

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ			
1. Датум и орган који је именовао комисију: 26.09.2024. год., бр. 012-199/50-2021, Декан Факултета техничких наука у Новом Саду на основу одлуке Наставно-научног већа факултета			
2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :			
1.	др Слободан Дудић	редовни професор	Мехатроника, роботика и аутоматизација и интегрисани системи; 25.09.2022. год.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Факултет техничких наука, Нови Сад		председник
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији
2.	др Мирко Раковић	редовни професор	Мехатроника, роботика и аутоматизација и интегрисани системи; 13.02.2024. год.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Факултет техничких наука, Нови Сад		члан
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији
3.	др Драгана Орос	ванредни професор	Мехатроника, роботика и аутоматизација и интегрисани системи; 15.07.2022. год.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Факултет техничких наука, Нови Сад		члан
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији
4.	др Маја Чавић	редовни професор	Машински елементи, механизми и инжењерске графичке комуникације; 25.09.2022. год.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Факултет техничких наука, Нови Сад		ментор
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији
5.	др Александар Родић	научни саветник	Роботика
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Институт Михајло Пупин, Београд		члан
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме: Марко, Милан, Пенчић
2. Датум рођења, општина, држава: 14.04.1984. год., Зајечар, Република Србија
3. Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив:
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука у Новом Саду, мастер инж. мехатронике
4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:
2012. год., Мехатроника

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Биолошки инспирисане роботске очи за истраживање невербалне комуникације између човека и хуманоидних робота

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација кандидата Марка Пенчић је написана на 139 страница, на српском језику, употребом латиничног писма. Садржи укупно 9 поглавља, и то:

1. Увод
2. Људско око
3. Преглед стања у области
4. Предмет истраживања
5. Механички систем
6. Електрични систем
7. Експеримент
8. Резултати и дискусија
9. Закључак

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Наслов дисертације је јасно формулисан и у потпуности указује на садржај рада.

Прво поглавље приказује уводна разматрања која указују да постоји све већа потреба за услужним роботима социјалне интелигенције ради интеграције са људима у свакодневном окружењу и обављања различитих задатака. Такви роботи морају бити способни за напредну друштвену интеракцију, као и стабилну манипулацију са људима и објектима. Ипак, већина услужних робота је пројектована за обављање неинтерактивних услуга попут чишћења, надзора или доставе. Услед раста потреба, од друштвених робота се очекује обављање интелигентних и друштвено интерактивних радњи као што су пријем и вођење људи, емоционално дружење, неки аспекти медицинске неге и др., што чини интеракцију између човека и робота кључном за побољшање аспеката квалитета живота и веће ефикасности у пружању услуга неге људи. Осим конкретног асистивног задатка, интерактивни роботи морају да испуне и одговарајуће социо-емоционалне захтеве. Да би друштвено асистивни робот био прихваћен као компетентан партнер људима, он мора да буде способан да комуницира са њима на ефикасан и јасан, али и природан и допадљив начин, употребом вербалних и невербалних сигнала. Лице је најизражајнији део тела, док су очи најизражајнији део лица, због чега очи представљају изразито моћно средство за реализовање невербалне комуникације. Све ово добија на значају ако се има у виду да су лица већине развијених робота крута и непокретна. Уколико се у очне јабучице уграде камере, онда је могуће употребом система визије остварити и неку од функција вештачког вида робота, као што су детекција лица особе или објекта испред робота, процена одстојања од робота и сл., чиме се омогућава шири спектар задатака које робот може да изврши. Због свега тога, очи су изразито важне и ефективне компоненте друштвено интерактивних робота, што имплицира оправданост њиховом развоју и реализацији.

Друго поглавље се бави структуром и диморфизмом људског ока, као и кинематичким параметрима очне јабучице, очних капака и обрва. Сходно томе, дефинисани су покрети ока, опсеги кретања и брзине, а њихово достизање представља основни захтев за реализацију. Поред примарне улоге – чуло вида, очи и обрве су кључни елементи за препознавање лица и реализовање невербалне комуникације. Функционалности роботског система, попут модела визуалне пажње и система за препознавање лица и објеката, омогућавају роботу да успостави и одржава контакт очима са саговорником, што одаје утисак фокусираности и природности интеракције. Могућност подешавања положаја обрва и капака омогућава генерисање фацијалних експресија робота ради симулације различитих различитих емоција. Трептање и брзине покрета јабучица и капака су веома важни аспекти функционалности који доприносе природности покрета робота.

