

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Филипа Бечановића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр 883/34 од 13. јуна 2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Филипа Бечановића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом:

„Откривање оптималних стратегија у људском кретању путем инверзног оптималног управљања”
(енг. “*Uncovering optimal strategies in human motion through inverse optimal control*”).

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци кандидата

Филип Бечановић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, рођен је 04.12.1997. године у Београду. Основну школу делимично је похађао у Београду, у школи 20. Октобар, а завршио је у Паризу, Француској, у колежу Жансон де Саји (Collège Janson de Sailly). Средњу школу започео је у Паризу, у лицеју (Lycée) по истом имену, а завршио је девету београдску гимназију, Михаило Петровић Алас. Основне академске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2015. године. Дипломирао је на одсеку за Сигнале и системе 2019. године са просечном оценом 9.42 одбравивши дипломски рад под називом „Локализација робота у познатом окружењу коришћењем честичног филтера“. Мастер академске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2019. године, а завршио је 2020. године са просечном оценом 9.33 одбравивши мастер рад „Анализа људског покрета употребом инверзног оптималног управљања“. Током основних студија одрадио је стучну праксу у развојном центру компаније Мајкрософт (Microsoft) у Београду у трајању од четири месеца. Током мастер студија, одрадио је истраживачку праксу у Паризу у Лабораторији за слике, сигнале и интелигентне системе - ЛИССИ (Laboratoire des Images, Signaux et Systèmes Intelligents - LISSI) Универзитета Пари-Ест Кретеј (Université Paris-Est Créteil) у трајању од шест месеци, у оквиру Еразмус+ програма размене студената.

Двојне докторске академске студије уписао је 2020. године на Електротехничком факултету у Београду и на Универзитету Пари-Ест Кретеј. Област научног истраживања кандидата обухвата примену оптимизационих алгоритама за планирање

покрета код хуманоидних механичких структура, као и примену инверзног оптималног управљања као методу учења покрета из примера. Од јануара 2021. године ангажован је као истраживач приправник на Електротехничком факултету у Београду. У току докторских студија остварио је два петомесечна истраживачка боравка у Тулузу, Француској, у истраживачком тиму за хуманоидне роботе Ђепето (Gepetto) Лабораторије за анализу и архитектуру система (ЛААС-ЦНРС) током 2022. и 2023. године.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

Кандидат Филип Бечановић је уписао докторске студије на Електротехничком факултету у Београду школске 2020/21. године на модулу „Управљање системима и обрада сигнала”. Током докторских студија испунио је све обавезе и положио све испите предвиђене наставним планом и програмом студија, са просечном оценом 10. Списак положених предмета и обавеза дат је у следећој табели:

Шифра/Акроним предмета/обавезе	Назив предмета/обавезе	Оцена	ЕСПБ
19Д051ТРС	Теорија роботских система	10	9
19Д051НМ	Неуралне мреже	10	9
19Д051МКР	Моторна контрола и рехабилитација	10	9
19Д081ЛА	Линеарна алгебра	10	9
19Д051СРС	Специјални роботски системи	10	9
19Д051УСС	Управљање сложеним системима	10	9
19Д081ФАП	Функционална анализа и примене	10	9
100021-19	19 Студијски истраживачки рад I	/	24
100022-19	19 Студијски истраживачки рад II	/	24
	Укупно остварено:		111

Кандидат је аутор 4 научна рада, од којих је један објављен у међународном часопису са импакт фактором, а три рада су објављена у зборницима радова међународних скупова. Списак публикација у којима је Филип Бечановић коаутор дат је у наставку:

- **F. Bećanović**, V. Bonnet, R. Dumas, K. Jovanović and S. Mohammed, "Force Sharing Problem During Gait Using Inverse Optimal Control," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 872-879, Feb. 2023, doi: [10.1109/LRA.2022.3217398](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3217398). [категорија M21, IF: 4.321].
- **F. Bećanović**, J. Miller, V. Bonnet, K. Jovanović and S. Mohammed, "Assessing the Quality of a Set of Basis Functions for Inverse Optimal Control via Projection onto Global Minimizers," *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, Cancun, Mexico, 2022, pp. 7598-7605, doi: [10.1109/CDC51059.2022.9993342](https://doi.org/10.1109/CDC51059.2022.9993342). [категорија M33].
- M. Radmilović, Đ. Urukalo, M. Petrović, **F. Bećanović** and K. Jovanović, "Influence of Muscle Co-Contration Indicators for Different Task Conditions," 8th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2021), Ethno Village Stanišići, Bosnia & Herzegovina, 2021, pp. 584, ISBN 978-86-7466-894-8. [категорија M33].

- **F. Bečanović**, V. Bonnet, S. Mohammed i K. Jovanović, "PronalazakOptimizacioneFunkcijeKretanjaizSimuliraneDemonstracijePokreta Čučnja", Zbornikradova 65. konferencijeETTRAN 2021, EtnoSeloStanišići, BosnaiHercegovina, 2021, pp. 551-555, ISBN 978-86-7466-894-8.[категорија M33].

Дана 20.јуна 2023. године на Електротехничком факултету у Београду, кандидат Филип Бечановић је имао јавни усмени испит о подобности предложене теме докторске дисертације и кандидата, пред комисијом у саставу:

1. др Драган Мирков, редовни професор, Универзитет у Београду – Факултет спорта и физичког васпитања.
2. др Милица Јанковић, ванредни професор,Универзитет у Београду - Електротехнички факултет (председник комисије),
3. др Ненад Јовичић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.
4. др Маја Трумић, научни сарадник,Универзитет у Београду - Електротехнички факултет

Комисија је једногласно закључила да кандидат испуњава услове за рад на предложеној теми докторске дисертације и оценила испит оценом - **задовољно**.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу претходног приказаног резултата досадашњег рада и активности Филипа Бечановића и узимајући у обзир претходно наведене чињенице, Комисија је стекла увид у способности и научно-истраживачки рад кандидата, те констатује да је кандидат стекао неопходно искуство за научно-истраживачки рад. Комисија сматра да је кандидат способан да током израде докторске дисертације оствари резултате, који могу бити приказани и верификовани од стране међународне научне заједнице. Комисија даје позитиван став да кандидат Филип Бечановић настави са својим истраживачким радом и констатује да кандидат испуњава све потребне и формалне услове да приступи изради дисертације.

