

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Маје Трумић

Одлуком Наставно-научног већа бр. 5019/17-3 од 24.2.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Маје Трумић под насловом

Естимација крутости и адаптивно управљање код попустљивих робота

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидаткиња је тему докторске дисертације под називом „Естимација крутости и адаптивно управљање код попустљивих робота“ пријавила Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, 11.06.2020. године. За менторе су предложени др Коста Јовановић, доцент, и др Адриано Фађолини, доцент, у складу са билатералним програмом докторских студија између Електротехничког факултета, Универзитета у Београду и Универзитета у Палерму, у Италији.

Комисија за студије трећег степена разматрала је, на својој седници одржаној 16.06.2020. године, предлог теме за израду докторске дисертације и упутила предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидаткиње Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5019/17-1 од 20.7.2020) у саставу:

- др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Слободан Вукосавић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Вељко Поткоњак, редовни професор, Универзитет Метрополитан.

Кандидаткиња је полагала јавну усмену одбрану теме докторске дисертације 27.08.2020.

На седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета усвојен је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5019/17-2 од 09.09.2020).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 28.09.2020. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Естимација крутости и адаптивно управљање код попустљивих робота“ (Одлука бр. 61206-2981/2-20 од 28.09.2020. године).

Кандидаткиња је предала докторску дисертацију на преглед и оцену 25.01.2021. године. Комисија за студије трећег степена потврдила је на својој седници одржаној 02.02.2021. године испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Факултета је именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу (Одлука бр. 5019/17-3 од 24.02.2021. године):

- др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Слободан Вукосавић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- Cosimo Della Santina, Assistant Professor (доцент), Department of Cognitive Robotics, Delft University of Technology, Холандија,
- Alessandro De Luca, Full Professor (редовни професор), Department of Computer, Control and Management Engineering, The Sapienza University of Rome, Италија,
- Antonio Chella, Full Professor (редовни професор), Department of Engineering, University of Palermo, Италија,
- Filippo D'Ippolito, Assistant Professor (доцент), Department of Engineering, University of Palermo, Италија.

Кандидаткиња је започела докторске студије школске 2017/2018. године у зимском семестру.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада техничким наукама односно ужим научним областима роботика и управљање системима, за које су Електротехнички факултет Универзитета у Београду и Универзитет у Палерму матични. Ментор докторског рада са Електротехничког факултета Универзитета у Београду, др Коста Јовановић је изабран у звање доцента за ужу научну област аутоматика. Др Адриано Фађолини, ментор са Универзитета у Палерму је такође у звању доцента за ужу научну област аутоматика. Оба ментора су аутори великог броја научних радова у истакнутим међународним часописима.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Маја Трумић је рођена 18.09.1993. године у Бору, где је завршила основну школу и Гимназију. Електротехнички факултет у Београду уписује 2012. године на Одсеку за сигнале и системе. Дипломирала је 2016. године са просечном оценом 9.76 са темом дипломског рада „Пројектовање аутопилота за самонавођену летилицу ваздух-земља кратког домета“. Мастер студије уписује 2016. године на Електротехничком факултету у Београду на истом одсеку и

завршава годину дана касније са просечном оценом 10 и мастер радом под насловом „Анализа вибрационих сигнала са мотора мале снаге коришћењем вејвлет анализе“. Двојне докторске студије је уписала 2017/2018. школске године на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Управљање системима и обрада сигнала, и на Универзитету у Палерму, у оквиру програма Информационе и комуникационе технологије. Током докторских студија на Електротехничком факултету положила је десет испита са просечном оценом 10.00.

Маја Трумић је током основних студија стицала знања кроз стручне праксе у Војнотехничком институту у Београду 2016. године (у трајању од три месеца) и истраживачком центру компаније Бош у Ренингену, у Немачкој исте године (у трајању од четири месеца). Након успешно завршене стручне праксе, Маја Трумић је добила прилику да 2017. ради на мастер тези у оквиру постројења компаније Бош у Билу, у Немачкој. У оквиру билатералних докторских студија Маја Трумић је у периоду од три године провела осамнаест месеци на Универзитету у Палерму у тиму „МИРПАлаб“ као студент докторских студија. У току докторских студија похађала је курсеве из области адаптивног управљања и оптимизације у оквиру летње школе у Бертинору, Италији, у организацији италијанског Друштва доцената и истраживача из аутоматике (*Societe Italiana Docenti e Ricercatori in Automatica - SIDRA*), као и курсеве из области нелинеарног управљања системима и робусног и адаптивног управљања мултиваријабилним системима у оквиру програма *International Graduate School on Control* под организацијом *The European Embedded Control Institute (EECI)*.

До сада је учествовала у два национална пројекта:

- TP-35003: „Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика“, пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, 2011-2020. године и
- *ForNextCobot: „Mechanical Impedance Estimation and Planning for Next Generation Collaborative Robots“*, пројекат ПРОМИС Фонда за науку Републике Србије, у оквиру програма за извршне пројекте младих истраживача #6062528, 2020-2022. године

и једном међународном пројекту HORIZON 2020 *MINDtheGEPs-101006543: „Modifying Institution by Developing Gender Equality Plans“*, 2021-2025. године.

Област научног истраживања кандидаткиње обухвата моделирање и адаптивно управљање попустљивим роботским системима као и естимацију крутости код артикулисаних попустљивих робота. Досадашњи резултати кандидаткиње Маје Трумић су приказани кроз публиковане радове и то: 3 рада у међународним часописима, 1 рад штампан у зборницима међународних научних скупова и 3 радова штампаних у зборницима научних скупова од националног значаја.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација под насловом „Естимација крутости и адаптивно управљање код попустљивих робота“ написана је на 121 страни на енглеском језику, у складу са Споразумом о билатералним докторским студијама. На почетку дисертације дати су Апстракт и тезе на енглеском, српском и италијанском језику, Захвалница и Садржај. Следи Увод који се састоји од три поглавља: Мотивација, Доприноси тезе и Преглед тезе.

Остатак дисертације је организован у три дела: 1. Моделирање; 2. Естимација крутости; 3. Нелинеарно адаптивно управљање попустљивим роботима. Први део „Моделирање“ се састоји од три поглавља: 1. Увод; 2. Попустљиви артикулисани роботи; 3. Роботи попустљиве структуре. Други део „Естимација крутости“ чине четири поглавља: 4. Увод; 5. Основе; 6. Инвазивни приступ; 7. Неинвазивни приступ. Трећи део „Нелинеарно адаптивно

управљање попустљивим роботима“ садржи пет поглавља: 8. Увод; 9. Основе; 10. Попустљиви артикулисани роботи са пнеуматским погоном; 11. Попустљиви артикулисани роботи са електро-механичким погоном; 12. Роботи попустљиве структуре.

Након последњег дела тезе дат је Закључак, списак коришћене литературе са референцама наведених по абecedном редоследу презимена аутора и Биографија кандидата.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводни део тезе почиње кратким историјатом роботике и образложењем мотивације научника да покрену развој попустљиве роботике, а затим уводи основне појмове и начине на које се попустљивост у роботу може остварити. У поглављу под називом „Мотивација“ се истиче важност узимања у обзир крутости попустљивих робота како би се обезбедила сигурна средина за колаборативан рад човека и робота, као и боље перформансе попустљивих робота путем затварања повратне спреге и по позицији и по крутости зглобова робота. Следе поглавља „Доприноси тезе“, где су концизно приказани основни научни доприноси тезе, и „Преглед тезе“ са кратким приказом појединачних поглавља.

Основни део тезе је подељен у три дела: „Моделирање“, „Естимација крутости“ и „Нелинеарно адаптивно управљање попустљивим роботима“.

„Моделирање“ читаоца упознаје са механизмима различитих типова попустљивих робота и њиховим математичким описом. Прво поглавље даје преглед механизма попустљивих артикулисаних робота са посебним освртом на роботе погоњене антагонистичким актуаторима променљиве крутости, као и кратак приказ различитих робота попустљиве структуре. У другом поглављу је представљен математички опис попустљивих артикулисаних робота погоњених пнеуматским или електро-механичким актуаторима променљиве крутости. Треће поглавље уводи два динамичка модела робота попустљиве структуре, који су изведени уз претпоставку константне или афине закривљености робота. Коришћењем побољшане параметризације за проширену формулацију робота попустљиве структуре са константном кривином у тродимензионом простору избегава се појава сингуларитета и дисконтинуитета, што представља један од научних доприноса тезе.

„Естимација крутости“ садржи нове технике за процену крутости код артикулисаних попустљивих робота. Будући да крутост није мерљива величина не постоји сензор којим се она може одредити. Са друге стране, познавање вредности крутости робота је пресудно не само зарад гарантовања безбедне колаборације човека и робота већ и за дизајнирање закона управљања којим се затвара повратна спрега по позицији и крутости. Четврто поглавље представља основне концепте и савремене технике за процену крутости у зглобовима артикулисаних попустљивих робота. Потом, у петом поглављу је дата општа теорија закашњеног опсервера непознатих улаза и рекурзивног алгоритма најмањих квадрата, који представљају основу за естимацију крутости и флексибилног момента, као и за одређивање њихових аналитичких израза. У шестом поглављу се примењује инвазивни приступ како би се одредила крутост у пнеуматски и електро-механички погоњеним зглобовима робота. Прво се помоћу опсервера непознатих улаза естимира флексибилни момент који делује на зглоб робота, а који се сматра непознатим улазом у линеарни систем. Затим се помоћу рекурзивног алгоритма најмање квадрата добијају коефицијенти апроксимација крутости и флексибилног момента. Приказани су резултати добијени у симулационом и експерименталном окружењу. Седмо поглавље представља неинвазивни приступ естимацији крутости који не захтева информацију о командованом моменту на моторима актуатора, већ само о позицијама и брзинама сегмента и мотора актуатора. У овом случају се закашњени опсервер непознатих улаза и рекурзивни алгоритам најмањих квадрата користе за директну реконструкцију првог извода флексибилног момента по времену, који по дефиницији садржи информацију о крутости зглоба.

