



**ИЗВЈЕШТАЈ**  
*о ојени урађене докторске дисертације*

**1. ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ**

Орган који је именовано комисију: Научно-наставно вијеће Електротехничког факултета  
Универзитета у Бањој Луци

Датум именовања комисије: 18. 11. 2024. године

Број одлуке: 20/3.879-4/24

Чланови комисије:

1.	Крчмар Игор Презиме и име	ванредни професор Звање	Електротехника, електроника, информационо инжењерство и рачунарске и информационе науке, Аутоматика и роботика Научно поље и ужа научна област
	Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет Установа у којој је запослен-а		предсједник Функција у комисији
2.	Ракић Александар Презиме и име	редовни професор Звање	Електротехника, електроника, информационо инжењерство и рачунарске и информационе науке, Аутоматика Научно поље и ужа научна област
	Електротехнички факултет Универзитета у Београду Установа у којој је запослен-а		члан Функција у комисији
3.	Рисојевић Владимир Презиме и име	ванредни професор Звање	Електротехника, електроника, информационо инжењерство и рачунарске и информационе науке, Општа електротехника Научно поље и ужа научна област
	Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет Установа у којој је запослен-а		члан Функција у комисији

**2. ПОДАЦИ О СТУДЕНТУ**

Име, име једног родитеља, презиме: Велибор, Миодраг, Ђалић

Датум рођења: 29. 7. 1982. године					
Мјесто и држава рођења: Чајниче, Босна и Херцеговина					
<b>2.1. Студије првог циклуса или основне студије или интегрисане студије</b>					
Година уписа:	2001. год.	Година завршетка:	2008. год.	Просјечна оцјена током студија:	8,92
Универзитет: Универзитет у Новом Саду					
Факултет/и: Факултет техничких наука					
Студијски програм: Рачунарство и аутоматика - Аутоматика и управљање системима					
Стечено звање: Дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства - мастер					
<b>2.2. Студије другог циклуса или мастер студије</b>					
Година уписа:	2001. год.	Година завршетка:	2008. год.	Просјечна оцјена током студија:	8,92
Универзитет: Универзитет у Новом Саду					
Факултет/и: Факултет техничких наука					
Студијски програм: Рачунарство и аутоматика - Аутоматика и управљање системима					
Назив завршног рада другог циклуса или мастер тезе, датум одбране: Повећање енергетске ефикасности клима коморе у оквиру система за гријање, вентилацију и климатизацију примјеном адаптивног алгорита управљања, 23. 4. 2008. године					
Ужа научна област завршног рада другог циклуса или мастер тезе: Аутоматско управљање системима					
Стечено звање: Дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства - мастер					
<b>2.3. Студије трећег циклуса</b>					
Година уписа:	2009. год.	Број ECTS остварених до сада:	60	Просјечна оцјена током студија:	9,50
Факултет/и: Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци					
Студијски програм: Информационо-комуникационе технологије					
<b>2.4. Приказ научних и стручних радова студента</b>					
РБ	Подаци о референци				Категорија <sup>1</sup>
1.	Д. Косић, В. Ђалић, П. Марић, “Побољшање конвергенције алгоритама за калибрацију геометрије робота”, ИНФОТЕХ -				Зборник радова међународног научног

<sup>1</sup> Категорија се односи на оне часописе и научне скупове који су категорисани у складу са Правилником о публикацији научних публикација („Службени гласник РС”, бр. 77/17) и Правилником о мјерилима за остваривање и финансирање Програма одржавања научних скупова („Службени гласник РС”, бр. 102/14) односно припадност рада часописима индексираним у свјетским цитатним базама.