2. Предмет, циљ и значај истраживања

У областима истраживања ергономије, биомеханике и роботике, разумевање људске моторне контроле има важне примене – од унапређења технологија у сектору здравствене неге и рехабилитације до дизајнирања ефикасније роботске помоћи [1]. Иако је аутоматизација широко распрострањена у многим индустријама, још увек постоје задаци који се не могу у потпуности аутоматизовати због своје стохастичке природе, који захтевају опажање, доношење одлука и руковање на људском нивоу [2]. Многи такви задаци укључују тежак физички рад, прекомерно понављање, неергономичне положаје и подизање тешких терета који се често препознају као главни узроци мишићно-скелетних поремећаја (МСП) [3]. МСП-и преовлађују међу индустријским радницима, чинећи 80% болести у индустријском окружењу са годишњим порастом од 3% током протекле деценије. МСП-и могу довести до превременог пензионисања и значајних потешкоћа у испуњавању свакодневних задатака људи, што представља важан социјални и економски изазов за раднике, компаније и државну управу [4]. Колаборативни роботи и егзоскелети у директној физичкој интеракцији са човеком се сматрају перспективним решењима за смањење МСП-а у индустрији комбиновањем људског опажања и доношења одлука са физичком снагом робота [2]. Поред тога, ове технологије имају потенцијал да унапреде будућност асистивне технологије у рехабилитационим центрима [5]. Међутим, ограничено разумевање људског кретања и неспособност робота да га алгоритамски предвиде током заједничких или помоћних задатака ометају њихову безбедну сарадњу са људима и успешно обављање задатака [6].

Обећавајуће решење за превазилажење овог изазова представља употреба технике инверзног оптималног управљања (ИОУ) заснованог на подацима за учење из снимљених људских покрета [7, 8]. Охрабрујући резултати су добијени употребом ИОУ у различитим биомеханичким и роботским применама, укључујући бипедални ход контролисан обртним моментом [9], расподелу мишићних сила током бипедалног хода [10], хватање [11], и индустријско завртање [12]. Због тога, ИОУ има потенцијал да постане незаобилазна методологија у пројектовању ефикасне и безбедне помоћи од стране робота [13]. Штавише, ИОУ се може користити за одређивање промена у циљевима током управљања покретима и сегментацију људског покрета у кораке [14, 15], што доводи до поузданије повратне информације у ергономској процени тежине задатака за људе [14]. Ово такође може довести до прецизнијих људских симулација и, заузврат, олакшати дизајн ергономских радних простора који ће смањити ризик од МСП-а [16].

ИОУ и сличне технике су примењене у бројним областима, укључујући али не ограничавајући се на теорију управљања, вештачку интелигенцију, роботiku, здравствене системе, енергетске системе и маркетинг [7, 8, 17]. Упркос напорима да се испитају и класификују бројни приступи [7, 8], чини се да не постоји општа сагласност о номенклатури, претпоставкама и методама решења. Што се тиче ИОУ-а, остају питања која се односе на његову отпорност на шум [17, 18] или на врсту критеријумске функције која се може користити током учења [17-19].

Фокус истраживања биће проучавање људске моторне контроле коришћењем ИОУ-а на експериментално добијеним подацима. Очекиване употребе и примене резултата су у

ергономији, биомеханици и роботизи, са потенцијалом за побољшање и унапређење асистивних технологија у индустрији и здравству са фокусом на рехабилитацију. Штавише, истраживање ће се делимично усредсредити на методе за ИОУ саме по себи, са циљем дисеминације резултата истраживања у сродним областима теоријеуправљања и вештачке интелигенције.

- [1] Gualtieri, L., Rauch, E. and Vidoni, R., 2021. Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, p.101998.
- [2] Ajoudani, A., Zanchettin, A.M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K. and Khatib, O., 2018. Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Autonomous Robots*, 42, pp.957-975.
- [3] Da Costa, B.R. and Vieira, E.R., 2010. Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies. *American journal of industrial medicine*, 53(3), pp.285-323.
- [4] Gomez-Galan, M., Perez-Alonso, J., Callejón-Ferre, Á.J. and López-Martínez, J., 2017. Musculoskeletal disorders: OWAS review. *Industrial health*, 55(4), pp.314-337.
- [5] Huo, W., Mohammed, S., Moreno, J.C. and Amirat, Y., 2014. Lower limb wearable robots for assistance and rehabilitation: A state of the art. *IEEE systems Journal*, 10(3), pp.1068-1081.
- [6] Bauer, A., Wollherr, D. and Buss, M., 2008. Human–robot collaboration: a survey. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5(01), pp.47-66.
- [7] Ab Azar, N., Shahmansoorian, A. and Davoudi, M., 2020. From inverse optimal control to inverse reinforcement learning: A historical review. *Annual Reviews in Control*, 50, pp.119-138.
- [8] Chan, T.C., Mahmood, R. and Zhu, I.Y., 2021. Inverse optimization: Theory and applications. arXiv preprint arXiv:2109.03920.
- [9] Clever, D. and Mombaur, K.D., 2016, June. An Inverse Optimal Control Approach for the Transfer of Human Walking Motions in Constrained Environment to Humanoid Robots. In *Robotics: Science and systems*.
- [10] Becanovic, F., Bonnet, V., Dumas, R., Jovanovic, K. and Mohammed, S., 2023. Force Sharing Problem During Gait Using Inverse Optimal Control. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(2), pp. pp-872.
- [11] Berret, B., Chiovetto, E., Nori, F. and Pozzo, T., 2011. Evidence for composite cost functions in arm movement planning: an inverse optimal control approach. *PLoS computational biology*, 7(10), p.e1002183.
- [12] Sylla, N., Bonnet, V., Venture, G., Armande, N. and Fraisse, P., 2014, August. Human arm optimal motion analysis in industrial screwing task. In 5th IEEE RAS/EMBS international conference on biomedical robotics and biomechatronics (pp. 964-969). IEEE.
- [13] Mainprice, J., Hayne, R. and Berenson, D., 2016. Goal set inverse optimal control and iterative replanning for predicting human reaching motions in shared workspaces. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(4), pp.897-908.
- [14] Lin, J.F.S., Bonnet, V., Panchea, A.M., Ramdani, N., Venture, G. and Kulić, D., 2016, November. Human motion segmentation using cost weights recovered from inverse optimal control. In 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (pp. 1107-1113). IEEE.
- [15] Westermann, K., Lin, J.F.S. and Kulić, D., 2020. Inverse optimal control with time-varying objectives: application to human jumping movement analysis. *Scientific reports*, 10(1), p.11174.
- [16] Chaffin, D.B., 2002. On simulating human reach motions for ergonomics analyses. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 12(3), pp.235-247.
- [17] Aswani, A., Shen, Z.J. and Siddiq, A., 2018. Inverse optimization with noisy data. *Operations Research*, 66(3), pp.870-892.
- [18] Colombel, J., Daney, D. and Charpillet, F., 2022, May. On the Reliability of Inverse Optimal Control. In 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 8504-8510). IEEE.
- [19] Bečanović, F., Miller, J., Bonnet, V., Jovanović, K. and Mohammed, S., 2022, December. Assessing the Quality of a Set of Basis Functions for Inverse Optimal Control via Projection onto Global Minimizers. In 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC) (pp. 7598-7605). IEEE.