Треће поглавље приказује преглед доступне литературе и податке о реализованим роботима који су у стању да на интуитиван и транспарентан начин изражавају емоције, налик људима, померањем карактеристичних делова лица, као што су очи, обрве и уста, независно од остатка лица. У конструкцији и реализацији лица друштвено интерактивних робота, постоје два основна приступа. Први се односи на крута лица са покретљивим механичким деловима – очне јабучице, очни капци, обрве и уста, док други приступ подразумева круто лице на коме се приказују очи, обрве и уста употребом светлећих диода; такође, могуће је комбиновати ова два приступа. У складу са тим, преглед литературе је обухватио две групе проблема: (1) роботи који имају крута лица и покретљиве механичке делове попут очних јабучица, очних капака и обрва, и (2) роботи који такође имају крута лица, при чему се очне јабучице и капци актуирају механички, док се обрве и/или уста приказују употребом светлећих диода. Додатно су анализирани: (1) број степени слободе (СС) очију и обрва због тога што већи број СС омогућава већи асортиман покрета и самим тим већи спектар невербалних израза лицем – емоције, (2) на који начин се врши пренос кретања са актуатора на очне јабучице, капке и обрве – излазни чланови погонских механизма, (3) врсте употребљених актуатора и сензора, и (4) способност робота да произведе фацијалне експресије.

Четврто поглавље описује предмет истраживања и приказује постављене хипотезе: (X1) могуће је моделирати механички систем (очних јабучица, очних капака и обрва) у складу са биолошким принципима и кинематиком људског ока, (X2) могуће је формирати структуру механичког система (очних јабучица, очних капака и обрва) тако да омогући безазорно бидирекционо кретање, (X3) могуће је формирати управљачки систем (очних јабучица, очних капака и обрва) тако да испуни кинематичке параметре људског ока, и (X4) могуће је експериментално доказати да је предложена

структура механичког система (очних јабучица, очних капака и обрва) способна да оствари невербалну комуникацију употребом лица робота. На основу свега тога, циљ истраживања је развој потпуно новог механичког, електричног и управљачког система роботских очију и обрва специјалне кинематске структуре, са карактеристикама мушког и женског ока, који на функционалном нивоу треба да омогући асортиман покрета који имају људске очи и обрве, ради симулације различитих емоционалних стања робота. Механички систем треба да представља напредну хардверску платформу за развој и имплементацију роботске визије и алгоритама различите намене као што је детекција лица и објеката, препознавање емоција, семантичка сегментација сцене, и др. Употребом система визије, који је подржан софистицираним механичким и управљачким системом, друштвено асистивни роботи потенцијално могу да растерете здравствени систем доприносећи квалитету неге оболелих и угрожених лица, као и безбедности здравствених радника.

Пето поглавље детаљно разматра механички систем очних јабучица, очних капака и обрва са аспекта структуре и димензија. Механички систем за пренос кретања са актуатора на излазне чланове – очне јабучице, очни капци и обрве, треба да испуни високе захтеве у погледу: (1) кинематике – бидирекционо кретање без трзаја током промене правца и смера наглим успоравањем, заустављањем и убрзавањем, (2) структуре – висока поузданост, висок степен искоришћења, и најважније, безазорност којом се обезбеђује висока тачност позиционирања и висока тачност и поновљивост покрета, што је од суштинског значаја, (3) величине и масе – што мање димензије и масе које имају реперкусије на расположив простор у глави робота (смештај механичког и електричног система), и инерцијалне силе, респективно. Најпре је урађен детаљан преглед трансмисија у складу са постављених захтевима. На основу избора оптималне трансмисије из скупа анализираних, предложене су структуре механичких система очних јабучица, очних капака и обрва, на основу чега је урађена кинематичка анализа и оптимална димензиона синтеза. Такође, испитан је однос промене положаја улазног/излазног члана свих механизма ради процене утицаја на управљачки систем – добијене промене су блиске линеарним што је веома повољно са аспекта управљања. Због структуре веза, сви механизми обезбеђују ниска трења и мале зазоре, што је веома важно за иницирање покрета без трзаја, као и висока тачност позиционирања која обезбеђује високу тачност и поновљивост покрета.