	ЈАХОРИНА, свезак 9, реф. А-19, стр. 92-95, март 2010.	скупа прве категорије	
<p><i>Кратак опис садржаја:</i> У раду се третира проблем калибрације произвољног манипулатора помоћу отвореног кинематичког ланца. Тежиште рада је на анализи и побољшању конвергенције алгоритама у циљу смањења осјетљивости на почетну процјену. Разматран је утицај избора скупа конфигурација на квалитет рјешења за три нумеричка метода: Newton-Raphson, општи итеративни метод и Levenberg-Marquardt. Процјене инкремента за корекцију параметара геометрије и грешке процјене положаја врха манипулатора у радном простору су коришћени за процјену и илустрацију конвергенције. Резултати проведених симулација потврђују побољшања постигнута предложеним алгоритмима.</p>			
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u>	НЕ
РБ	Подаци о референци	Категорија	
2.	Д. Косић, В. Ђалић, П. Марић, “Испитивање поновљивости манипулатора кориштењем стерео вида”, ИНДЕЛ, Зборник радова, стр. 293-295, Бања Лука, новембар 2010.	Зборник радова међународног научног скупа прве категорије	
<p><i>Кратак опис садржаја:</i> Поновљивост или тачност понављања положаја врха манипулатора је статистичка величина везана за тачност манипулатора која представља одступање од средње вриједности остварених позиција. Тежиште овог рада је на примјени стерео вида за испитивање поновљивости манипулатора. Резултати проведених експеримената показују да се стерео вид веома ефикасно може искористити за испитивање поновљивости манипулатора.</p>			
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u>	НЕ
РБ	Подаци о референци	Категорија	
3.	D. Kosić, V. Đalić, P. Marić, “Robot geometry calibration in an open kinematic chain using stereo vision”, Proc. of International Scientific Conference UNITECH’11, pp. 528-531, Gabrovo, November 2010.	Научни рад на научном скупу међународног значаја, штампан у цјелини	
<p><i>Кратак опис садржаја:</i> У раду се третира проблем калибрације геометрије манипулатора у отвореном кинематичком ланцу кориштењем стерео вида. Двије камере се користе за мјерење позиције врха манипулатора, као и за тестирање поновљивости манипулатора за рачунање максималне дозвољене грешке калибрације. Систем је тестиран на стандардном Robix манипулатору и резултати тестова показују да предложени систем калибрише геометрију манипулатора у границама његове поновљивости.</p>			
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u>	НЕ
РБ	Подаци о референци	Категорија	
4.	Марић С., Ђалић В., Јаковљевић С., Дамљановић А., “Побољшање перформанси апликативних система денормализацијом релационих база података”, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА свезак 10, реф. Е-II-4, стр. 543-547, март 2011.	Зборник радова међународног научног скупа прве категорије	
<p><i>Кратак опис садржаја:</i> У овом раду су анализирани и описани различити сценарији када се денормализацијом организације релационих база података може постићи побољшање апликативних перформанси. Презентовани су експерименти, базирани на реалним апликативним ситуацијама, који илуструју позитивне и негативне ефекте примјене поступака денормализације на</p>			

структуре које репрезентују генерализације/специјализације. Експерименти су реализовани коришћењем Oracle 10g SUBP и Toad for Oracle 10.5.0.41 алата.

<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b>ДА</b>	<b><u>НЕ</u></b>
---	--	-----------	------------------

РБ	Подаци о референци	Категорија	
----	--------------------	------------	--

5.	Ђурић У., Ђалић В., “Одређивање поновљивости Robix манипулатора кориштењем стерео вида”, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА свезак. 10, реф. Ф-38, стр. 1072-1074, март 2011.	Зборник радова међународног научног скупа прве категорије	
----	---	---	--

*Кратак опис садржаја:* Поновљивост робота описује његову способност да врх манипулатора позиционира у исти положај. Тежиште овог рада је на испитивању поновљивости манипулатора кориштењем стерео вида. У раду је описан систем двију камера са паралелним осама, приказан је поступак калибрације тог система, као и резултати експеримената. Симулације су вршене на Robix манипулатору, а резултати показују да се стерео вид може ефикасно примјенити у поступку испитивања поновљивости манипулатора.