3. Полазне хипотезе

Хипотезе истраживања су следеће:

- Људско кретање у простору зглобова и силе интеракције са околином могу се проценити спајањем мерења из система за снимање покрета (*енг. motioncapture*) и платформеза мерење силе (*енг. forceplate*) са механичким моделом људског тела у облику везе крутих тела [20, 21].
- За дати моторни задатак, постоје инваријантни аспекти у покретима произведеним људским моторним системом који се могу мерити и квантификовати, било да се кретање анализира у зглобном или мишићном простору [9-16, 17-19].
- Инваријантни аспекти кретања које производи људски моторни систем могу се моделовати као процес оптимизације: процес селекције најприкладнијег покрета међу бесконачним могућностима. Инваријантни аспекти се могу идентификовати помоћу ИОУ-а коришћењем података измереног људског кретања. Када се идентификују инваријантни аспекти кретања, они се у будућности могу користити за предвиђање људског кретања, генерисање путања сличних човеку и анализу циљева кретања [9-16, 17-19].

Полазне хипотезе биће тестиране на реалним подацима. Истраживања ће садржати експериментално мерење покрета помоћу система за снимање покрета и платформе за мерење силе, и односиће се на покрет подизања кутије који има значај у ергономији. Истраживање ће се ослонити и на слободно доступне (*енг. open-source*) податке [22, 23] о мишићним силама у доњим удовима хемипаретичних пацијената током ходања које имају значај у рехабилитацији.

[20] Müller, B., Wolf, S.L., Brüggemann, G.P., Deng, Z., McIntosh, A.S., Miller, F. and Selbie, W.S. eds., 2018. Handbook of human motion (pp. 1-2543). Berlin: Springer.

[21] Kajita, S., Hirukawa, H., Harada, K. and Yokoi, K., 2014. Introduction to humanoid robotics (Vol. 101, p. 2014). Springer Berlin Heidelberg.

[22] Meyer, A.J., Patten, C. and Fregly, B.J., 2017. Lower extremity EMG-driven modeling of walking with automated adjustment of musculoskeletal geometry. PloS one, 12(7), p.e0179698.

[23] Li, G., Shourijeh, M.S., Ao, D., Patten, C. and Fregly, B.J., 2021. How well do commonly used co-contraction indices approximate lower limb joint stiffness trends during gait for individuals post-stroke? Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8, p.588908.

4. Методе истраживања

Истраживање ће започети прегледом најсавременије литературе о теорији и примени ИОУ-а заснованог на подацима [7,8], са фокусом на његове примене у људском кретању [9-16, 17-19]. Студија ће такође укратко истражити везе између ИОУ-а и теорија мултикритеријумске оптимизације (*енг. multi-objective optimization*) [24] и оптимизације на два нивоа (*енг. bilevel optimization*) [25]. Да би се илустровале методе

ИОУ-а, истраживање ће пружити једноставне рачунске примере и пратеће графичке илустрације.

Студија ће истражити питање „одабира базисних функција“ у контексту ИОУ-а, са посебним нагласком на конвексне квадратне базисне функције [19]. На основу техника из области полиномијалне оптимизације [26], у истраживању ће бити представљена процедура за проналажење доње границе грешке процедуре ИОУ-а за дати скуп података и базисних функција [19].

Мотивисано потенцијалном применом ИОУ-а у дизајнирању рехабилитационе технологије, посебно егзоскелета за ходање, истраживање ће истражити како људски моторни систем распоређује мишићне силе у доњим удовима током хода. Студија ће користити ИОУ за анализу слободно доступних (*енг. open-source*) података о ходању хемипаретичних пацијената. Слободно доступни подаци прикупљени су коришћењем ЕМГ-а, система за снимање покрета, платформе за мерење контактне силе и траке за трчање. Слободно доступни подаци садрже и калибрисани геометријски модел доњег дела тела као и екстраховане референтне мишићне силе у доњим удовима [23]. Калибрисани геометријски модел и референтне мишићне силе ће послужити као полазна тачка, а биће примењена процедура ИОУ-а да се закључи који биомеханички циљеви из литературе најбоље објашњавају добијене податке [10]. Студија ће анализирати и упоредити резултате симулације са наученим циљевима путем ИОУ-а у односу на репере из литературе.

Истраживање ће такође укључити експерименте на здравим људским учесницима који обављају задатак подизања кутије, изабран због процењених 52% МСП-а повезаних са преоптерећењем током задатака подизања у процесу рада [27]. Циљ студије ће бити истраживање краткорочних адаптација у несвесном процесу руковања и планирања кретања човека приликом обављања одређеног задатка. Студија ће користити Оптитрек (*енг. Optitrack*) систем за снимање покрета и АМТИ (*енг. AMTI*) платформу за мерење силе, заједно са објектом који се подиже током експеримената и столом за постављање објекта након подизања.

Добијени експериментални подаци биће искоришћени у оквиру ИОУ-а за анализу контролних циљева људских испитаника током задатка подизања кутије. Студија ће анализирати одступања у добијеним оптималним стратегијама за планирање кретања међу испитаницима, и између случајева када су испитаници добили упутства да користе технику дизања базирану на чучњу или не [27]. Биће анализирани ефекти технике дизања, а закључци ће бити упоређени са познатим резултатима [27]. Научене стратегије за планирање кретања ће бити коришћене за симулацију и упоређене са најсавременијим приступима из литературе [28, 29].