Шесто поглавље детаљно разматра електрични систем очних јабучица, очних капака и обрва. Актуатори за покретање механичких система очних јабучица, очних капака и обрва, треба да испуне високе захтеве у погледу: (1) кинематике – бидирекционо кретање у различитим опсезима, као и *min/max* брзине и убрзања што је од суштинског значаја за глатке покрете праћење и рапидне – сакадичне покрете, (2) структуре – безазорност актуатора, (3) сензорике и управљања – висока тачност позиционирања и поновљивост покрета, затворена управљачка спрега, (4) величине и масе – мале димензије и масе актуатора и читавог управљачког система имајући у виду расположив простор у глави робота за смештај механичког система и актуатора са управљањем. Најпре је урађен детаљан преглед актуатора у складу са постављеним захтевима. На основу избора оптималног типа актуатора из скупа анализираних, предложена је структура управљачког система јабучица, капака и обрва. Компактни системи који обухватају мотор, редуктор, сензор и мотор-контролер, предложени су за покретање механизма. Најпогодније решење за управљање је комбинација мотора једносмерне струје са одговарајућим редуктором и сензором апсолутног положаја или инкременталним енкодером. Даље је предложена структура серво контролера за управљање сваког мотора понаособ, док је на крају приказан избор актуатора и управљања за покретање сегмента ока.

Седмо поглавље експериментално утврђује у којој мери је предложено решење очију и обрва способно да испољи емоције групи људских субјеката. Људи, као друштвена бића, теже интеракцији са другим субјектима и недостатак експресије осећања могу протумачити као незаинтересованост саговорника. Због тога је важно да робот буде способан да испољава емоције и комуницира са људима на природан и транспарентан начин, употребом вербалних и невербалних сигнала. Према Екману, шест основних емоција релевантних за експеримент је изабрано: изненађење, страх, гађење, бес, срећа и туга. На основу изгледа робота МАРКО, дизајниран је дводимензионални приказ његовог лица, са једном изменом – доњи део лица који обухвата нос и уста је прекривен заштитином маском. Ова измена је урађена из неколико разлога: (1) пажња субјеката треба да буде усмерена на горњу половину лица робота – развијене очи и обрве, као и

њихову способност да испоље емоције, (2) доња половина лица је крута и непокретна, и због тога није од значаја за експеримент – треба напоменути да су нос и уста изразито важни делови лица за испољавање и препознавање емоција, и приказати их као непокретне уз друге покретне делове лица (очи и обрве), учинило би испољене изразе лица нескладним што би потенцијално збунило субјекте, (3) лице робота МАРКО је срцолико и већ на први поглед привлачи пажњу околине својим позитивним ставом, без обзира на положај покретних делова лица – због тога је важно прекрити лице и пажњу субјеката усмерити на горњи део лица и регију ока, и (4) глобална пандемија вирусом SARS-CoV-2 наметнула је употребу заштитне маске у комуникацији, што је данас општеприхваћено.

Осмо поглавље сумира резултате истраживања и обухвата: (1) поређење приказаног механичког система са кинематиком људског ока, (2) предности усвојене структуре механизма и њихову реконфигурабилност, (3) способност механичког система да произведе фацијалне експресије. Механички систем се састоји од три подсистема који омогућавају кретање очних јабучица, очних капака и обрва независно од остатка лица робота; захваљујући својој структури, механички систем јабучица омогућава све покрете ока што је главни услов за реализовање бинокуларне функције вештачког вида робота и стереовизују. Већина усвојених механизма за погон механичког система јабучица, капака и обрва су полужни, док је за подизање обрва усвојен механизам заснован на навојном вретену; због тога је испитана реконфигурабилност полужних механизма тако да кинематика ока остане ненарушена. Циљ експеримента је био да се утврди да ли је предложено решење структуре роботских очију и обрва способно да ефикасно изрази емоције човеку и у којој мери; одговор на ово питање је тражен експериментом у којем су субјектима приказивани видео клипови робота МАРКО како изражава основне емоције лицем које је као такве дефинисао Екман.

Девето поглавље приказује закључак и допринос дисертације – главни допринос су четири универзална, напредна и софистицирана хардверска решења роботских очију са 7 и 8 СС од чега су два са карактеристикама мушког, а два са карактеристикама женског ока, у потпуности заснована на кинематичким принципима људског ока. Веома важан аспект функционалности је и употреба безазорних механизма, што је од суштинског значаја за имплементацију роботске визије и алгоритама различите намене, нарочито ако се има у виду да ће камере бити лоциране у очима робота. Приказани кинематички модел механичког система ока, заједно са поступком оптималне димензионе синтезе, може бити од велике помоћи истраживачима приликом развоја роботских очију. Могућност примене резултата се огледа и у томе да, употребом приказаног алгоритма развоја и поступака оптималне синтезе заснованим на кинематичким моделима, могуће је пројектовати и прилагодити очи без обзира на облик и запремину главе хуманоида, што приказано решење карактерише универзалним, за оба пола, имајући у виду кантални нагиб очних капака. Осим тога, приказана решења су јефтина, малих су димензија и маса, једноставна за реализацију, имплементацију и комерцијализацију.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ:

У оквиру истраживања током рада на докторској дисертацији, кандидат је објавио укупно 33 научне публикације, од којих 5 у часописима са СЦИ листе – један рад категорије М21, два рада категорије М22 и два рада категорије М23. Преостале публикације су из категорија М24, М33, М51 и М53. Радови су побројани у складу са “Правилником о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача”.