Трећи део тезе је посвећен нелинеарном адаптивном управљању попустљивим роботима. Како управљање попустљивим роботима представља значајан изазов услед присуства флексибилних и нелинеарних елемената, као и због еластичне везе између мотора и сегмената артикулисаних попустљивих робота, представљено је решење које омогућује декупловано регулисање позиције и крутости артикулисаних попустљивих робота и робусност у односу на параметре динамичког модела попустљивих робота. Поглавље осам даје преглед претходно постигнутих резултата у области управљања попустљивим роботима, док девето поглавље представља принципе нелинеарног адаптивног управљања које се користи у наставку. У десетом поглављу изведено је декупловано нелинеарно адаптивно управљање које омогућује истовремено и независно регулисање позиције и крутости у затвореној спрези код артикулисаних пнеуматских попустљивих робота. Резултати су верификовани у симулацијама и експериментима и упоређени са приступом линеаризације помоћу повратне спреге. Једанаесто поглавље представља каскадно декупловано адаптивно управљање за попустљиве роботе са електро-механичким погоном, које узима у обзир и динамику актуатора. Тако се у унутрашњој петљи омогућује асимптотско праћење жељених позиција мотора, док се у спољној петљи регулише праћење жељених трајекторија позиције и крутости у зглобовима робота. Резултати су валидирани у симулацијама. У дванаестом поглављу пажња је посвећена управљању роботима попустљиве структуре. Показана је формулација адаптивног управљања и описани потребни и довољни услови за конвергенцију. Перформансе су тестиране у симулационом окружењу на роботу попустљиве структуре са константном закривљеношћу који се креће у равни и у простору, а робусност је валидирана на планарном роботу са афином закривљеношћу.

На крају, сумирани су остварени научни доприноси и резултати, након чега су предложени даљи правци истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Последњих деценија истраживања у области роботике су усмерена ка развоју робота сличним човеку и у механичком и у когнитивном смислу, како би такав робот на сигуран начин блиско сарађивао са човеком. Бројна истраживања показала су да сарадња робота и човека може имати позитиван социјални и економски утицај и истовремено сачувати здравље људи приликом обављања тешких послова. На крају, задовољила би се тежња човека да направи нешто што може достићи или чак превазићи људске способности. То је условило развој попустљивих робота, чија се експанзија тек предвиђа у блиској будућности.

Савременост ове докторске дисертације почива на моделирању робота попустљиве структуре, естимацији крутости и пројектовању управљања за попустљиве роботе. Правац истраживања тезе прати најновије резултате у овој области. Прецизније, недавни закључак да се динамика робота попустљиве структуре може повезати са динамиком проширеног ригидног робота испуњавањем одређених кинематичких и динамичких ограничења [3.1:1] отворио је могућност за примену класичних техника управљања теоретски бесконачно димензионим роботом попустљиве структуре. Усвајањем адаптивног управљања, као што је изложено у тези, избегава се потреба за екстензивном идентификацијом динамичких параметара робота попустљиве структуре, што је случај приликом примене закона управљања заснованих на добром познавању модела.

Према другом савременом резултату, присуство *feedforward* дела у закону управљања важно је зарад спречавања повећања крутости услед пропорционалног дејства контролера и самим тим губитка основног својства робота – попустљивости – као што је скоро истакнуто у раду [3.1:2]. Имајући то у виду, у тези се примењује адаптивно управљање које својом

формулацијом обухвата не само контролер пропорционално-диференцијалног дејства, већ и члан којим је презентован модел у виду производа регресорске матрице и параметара који се уче у реалном времену. На тај начин, под условом да параметри конвергирају ка тачној вредности, адаптивно управљање оставља могућност остваривања *feedforward* дејства. У прилог савремености тезе говори и коришћење робота са *qbmove* актуаторима за експерименталну валидацију резултата.

Оригиналност ове докторске дисертације се огледа у развоју декуплованих закона управљања базираних на адаптивној техници којима се постиже симултано и независно управљање позицијом и крутошћу код попустљивих робота са антагонистичким погоном. Тиме се остварује жељена динамика не само позиције робота већ и његове крутости што доприноси поспешивању безбедности робота у човековом окружењу. Такође, иновативност лежи и у дизајнирању процедуре за естимацију крутости, којом се уз минимално кашњење истовремено обезбеђује вредност крутости у реалном времену као и аналитички израз за крутост и флексибилни момент код артикулисаних попустљивих робота.

[3.1:1] C. Della Santina, R. K. Katzschmann, A. Bicchi, and D. Rus (2020), "Model-based dynamic feedback control of a planar soft robot: Trajectory tracking and interaction with the environment," SAGE The International Journal of Robotics Research, vol. 39, no. 4, pp. 490–513.

[3.1:2] C. Della Santina, M. Bianchi, G. Grioli, et al. (2017), "Controlling soft robots: Balancing feedback and feedforward elements". IEEE Robotics & Automation Magazine vol. 24, no.3, pp. 75–83.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У овој докторској дисертацији, анализирана литература је обимна и релевантна. Наведено је укупно 108 библиографских референци. Литература садржи радове релевантне за области истраживања у тези. Приказане референце дају комплетну анализу тренутних достигнућа у представљеним областима. Списак литературе укључује и релевантне радове које је кандидаткиња публиковала као аутор или коаутор.

У дисертацији се користи модел артикулисаних попустљивих робота изведен у [3.2:1], док се модел робота попустљиве структуре изводи на основу радова [3.2:2-3]. Приликом извођења процедуре за естимацију крутости користе се методе представљене у раду [3.2:4] и књизи [3.2:5], које омогућују тачну процену крутости без потребе за коришћењем сензора силе и момента, естимације брзине или хеуристичког подешавања параметара филтра у поређењу са референтном литературом [3.2:6-8].

Резултати радова [3.2:9-11] били су извор инспирације за развој декуплованог управљања пнеуматским роботима. У складу са референцом [3.2:12], у тези је представљен адаптивни компензатор који почива на [3.2:13], односно техника које се не ослања само на повратну спрегу већ и на динамичко учење параметара, и динамички декуплер заснован на идеји о коришћењу нултог простора актуаторске матрице [3.2:14]. Слична идеја примењена је и на управљање електро-механичким роботима са антагонистичком актуацијом, где је за разлику од референтне литературе [3.2:15] укључена у разматрање и динамика актуатора и изведен доказ о стабилности по угледу на [3.2:16]. У последњем поглављу тезе презентовано је управљање роботима попустљиве структуре, које почива на оригиналној замисли изложеној у [3.2:17] о динамичком управљању позицијом ових робота у затвореној спрези.

[3.2:1] A. De Luca and W. Book (2016) Robots with flexible element. In: Siciliano B and Khatib O (eds.) *Springer handbook of robotics*, chapter 11. Springer, pp. 243–282.

[3.2:2] R. K. Katzschmann, C. Della Santina, Y. Tashimatsu, A. Bicchi, and D. Rus (2019), "Dynamic motion control of multi-segment soft robots using piecewise constant curvature matched with an augmented rigid body model," in 2nd International Conference on Soft Robotics IEEE, pp. 454–461.

[3.2:3] C. Della Santina, A. Bicchi, and D. Rus (2020), "On an improved state parametrization for soft robots with piecewise constant curvature and its use in model based control," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 1001–1008.

- [3.2:4] S. Sundaram and C. N. Hadjicostis (2008), "Partial state observers for linear systems with unknown inputs," *Automatica*, vol. 44, no. 12, pp. 3126–3132.
- [3.2:5] L. Ljung (1999), *System Identification: Theory for the User*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, pp. 1–14.
- [3.2:6] G. Grioli and A. Bicchi (2010), "A non-invasive, real-time method for measuring variable stiffness," in *Proceedings of Robotics and Systems Society*, Zaragoza, Spain, pp. 89–96.
- [3.2:7] F. Flacco, A. De Luca, I. Sardellitti, and N. G. Tsagarakis (2012), "On-line estimation of variable stiffness in flexible robot joints," *International Journal of Robotics Research*, vol. 31, no. 13, pp. 1556–1577.
- [3.2:8] T. Ménard, G. Grioli, and A. Bicchi (2014), "A stiffness estimator for agonistic–antagonistic variable-stiffness-actuator devices," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 5, pp. 1269–1278.
- [3.2:9] G. Tonietti and A. Bicchi (2002) Adaptive simultaneous position and stiffness control for a soft robot arm. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2, pp. 1992–1997.
- [3.2:10] G. Palli, C. Melchiorri, T. Wimbock, M. Grebenstein and G. Hirzinger (2007) Feedback linearization and simultaneous stiffness position control of robots with antagonistic actuated joints. In: 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, pp. 4367–4372.
- [3.2:11] G. Palli, C. Melchiorri and A. De Luca (2008) On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008). IEEE, pp. 1753–1759.
- [3.2 :12] C. Della Santina, M. Bianchi, G. Grioli, et al. (2017), "Controlling soft robots: Balancing feedback and feedforward elements". IEEE Robotics & Automation Magazine vol. 24, no.3, pp. 75–83.
- [3.2:13] JJE Slotine and W Li (1991) Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [3.2:14] O. Khatib (1987) A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3(1): 43–53.
- [3.2:15] R. Mengacci, F. Angelini, M. Catalano, G. Grioli, A. Bicchi and M. Garabini (2020) On the motion/stiffness decoupling property of articulated soft robots with application to model-free torque iterative learning control. *The International Journal of Robotics Research*.
- [3.2:16] Ortega R, Perez JAL, Nicklasson PJ and Sira-Ramirez HJ (2013) Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: mechanical, electrical and electromechanical applications. *Springer Science & Business Media*.
- [3.2:17] C. Della Santina, R. K. Katzschmann, A. Bicchi, and D. Rus (2020), "Model-based dynamic feedback control of a planar soft robot: Trajectory tracking and interaction with the environment," SAGE *The International Journal of Robotics Research*, vol. 39, no. 4, pp. 490–513.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање у оквиру ове докторске дисертације је засновано на следећим методама:

- Модел артикулисаног попустљивог робота са антагонистичким актуаторима променљиве крутости: У тези је усвојен модел артикулисаних попустљивих робота који је истовремено погодан за анализу система и извођење закона управљања узевши у обзир одређене апроксимације. Прво, математичка релација између флексибилног момента и трансмисионе дефлексије мора бити глатка и инвертибилна. Затим, усваја се да је актуатор i -тог сегмента смештен на $i-1$ -ом сегменту. Што се тиче робота са електро-механичким погоном, претпоставља се да је инерциона матрица ротора дијагонална, тако да положај ротора не утиче на матрицу инерције робота, вектор гравитације, као и на угаону брзину центра масе ротора. Будући да је могуће променити крутост ових робота, њима прети опасност од пада услед гравитација у случајевима када је крутост премала. Због тога се претпоставља да је најмања крутост већа од горње границе градијента гравитационих сила.
- Закашњени опсервери непознатих улаза: Ова врста опсервера је користан алат који се углавном користи за детектовање дефеката у систему путем прецизне процене

стања система, независно од непознатих улаза. У тези је, пак, стављен акценат на процену самих непознатих улаза који су у овом случају нелинеарна, временски-променљива функција стања система. У обимној литератури опсервера непознатих улаза издвојили су се закашњени опсервери непознатих улаза као најбоље решење из разлога што пружају више информација о систему. Наиме, захваљујући употреби неколико узастопних вредности излаза система, они су у стању да процене и стања и непознате улазе у систем са константним и унапред одређеним кашњењем, а уз то су услови за постојање опсервера лакше оствариви у односу на друга решења. Њиховим коришћењем се постиже могућност асимптотске реконструкције непознатог флексибилног момента без коришћења сензора силе и са мањим бројем променљивих стања, у односу на сличне опсервере.

- Рекурзивни алгоритам најмањих квадрата: Помоћу рекурзивног алгоритма најмањих квадрата врши се идентификација параметара аналитичке апроксимације крутости и флексибилног момента минимизацијом разлике флексибилног момента и његове апроксимације. Улазни подаци у алгоритам су одговарајуће променљиве стања, које утичу на флексибилни момент, као и резултат естимације флексибилног момента (односно његовог првог извода у зависности од приступа одређивању крутости) помоћу опсервера непознатих улаза. Основне предности јесу редукција шума у сигналу флексибилног момента, могућност добијања аналитичких израза за крутост и момент и нумеричка ефикасност која омогућује примену у реалном времену.
- Нелинеарно адаптивно управљање: Адаптивно управљање је техника која је робусна на несигурности модела, настале услед непрецизног познавања параметара динамичког система. Коришћењем овог закона управљања обезбеђује се асимптотско праћење жељених трајекторија зглобова помоћу динамичког адаптирања параметара. Услов за примену адаптивног управљања је линеарност динамичког модела у односу на одговарајуће параметре, односно способност да се модел изрази како производ регресорске матрице и константног вектора параметара. Основна формулација такође захтева услов да је систем потпуно актуисан. У тези је ова техника проширена тако да омогући симултано и независно управљање позицијом и крутошћу.

3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати из области моделирања робота попустљиве структуре важе за генерички робот ове врсте, док проширена формулација олакшава примену класичних закона управљања на роботске системе попустљиве структуре.

Естиматори крутости представљени у тези су применљиви на класу артикулисаних попустљивих робота са антагонистичким пнеуматским или електро-механичким погоном. Захваљујући децентрализованој структури, могу се применити на роботе са више степени слободе, док чињеница да се опсервабилност не губи када је робот у стационарном стању гарантује добре перформансе у свим режимима рада роботског система.

У случају пнеуматских робота, техника декуплованог адаптивног управљања је применљива не само на роботе погоњене антагонистичким Мек-Кибиновим мишићима, већ важи за све пнеуматске роботе са антагонистичким погоном који имају линеарну релацију између командованих притисака и остварених момената и крутости у зглобовима. На пример, роботски систем представљен у [3.4:1] поседује антагонистички погон остварен коморама направљеним од специјалне тканине. Будући да је релација између командованих притисака и остварених момената и крутости линеарна, следи да се може применити овај закон управљања. Такође, узевши у обзир да нису неопходни виши изводи позиције и

крутости метод одликује и практична применљивост, показана у експерименталним резултатима.

Потом, закон управљања изведен за електро-механичке роботе је применљив на артикулисане попустљиве роботе са антагонистичким погоном, код којих је аналитичка форма флексибилног момента у виду експоненцијалне функције, што и јесте најчешће случај за ову групу попустљивих роботских система [3.4:2-3]. На крају, адаптивно управљање роботима попустљиве структуре је пројектовано под претпоставком да робот има константне закривљености по деловима, али су симулациони резултати показали робусност чак и када је у питању афина закривљеност робота.

[3.4:1] C. Best, M. Gillespie, P. Hyatt, L. Rupert, V. Sherrod and M. Killpack (2016) A new soft robot control method: Using model predictive control for a pneumatically actuated humanoid. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 23(3): 75–84.

[3.4:2] qbmove Centro Piaggio (2011) QbMove Maker Pro datasheet. <https://www.qbrobotics.com>. Accessed: 2019-09-01.

[3.4:3] R. Mengacci, M. Garabini, G. Grioli, M. Catalano, & A. Bicchi (2021). Overcoming the Torque/Stiffness Range Tradeoff in Antagonistic Variable Stiffness Actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња Маја Трумић је израдом ове докторске дисертације и публикацијом седам научних радова у потпуности демонстрирала способности за самосталан научно-истраживачки рад. Кандидаткиња је систематично извршила преглед релевантне литературе, успешно идентификовала недостатке досадашњих студија и предложила решења којима се превазилазе ограничења постојећих приступа. Тема дисертације је веома актуелна, при чему резултати дисертације поспешују интеграцију попустљивих робота у човеково и индустријско окружење и омогућују ефективно искоришћење потенцијала попустљивих робота. Методе истраживања и приступи у реализацији су иновативни и креативни. Остварени доприноси су оригинални и потврђују способности кандидаткиње за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси ове докторске дисертације су следећи:

- 1) Модел генеричког тродимензионог робота попустљиве структуре заснован на хипотези константе закривљености по деловима, који обезбеђује кинематичку и динамичку еквиваленцију са оригиналним системом, а који нема сингуларитете и дисконтинуитете;
- 2) Инвазивни естиматор крутости у зглобовима артикулисаних попустљивих пнеуматских и електро-механичких робота заснован на теорији опсервера непознатих улаза, који не захтева априори знање о моделу крутости нити информацију о брзини мотора или сегмента;
- 3) Неинвазивни естиматор крутости у зглобовима артикулисаних попустљивих електро-механичких робота заснован на теорији опсервера непознатих улаза, који не губи опсервабилност када је робот у стационарном стању и не захтева информацију са сензора силе или момента;
- 4) Експериментална валидација инвазивног и неинвазивног естиматора крутости на артикулисаном попустљивом роботу са електро-механичком актуацијом;

- 5) Робусни систем управљања у затвореној петљи позицијом и крутошћу артикулисаних робота са пнеуматским актуаторима променљиве крутости, који је заснован на теорији адаптивног управљања. Декупловање управљања позицијом и крутошћу је остварено коришћењем додатног степена слободе управљања, који је добијен помоћу нултог простора актуаторске матрице;
- 6) Симулациона и експериментална валидација предложеног система управљања којом су показане перформансе и поређење са методама заснованим на управљању крутошћу у отвореној петљи и управљању путем линеаризације система помоћу повратне спреге;
- 7) Робусни каскадни системи управљања у затвореној петљи позицијом и крутошћу артикулисаних робота са електро-механичким актуаторима променљиве крутости, који узимају у обзир и динамику актуатора, а засновани су на теорији пропорционално-диференцијалног контролера са *feedforward* чланом и нелинеарног адаптивног управљања. Декупловање је остварено конструисањем одговарајуће матрице којом се остварује мапирање флексибилних момената мотора у жељену динамику позиције и крутости робота;
- 8) Симулациона валидација предложених система управљања и њихова компарација са случајем када је укључено и интегрално дејство.
- 9) Робусни систем управљања позицијом робота попустљиве структуре у затвореној петљи, који се заснива на теорији нелинеарног адаптивног управљања;
- 10) Опсежне валидације у симулационом окружењу које обухватају тродимензионе и роботе попустљиве структуре са афином закривљеношћу, доказујући ефикасност и робусност развијених контролера.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Научни доприноси наведени у тачки 4.1 представљају следећа унапређења научних знања у поређењу са постојећим стањем:

- 1) Моделирање робота попустљиве структуре се ослања на хипотезу о константој закривљености робота по деловима. У поређењу са радовима [4.2:1-2], у тези се описује побољшана параметризација која превазилази проблеме сингуларитета и дисконтинуитета у неизбежним праволинијским конфигурацијама робота. Овај динамички опис се надовезује на [4.2:3] пружајући везу између описа робота попустљиве структуре и класичног ригидног робота у виду проширене формулације. Ова веза је кључна за примену адаптивног управљања (у дванаестом поглављу) и представља научни допринос који се не појављује ни у једној претходној публикацији.
- 2) У поређењу са постојећим инвазивним естиматорима крутости [4.2:4-5], предложено решење у тези користи теорију закашњених опсервера непознатих улаза како би се симултано дошло до информација о брзини мотора и флексибилном моменту. На тај начин, за разлику од [4.2:4], метод не захтева информацију о брзини мотора актуатора, те није неопходно подешавати параметре Калмановог филтра или користити сензоре брзине како би се добила та информација. У поређењу са [4.2:5], за описани естиматор у тези не постоји доказ о конвергенцији крутости ка тачној вредности, али са друге стране се истовремено естимирају крутост и флексибилан момент, што може бити од користи за пројектовање управљачких система заснованих на моделу. На крају, приступ из [4.2:5] захтева подешавање дужине интервала за интеграцију у зависности од брзине улазног сигнала, док је предложени естиматор потпуно независан од природе сигнала. Додатно, естиматор је, слично [4.2:4], децентрализоване структуре те се метода може применити за естимацију крутости у артикулисаним роботима са више степени слободе, за разлику од [4.2:5].

- 3) Основна предност предложеног неинвазивног естиматора крутости у односу на постојећа решења [4.2:6-7] почива на томе да није неопходан сензор силе или момента како би се проценила крутост, већ само информација о позицији и брзинама мотора актуатора и сегмента. У поређењу са [4.2:6], естиматор не губи опсервабилност када је у робот у стационарном стању. Са друге стране, у односу на [4.2:7], где није потребан податак о вишим изводима позиције, предложени естиматор захтева информацију о брзинама мотора актуатора. На крају, за разлику од инвазивних естиматора крутости, није неопходна информација о командованом моменту моторима актуатора.
- 4) Будући да се сви естиматори заснивају на претпоставци о перзистентној екситацији система, најизазовнији случај јесте када робот мења своју крутост док се не креће, односно када је позиција константна. За разлику од претходних публикација на тему естиматора крутости, у тези су приказани експериментални резултати када се робот налази у три мода рада: 1) када се позиција и крутост зглобова мењају симултано, 2) када се само позиција мења и 3) када се само крутост мења.
- 5) Декупловано нелинеарно адаптивно управљање пнеуматским роботима је проширење методе из [4.2:8] у смислу да се крутошћу робота управља у затвореној спрези, што доприноси безбедности робота. Предложено решење користи управљачки степен слободе, повезан са нултим простором актуаторске матрице, како би се декупловало управљање позицијом и крутошћу у затвореној спрези. Док идеја о коришћењу пројекције нултог простора није новина у роботизици (већ се користи за постизање одговарајуће силе и момента коришћењем нултог простора Јакобијана), овај приступ омогућава декупловање без потребе за вишим изводима позиције и крутости, за разлику од [4.2:9] чак и када модел система није савршено познат. Основни недостатак методе лежи у претпоставци да је модел актуатора потпуно познат.
- 6) Експериментална валидација декуплованог нелинеарног адаптивног управљања на пнеуматском артикулисаном попустљивом роботу са два степена слободе представља јединствене резултате добијене затварањем спреге по позицији и крутости попустљивог робота. Услед несавршености хардвера, у тези су приказани спорији експерименти, пошто би у супротном дошло до проклизавања и мерних грешака.
- 7) Декупловано нелинеарно адаптивно управљање електро-механичким попустљивим роботима прати линију истраживања [4.2:8], у смислу да се спрега затвара по позицији и крутости зглобова. Међутим, предложени приступ у тези се разликује на више начина од до сада доступних резултата. Прво, коришћењем робусног управљања заснованог на адаптивној техници, управљачки систем је робустан на несигурности у динамичком моделу робота. Затим, својство декуплованог управљања позицијом и крутошћу се постиже употребом експлицитног односа између флексибилних момената и остварене крутости у зглобу робота, чиме се избегава потреба за вишим изводима позиције и крутости. Штавише, за разлику од [4.2:10], приказани приступ узима у обзир и динамику актуатора. Основни недостатак је потреба за прецизним познавањем модела актуатора.
- 8) Валидација декуплованог адаптивног управљања електро-механичким роботима у симулационом окружењу показала је перформансе са и без укључивања интегралног дејства у управљачки подсистем крутости и дала поређење са управљачким системом заснованим на добром познавању динамичког модела робота.
- 9) Перформансе управљачких система који се користе у претходно наведеним радовима [4.2:1-3] зависе од тачног познавања динамичких параметара робота попустљиве структуре, што често није доступно. У тези је дата формулација робусног управљања заснованом на адаптивној теорији, као и потребни и довољни услови за конвергенцију.
- 10) Тестирање предложеног закона управљања у симулационом окружењу показало је ефикасност и робусност у односу на несигурност динамичких параметара, као и на сам модел робота.

- [4.2:1] C. Della Santina, R. K. Katzschmann, A. Bicchi, and D. Rus, "Model-based dynamic feedback control of a planar soft robot: Trajectory tracking and interaction with the environment," *SAGE The International Journal of Robotics Research*, vol. 39, no. 4, pp. 490–513, 2020.
- [4.2:2] R. K. Katzschmann, C. Della Santina, Y. Toshimitsu, A. Bicchi, and D. Rus, "Dynamic motion control of multi-segment soft robots using piecewise constant curvature matched with an augmented rigid body model," in *2nd International Conference on Soft Robotics IEEE*, 2019, pp. 454–461.
- [4.2:3] C. Della Santina, A. Bicchi, and D. Rus, "On an improved state parametrization for soft robots with piecewise constant curvature and its use in model based control", *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 1001–1008, 2020
- [4.2:4] F. Flacco, A. De Luca, I. Sardellitti, and N. G. Tsagarakis, "On-line estimation of variable stiffness in flexible robot joints," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 31, no. 13, pp. 1556–1577, Nov. 2012.
- [4.2:5] T. Ménard, G. Grioli, and A. Bicchi, "A stiffness estimator for agonistic– antagonistic variable-stiffness-actuator devices," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 30, no. 5, pp. 1269–1278, Oct. 2014.
- [4.2:6] G. Grioli and A. Bicchi, "A non-invasive, real-time method for measuring variable stiffness," *Robotics Science and Systems VI*, 2010.
- [4.2:7] G. Grioli and A. Bicchi, "A real-time parametric stiffness observer for vsa devices," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE*, 2011, pp. 5535–5540.
- [4.2:8] G. Tonietti and A. Bicchi (2002) "Adaptive simultaneous position and stiffness control for a soft robot arm". *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2*, pp. 1992–1997.
- [4.2:9] G. Palli, C. Melchiorri and A. De Luca (2008) On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008 (ICRA 2008)*. IEEE, pp. 1753–1759.
- [4.2:10] R. Mengacci, F. Angelini, M. Catalano, G. Grioli, A. Bicchi and M. Garabini (2020) "On the motion/stiffness decoupling property of articulated soft robots with application to model-free torque iterative learning control. *The International Journal of Robotics Research*: 0278364920943275.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси докторске дисертације су верификовани следећим:

Категорија M21:

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, In press, impakt faktor: 4.7, DOI: 10.1177/0278364920903787, ISSN: 0278-3649. (научни доприноси (5) и (6))

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, pp. 1843-1850, 2020, impakt faktor: 3.6, DOI: 10.1109/LRA.2020.2969952, ISSN: 2377-3766. (научни доприноси (2) и (4))

Категорија M24:

Maja Trumić, Cosimo Della Santina, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini „Adaptive Control of Soft Robots Based on an Enhanced 3D Augmented Rigid Robot Matching“, *IEEE Control System Letters*, 2021, Vol. 5, No. 6, DOI: [10.1109/LCSYS.2020.3047737](https://doi.org/10.1109/LCSYS.2020.3047737), ISSN: 2475-1456. (научни доприноси (1) и (10))

Категорија M33:

Maja Trumić, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini Comparison of model-based simultaneous position and stiffness control techniques for pneumatic soft robots, In: *International Conference on*

Robotics in Alpe-Adria Danube Region, Springer, pp.218-226, 2020, DOI:10.1007/978-3-030-48989-2. (научни допринос (5))

Категорија M63:

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. (научни доприноси (5) и (7))

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.