[24] Miettinen, K., 1999. Nonlinear multiobjective optimization (Vol. 12). Springer Science & Business Media.

[25] Dempe, S., Kalashnikov, V., Pérez-Valdés, G.A. and Kalashnykova, N., 2015. Bilevel programming problems. Energy Systems. Springer, Berlin, 10, pp.978-3.

[26] Lasserre, J.B., 2015. An introduction to polynomial and semi-algebraic optimization (Vol. 52). Cambridge University Press.

[27] van der Have, A., Van Rossom, S. and Jonkers, I., 2019. Squat lifting imposes higher peak joint and muscle loading compared to stoop lifting. Applied Sciences, 9(18), p.3794.

[28] Song, J., Qu, X. and Chen, C.H., 2015. Lifting motion simulation using a hybrid approach. Ergonomics, 58(9), pp.1557-1570.

[29]Rakshit, R., Xiang, Y. and Yang, J., 2020. Dynamic-joint-strength-based two-dimensional symmetric maximum weight-lifting simulation: Model development and validation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H: Journal of Engineering in Medicine. 234(7). pp.660-673.

5. Очекивани научни доприноси

Очекивани научни доприноси тезе су:

- Систематски преглед литературе и метода у области оптималног моделирања кретања човека и инверзног оптималног управљања. Делимичан преглед литературе и метода у сродним областима инверзног учења подстицањем (*eng.inversereinforcementlearning*), мултикритеријумске оптимизације и оптимизације на два нивоа.
- Анализа и интерпретација особина тренутних метода за ИОУ, уз напомене о практичним имплементацијама и перформансама.
- Пројектовање методе за проналажење доњих граница грешке инверзне оптималног управљања кретањем за дати скуп података и дату основу базисних функција, у контексту конвексних квадратних базисних функција.
- Примена инверзног оптималног управљања на два случаја стварне употребе, оба везана за примене у контекстуергономије и рехабилитације. Један случај употребе је подизање кутије, а други случај расподеле мишићних сила у доњим удовима током ходања.
- Експериментално прикупљање података о људском подизању кутија коришћењем система за снимање покрета и платформе за мерење силе.
- Истраживање краткорочних адаптација несвесног процеса доношења одлука и планирања кретања код људи приликом извођења специфичног задатка подизања кутија, и анализа одступања у добијеним стратегијама планирања кретањау зависности од испитаника, поставке и технике дизања.
- Примена инверзног оптималногуправљања за закључивање биомеханичких циљева који најбоље објашњавају добијене податке о расподели мишићне силе у доњим удовима током хода, користећи слободно доступне (*eng.open-source*)податке хода хемипаретичних пацијената, који садрже референтне мишићне силе и калибрисан геометријски моделдоњег дела тела. Поређење резултата у односу на референтне вредности из литературе.
- Валидација научених стратегија планирања кретања из два наведена случаја употребе кроз симулацију и поређење са најсавременијим приступима из литературе.

6. План истраживања

Истраживање ће бити спроведено са идејом да се ИОУ примени на стварне људске податке са различитим моделима и задацима како би се научиле стратегије планирања људског кретања. Штавише, истраживање ће обухватити испитивање метода и алгоритама ИОУ-а и њихове примењивости на једноставне математичке моделе, како би се схватиле потешкоће примене на сложеним моделима људског кретања.

Биће дата биомеханичка интерпретација резултата ИОУ-а, осмишљене реалистичније симулације људског кретања, и расветљена применљивост различитих метода и алгоритама ИОУ-а на моделе људског кретања.

1) Прва фаза – Упознавање

Студија ће започети анализом структуре проблема ИОУ-а кроз преглед литературе у сродним областима. Паралелно ће се вршити и преглед литературе о моделирању људског кретања. Стандардне методе ИОУ-а биће тестиране на једноставним нумеричким примерима, а резултати ће бити критички изложени. Биће оцењене и упоређене предности различитих приступа ИОУ, као и њихова примењивост на моделе људског кретања. Проучавање се специфични проблеми ИОУ-а као што је избор базисних функција.

2) Друга фаза – Прва студија случаја – Расподела мишићних сила у доњим удовима током хода

Задатак расподеле мишићних сила у доњим удовима током хода биће изабран као прва студија случаја на основу слободне доступности података из клиничких истраживања са слободно доступним подацима [21], као и зато што је погодан за једноставнији математички модел.

3) Трећа фаза – Друга студија случаја – Прикупљање података – Подизање кутије

Задатак подизања кутије биће изабран као друга студија случаја на основу његове важне корелације са МСП-а на раду и због његове умерене сложености у моделирању. Експеримент ће бити осмишљен како би се истражили циљеви моторне контроле и краткорочне адаптације у контролном процесу човека приликом обављања задатка подизања кутије. Подаци ће бити прикупљени на здравим испитаницима, без историје МСП-а, коришћењем Оптистрек система заснимање покрета и АМТИ платформе за мерење силе, и биће обрађени и јавно доступни. Познате технике ИОУ-а, као и хеуристичке адаптације, биће примењене на податке како би се анализирали у овом оквиру. Биће речи о сложеностима примене ИОУ-а на сложенијим моделима.

Студије случаја ће бити праћене детаљним описима математичких модела и доступних скупова података. Нумеричке методе биће објашњене, а нумерички резултати биће свеобухватно представљени у табеларном и сликовном облику. Биомеханичка интерпретација резултата заједно са њиховим импликацијама за осмишљавање приступа за бољу помоћ у рехабилитацији и унапређење сарадње човека и робота биће опширно преиспитани и упоређени са релевантном научном литературом.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи рад кандидата Филипа Бечановића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија констатује да кандидат испуњава све потребне услове за израду докторске дисертације под насловом **„Откривање оптималних стратегија у људском кретању путем инверзног оптималног управљања“**. Поред испуњених формалних услова, кандидат је демонстрирао способност систематичног приступа анализи проблема, теоријска и практична знања из области моделирања, анализе и предикције људског кретања и теорије оптимизације, као и способност излагања резултата научној заједници. Предложена тема је врло актуелна и заснована како на истраживачким активностима научне заједнице тако и на савременим технолошким потребама рехабилитационе медицине и индустријске ергономије.