Рад у врхунском међународном часопису (M22, IF: 3.9, Engineering, Electrical & Electronic):

1. **M. Penčić**, M. Čavić, D. Oros, P. Vrgović, K. Babković, M. Orošnjak, D. Čavić, Anthropomorphic Robotic Eyes: Structural Design and Non-Verbal Communication Effectiveness. Sensors, vol. 22, no. 8, pp. 3060-1–3060-45, 2022. ISSN: 1424-8220, DOI: 10.3390/s22083060.

Рад у истакнутом међународном часопису (M22, IF: 1.093, Thermodynamics):

1. **M.M. Penčić**, B.A. Borovac, D.I. Kovačević, M.V. Čavić, Development of the Multi-Segment Lumbar Spine for Humanoid Robots. Thermal Science, vol. 20, suppl. 2, pp. S581-S590, 2016. ISSN: 0354-9836, DOI: 10.2298/TSCI151005040P
2. M.V. Čavić, **M.M. Penčić**, M.Ž. Zlokolica, Adaptive Continuously Variable Transmission Used for

Maintaining Stationary Regime of Driving Machine. Thermal Science, vol. 20, suppl. 2, pp. S525-S536, 2016. ISSN: 0354-9836, DOI: 10.2298/TSCI151004035C

Рад у међународном часопису (M23, IF: 1.566, Engineering, Mechanical):

1. M. Čavić, M. Penčić, D. Oros, D. Čavić, M. Orošnjak, M. Rackov, High-Capacity Stacking Apparatus for Thermoforming Machine – Part I: Synthesis of Intermittent Mechanisms as Stacker Driving Units. *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 8, pp. 1–18, 2021. ISSN: 1687-8140, DOI: 10.1177/168781402111040892
2. M. Penčić, M. Čavić, D. Oros, D. Čavić, M. Orošnjak, V. Karanović, High-Capacity Stacking Apparatus for Thermoforming Machine – Part II: Structural Design of the Adjustable Stacker Driving Mechanism. *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 10, pp. 1–19, 2021. ISSN: 1687-8140, DOI: 10.1177/168781402111052458

Рад у националном часопису међународног значаја (M24):

3. M. Penčić, M. Čavić, B. Borovac, Development of the Low Backlash Planetary Gearbox for Humanoid Robots. *FME Transactions*, vol. 45, no. 1, pp. 122–129, 2017. ISSN 1451-2092, UDK: 621, DOI: 10.5937/fmet1701122P