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.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација кандидаткиње Маје Трумић испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације. Наведени научни доприноси се односе на поспешивање интеграције попустљивих робота у човеково и индустријско окружење и побољшању перформанси ових робота путем управљања позицијом и крутошћу у затвореној спрези. Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације се огледају у моделирању робота попустљиве структуре, развоју естиматора крутости у зглобовима артикулисаних попустљивих робота и дизајнирању адаптивних управљачких система код попустљивих робота. Већина наведених резултата је верификована у публикацијама кандидаткиње, а неки од њих су и експериментално демонстрирани на пнеуматском попустљивом роботу *GioSte* и на роботу састављеном од *qbtmove* електро-механичких актуатора променљиве крутости. Узимајући у обзир све наведено, Комисија сматра да докторска дисертација Маје Трумић садржи оригиналне научне доприносе у области естимације крутости и адаптивног управљања код попустљивих робота. Стога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Естимација крутости и адаптивно управљање код попустљивих робота“ прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 02.04.2021.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



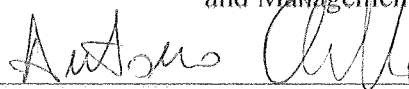
Др Слободан Вукосавић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



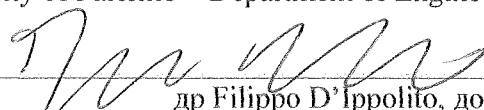
др Cosimo Della Santina, доцент
Delft University of Technology – Department of Cognitive Robotics



др Alessandro De Luca, редовни професор
The Sapienza University of Rome – Department of Computer, Control
and Management Engineering



др Antonio Chella, редовни професор
University of Palermo – Department of Engineering



др Filippo D'Ippolito, доцент
University of Palermo – Department of Engineering

TO THE ACADEMIC COUNCIL

Subject: Report on the completed doctoral dissertation of candidate Maja Trumić

By the Decision of the Academic Council of the School of Electrical Engineering, Reg. No. 5019/17-3, from February, 24th, 2021, we were appointed as members of the Commission for examination, evaluation, and defence of Maja Trumić's doctoral dissertation titled

Stiffness Estimation and Adaptive Control for Soft Robots

After examination of the submitted thesis and accompanying material and interview with the candidate, the Commission made the following

R E P O R T

1. INTRODUCTION

1.1. Chronology of the dissertation approval and preparation

The candidate submitted the title of the doctoral thesis „Stiffness Estimation and Adaptive Control for Soft Robots“ to the Commission for the third-level studies at the School of Electrical Engineering, University of Belgrade on June, 11th, 2020 and proposed Ph.D. Kosta Jovanović, Assistant Professor, and Ph.D. Adriano Fagiolini, Assistant Professor, as dissertation supervisors in accordance with the bilateral program of doctoral studies between the School of Electrical Engineering, University of Belgrade and the University of Palermo, Italy.

The Commission for the third-level studies considered the proposal of the title for the doctoral dissertation on its session held on June, 16th 2020 and forwarded the proposal of the Commission on the evaluation of the topic suitability and the candidate to the Academic Council.

The Academic Council of the School of Electrical Engineering appointed the Commission for conditions evaluation and acceptance of the doctoral dissertation topic (the Decision No. 5019/17-1 from July, 20th 2020) composed of:

- Ph.D. Željko Đurović, Full Professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,
- Ph.D. Slobodan Vukosavić, Full Professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering, and
- Ph.D. Veljko Potkonjak, Full Professor, University Metropolitan.

The candidate had a public oral defense of the topic of the doctoral dissertation on August, 27th 2020.

The Academic Council of the School of Electrical Engineering adopted the Report on the conditions evaluation and acceptance of the doctoral dissertation topic of the Commission on the session held on (the Decision No. 5019/17-2 from September, 9th 2020).

The Council of scientific fields of technical sciences of the University of Belgrade, on the session from September, 28th 2020, assented to the proposal of the doctoral dissertation topic entitled "Stiffness Estimation and Adaptive Control for Soft Robots" (Decision No. 61206-2981/2-20).

The candidate submitted the doctoral dissertation for examination and evaluation on January, 25th 2021. The Commission for the third-level studies confirmed the fulfillment of all necessary conditions for submitting the proposal to the Academic Council of the School of Electrical Engineering for forming the Commission for examination and evaluation of the doctoral dissertation on the session held on February, 2nd 2021.

The Academic Council of the School of Electrical Engineering appointed the Commission for examination and evaluation of the doctoral dissertation (Decision No's 5019/17-3 from February 24th, 2021), composed of:

- Ph.D. Željko Đurović, Full Professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,
- Ph.D. Slobodan Vukosavić, Full Professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,
- Ph.D. Cosimo Della Santina, Assistant Professor, Department of Cognitive Robotics, Delft University of Technology, Netherlands,
- Ph.D. Alessandro De Luca, Full Professor, Department of Computer, Control and Management Engineering, The Sapienza University of Rome, Italy,
- Ph.D. Antonio Chella, Full Professor, Department of Engineering, University of Palermo, Italy,
- Ph.D. Filippo D'Ippolito, Assistant Professor, Department of Engineering, University of Palermo, Italy.

The candidate started the doctoral study program in the winter semester of the academic year 2017/2018.

1.2. The doctoral dissertation scientific area

The School of Electrical Engineering of the University of Belgrade and the University of Palermo are specialized for the doctoral dissertation, which belongs to the technical sciences, more precisely, to the research areas of robotics and system control. The doctoral thesis supervisor from the School of Electrical Engineering of the University of Belgrade, Ph.D. Kosta Jovanović is an assistant professor in the scientific area of Automation. The thesis supervisor from the University of Palermo, Ph.D. Adriano Fagiolini is as well an assistant professor in the scientific area of Automation. Both supervisors are the authors of a large number of scientific papers in international journals.

1.3. Biography of the candidate

Maja Trumić was born on September 18th, 1993. in Bor, where she finished elementary and high school. She enrolled at the School of Electrical Engineering in Belgrade in 2012 at the Department of Signals and Systems and graduated in 2016 with an average grade of 9.76, defending the bachelor thesis titled "Design of an autopilot for a self-guided short-range air-to-ground missile". The same year she started master studies at the School of Electrical Engineering in Belgrade at the same department and finished a year later with an average grade of 10 and a master thesis titled "Analysis of vibration signals from low power motors using wavelet analysis". In the

2017/2018 academic year, she enrolled in bilateral doctoral studies at the School of Electrical Engineering in Belgrade, in the module System Control and Signal Processing, and at the University of Palermo, within the program Information and Communication Technologies. During her doctoral studies at the School of Electrical Engineering, she passed ten exams with an average grade of 10.00.

In her undergraduate studies, Maja Trumić acquired knowledge through internships at the Military Technical Institute in Belgrade in 2016 (three months) and the Bosch research center in Renningen, Germany, in the same year (four months). After successfully completing her internship, Maja Trumić was given the opportunity to work on a master thesis in 2017 within the Bosch plant in Buhl, Germany.

As part of bilateral doctoral studies, Maja Trumić spent eighteen months at the University of Palermo in the "MIRPALab" team as a doctoral student. During her doctoral studies, she attended courses in the area of adaptive control and optimization within the summer school in Bertinoro, Italy, organized by the Italian Society of Assistant Professors and Researchers in Automation (Società Italiana Docenti e Ricercatori in Automatica - SIDRA), as well as courses in nonlinear systems and control and robust and adaptive control of multivariable systems within the International Graduate School on Control, organized by The European Embedded Control Institute (EECI).

She has taken part in two national projects:

- TR-35003: „Ambient Intelligent Service Robots of Anthropomorphic Characteristics“, a project of the Ministry of education, science and technological development, Republic of Serbia, 2011-2020. and
- ForNextCobot: „Mechanical Impedance Estimation and Planning for Next Generation Collaborative Robots“, a project of PROMIS, Science Fund of the Republic of Serbia, as part of the Program for excellent projects of young researchers #6062528, 2020-2022.

and one international project HORIZON 2020 *MINDtheGEPs*-101006543: „Modifying Institution by Developing Gender Equality Plans“, 2021-2025.

The research area of the candidate includes modeling and adaptive control of soft robots as well as estimation of stiffness in soft articulated robots. The research results of Maja Trumić have been presented through the published papers: three papers in international journals, one paper published in proceedings of international conferences, and three papers published in proceedings of national conferences.

2. DESCRIPTION OF DISSERTATION

2.1. Dissertation content

The dissertation titled “Stiffness Estimation and Adaptive Control for Soft Robots” has 143 pages and it is written in the English language according to the bilateral doctoral agreement with the University of Palermo. At the beginning of the dissertation, Abstracts of the thesis in English, Serbian, and Italian are given, followed by Acknowledgments and Contents. Afterward, there is an Introduction which has three chapters: Motivation, Thesis contributions, and Thesis overview.

The rest of the thesis is organized into three parts: 1. Modeling, 2. Stiffness Estimation, and 3. Nonlinear adaptive control of soft robots. The first part “Modeling” consists of three chapters: 1. Introduction, 2. Soft articulated robots, and 3. Soft-bodied robots. The second part “Stiffness Estimation” contains four chapters: 4. Introduction, 5. Background, 6. Invasive approach, and 7. Non-invasive approach. The third part “Nonlinear adaptive control of soft robots” has five chapters: 8. Introduction, 9. Background, 10. Soft articulated robots with pneumatic drive, 11. Soft articulated robots with electro-mechanical drive, and 12. Soft-bodied robots.

After the last part of the thesis, the Conclusion, a Bibliography with references listed in alphabetical order of the author's surname, and the candidate Biography are given.

2.2. A brief overview of thesis chapters

The introductory part of the thesis begins with a brief history of robotics and an explanation of the scientists' motivation to initiate the development of soft robotics. It then introduces the basic concepts and ways in which compliance can be achieved. The chapter titled "Motivation" highlights the importance of taking into account the stiffness of soft robots in order to provide a safe environment for human-robot collaboration, as well as to achieve better performance of soft robots by closing the feedback on both the position and stiffness. The following chapters are "Thesis contributions" where the scientific contributions of the thesis are presented, and "Thesis overview" with a brief review of individual chapters.