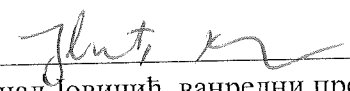
На основу изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Филипу Бечановићу, мастер инжењеру електротехнике и рачунарства, одобри израду докторске дисертације под насловом **„Откривање оптималних стратегија у људском кретању путем инверзног оптималног управљања“**, под менторством др Косте Јовановића, ванредног професора на Електротехничком факултету Универзитета у Београду и др Самера Мохамеда, редовног професора на Одсеку за науку и технологије Универзитета Пари-Ест Кретеј, у Француској.

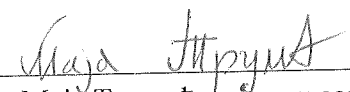
У Београду, 21.06.2023. године

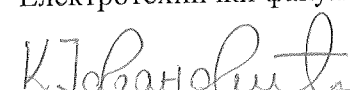
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Милица Јанковић, ванредни професор,
Универзитет у Београду -
Електротехнички факултет


др Драган Мирков, редовни професор,
Универзитет у Београду -
Факултет спорта и физичког васпитања


др Ненад Јовичић, ванредни професор,
Универзитет у Београду -
Електротехнички факултет


др Маја Трумић, научни сарадник,
Универзитет у Београду -
Електротехнички факултет


др Коста Јовановић, ванредни професор,
Универзитет у Београду -
Електротехнички факултет


др Самер Мохамед, редовни професор,
Универзитет Пари-Ест Кретеј -
Одсек за науку и технологије

University of Belgrade
School of Electrical Engineering

TO THE TEACHING-SCIENTIFIC COUNCIL

Subject: Eligibility of the topic and the candidate Filip Bečanović, master engineer of electrical engineering and computer science, for the preparation of a doctoral dissertation.

By the decision no. 883/34 made on the 13th of June 2023. by the Teaching-Scientific Council of the School of Electrical Engineering, we were appointed to be members of the Commission for the evaluation of the eligibility of the topic and the candidate Filip Bečanović, master engineer of electrical engineering and computer science, for the preparation of a doctoral dissertation and scientific relevance of the topic entitled:

„Uncovering optimal strategies in human motion through inverse optimal control”.

(Serbian „Откривање оптималних стратегија у људском кретању путем инверзног оптималног управљања”).

Based on the material provided at the candidate's request, the Commission submits the following

REPORT

1. Information about the Candidate

1.1. Biographical data of the candidate

Filip Bečanović, master engineer of electrical engineering and computer science, was born on December 4, 1997. in Belgrade. He partially attended elementary school in Belgrade, at the “20th of October” school, and graduated in Paris, France, at the Collège Janson de Sailly. He started high school in Paris, at the Lycée of the same name, and graduated from the ninth high school in Belgrade, Mihailo Petrović Alas. He enrolled in bachelor academic studies at the School of Electrical Engineering in Belgrade in 2015. He graduated from the Department of Signals and Systems in 2019 with an average grade of 9.42, defending his thesis entitled "Robot localization in a known environment using a particle filter". He enrolled in the Master of Academic Studies at the School of Electrical Engineering in Belgrade in 2019, and graduated in 2020 with an average grade of 9.33, defending his master's thesis "Analysis of human movement using inverse optimal control". During his undergraduate studies, he completed a four-month internship at the Microsoft development center in Belgrade. During his master's studies, he did a research internship in Paris at the Laboratory for Images, Signals and Intelligent Systems - LISSI (Laboratoire des Images, Signaux et Systèmes Intelligents - LISSI) of the Université Paris-Est Créteil (Université Paris-Est Créteil) for six months, within an Erasmus+ student exchange program.

In 2020, he enrolled in dual doctoral academic studies at the School of Electrical Engineering in Belgrade and at the University of Paris-Est Creteil. The candidate's field of scientific research includes the application of optimization algorithms for motion planning in humanoid mechanical structures, as well as the application of inverse optimal control as a method of learning motion from examples. Since January 2021, he has been engaged as a research trainee at the School of Electrical Engineering in Belgrade. During his doctoral studies, he completed two five-month research stays in Toulouse, France, in the Gepetto humanoid robot research team of the Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS-CNRS) in 2022 and 2023.

1.2. Acquired scientific research experience

Candidate Filip Bećanović enrolled in doctoral studies at the School of Electrical Engineering in Belgrade in the academic year 2020/21. in the module "System management and signal processing". During his doctoral studies, he fulfilled all obligations and passed all exams provided for in the study plan and program, with an average grade of 10. The list of passed subjects and obligations is given in the following table:

Subject/Obligation Code/Acronym	Subject/Obligation name	Grade	ECTS Credits
19D051TRS	Theory of Robotic Systems	10	9
19D051NM	Neural Networks	10	9
19D051MKR	Motor Control and Rehabilitation	10	9
19D081LA	Linear Algebra	10	9
19D051SRS	Special Purpose Robotic Systems	10	9
19D051USS	Complex Systems Control	10	9
19D081FAP	Functional Analysis and Applications	10	9
100021-19	19 Research work related to the dissertation I	/	24
100022-19	19 Research work related to the dissertation II	/	24
	Total credits:		111

The candidate is the author of 4 scientific papers, one of which was published in an international journal with an impact factor, and three papers were published in proceedings of international meetings. The list of publications in which Filip Bećanović is a co-author is given below:

- **F. Bećanović**, V. Bonnet, R. Dumas, K. Jovanović and S. Mohammed, "Force Sharing Problem During Gait Using Inverse Optimal Control," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 872-879, Feb. 2023, doi: [10.1109/LRA.2022.3217398](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3217398). [IF: 4.321].
- **F. Bećanović**, J. Miller, V. Bonnet, K. Jovanović and S. Mohammed, "Assessing the Quality of a Set of Basis Functions for Inverse Optimal Control via Projection onto Global Minimizers," *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, Cancun, Mexico, 2022, pp. 7598-7605, doi: [10.1109/CDC51059.2022.9993342](https://doi.org/10.1109/CDC51059.2022.9993342).
- M. Radmilović, Đ. Urukalo, M. Petrović, **F. Bećanović** and K. Jovanović, "Influence of Muscle Co-Contration Indicators for Different Task Conditions," *8th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2021)*,

Ethno Village Stanišići, Bosnia & Herzegovina, 2021, pp. 584, ISBN 978-86-7466-894-8.