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

1. M. Penčić, M. Čavić, B. Borovac, Analysis of Mechanisms for Achieving Different Ways of Power Transmission and Motion of the Anthropomorphic Robots Upper Body. *Proceedings of the 5th International Conference on Power Transmission (BAPT 2016)*, Ohrid, Macedonia, 5-8 October 2016, pp. 115–122. ISBN: 978-608-4624-25-7
2. M. Penčić, S. Savić, M. Čavić, B. Borovac, Z. Lu, Development of the Lower Body of Assistive Humanoid Robot MARKO. *Proceedings of the 8th International Scientific and Expert Conference (TEAM 2016)*, Trnava, Slovakia, 19-21 October 2016. pp. 23–28. ISBN: 978-80-8096-237-1
3. M. Penčić, M. Čavić, M. Rackov, B. Borovac, Z. Lu, Optimization of Planetary Gear Trains with Spur, Helical and Double Helical Gears. *Proceedings of the 8th International Scientific and Expert Conference (TEAM 2016)*, Trnava, Slovakia, 19-21 October 2016, pp. 29–34. ISBN: 978-80-8096-237-1
4. M. Penčić, M. Čavić, M. Rackov, B. Borovac, Assistive Humanoid Robot MARKO: Development of the Waist Mechanism. *Proceedings of the 13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering (DEMI 2017)*, Banja Luka, B&H, 26-27 May 2017, pp. 495–500. ISBN: 978-99938-39-72-9
5. M. Penčić, M. Čavić, S. Savić, M. Gnjatović, B. Borovac, Z. Lu, Social Humanoid Robot SARA: Development and Dilemmas. *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2017)*, Kladovo, Serbia, 5-8 June 2017, pp. ROI2.5-1–ROI2.5-6. ISBN: 978-86-7466-692-0
6. M. Penčić, M. Čavić, M. Rackov, B. Borovac, I. Knežević, M. Zlokolica, Kinematic Analysis of the Robot Eyes Drive System with 7 DOFs. *Proceedings of the 8th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET 2017)*, Novi Sad, Serbia, 8-10 June 2017, pp. PS-1.14-1–PS-1.14-5. ISBN: 978-86-7892-934-2
7. M. Penčić, M. Čavić, M. Rackov, Optimal Synthesis of the Robot Eyes Drive System with 7 DOFs. *Proceedings of the 8th International Scientific Conference on Research and Development of Mechanical Elements and Systems (IRMES 2017)*, Trebinje, B&H, 7-9 September 2017, pp. 111–116. ISBN: 978-9940-527-53-2
8. M. Penčić, M. Čavić, B. Borovac, M. Rackov, Social Humanoid Robot SARA: Dynamic Analysis of the Arm. *Proceedings of the 17th International Scientific Conference on INDUSTRIAL SYSTEMS (IS 2017)*, Novi Sad, Serbia, 5-6 October 2017, pp. 130–135. ISBN: 978-86-7892-978-6
9. M. Penčić, M. Čavić, M. Rackov, B. Borovac, Z. Lu, Drive System of the Robot Eyeballs and Eyelids with 8 DOFs. In book: I. Doroftei, C. Oprisan, D. Pislă, E.-C. Lovasz (Eds.) *New Advances in Mechanism and Machine Science: Proceedings of the 12th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines (SYROM 2017)*, MMS, vol. 57, pp. 47–56. Springer, Cham, 2018. ISBN: 978-3-319-79110-4, DOI: 10.1007/978-3-319-79111-1_5
10. M. Penčić, M. Čavić, M. Rackov, B. Borovac, Z. Lu, Kinematic-Dynamic Analysis of the Cam-

Worm Mechanism for Humanoid Robots Shrug. In book: I. Doroftei, C. Oprisan, D. Pisla, E.-C. Lovasz (Eds.) *New Advances in Mechanism and Machine Science: Proceedings of the 12th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines (SYROM 2017)*, MMS, vol. 57, pp. 37–45. Springer, Cham, 2018. ISBN: 978-3-319-79110-4, DOI: 10.1007/978-3-319-79111-1_4