<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b>	<b>НЕ</b>
---	--	------------------	-----------

РБ	Подаци о референци	Категорија	
----	--------------------	------------	--

6.	Ђалић В., Марић П., Косић Д., “Практично рјешење проблема кореспондентних тачака при калибрацији геометрије манипулатора”, Зборник радова 55. Конференције за ЕТРАН, Бања Врућица, Јун 2011.	Научни рад на научном скупу међународног значаја, штампан у цјелини	
----	--	---	--

*Кратак опис садржаја:* Примјена стерео вида при калибрацији геометрије манипулатора омогућава ефикасније одређивање вањских координата врха манипулатора па самим тим повећава ефикасност и убрзава процес калибрације. Један од основних проблема који се јављају када се користи стерео вид је проблем одређивања кореспондентних тачака. У раду је приказано практично рјешење проблема кореспондентних тачака примјеном алгорита који се темељи на корелацији области. Показано је да предложени алгоритам задовољава захтјеве калибрације манипулатора.

<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b>	<b>НЕ</b>
---	--	------------------	-----------

РБ	Подаци о референци	Категорија	
----	--------------------	------------	--

7.	Marić P., Đalić V., “Choice of Window Size in Calibrating the Geometry of Manipulators Based on the Regions Correlation”, Electronics, Vol.15, No.1, pp. 45-53, June 2011.	Научни часопис прве категорије	
----	--	--------------------------------	--

*Кратак опис садржаја:* Рад је посвећен прецизној аутоматској калибрацији манипулатора индустријских робота. Изложене су могућности и ограничења у примјени визуелних стерео система за аутоматску калибрацију манипулатора. Надаље, дато је практично рјешење проблема проналажења кореспондентних тачака на бази анализе региона. Анализа је поткријепљена илустрацијама како положај маркера на врху манипулатора утиче на вриједности критеријумске функције. Предложен је начин избора величине прозора у односу на величину маркера тако да се добије најбоља поузданост у одређивању кореспондентних области. У раду су дати резултати који потврђују проведenu анализу и поузданост предложеног поступка аутоматизоване калибрације манипулатора.

<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b>	<b>НЕ</b>
---	--	------------------	-----------

РБ	Подаци о референци	Категорија
8.	Косић Д., <b>Ђалић В.</b> , Марић П., “Калибрација геометрије манипулатора примјеном генетског алгоритма”, Зборник радова 55. Конференције за ЕТРАН, Бања Врућица, Јун 2011.	Научни рад на научном скупу међународног значаја, штампан у цјелини
<i>Кратак опис садржаја:</i> Калибрација геометрије манипулатора се базира на рјешавању система нелинеарних једначина, при чему је ред тог система неријетко већи од 10. За рјешавање таквих система развијени су многи нумерички методи, али за успјешну конвергенцију потребна је квалитетна претпоставка рјешења. Генетски алгоритам је итерациони метод за проналажење рјешења из великог скупа могућих, тј. много је мање осјетљив на избор почетне претпоставке. У раду је представљена модификација генетског алгоритма, односно његових оператора, прилагођена рјешавању проблема калибрације геометрије манипулатора.		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u> НЕ
РБ	Подаци о референци	Категорија
9.	<b>Ђалић В.</b> , Marić P., “Reliable automatic recognition of manipulator’s end-effector using robot vision”, Proc. of International Scientific Conference UNITECH’11, p. 564-568, Gabrovo, November 2011.	Научни рад на научном скупу међународног значаја, штампан у цјелини
<i>Кратак опис садржаја:</i> Аутоматско препознавање маркера на слици манипулатора робота припада проблему препознавања објекта. Рад презентује проблем аутоматског препознавања маркера постављеног на врх манипулатора, помоћу SIFT алгоритма. SIFT алгоритам се користи за детекцију и опис локалних региона на слици, инваријантних на скалирање и ротацију слике и дјелимично инваријантних на промјене освјетљења сцене. Презентовани резултати provedених експеримената потврђују да се помоћу SIFT алгоритма успјешно детектује предложени маркер. Такође, потврђена је инваријантност карактеристичних региона на маркеру.		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u> НЕ
РБ	Подаци о референци	Категорија
10.	Marić P., <b>Ђалић В.</b> , “Automatic detection of robots’ manipulator end-effector position using SIFT algorithm”, Proc. of the 22nd International DAAAM Symposium “Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity”, pp. 1581-1582, Vienna, November 2011.	Научни рад на научном скупу међународног значаја, штампан у цјелини
<i>Кратак опис садржаја:</i> У раду је презентован проблем аутоматског препознавања положаја врха манипулатора помоћу SIFT алгоритма. У циљу постизања потпуне аутоматизације у препознавању врха манипулатора препоручено је постављање маркера на врх манипулатора. Поређењем маркера различитих текстура показано је да се коришћењем маркера предложене текстуре постиже највећа поузданост при аутоматској детекцији.		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u> НЕ
РБ	Подаци о референци	Категорија
11.	<b>V. Djalic</b> , P. Maric, D. Kosic, D. Samuelsen, B. Thyberg, O. Graven,” Remote laboratory for robotics and automation as a tool for remote	Научни рад на научном скупу међународног