- **F. Bečanović**, V. Bonnet, S. Mohammed i K. Jovanović, “Pronalazak Optimizacije Funkcije Kretanja iz Simulirane Demonstracije Pokreta Čučnja”, Zbornik radova 65. konferencije ETRAN 2021, Etno Selo Stanišići, Bosna i Hercegovina, 2021, pp. 551-555, ISBN 978-86-7466-894-8.

On June 20, 2023, at the School of Electrical Engineering in Belgrade, candidate Filip Bečanović had a public oral exam on the suitability of the proposed topic of the doctoral dissertation and the candidate, in front of a committee composed of:

1. Dr. Dragan Mirkov, full professor, University of Belgrade - Faculty of Sports and Physical Education,
2. Dr. Milica Janković, associate professor, University of Belgrade - School of Electrical Engineering (president of the committee),
3. Dr. Nenad Jovičić, associate professor, University of Belgrade - School of Electrical Engineering,
4. Dr. Maja Trumić, research associate, University of Belgrade - School of Electrical Engineering

The commission unanimously concluded that the candidate meets the requirements for work on the proposed topic of the doctoral dissertation and graded the exam as - **satisfactory**.

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

Based on the previous results of Filip Bečanović's previous work and activities and taking into account the aforementioned facts, the Commission gained insight into the candidate's abilities and scientific research work, and concludes that the candidate has acquired the necessary experience for scientific research work. The committee believes that the candidate is capable of achieving results during the preparation of the doctoral dissertation, which can be presented and verified by the international scientific community. The commission gives a positive opinion that the candidate Filip Bečanović continues with his research work and states that the candidate fulfills all the necessary and formal conditions to begin the dissertation.

2. Subject, aim, and significance of the research

In the research fields of ergonomics, biomechanics, and robotics, understanding human motor control has important implications – from advancing technologies in the healthcare and rehabilitation sector to designing more efficient robotic assistance [1]. Even though automation has been widely implemented in many industries, there still exist tasks that cannot be fully automated because of their flexible requirements, necessitating human-level perception, decision-making, and operation [2]. Many of these tasks involve heavy physical work, excessive repetition, awkward postures, and heavy lifting which are often identified to be the main causes of Musculoskeletal Disorders (MDs) [3]. MDs are prevalent among industrial workers, accounting for 80% of industrial diseases with an annual increase of 3% over the past decade. MDs can lead to early retirement and significant difficulties in accomplishing basic everyday tasks for affected people, thus presenting important economical and societal challenges from the point of view of both companies and governments [4]. Human-robot collaboration and exoskeletons are regarded as promising solutions for reducing MDs in industry by combining the human's superior perception and decision making with the robot's physical power generation [2]. Additionally, they have the potential to improve the future of assistive technology in rehabilitation centers [5]. However, a limited understanding of human motion and the inability of robots to algorithmically anticipate it during collaborative or assistive tasks hinder their safe coexistence with humans and successful task performance [6].

To overcome this challenge, a promising solution is to use data-driven Inverse Optimal Control (IOC) to learn human-like motions from demonstrations of a human supervisor [7, 8]. IOC has yielded encouraging results in various biomechanical and robotic applications, including torque-controlled locomotion [9], muscle-force sharing during locomotion [10], grasping [11], and industrial screwing [12], and has the potential to become essential in designing seamless and natural robotic assistance [13]. Furthermore, IOC can be used to determine changes in motion control objectives and segment human motion into phases [14, 15], leading to more informative feedback in the ergonomic evaluation of task difficulty for human workers [14]. This can also lead to more accurate human simulations and, in turn, facilitate the design of ergonomic workspaces that will reduce the risks of MDs [16].

IOC and similar techniques have been applied in numerous fields, including but not limited to control theory, artificial intelligence, robotics, health systems, energy systems, and marketing [7, 8, 17]. Despite efforts to survey and classify the numerous approaches [7, 8], there seems to be no consensus on nomenclature, assumptions, and solution methods. Regarding IOC, there remain questions pertaining to its resilience to noise [17, 18] or to the type of learning loss function to be used [17-19].

The focus of the research will be the study of human motor control via the use of data-driven IOC on experimentally acquired data. The expected use cases and applications of the results are in ergonomics, biomechanics, and robotics, with the potential for improving and advancing assistive technologies in industry, healthcare, and rehabilitation. Moreover, the research will partially focus on methods for data-driven IOC in and of itself, with the outputs of the research targeting impact in related fields of control theory and artificial intelligence.

- [1] Gualtieri, L., Rauch, E. and Vidoni, R., 2021. Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, p.101998.
- [2] Ajoudani, A., Zanchettin, A.M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K. and Khatib, O., 2018. Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Autonomous Robots*, 42, pp.957-975.
- [3] Da Costa, B.R. and Vieira, E.R., 2010. Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies. *American journal of industrial medicine*, 53(3), pp.285-323.
- [4] Gomez-Galan, M., Perez-Alonso, J., Callejón-Ferre, Á.J. and López-Martínez, J., 2017. Musculoskeletal disorders: OWAS review. *Industrial health*, 55(4), pp.314-337.
- [5] Huo, W., Mohammed, S., Moreno, J.C. and Amirat, Y., 2014. Lower limb wearable robots for assistance and rehabilitation: A state of the art. *IEEE systems Journal*, 10(3), pp.1068-1081.
- [6] Bauer, A., Wollherr, D. and Buss, M., 2008. Human–robot collaboration: a survey. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5(01), pp.47-66.
- [7] Ab Azar, N., Shahmansoorian, A. and Davoudi, M., 2020. From inverse optimal control to inverse reinforcement learning: A historical review. *Annual Reviews in Control*, 50, pp.119-138.
- [8] Chan, T.C., Mahmood, R. and Zhu, I.Y., 2021. Inverse optimization: Theory and applications. arXiv preprint arXiv:2109.03920.
- [9] Clever, D. and Mombaur, K.D., 2016, June. An Inverse Optimal Control Approach for the Transfer of Human Walking Motions in Constrained Environment to Humanoid Robots. In *Robotics: Science and systems*.
- [10] Becanovic, F., Bonnet, V., Dumas, R., Jovanovic, K. and Mohammed, S., 2023. Force Sharing Problem During Gait Using Inverse Optimal Control. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(2), pp. pp-872.
- [11] Berret, B., Chiovetto, E., Nori, F. and Pozzo, T., 2011. Evidence for composite cost functions in arm movement planning: an inverse optimal control approach. *PLoS computational biology*, 7(10), p.e1002183.
- [12] Sylla, N., Bonnet, V., Venture, G., Armande, N. and Fraitse, P., 2014, August. Human arm optimal motion analysis in industrial screwing task. In *5th IEEE RAS/EMBS international conference on biomedical robotics and biomechatronics* (pp. 964-969). IEEE.
- [13] Mainprice, J., Hayne, R. and Berenson, D., 2016. Goal set inverse optimal control and iterative replanning for predicting human reaching motions in shared workspaces. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(4), pp.897-908.
- [14] Lin, J.F.S., Bonnet, V., Panchea, A.M., Ramdani, N., Venture, G. and Kulić, D., 2016, November. Human motion segmentation using cost weights recovered from inverse optimal control. In *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)* (pp. 1107-1113). IEEE.
- [15] Westermann, K., Lin, J.F.S. and Kulić, D., 2020. Inverse optimal control with time-varying objectives: application to human jumping movement analysis. *Scientific reports*, 10(1), p.11174.
- [16] Chaffin, D.B., 2002. On simulating human reach motions for ergonomics analyses. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 12(3), pp.235-247.
- [17] Aswani, A., Shen, Z.J. and Siddiq, A., 2018. Inverse optimization with noisy data. *Operations Research*, 66(3), pp.870-892.
- [18] Colombel, J., Daney, D. and Charpillet, F., 2022, May. On the Reliability of Inverse Optimal Control. In *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 8504-8510). IEEE.
- [19] Bečanović, F., Miller, J., Bonnet, V., Jovanović, K. and Mohammed, S., 2022, December. Assessing the Quality of a Set of Basis Functions for Inverse Optimal Control via Projection onto Global Minimizers. In *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)* (pp. 7598-7605). IEEE.