11. **M. Penčić**, M. Čavić, B. Borovac, Z. Lu, M. Rackov, *Robotic Eyes with 7 DOFs: Structural Design and Motion Simulation*. In book: V. Arakelian, P. Wenger (Eds.) *ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control: Proceedings of the 22nd CISM-IFTToMM Symposium*, CISM, vol. 584, pp. 52–60. Springer, Cham, 2019. ISBN: 978-3-319-78962-0, DOI: 10.1007/978-3-319-78963-7_8
12. **M. Penčić**, M. Čavić, B. Borovac, Z. Lu, *Social Humanoid Robot SARA: Development and Realization of the Shrug Mechanism*. In book: A. Gasparetto, M. Ceccarelli (Eds.) *Mechanism Design for Robotics: Proceedings of the 4th IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics (MEDER 2018)*, MMS, vol. 66, pp. 369–377. Springer, Cham, 2019. ISBN: 978-3-030-00364-7, DOI: 10.1007/978-3-030-00365-4_44
13. **M. Penčić**, M. Čavić, *Eyebrows Mechanism with 2 DOFs for Expressing Nonverbal Communication of Socially Interactive Robots*. *Proceedings of the 9th International Scientific and Expert Conference (TEAM 2018)*, Novi Sad, Serbia, 10-12 October 2018, pp. 66–70. ISBN: 978-86-6022-098-3
14. B. Borovac, M. Raković, M. Gnjatović, M. Nikolić, V. Delić, **M. Penčić**, S. Savić, J. Tasevski, D. Mišković, A. Mikov, R. Krasnik, *Development and Testing of Humanoid Robot MARKO – An Assistant in Therapy for Children*. *Proceedings of the 14th International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2018)*, Niš, Serbia, 14-16 November 2018, pp. 12–15. ISBN: 978-86-6125-205-1
15. **M. Penčić**, M. Čavić, B. Brkić, M. Rackov: *A Novel 3 DOFs Waist Mechanism for Humanoid Robots: Kinematic Analysis and Motion Simulation*. In book: T. Uhl (Ed.) *Advances in Mechanism and Machine Science: Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science (IFTToMM WC 2019)*, MMS, vol. 73, pp. 2809–2818. Springer, Cham, 2019. ISBN: 978-3-030-20130-2, DOI: 10.1007/978-3-030-20131-9_278
16. **M. Penčić**, B. Brkić, M. Čavić, M. Rackov: *Dynamic Analysis and Motion Simulation of the 3 DOFs Waist Mechanism for Humanoid Robots*. In book: C.-H. Kuo, P.-C. Lin, T. Essomba, G.-C. Chen (Eds.) *Robotics and Mechatronics: Proceedings of the 6th IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics (ISRM 2019)*, MMS, vol. 78, pp. 63–75. Springer, Cham, 2020. ISBN: 978-3-030-30035-7, DOI: 10.1007/978-3-030-30036-4_6
17. B. Borovac, M. Raković, M. Nikolić, V. Delić, S. Savić, **M. Penčić**, D. Mišković, *Robotics as Assistive Technology for Treatment of Children with Developmental Disorders – Example of Robot MARKO*. In book: M. Rackov, R. Mitrović, M. Čavić (Eds.) *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering: Proceedings of the 11th International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering (KOD 2021)*, MMS, vol. 109, pp. 69–76. Springer, Cham, 2022. ISBN: 978-3-030-88464-2, DOI: 10.1007/978-3-030-88465-9_4
18. D. Oros, **M. Penčić**, M. Čavić, M. Orošnjak, D. Čavić, Z. Lu, *PAM Actuators Applications in Robotics: Rapid Review*. *Proceedings of the 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2023)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 5-8 June 2023, pp. 1–6. ISBN: 979-8-3503-0711-5, DOI: 10.1109/IcETRAN59631.2023.10192233

Рад у врхунском часопису националног значаја (M51):

1. **M. Penčić**, M. Čavić, B. Borovac, *Optimal Synthesis of the Worm-Lever Mechanism for Humanoid Robots Shrug*. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 245–256, 2017. ISSN: 1451-4869, UDK: 007.52, DOI: 10.2298/SJEE161117005P

Рад у међународном часопису који не припада СЦИ листи (M53):

1. **M. Penčić**, M. Čavić, S. Savić, M. Rackov, B. Borovac, Z. Lu, *Assistive Humanoid Robot MARKO: Development of the Neck Mechanism*. *MATEC Web of Conferences*, vol. 121, no. 1, pp. 08005-1–08005-8, 2017. ISSN: 2261-236X, DOI: 10.1051/mateconf/201712108005
2. **M. Penčić**, M. Rackov, M. Čavić, I. Kiss, V.G. Cioată, *Social Humanoid Robot SARA: Development of the Wrist Mechanism*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 294, no. 1, pp. 012079-1–012079-10, 2017. ISSN: 1757-899X, DOI: 10.1088/1757-899X/294/1/012079

3. Z. Lu, R. Jiang, Z. Ma, X. Shen, **M. Penčić**, B. Borovac, M. Mernik, B. Li, Design of Semantic Training System for Robot Assisted Cerebral Palsy Rehabilitation. *Gaojishu Tongxin/High Technology Letters*, vol. 29, no. 2, pp. 183–188, 2019. ISSN: 1002-0470, DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2019.02.009
4. Z. Lu, H. Wang, X. Shen, **M. Penčić**, Y. Liu, C. Shan, Y. Zhao, R. Ilieva, B. Nemeč, M. Mernik, Design of DCI-Based Robot Assisted Cerebral Palsy Rehabilitation Facial Expression Training System. *Gaojishu Tongxin/Chinese High Technology Letters*, vol. 31, no. 2, pp. 207–213, 2021. ISSN: 1002-0470, DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2021.02.011
5. Z. Lu, H. Wang, Z. Ma, X. Shen, **M. Penčić**, Y. Liu, C. Shan, Y. Zhao, R. Ilieva, T. Kosar, M. Horvat, M. Mernik, DSL-Based Optimization of Intelligent Rehabilitation System for Cerebral Palsy. *Gaojishu Tongxin/Chinese High Technology Letters*, vol. 31, no. 7, pp. 773–780, 2021. ISSN: 1002-0470, DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2021.07.011
6. Z. Lu, Q. Wang, H. Wang, X. Shen, **M. Penčić**, Y. Liu, C. Shan, Y. Zhao, M. Čavić, R. Ilieva, M. Mernik, Design of a BCI-Based Robot Assisted System for Facial Expression Rehabilitation of CP. *Gaojishu Tongxin/Chinese High Technology Letters*, vol. 33, no. 4, pp. 419–427, 2023. ISSN: 1002-0470, DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2023.04.009
7. Q. Wang, Z. Lu, X. Shen, C. Shan, Y. Liu, Y. Chen, Y. Zhao, **M. Penčić**, M. Čavić, R. Ilieva, M. Mernik, Survey of Key HCI Technologies in Social Rehabilitation Training System for Cerebral Palsy. *Gaojishu Tongxin/Chinese High Technology Letters*, vol. 33, no. 5, pp. 537–549, 2023. ISSN: 1002-0470, DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2023.05.010
8. Z. Lu, Q. Wang, **M. Penčić**, M. Čavić, R. Ilieva, Design of Rehabilitation Training System of Social Helpless Shoulder Shrugging Movement for Cerebral Palsy Based on Human-Computer Interaction Technology. *Gaojishu Tongxin/Chinese High Technology Letters*, vol. 33, no. 6, pp. 652–660, 2023. ISSN: 1002-0470, DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2023.06.010