The main part of the thesis is divided into three parts: "Modeling", "Stiffness estimation" and "Nonlinear adaptive control of soft robots".

"Modeling" introduces the reader to the mechanisms of state-of-the-art soft robotic setups and provides their mathematical description. The first chapter gives an overview of different soft articulated robots, highlighting ones with the antagonistic variable stiffness actuation, and briefly reports on various soft-bodied robots. The second chapter presents the mathematical description of soft articulated robots with the variable stiffness actuators driven by either pneumatic or electro-mechanic drive. The third chapter introduces two dynamic models of soft-bodied robots, derived under the assumption of piecewise constant curvature and affine curvature. The author contributes by developing an augmented formulation for a piecewise-constant curvature soft robot in three-dimensional space, that is described by an improved parameterization, thus avoiding singularity and discontinuity issues.

"Stiffness estimation" proposes novel techniques for stiffness estimation in soft articulated robots. Recalling that stiffness is not measurable, there is no sensor that can retrieve its value. However, being aware of the stiffness value is crucial not only for guaranteeing the safe human-robot collaboration but also for designing the control techniques which close the loop on both position and stiffness. The fourth chapter introduces the main concept of stiffness estimation, as well as state-of-the-art techniques. Then, the fifth chapter outlines the general theory of delayed unknown input observers and recursive least square algorithm, which are fundamental for determining the analytic expressions of stiffness and flexibility torque. In the sixth chapter, an invasive approach is performed to find stiffness in both pneumatically and electro-mechanically actuated robot joints. First, one should determine the flexibility torque acting on the robot joint by considering it as an unknown input to the system. Then, coefficients of stiffness and flexibility torque polynomial approximations are obtained via a recursive least square algorithm. Results obtained in simulation and experimental environments are shown. The seventh chapter presents a non-invasive approach, which is appealing for the reason that only information on link and drives positions are necessary. Herein, a delayed UIO and RLS algorithm are used to directly reconstruct the first time derivative of the flexibility torque, which by definition contains the information on stiffness.

The third part addresses the nonlinear adaptive control of soft robots. To manage a soft robot presents an immense challenge due to the existence of intrinsic flexible and nonlinear elements as well as the elastic coupling between the motors and links positions in the case of soft articulated robots. Thus, the solutions proposed in this part tackle these challenges by coping with model uncertainties and ensuring the decoupling property. The eighth chapter reviews the previously achieved results in controlling soft robots. The ninth presents the principles of nonlinear adaptive control. In the tenth chapter, the decoupled nonlinear adaptive control is proposed to ensure the simultaneous and independent closed-loop control of both position and stiffness for pneumatically

driven soft articulated robots. The results are verified in simulations and experiments and compared to the feedback linearization approach. The eleventh chapter proposes a cascade-based decoupled adaptive control for robots with the electro-mechanic actuation, which also considers the actuator dynamics. The inner loop controller ensures asymptotic tracking of the desired motors positions, while the outer-loop one enables tracking of the desired position and stiffness trajectories. The results are validated in simulations. The twelfth chapter tackles the dynamic control of soft-bodied manipulators. More precisely, it shows how to formulate the adaptive control calculations and describe the necessary and sufficient hypotheses for convergence. The performance is tested in simulations on planar and three-dimensional soft-bodied robots with piecewise constant curvature, as well as on soft-bodied robots with affine curvature.

Finally, the thesis contributions and results are summed up, and the future work is proposed.

3. DISSERTATION EVALUATION

3.1. State-of-the-art and originality

The aspiration of the robotics society in the last decades has been the development of robots that will be more human-like in both mechanical and cognitive sense and, as such, capable of operating within the anthropic environment. Indeed, numerous research has shown that creating a shared human-robot workplace would have positive social and economic influence, while human-robot collaboration would radically improve the health of manufacturing workers if robots would assist them. These insights, accompanied by the endeavor to achieve or even surpass human dexterity and promptness in performing motion and manipulation tasks, have fostered the development of soft robotics, whose expansion is yet to occur in the near future.

The modernity of this doctoral dissertation is based on modeling, stiffness estimation, and control design for soft robots. The direction of the thesis research follows the latest results in this area. More precisely, the recent conclusion that the dynamics of a soft-bodied robot can be related to the dynamics of an augmented rigid robot by meeting certain kinematic and dynamic constraints [3.1:1] has opened the possibility for applying classical control techniques on a theoretically infinitely dimensional soft-bodied robot. Adoption of adaptive control, as presented in the thesis, avoids the need for extensive identification of dynamic parameters of soft-bodied robots, which is the case when applying control laws based on precise knowledge of the model.

According to another state-of-the-art result, the presence of feedforward term in the control law is crucial for preventing the increase of stiffness due to the proportional action of the controller and thus lose the basic property of a soft robot - compliance - as recently pointed out in [3.1:2]. Taking this into account, the thesis considers adaptive control, whose formulation includes both the feedback proportional-differential controller and the term presenting the model as a product of a regressor and parameters *learned* in real-time. In this way, provided that the parameters converge to the correct value, adaptive control leaves the possibility of achieving a feedforward effect. Finally, the use of robots with *qbm* actuators for experimental validation of results supports the thesis modernity.

The originality of this doctoral dissertation is reflected in the development of decoupled control laws based on adaptive techniques that achieve simultaneous and independent control of position and stiffness in soft articulated robots with an antagonistic drive. In this way, the desired dynamics of a robot's position and stiffness are achieved, which contributes to improving the safety of the robot in the anthropic environment. Also, the innovation lies in the design of the procedure for stiffness estimation, which simultaneously provides the numerical value of stiffness in real-time and the analytical expression for stiffness and flexible torque in soft articulated robots, with minimum time delay.

- [3.1:1] C. Della Santina, R. K. Katzschmann, A. Bicchi, and D. Rus (2020), "Model-based dynamic feedback control of a planar soft robot: Trajectory tracking and interaction with the environment," *SAGE The International Journal of Robotics Research*, vol. 39, no. 4, pp. 490–513.
- [3.1:2] C. Della Santina, M. Bianchi, G. Grioli, et al. (2017), "Controlling soft robots: Balancing feedback and feedforward elements". *IEEE Robotics & Automation Magazine* vol. 24, no.3, pp. 75–83.

3.2. Review of the used literature

This doctoral dissertation presents extensive and relevant literature. A total amount of 108 bibliographical references is cited. The literature contains scientific papers relevant to the research areas in the thesis. The presented references give a complete analysis of the current achievements in the presented areas. Moreover, the list of references includes relevant papers that the candidate has published as an author or co-author.

The dissertation leverages a model of soft articulated robots presented in [3.2:1], while the model of a soft-bodied robot is derived based on results in [3.2:2-3]. When performing the procedure for stiffness estimation, the methods presented in [3.2:4] and the book [3.2:5] are used, which enable accurate stiffness estimation without the need to use force/torque sensors, velocity estimation, or heuristic adjustment of filter parameters, compared to reference literature [3.2: 6-8].

The results of [3.2:9-11] were a source of inspiration for the development of decoupled control of pneumatic robots. Following the reference [3.2:12], the thesis presents an adaptive compensator based on [3.2:13], i.e. a technique that relies not only on feedback but also on dynamic learning of parameters, and a dynamic decoupler based on the idea of using null-space of the actuator matrix [3.2:14]. A similar idea was applied to the control of electro-mechanical robots with antagonistic actuation where, unlike in [3.2:15], the dynamics of actuators were included in the consideration, and proof of stability based on [3.2:16] was derived. In the last chapter of the thesis, the control of soft-bodied robots is presented, which is based on the original idea presented in [3.2:17] on the dynamic control of the position of these robots in a closed coupling.

- [3.2:1] A. De Luca and W. Book (2016) Robots with flexible element. In: Siciliano B and Khatib O (eds.) *Springer handbook of robotics*, chapter 11. Springer, pp. 243–282.
- [3.2:2] R. K. Katzschmann, C. Della Santina, Y. Tashimatsu, A. Bicchi, and D. Rus (2019), "Dynamic motion control of multi-segment soft robots using piecewise constant curvature matched with an augmented rigid body model," in 2nd International Conference on Soft Robotics IEEE, pp. 454–461.
- [3.2:3] C. Della Santina, A. Bicchi, and D. Rus (2020), "On an improved state parametrization for soft robots with piecewise constant curvature and its use in model based control," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 1001–1008.
- [3.2:4] S. Sundaram and C. N. Hadjicostis (2008), "Partial state observers for linear systems with unknown inputs," *Automatica*, vol. 44, no. 12, pp. 3126–3132.
- [3.2:5] L. Ljung (1999), *System Identification: Theory for the User*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, pp. 1–14.
- [3.2:6] G. Grioli and A. Bicchi (2010), "A non-invasive, real-time method for measuring variable stiffness," in *Proceedings of Robotics and Systems Society*, Zaragoza, Spain, pp. 89–96.
- [3.2:7] F. Flacco, A. De Luca, I. Sardellitti, and N. G. Tsagarakis (2012), "On-line estimation of variable stiffness in flexible robot joints," *International Journal of Robotics Research*, vol. 31, no. 13, pp. 1556–1577.
- [3.2:8] T. Ménard, G. Grioli, and A. Bicchi (2014), "A stiffness estimator for agonistic–antagonistic variable-stiffness-actuator devices," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 5, pp. 1269–1278.
- [3.2:9] G. Tonietti and A. Bicchi (2002) Adaptive simultaneous position and stiffness control for a soft robot arm. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2, pp. 1992–1997.
- [3.2:10] G. Palli, C. Melchiorri, T. Wimbock, M. Grebenstein and G. Hirzinger (2007) Feedback linearization and simultaneous stiffness position control of robots with antagonistic actuated joints. In: 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, pp. 4367–4372.
- [3.2:11] G. Palli, C. Melchiorri and A. De Luca (2008) On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008). IEEE, pp. 1753–1759.