3. Initial hypotheses

The research hypotheses are the following:

- Human motion in joint space and the forces of interaction with the environment can be estimated by coupling measurements from a motion capture system and force plates with the mechanical rigid-body linkage model of the human body [20, 21].
- For a given motor task, there are invariant aspects in the motion produced by the human motor control system, which can be measured and quantified, whether the motion is analyzed in joint space or in muscle space [9-16, 17-19].
- The invariant aspects of the motion produced by the motor control system can be modeled as an optimization process: a process of selection among infinite possibilities of the most appropriate motion. The invariant aspects can be identified using measured data of human motion with IOC. Once the invariant aspects of the motion are identified, they can be used in the future for predicting human motion, generating human-like trajectories, and analysis of the motion objectives [9-16, 17-19].

The initial hypotheses will be tested on real data. The study will contain experimental measurements of motion using a motion capture system and a force plate, and will concern human box-lifting motion which is of interest in the context of ergonomics. The study will also rely on open-source data [22, 23] of muscle forces in the lower limbs of hemiparetic patients during gait which are of interest in the context of rehabilitation.

[20] Müller, B., Wolf, S.L., Brüggemann, G.P., Deng, Z., McIntosh, A.S., Miller, F. and Selbie, W.S. eds., 2018. Handbook of human motion (pp. 1-2543). Berlin: Springer.

[21] Kajita, S., Hirukawa, H., Harada, K. and Yokoi, K., 2014. Introduction to humanoid robotics (Vol. 101, p. 2014). Springer Berlin Heidelberg.

[22] Meyer, A.J., Patten, C. and Fregly, B.J., 2017. Lower extremity EMG-driven modeling of walking with automated adjustment of musculoskeletal geometry. PloS one, 12(7), p.e0179698.

[23] Li, G., Shourijeh, M.S., Ao, D., Patten, C. and Fregly, B.J., 2021. How well do commonly used co-contraction indices approximate lower limb joint stiffness trends during gait for individuals post-stroke?. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8, p.588908.

4. Research methods

The research will begin by reviewing the state-of-the-art theory and applications of data-driven IOC [7,8], with a focus on its applications in human motion [9-16, 17-19]. The study will also briefly explore the connections between IOC and theories of multi-objective optimization [24] and bi-level optimization [25]. To illustrate the methods of IOC, the research will provide simple computational examples and accompanying graphical illustrations.

The study will explore the issue of "basis function selection" in the context of IOC, with a particular emphasis on convex quadratic basis functions [19]. Based on techniques from the field of polynomial optimization [26], the research will present a procedure for finding lower bounds on the error of an IOC procedure for a given data set and basis functions [19].

Motivated by the potential applications of IOC in designing rehabilitation technology, especially walking exoskeletons, the research will investigate how the human motor control system distributes muscle forces in the lower limbs during gait. The study will use IOC to analyze open-source walking data of hemiparetic patients. The open-source data was collected using EMG, a motion capture system, force-plates, and a treadmill. The open-source data contains a calibrated geometric model of the lower body as well as extracted reference muscle forces in the lower limbs [23]. The calibrated geometric model and the reference muscle forces will serve as a baseline, and an IOC procedure will be applied to infer which biomechanical objectives from the literature best explain the obtained data [10]. The study will analyze and compare the results of the simulation with the learned objectives against literature baselines.

The research will also include experiments on healthy human participants performing a box-lifting task, chosen due to an estimated 52% of work-related MDs being caused by overloading during lifting tasks [27]. The goal of the study will be to investigate short-term adaptations in the unconscious decision-making and control process of humans when performing a specific task. The study will use an Optitrack¹ motion capture system and an AMTI² Force Plate, along with the object to be lifted during the experiments and a table to place the object upon lifting.

The obtained experimental data will be input into the IOC framework to analyze the control objectives of human subjects during a box-lifting task. The study will analyze variations in retrieved control objectives across subjects, trials, and whether the subjects were instructed to use a squat lifting technique or not [27]. The effects of squat lifting will be analyzed, and conclusions will be compared to known results [27]. The learned control objectives will be used for simulation and compared to state-of-the-art approaches from the literature [28, 29].

[24] Miettinen, K., 1999. Nonlinear multiobjective optimization (Vol. 12). Springer Science & Business Media.

[25] Dempe, S., Kalashnikov, V., Pérez-Valdés, G.A. and Kalashnykova, N., 2015. Bilevel programming problems. Energy Systems. Springer, Berlin, 10, pp.978-3.