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

Ово истраживање приказује биомиметички дизајн механичког система очију за мушке и женске хуманоидне роботе, у складу са могућим преференцијама потенцијалних корисника, са адекватним кинематским карактеристикама, који на функционалном нивоу треба да омогући спектар покрета који имају људске очи и обрве ради симулације различитих емоционалних стања робота. На основу тога су формиране хипотезе и сваки од наведених проблема је решаван.

X1: Могуће је моделирати механички систем (очних јабучица, очних капака и обрва) у складу са биолошким принципима и кинематиком људског ока.

Приказани механички систем омогућава независне покрете јабучица, капака и обрва од остатка лица и састоји се од три подсистема: (1) механички систем очних јабучица, (2) механички систем очних капака и (3) механички систем обрва. Механички систем јабучица има 3 или 4 СС омогућавајући заједничке *pitch* и независне *yaw* покрете или независне *pitch* и *yaw* покрете сваког ока, респективно. Захваљујући својој структури, способан је да произведе све покрете јабучица у складу са биолошким принципима ока, што је од изузетног значаја за реализовање бинокуларне функције вештачког вида робота и стереовизију. Механички систем очних капака има 4 СС и омогућава независну ротацију сваког капака, док механички систем обрва има 2 СС и омогућава подизање обе обрве истовремено, као и ротацију обрва у супротним смеровима. Са аспекта кинематике, механички системи јабучица, капака и обрва су у великој мери способни да произведу покрете налик људским – врсте покрета, опсеи кретања и угаоне брзине, што је од суштинског значаја за генерисање фацијалних експресија и невербалну комуникацију робота на природан и интуитиван начин. Према томе, закључује се да је прва хипотеза потврђена.

X2: Могуће је формирати структуру механичког система (очних јабучица, очних капака и обрва) тако да омогући бидирекционо кретање без зазора.

На основу избора оптималне трансмисије из скупа анализираних, предложене су структуре механичких система очних јабучица, очних капака и обрва, засноване на полужним механизмима и навојном вретену, на основу чега је урађена кинематичка анализа и оптимална димензиона синтеза у складу са кинематиком људског ока. Такође, испитан је однос промене положаја улазног/ излазног члана полужних механизма ради процене утицаја на управљачки систем – добијене промене су врло блиске линеарним што је веома повољно са аспекта управљања. Осим тога, размотрена је и потврђена реконфигурабилност полужних механизма, што је од изузетног значаја приликом дизајна главе хуманоида. Због структуре веза, сви механизми обезбеђују ниска трења и мале зазоре, што је веома важно за иницирање покрета без трзаја, као и високу тачност позиционирања која обезбеђује високу тачност и поновљивост покрета. Према томе, закључује се да је друга хипотеза потврђена.

X3: Могуће је формирати управљачки систем (очних јабучица, очних капака и обрва) тако да испуни кинематичке параметре људског ока.

Анализом различитих типова актуатора је утврђено да електрични актуатори једини испуњавају задате параметре система. Као резултат анализе, предложени су компактни системи за покретање механизма који обухватају мотор, планетарни редуктор, сензор и мотор контролер. Најпогодније решење за управљање је комбинација мотора једносмерне струје са одговарајућим редуктором и сензором апсолутног положаја или инкременталним енкодером. Структура серво контролера за управљање сваког мотора понаособ је такође предложена, док је на крају приказан начин избора актуатора за покретање сегмента ока. Према томе, закључује се да је трећа хипотеза потврђена.