	access to learning content”, International Conference- Interactive Collaborative Learning (ICL), Villach, Austria, 2012.	значаја, штампан у цјелини
<i>Кратак опис садржаја:</i> У раду је презентован значај удаљене лабораторије као примјер ефикасног средства за образовање на даљину студената додипломског и постдипломског студија у области роботике и аутоматизације. Исти систем се може користити за потребе обуке запослених у малим и средњим предузећима. Предложен је комплетан систем реализације удаљене лабораторије који је заснован на роботском виду.		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b>ДА</b> <b>НЕ</b>
РБ	Подаци о референци	Категорија
12.	P. Maric, <b>V. Djalic</b> , “Improving Accuracy and Flexibility of Industrial Robots Using Computer Vision”, InTech, ISBN 978-953-51-0480-3, pp. 139-164, Rijeka, Croatia, 2012.	Поглавље у књизи/тематском зборнику међународног значаја
<i>Кратак опис садржаја:</i> У овом поглављу књиге је дат преглед истраживања и практичних реализација идентификације геометрије индустријских робота помоћу рачунарског вида. Презентована су рјешења која омогућавају да се задовољи више опречних захтјева: повећање флексибилности и тачности позиционирања без коришћења скупе додатне опреме и заморних поступака калибрације. Анализа представља допуну постигнуте механичке флексибилности у последњих десет година (аутоматска измјена алата робота, реконфигурабилни манипулатори и реконфигурабилни фиксатори обрадака). Након сваке измјене конфигурације геометрије неке од компонената производног система, потребно је аутоматски идентификовати параметре модела, да би се постигла висока флексибилност и прецизност у извршавању задатака. За потпуну аутоматизацију флексибилног управљања потребно је у оквиру визуелног стерео система реализовати комбинацију различитих алгоритама за обраду слике. На основу анализе погодности и недостатака ових алгоритама комбиноване су њихове добре особине да се добије јединствен потпуно аутоматизован поступак. У тексту су дате илустрације које потврђују сагласност проведене анализе, очекиваних својстава алгоритама и резултата проведених експеримената.		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b>ДА</b> <b>НЕ</b>
РБ	Подаци о референци	Категорија
13.	<b>Velibor Djalic</b> , Ole Jakob Elle, Petar Maric, “Automation of Robotic Cutting Surgical Action in an open Surgery Using Computer Vision”, SDPS-2015, Dallas Fort Worth, November 2015.	Научни рад на научном скупу међународног значаја, штампан у цјелини
<i>Кратак опис садржаја:</i> У раду је презентован концепт аутономних роботских система за извршавање основних хируршких задатака. Концепт је базиран на задатку сјечења у оквиру хируршког захвата под називом медијална лапаротомија. У раду је описана опрема за извршавање задатка сјечења која се базира на примјени индустријског робота и стерео камере. Описани су алгоритми за детекцију карактеристичких тачака потребних за прецизно планирање путање сјечења и истакнуте су предности кориштења визуелних система како у пре-оперативном, тако и у интра-оперативном процесу. Истакнути су недостаци и предложена побољшања опреме и алгоритама кориштених у раду. Дате су смјернице за даљи рад. Предложени концепт потврђен је резултатима проведених експеримената чиме је потврђена претпоставка да се аутономни роботски систем може користити за извршавање задатка сјечења у хирургији, те да се аутономија роботизованих хируршких процедура може унаприједити кориштењем визуелних система, као што је стерео камера. Резултати проведених експеримената истичу значај и потенцијал предложеног концепта за		