¹<https://optitrack.com/>

²<https://www.amti.biz/>

- [26] Lasserre, J.B., 2015. An introduction to polynomial and semi-algebraic optimization (Vol. 52). Cambridge University Press.
- [27] van der Have, A., Van Rossum, S. and Jonkers, I., 2019. Squat lifting imposes higher peak joint and muscle loading compared to stoop lifting. *Applied Sciences*, 9(18), p.3794.
- [28] Song, J., Qu, X. and Chen, C.H., 2015. Lifting motion simulation using a hybrid approach. *Ergonomics*, 58(9), pp.1557-1570.
- [29] Rakshit, R., Xiang, Y. and Yang, J., 2020. Dynamic-joint-strength-based two-dimensional symmetric maximum weight-lifting simulation: Model development and validation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 234(7), pp.660-673.

5. Expected scientific contributions

The expected scientific contributions of the thesis are:

- The systematic overview of the literature and methods in the field of optimization-based human motion modeling, and inverse optimal control. A partial overview of literature and methods in related fields of inverse reinforcement learning, multi-objective optimization, and bi-level optimization.
- Analysis and interpretation of the properties of current inverse optimal control methods, with remarks about practical implementations and performance.
- Design of a procedure for finding lower bounds on the error of an inverse optimal control procedure for a given data set and a given function basis, in the context of convex quadratic basis functions.
- Application of inverse optimal control to two real use cases, both related to applications in the context of ergonomics and rehabilitation. One use case being box-lifting, and another use case being muscle-force sharing in lower limbs during gait.
- Experimental human box-lifting data collection using a motion capture system and a force plate.
- Investigation of short-term adaptations of the unconscious decision-making and control process of humans when performing a specific box-lifting task, and analysis of the variations in retrieved control objectives across subjects, trials, and lifting techniques.
- Application of inverse optimal control to infer the biomechanical objectives that best explain the observed muscle force data in the lower limbs of hemiparetic patients during gait, using open-source data containing the reference muscle forces and a calibrated geometric model of the lower body. Comparison of the results against literature baselines.
- Validation of the learned control objectives from the above two use cases through simulation, and comparison with state-of-the-art approaches from the literature.

6. Research plan

The research will be conducted with the idea of applying IOC to real human data with different models and tasks in order to learn human motion objectives. Moreover, it will comprise an inquiry into IOC methods and algorithms and their applicability to simple mathematical models, in order to grasp the intricacies of application to complex models of human motion.

The objective will be to give a biomechanical interpretation of the results of the application of IOC to human motion, as well as to design more realistic simulations of human motion and shed light on the applicability of various IOC methods and algorithms to human motion models.

1) First phase – Familiarization

The study will start off with an analysis of the structure of the IOC problem through a literature review of related fields. In parallel, a survey on the modeling of human motion will be performed. Standard IOC methods will be tested on simple numerical examples, and the results will be reported. The advantages of different approaches will be evaluated and compared, and their applicability to models of human motion will be evaluated. Particular problems of IOC will be studied like the selection of basis functions, and contributions will be published.

2) Second phase – First case study – Muscle force sharing in lower limbs during gait

The task of muscle-force sharing in lower limbs during gait will be chosen as a first case study on the basis of the availability of open-source clinical research data [21] and because of its simple mathematical model.

3) Third phase – Second case study – Data collection – Box-lifting

The task of box-lifting will be chosen as a second case study on the basis of its important correlation with work-related MDs, due to its moderate complexity in modeling. An experiment will be designed to investigate the motor control objectives, and the short-term adaptations in the control process of the human when performing the box-lifting task. The data will be collected on healthy subjects with no history of MSDs, using an Optitrack motion capture and AMTI force plate, will be processed, and made publicly available. Known IOC techniques, as well as heuristic adaptations, will be applied to the data in order to analyze it within this framework. The intricacies of the application of IOC to more complex models will be discussed.

The case studies will be accompanied by detailed descriptions of the mathematical models and available datasets. The numerical methods will be explained, and numerical results will be comprehensively presented in tabular and figure forms. Biomechanical interpretation of the results alongside their implication for the design of better rehabilitation assistance and human-robot collaboration will be extensively discussed and cross-referenced with literature.

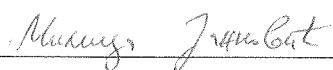
7. Conclusion and proposal

Based on the provided documentation and direct insight into the previous work of the candidate Filip Bečanović, the Commission concludes that the candidate Filip Bečanović, master engineer of electrical engineering and computer science, meets all the necessary conditions for the preparation of a doctoral dissertation entitled „**Uncovering optimal strategies in human motion through inverse optimal control**“. In addition to meeting the formal requirements, the candidate demonstrated the ability to systematically approach problem analysis, theoretical and practical knowledge in the fields of modeling, analysis and prediction of human motion and optimization theory, as well as competence in the presentation of results to the scientific community. The proposed dissertation topic is very current and based both on the research activities of the scientific community and on the modern technological needs of rehabilitation medicine and industrial ergonomics.

Based on the above, the Commission proposes to the Teaching and Scientific Council of the Faculty of Electrical Engineering of the University of Belgrade to authorize the preparation of a doctoral dissertation entitled „**Uncovering optimal strategies in human motion through inverse optimal control**“, to candidate Filip Bečanović, master of electrical engineering and computer science, under the mentorship of Dr. Kosta Jovanović, associate professor at the Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade, and Dr. Samer Mohamed, full professor at the Department of Science and Technology, University of Paris-Est Créteil, in France.

Belgrade, 21.06.2023.

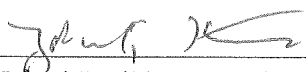
MEMBERS OF THE COMMISSION



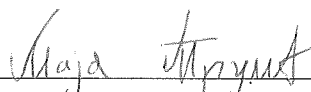
Dr. Milica Janović, Associate Prof.,
University of Belgrade –
School of Electrical Engineering



Dr. Dragan Mirkov, Prof.,
University of Belgrade –
Faculty of Sport and Physical Education



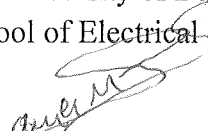
Dr. Nenad Jovičić, Associate Prof.,
University of Belgrade –
School of Electrical Engineering



Dr. Maja Trumić, Research Associate,
University of Belgrade –
School of Electrical Engineering



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



Dr. Samer Mohammed, Prof.,
University of Paris-Est Créteil –
Department of Science and Technology