X4: Могуће је доказати да је предложена структура механичког система (очних јабучица, очних капака и обрва) способна да оствари невербалну комуникацију употребом лица робота.

Успех механичког система је зависио и од тога у којој мери је способан да омогући роботу генерисање фацијалних експресија, због чега је урађен експеримент. У ту сврху је употребљено дводимензионо лице робота МАРКО које је било прекривено заштитном маском ради фокусирања субјектата на регију ока. Субјекти су оцењивали ефикасност невербалне комуникације робота приказивањем кратких видео клипова. Предложена структура роботских очију је способна да у великој мери ефикасно изрази емоције љутне и туге, док делимично емоцију изнанађења. Изрази гађења, среће и страха су слабо идентификовани и често погрешно тумачени од стране субјектата као друге емоције. Потпуно разоткривање лица, поред очију и обрва, захтева присуство усана и

њихов положај, док је за емоцију гађења специфично померање носа и чела. Према томе, закључује се да је четврта хипотеза делимично потврђена.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:

Дисертација је добро структурирана, а резултати истраживања систематично приказани и јасно формулисани. Све приказане резултате и новине прате одговарајућа образложења. Употребљена литература указује да су размотрени актуелни ставови везани за предмет истраживања. На основу добијених резултата, формирани су закључци и утврђени оригинални доприноси дисертације. Кандидат је овладао одговарајућим знањима из области и у потпуности је спровео истраживање према плану дефинисаном у пријави теме дисертације. Комисија констатује да приказани резултати потврђују постављене хипотезе и Комисија позитивно оцењује начин приказа и тумачења резултата истраживања докторске дисертације.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

Дисертација је написана и структурирана у складу са образложењем и циљевима истраживања које је кандидат предложио приликом пријаве теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Дисертација садржи све битне елементе – јасно су постављени и дефинисани предмет, хипотезе и циљеви истраживања, коришћене су адекватне истраживачке методе и сасвим јасно су приказани резултати и допринос дисертације.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Главни допринос дисертације су четири универзална, напредна и софистицирана хардверска решења роботских очију са 7 и 8 СС од чега су два са карактеристикама мушког, а два са карактеристикама женског ока, а која у потпуности заснована на кинематичким принципима људског ока. Веома важан аспект функционалности је и употреба беззорних механизма, што је од суштинског значаја за имплементацију роботске визије и алгоритама различите намене, нарочито ако се има у виду да ће камере бити лоциране у очима робота. Приказани кинематички модел механичког система ока, заједно са поступком оптималне димензионе синтезе, може бити од велике помоћи истраживачима приликом развоја роботских очију. Могућност примене резултата се огледа и у томе да, употребом приказаног алгорита развоја и поступака оптималне синтезе заснованим на кинематичким моделима, могуће је пројектовати и прилагодити очи без обзира на облик и запремину главе хуманоида, што приказано решење карактерише универзалним, за оба пола, имајући у виду кантални нагиб очних капака. Осим тога, приказана решења су јефтина, малих су димензија и маса, једноставна за реализацију, имплементацију у комерцијализацију.

4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?

Докторска дисертација не садржи недостатке који би утицали на резултате истраживања.

5. Образложење резултата провере оригиналности рада (нумерички и наративно):

Библиотека Факултета техничких наука је извршила проверу дисертације у софтверу за детекцију плагијаризма *iThenticate*, при чему је утврђена подударност од свега 2% и углавном се односи на податке из рада на СЦИ листи које је кандидат претходно објавио у складу са *Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду*. Комисија констатује да је кандидат адекватно цитирао коришћену литературу и да оригиналност добијених научних резултата није упитна.

X ПРЕДЛОГ:

На основу наведеног, комисија предлаже:

а) да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана;

б) да се докторска дисертација врати кандидату на дораду (да се допуни односно измени);

в) да се докторска дисертација одбије.

Место и датум: Нови Сад, 30.09.2024. год.

ПОТПИС ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ:

1.Председник:

др Слободан Дудић, редовни професор

2.Члан:

др Мирко Раковић, редовни професор

3.Члан:

др Драгана Орос, ванредни професор

4.Ментор:

др Маја Чавић, редовни професор

5.Члан:

др Александар Родић, научни саветник

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај и да исти потпише.