даљи истраживачки рад са циљем примјене предложеног поступка у реалним хируршким процедурама			
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b>	<b>НЕ</b>
РБ	Подаци о референци	Категорија	
14.	V. Jovanović, V. Đalić, and P. Marić, "Accuracy Assessment of Structured-Light Based Industrial Optical Scanner," 2022 21st International Symposium INFOTEN-JAHORINA (INFOTEN), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/INFOTEN53737.2022.9751291.	Зборник радова међународног научног скупа прве категорије	
<p><i>Кратак опис садржаја:</i> Овај рад приказује процјену тачности индустријског оптичког скенера заснованог на структурираној свјетлости. Comet LED 5M скенер, као активни стерео систем, калибрише се различитим приступима, а утицај резултата калибрације на тачност система је провјерен експериментима. Поред унапријед дефинисане провјере тачности система, предложена је додатна метода и упоређени су добијени резултати. Експериментални резултати показују да систем испуњава веома ригорозне захтјеве, чак и у окружењу које није строго контролисано, што га чини веома погодним за употребу у, не само индустријским, већ и високо прецизним и високо осјетљивим апликацијама.</p>			
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b>	<b>НЕ</b>
РБ	Подаци о референци	Категорија	
15.	V. Đalić, V. Jovanović, P. Marić. "Submillimeter-Accurate Markerless Hand–Eye Calibration Based on a Robot’s Flange Features," Sensors 24, no. 4: 1071, 2024, <a href="https://doi.org/10.3390/s24041071">https://doi.org/10.3390/s24041071</a> .	Научни рад објављен у истакнутом научном часопису међународног значаја (SCIE, IF 3.9)	
<p><i>Кратак опис садржаја:</i> Овај рад представља нови приступ калибрацији рука-око без маркера који постиже аеродинамичне, флексибилне и веома прецизне резултате, чак и без компензације грешке. Процедура калибрације се, доминантно, заснива на коришћењу роботове централне тачке алата (ЦТА) као референтне тачке. Процјена координата ЦТА је заснована на роботовом облаку прирубних тачака, с обзиром на његове геометријске карактеристике. Изведен је математички модел који поједностављује конвенционалну калибрацију рука-око засновану на маркерима. Предложен је нови алгоритам за аутоматску процјену геометријских карактеристика прирубнице из њеног облака тачака, заснован на 3Д уклапању круга, методи најмањег квадрата и поступку најближих сусједа. Тачност предложеног алгоритма је потврђена коришћењем прстена за подешавање калибрације као полазне тачке. Како би се успоставио минималан потребан број и конфигурација калибрационих тачака, утицај броја и одабира јединствених позиција прирубнице робота на тачност калибрације се истражује и потврђује експериментима у стварном свијету. Експериментални налази снажно указују да предложени систем рука-око, који користи предложени алгоритам, омогућава процјену трансформације између робота и 3Д скенера са субмилиметарском тачношћу, чак и када се за калибрацију користе најмање четири некопланарне тачке. Приказани приступ побољшава тачност калибрације за приближно четири пута у поређењу са стањем технике, док елиминише потребу за компензацијом грешке. Предложени приступ калибрацији смањује потребан број положаја прирубнице робота за приближно 40%, а чак и више ако поступак калибрације користи само четири правилно одабрана положаја прирубнице. Представљени налази дају ефикаснију процедуру калибрације рука-око, нудећи супериорну једноставност имплементације и повећану прецизност у различитим роботским апликацијама.</p>			