- [3.2:12] C. Della Santina, M. Bianchi, G. Grioli, et al. (2017), “Controlling soft robots: Balancing feedback and feedforward elements”. *IEEE Robotics & Automation Magazine* vol. 24, no.3, pp. 75–83.
- [3.2:13] JJE Slotine and W Li (1991) *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [3.2:14] O. Khatib (1987) A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3(1): 43–53.
- [3.2:15] R. Mengacci, F. Angelini, M. Catalano, G. Grioli, A. Bicchi and M. Garabini (2020) On the motion/stiffness decoupling property of articulated soft robots with application to model-free torque iterative learning control. *The International Journal of Robotics Research*.
- [3.2:16] Ortega R, Perez JAL, Nicklasson PJ and Sira-Ramirez HJ (2013) Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: mechanical, electrical and electromechanical applications. *Springer Science & Business Media*.
- [3.2:17] C. Della Santina, R. K. Katzschmann, A. Bicchi, and D. Rus (2020), “Model-based dynamic feedback control of a planar soft robot: Trajectory tracking and interaction with the environment,” *SAGE The International Journal of Robotics Research*, vol. 39, no. 4, pp. 490–513.

3.3. Description and adequacy of applied scientific methods

Research within this doctoral dissertation is based on the following methods:

- Model of soft articulated robots driven by antagonistic variable stiffness actuators: The thesis adopts a model of soft articulated robots, derived under certain approximation assumptions, that is applicable for both analysis and control. First, the mapping between transmission deflection and flexibility torque has to be smooth and invertible. Furthermore, it is assumed that the actuator of the i -th robot link is mounted on link $i-1$, which is indeed the case for the robots mentioned below. Concerning electro-mechanically driven robots, it stands that the rotor inertia matrix is diagonal, such that the rotor position does not affect a robot inertia matrix, gravity vector, as well as the angular velocity of a rotor center of mass. Since it is possible to change the stiffness of these robots, they are in danger of falling due to gravity if their stiffness is too low. Therefore, it is assumed that the lowest stiffness of the joint is greater than the upper bound of gravity forces gradient.
- Delayed unknown input observers: These observers are useful tools that have mainly been used for detecting system failures, by achieving correct state estimation independently of the unknown inputs. In this case, however, the thesis focuses on estimating the unknown input, which is a nonlinear time-variant function of our system variables. Among the input-observer categories studied in the literature, so-called “delayed” input-observers are preferable as they provide more information about the system. Indeed, thanks to the use of multiple output values, collected over consecutive sampling times, they are capable of estimating both the system’s states and inputs with a constant and predetermined delay, and they involve looser existence conditions for the realization of the input-observer. This leads to the appealing feature of being able to asymptotically reconstruct the unknown flexibility torque, without velocity or force/torque sensor measurements and with a smaller state-space of the observer.
- Recursive least square algorithm: The recursive least square algorithm identifies the parameters of stiffness and flexibility torque analytical approximations by minimizing the difference between the flexible torque and its approximation. The algorithm inputs are the state variables, which affect the flexibility torque and the estimation of the flexibility torque (or its first derivative depending on the adopted approach), obtained via an unknown input observer. The main advantages are noise reduction in flexibility torque signal, the possibility to obtain analytical expressions for stiffness and torque, and numerical efficiency that allows the real-time application.
- Nonlinear adaptive control: Adaptive control is a technique robust to model uncertainties caused by inaccurate knowledge of dynamic system parameters. This controller ensures asymptotic tracking of a robot joint desired trajectories via dynamic adaptation of

parameters. To apply the adaptive control, the linearity of the dynamic model with respect to the corresponding parameters has to be guaranteed. More precisely, a model should be expressed as a product of a regressor matrix and a constant parameter vector. The basic formulation also requires that the system is fully actuated. In the thesis, this technique has been extended to allow simultaneous and independent control of position and stiffness.

3.4. Applicability of the dissertation results

The achieved results in modeling soft-bodied robots stand for a generic robot of this type. Moreover, the extended formulation facilitates the application of classical control laws to soft-bodied robotic systems.

The stiffness estimators presented in the thesis apply to a class of soft articulated robots with antagonistic pneumatic or electro-mechanical drive. Thanks to the decentralized structure, these estimators can be applied to robots with more degrees of freedom, while the fact that observability is not lost when a robot is steady guarantees good performance in all operation modes of the robotic system.

In the case of pneumatic robots, the decoupled adaptive control technique applies not only to robots driven by antagonistic McKibben muscles but also to all pneumatic robots with the antagonistic drive that have a linear relation between commanded pressures and realized torques and stiffness in the joints. For example, the robotic system presented in [3.4:1] has an antagonistic drive made of fabric chambers. Since the relationship between the commanded pressures and the realized torques and stiffness is linear, it follows that the proposed control law can be applied. Also, considering that higher derivatives of position and stiffness are redundant, the method is characterized by practical applicability, shown in experimental results.

The control law derived for electro-mechanical robots applies to soft articulated robots with antagonistic drive whose analytical expression of flexible torque has an exponential form. Indeed, this assumption is often justified for this group of soft robotic systems [3.4: 2-3]. Finally, even though adaptive control of soft-bodied robots is designed under the piecewise constant curvature assumption, the simulation results showed robustness even in the case of an affine curvature robot.

[3.4:1] C. Best, M. Gillespie, P. Hyatt, L. Rupert, V. Sherrod and M. Killpack (2016) A new soft robot control method: Using model predictive control for a pneumatically actuated humanoid. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 23(3): 75–84.

[3.4:2] qbmove Centro Piaggio (2011) QbMove Maker Pro datasheet. <https://www.qbrobotics.com>. Accessed: 2019-09-01.

[3.4:3] R. Mengacci, M. Garabini, G. Grioli, M. Catalano, & A. Bicchi (2021). Overcoming the Torque/Stiffness Range Tradeoff in Antagonistic Variable Stiffness Actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*.

3.5. Evaluation of the candidate's achieved capabilities for independent scientific work

Candidate Maja Trumić has fully demonstrated the capability of independent scientific work by completing this doctoral dissertation and the publication of seven scientific papers. The candidate carried out a systematic review of the relevant literature, successfully identifying the shortcomings of the previous studies. She proposed solutions that overcome the limitations of the existing approaches. The dissertation topic is up-to-date and multidisciplinary, while the results of the dissertation are contributing to the integration of compliant robots in the anthropic and industrial environment and enabling effective exploitation of soft robot potentials. Research methods and the developed approaches are innovative and creative. The achieved contributions are original and confirm the candidate's ability for independent scientific research work.

4. ACHIEVED SCIENTIFIC CONTRIBUTION

4.1. Overview of the achieved scientific contributions

Scientific contributions of this doctoral dissertation are the following:

- 1) A PCC-based model for a generic three-dimensional soft robot, ensuring kinematic and dynamic equivalence with the original system and having no representation singularities and discontinuities;
- 2) An invasive stiffness estimator for pneumatically and electro-mechanically driven soft articulated robots based on the theory of delayed Unknown Input Observers, which requires neither apriori knowledge about stiffness model nor measurement of motors velocities;
- 3) A non-invasive stiffness estimator for electro-mechanically driven soft articulated robots based on the theory of delayed Unknown Input Observers that lacks the necessity of force/torque measurements and does not experience observability issues;
- 4) Experimental validation of the invasive and non-invasive stiffness estimators performed on the electro-mechanically driven soft articulated robot;
- 5) A robust, closed-loop position and stiffness controller for pneumatic soft articulated robots, based on the nonlinear adaptive control theory. Decoupling position and stiffness control is achieved by using control degrees of freedom associated with the null-space of the actuator matrix;
- 6) A simulation and experimental validation of the proposed technique which shows the performance and comparison with open-loop based solutions and feedback linearization method;
- 7) A robust cascade-based closed-loop position and stiffness controllers for electro-mechanical soft articulated robots, which also address actuator dynamics and which are based on the proportional-derivative (PD) controller plus feedforward term and nonlinear adaptive control theory. Decoupling is achieved via the corresponding matrix that maps the flexibility torques into the desired position and stiffness dynamics;
- 8) Simulation validation of the proposed controllers and the comparison in cases when the integral term is added.
- 9) A robust closed-loop position controller for a soft-bodied robot, based on the nonlinear adaptive control theory;
- 10) Extensive simulation validation - including 3D and non-constant curvature soft robots - proving the effectiveness and the robustness of the controller.

4.2. Critical analysis of the research results

The scientific contributions listed in point 4.1 represent the following improvements in scientific knowledge compared to the state-of-the-art:

- 1) Modeling a soft-bodied robot leverages the piecewise constant curvature hypothesis. Compared to [4.2:1-2], the thesis describes an improved parameterization overcoming the singularity and discontinuity issues at the unavoidable configurations of rest for the soft robot. This dynamic description builds on [4.2:3] by providing a link between the soft-bodied description and rigid-bodied robots by means of the augmented formulation. This connection is instrumental to the application of adaptive control (Chapter 12), and it is a contribution of this work, not appearing in any previous publication.
- 2) In comparison with the existing invasive stiffness estimators [4.2:4-5], the proposed solution uses the theory of delayed unknown input observers to simultaneously obtain information about motor velocity and flexible torque. Thus, compared to [4.2:4], the method does not require information about the motors velocities. Consequently, it is not necessary to adjust the

parameters of the Kalman filter or use velocity sensors to obtain this data. Compared to [4.2:5], the proposed estimator lacks the proof of stiffness convergence, but on the other hand stiffness and flexible torque are estimated at the same time, which can be beneficial for designing model-based controllers. Finally, the approach from [4.2:5] requires a suitable tuning of the integration window length depending on the velocity of the input signal, while the proposed estimator is independent of the signal's nature. Moreover, similarly to [4.2:4], the estimator has a decentralized structure so the method can be applied to stiffness estimation in multi-degree-of-freedom articulated robots, unlike [4.2:5].