<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b>	<b>НЕ</b>
РБ	Подаци о референци	Категорија	
16.	I. Krčmar, P. Marić, V. Đalić, A. Rakić and B. Derajić, "Fuzzy Control of a Hydrodynamic Process," 2024 23rd International Symposium INFOTEN-JAHORINA (INFOTEN), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/INFOTEN60418.2024.10495983	Зборник радова међународног научног скупа прве категорије	
<p><i>Кратак опис садржаја:</i> Хидродинамички процеси, дио многих индустријских и урбаних инфраструктурних система, обично немају тачне моделе, што доводи до двосмислености у процедури пројектовања контролера. Оператери и инжењери управљања пружају значајна знања о успјешном управљању хидродинамичким системима. Фази контролер, погодан за експлоатацију и инкорпорацију расположивог знања, дизајниран је за контролу референтног система спојених резервоара. Успјешан фази контролер мора да се носи са спором динамиком процеса, мртвом зоном актуатора и униполарним управљачким сигналом, када се користи у задацима праћења референце. Дизајнирани фази контролер имплементира систем фази закључивања са 15 правила, два улаза и једним излазом, као и три подесива параметра појачања. Предложени контролер је успјешан у задацима праћења референце и потискивању сметњи. Експерименти, организовани као задаци праћења референце и имплементирани као компјутерске симулације, подржавају анализу.</p>			
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b>	<b>НЕ</b>
РБ	Подаци о референци	Категорија	
17.	I. Krčmar, A. Rakić, V. Đalić, B. Derajić and P. Marić, "Towards Optimal PI Controller for a Coupled Tanks System," 2024 11th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN), Nis, Serbia, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/IcETRAN62308.2024.10645196.	Научни рад на научном скупу међународног значаја, штампан у цјелини	
<p><i>Кратак опис садржаја:</i> Једноставан пропорционални и интегрални контролер се користи за управљање референтног хидродинамичког процеса, систем спрегнутих резервоара. Пропорционални дио контролера се поставља у путању повратне спреге да би се избјегао прескок у одскочном одзиву система. Дизајн контролера је поступак оптимизације јер минимизира површину између референтног одскочног сигнала и одзива система. Предложени контролер потискује степенасте сметње које дјелују на излазу система. Експерименти, изведени као компјутерске симулације, подржавају анализу.</p>			
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b>	<b>НЕ</b>

### 3. УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов докторске дисертације кандидата Велибора Ђалића, ма је „Повећање прецизности и флексибилности робота примјеном визуелног система без коришћења калибрационог објекта”.

Докторска дисертација припада научном пољу Електротехника, електроника, информационо инжењерство и рачунарске и информационе науке и ужој научној области Аутоматика и роботика

Комисија за оцјену подобности студента, теме и испуњености услова за менторство за



израду докторске дисертације именована је одлуком Научно-наставног вијећа Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци број 20/3.160-7/24 од 18. 3. 2024. године.

Одлуком број 02/04-3.643-37/24 од 28. 3. 2024. године, Сенат Универзитета у Бањој Луци је дао сагласност на именовање Комисије за оцјену подобности студента, теме и испуњености услова за менторство за израду докторске дисертације.

Научно-наставно вијеће Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци је, одлуком број 20/3.264-4/24 од 17. 5. 2024. године, усвојило Извјештај Комисије за оцјену подобности студента, теме и испуњености услова за менторство за израду докторске дисертације

Извјештај Комисије за оцјену подобности студента, теме и испуњености услова за менторство за израду докторске дисертације прихваћен је 30. 5. 2024. године, одлуком Сената Универзитета у Бањој Луци број 02/04-3.1115-41/24.

Докторска дисертација кандидата Велибора Ђалића, ма написана је на српском језику, ћириличним писмом. Почетни дио дисертације даје информације о ментору и дисертацији на српском и енглеском језику, захвалнице, посвету, коришћену нотацију, списак табела и списак слика. Дисертација је организована у девет поглавља, а за њима слиједе четири додатка, библиографија, биографија аутора, као и три изјаве. Дисертација је написана на 150 страна, уз презентовање 14 табела и 53 слике. Садржај дисертације је како слиједи.

1 Увод	1
1.1 Предмет истраживања	3
1.2 Циљеви истраживања	4
1.3 Примјена и значај резултата истраживања	6
1.4 Научни допринос	6
1.5 Организација дисертације	8
2 Преглед литературе	10
2.1 Методе калибрације система робот-визуелни сензор	12
2.1.1 Традиционалне методе калибрације засноване на коришћењу калибрационих објеката или маркера	13
2.1.2 Методе калибрације без коришћења калибрационих објеката или маркера	16
3 Калибрација система робот-визуелни сензор	20
3.1 Конфигурације система робот-визуелни сензор	21
3.2 Методологија калибрације система робот-визуелни сензор	23
4 Кинематичка калибрација робота	27
4.1 Дефинисање кинематичког модела манипулатора	29
4.2 Процјена геометријских параметара манипулатора заснована на диференцијалном моделу	31
4.3 Калибрација манипулатора коришћењем рачунарског вида	34
5 Визуелни сензори у роботници	42
5.1 Модел камере	43
5.2 Калибрација камере	46
6 Визуелни системи у задацима калибрације система робот-визуелни сензор	50
7 Експериментална поставка, предложени метод калибрације и алгоритам за процјену геометријских обиљежја прирубнице	54
7.1 Експериментална поставка	55
7.1.1 Робот Mitsubishi RV-2SDB	55
7.1.1.1 Прирубница манипулатора	56
7.1.1.2 Калибрација манипулатора	57