- 3) The main advantage of the proposed non-invasive stiffness estimator, concerning the existing solutions [4.2:6-7], is that a force/torque sensor is not necessary to assess stiffness. Instead, only information about the position and speeds of the actuator motors and robot links is required. Compared to [4.2:6], the estimator does not lose observability when the robot is in a steady position. On the other hand, compared to [4.2:7] that requires no higher derivatives information, the proposed estimator needs motors velocities. Finally, unlike invasive stiffness estimators, information on the commanded torque to the actuator motors is unnecessary.
- 4) Considering that all the above-mentioned estimators are founded on the assumption of the system's persistent excitation, the most challenging case occurs when a robot changes its stiffness while being in the rest. Compared to the previous publications on stiffness estimation, the thesis shows experimental results when a robot is in three different modes: 1) position and stiffness of a robot joint are changing simultaneously, 2) only position is changing, and 3) only stiffness is changing.
- 5) Decoupled nonlinear adaptive control of pneumatic robots extends the method from [4.2:8] by controlling the stiffness in closed-loop, which benefits the overall system safety. The proposed solution uses a control degree of freedom, associated with the null space of the actuator matrix, to decouple the tracking of position commands from stiffness ones. While the idea of using null-space projections is not new in robotics – it has been applied to the Jacobian matrix of a redundant manipulator to achieve force and torque control – the presented approach enables the above-mentioned decoupling, without the necessity of higher-order derivatives even when the system model is not perfectly known, compared to [4.2:9]. The main disadvantage of the method stems from the assumption that the actuator model is completely known.
- 6) Experimental validation of a decoupled nonlinear adaptive control on a pneumatic soft articulated robot with two degrees of freedom represents a unique result obtained by closing the loop on position and stiffness. Due to hardware imperfections, slower experiments are presented in the thesis, as otherwise slippage and measurement errors would occur.
- 7) Decoupled nonlinear adaptive control of electro-mechanical soft articulated robots follows the line of research in [4.2:8], where vectors of links position and joints stiffness are chosen as system outputs on which the loop is closed. The proposed approach, however, differs in multiple ways. First, by using robust control based on adaptive techniques, the system is able to cope with the uncertainties in robot dynamics. Then, the decoupled position and stiffness control is achieved by using an explicit relationship between flexible torques and the obtained stiffness in the robot joint, thus avoiding the need for higher position and stiffness derivatives. Moreover, compared to [4.2:10], the presented approach also takes into account the dynamics of the actuator. The main disadvantage comes from the need for precise knowledge of the actuator model.
- 8) Validating decoupled adaptive control of electro-mechanical robots in simulation environment showed performance with and without the integral term in the stiffness control subsystem and presented a comparison with the model-based controller.
- 9) The performance of the aforementioned controllers [4.2:1-3] depends heavily on accurate knowledge of soft robot dynamic parameters, which are generally not available in practice. Therefore, the thesis gives a formulation of robust control based on adaptive theory, as well as the necessary and sufficient conditions for convergence.

- 10) Testing of the proposed control law in a simulation environment has shown efficiency and robustness with respect to the uncertainty of dynamic parameters, as well as the robot model itself.

- [4.2:1] C. Della Santina, R. K. Katzschmann, A. Bicchi, and D. Rus, "Model-based dynamic feedback control of a planar soft robot: Trajectory tracking and interaction with the environment," *SAGE The International Journal of Robotics Research*, vol. 39, no. 4, pp. 490–513, 2020.
- [4.2:2] R. K. Katzschmann, C. Della Santina, Y. Toshimitsu, A. Bicchi, and D. Rus, "Dynamic motion control of multi-segment soft robots using piecewise constant curvature matched with an augmented rigid body model," in *2nd International Conference on Soft Robotics IEEE*, 2019, pp. 454–461.
- [4.2:3] C. Della Santina, A. Bicchi, and D. Rus, "On an improved state parametrization for soft robots with piecewise constant curvature and its use in model based control", *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 1001–1008, 2020
- [4.2:4] F. Flacco, A. De Luca, I. Sardellitti, and N. G. Tsagarakis, "On-line estimation of variable stiffness in flexible robot joints," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 31, no. 13, pp. 1556–1577, Nov. 2012.
- [4.2:5] T. Ménard, G. Grioli, and A. Bicchi, "A stiffness estimator for agonistic– antagonistic variable-stiffness-actuator devices," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 30, no. 5, pp. 1269–1278, Oct. 2014.
- [4.2:6] G. Grioli and A. Bicchi, "A non-invasive, real-time method for measuring variable stiffness," *Robotics Science and Systems VI*, 2010.
- [4.2:7] G. Grioli and A. Bicchi, "A real-time parametric stiffness observer for vsa devices," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE*, 2011, pp. 5535–5540.
- [4.2:8] G. Tonietti and A. Bicchi (2002) "Adaptive simultaneous position and stiffness control for a soft robot arm". *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2*, pp. 1992–1997.
- [4.2:9] G. Palli, C. Melchiorri and A. De Luca (2008) On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008 (ICRA 2008)*. IEEE, pp. 1753–1759.
- [4.2:10] R. Mengacci, F. Angelini, M. Catalano, G. Grioli, A. Bicchi and M. Garabini (2020) "On the motion/stiffness decoupling property of articulated soft robots with application to model-free torque iterative learning control. *The International Journal of Robotics Research*: 0278364920943275.

4.3. Verification of the scientific contributions

Scientific contributions of this doctoral dissertation are verified based on the following publications:

Category M21:

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, In press, impact factor: 4.7, DOI: 10.1177/0278364920903787, ISSN: 0278-3649. (scientific contributions (5) и (6))

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, pp. 1843-1850, 2020, impact factor: 3.6, DOI: 10.1109/LRA.2020.2969952, ISSN: 2377-3766. (scientific contributions (2) и (4))

Category M24:

Maja Trumić, Cosimo Della Santina, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini „Adaptive Control of Soft Robots Based on an Enhanced 3D Augmented Rigid Robot Matching“, *IEEE Control System Letters*, 2021, Vol. 5, No. 6, DOI: 10.1109/LCSYS.2020.3047737, ISSN: 2475-1456. (scientific contributions (1) и (10))

Category M33:

Maja Trumić, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini Comparison of model-based simultaneous position and stiffness control techniques for pneumatic soft robots, In: *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region*, Springer, pp.218-226, 2020, DOI:10.1007/978-3-030-48989-2. (scientific contributions (5))

Category M63:

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. (scientific contributions (5) и (7))

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.

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.

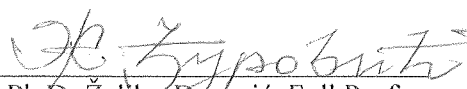
5. CONCLUSION AND PROPOSAL

Based on everything exposed above, the Commission considers that the doctoral dissertation of the candidate Maja Trumić fully meets all legal, formal, and essential requirements, as well as all criteria that are usually applied when evaluating the doctoral dissertation. The core scientific contribution of the thesis leads toward better integration of robots in the anthropic and industrial environment by closing the loop on position and stiffness. The main research results from this doctoral dissertation are modeling soft-bodied robots, estimation of stiffness in soft articulated robots, and the design of adaptive control of soft robots in general. Most results are verified in publications, while some of them are validated experimentally on pneumatic robot *GioSte* and soft articulated robot driven by *qbmove* electro-mechanical, variable stiffness actuators.

Taking all this into account, the Commission considers that the doctoral dissertation of Maja Trumić contains the original scientific achievements that contribute to the area of stiffness estimation and adaptive control of soft robots. Therefore, the Commission is pleased to propose to the Academic Council of the School of Electrical Engineering of the University of Belgrade to accept the doctoral dissertation entitled "Stiffness Estimation and Adaptive Control for Soft Robots", present it to the public, and forward it for the final acceptance to the Council of the scientific field of technical sciences at the University of Belgrade.

Belgrade, April 2nd, 2021

COMMITTEE MEMBERS



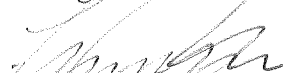
Ph.D. Željko Đurović, Full Professor

University of Belgrade – School of Electrical Engineering



Ph.D. Slobodan Yukosavić, Full Professor

University of Belgrade – School of Electrical Engineering



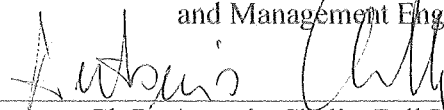
Ph.D. Cosimo Della Santina, Assistant Professor

Delft University of Technology – Department of Cognitive Robotics



Ph.D. Alessandro De Luca, Full Professor,

The Sapienza University of Rome – Department of Computer, Control
and Management Engineering



Ph.D. Antonio Chella, Full Professor

University of Palermo – Department of Engineering



Ph.D. Filippo D'Ippolito, Assistant Professor

University of Palermo – Department of Engineering