7.1.2 3D скенер Comet L3D 5M	60
7.1.2.1 Принцип рада 3D скенера Comet L3D 5M	61
7.1.2.2 Калибрација 3D скенера	63
7.1.3 Калибрациони прстен Mitutoyo NO. 177-290 (2011160)	66
7.1.4 Софтверска подршка и комуникациони протоколи	67
7.2 Математички модел калибрације система	67
7.3 Алгоритам за процјену координата TCP-а прирубнице манипулатора заснован на обради скупа 3D тачака	70
7.4 Метрика грешке	75
8 Експериментални резултати	77
8.1 Припрема експерименталне поставке и радног окружења	78
8.2 Калибрација робота	78
8.3 Калибрација 3D скенера	80
8.4 Валидација перформанси алгоритма за процјену координата TCP-а прирубнице манипулатора	84
8.5 Валидација калибрације предложеног поступка калибрације	87
8.6 Дискусија	90
8.7 Кинематичка калибрација манипулатора заснована на предложеној методологији	96
9 Закључак	102
А Робот Mitsubishi RV-2SDB	106
Б Прирубница робота Mitsubishi RV-2SDB	108
В 3D скенер Comet L3D 5M	110
Г Калибрациони прстен Mitutoyo NO.177-290(2011160)	111
Библиографија	113
Биографија аутора	128
Изјава о ауторству	129
Изјава којом се овлашћује Универзитет у Бањој Луци да Докторску дисертацију учини јавно доступном	130
Изјава о идентичности штампане и електронске верзије докторске дисертације	131
Кандидат је при изради докторске дисертације користио 179 литературних извора.	
1. Наслов докторске дисертације.	
2. Научно поље и ужа научна област.	
3. Датум прихватања теме докторске дисертације и бројеви одлука одговарајућих органа чланица и Универзитета.	
4. Датум прихватања Извјештаја комисије за оцјену подобности студента, теме и ментора за израду докторске дисертације и бројеви одлука одговарајућих органа чланица и Универзитета.	
5. Садржај докторске дисертације уз навођење броја страна.	
6. Истаћи основне податке о докторској дисертацији: обавезно укључујући обим, број и називе поглавља, број табела, слика, шема, графикона и број литературних навода.	

#### 4. УВОД И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Кандидат је у дисертацији предложио нови приступ у процесу калибрације робот-визуелни сензор, који постиже побољшање методологије и резултата добијених у [7]. Идеја за коришћење прирубнице робота као референтног објекта за калибрацију, представљена у [7], мотивисала је побољшање прецизности и флексибилности процеса калибрације заснованог на процјени геометријских обиљежја прирубнице робота. Ово се реализује без коришћења традиционалног калибрационог објекта. Додатно, приступ предложен у [8] даје методологију засновану на процјени калибрационих параметара

коришћењем само једначине транслације. Додатно, своди зависност о калибрационим објектима на употребу једне тродимензионалне тачке за калибрацију, што манифестује велики потенцијал за повећање прецизности и робусности процјене калибрационих параметара.

Калибрација је реализована коришћењем прирубнице робота као референтног калибрационог објекта, а процјена калибрационих параметара система заснована је на једначини транслације и коришћењу једне тродимензионалне тачке, односно координата центра прирубнице, као референтне тачке за калибрацију [9].

Геометријске карактеристике прирубнице робота размотрене су као карактеристична обиљежја која се могу детектовати и користити као потенцијалне референтне тачке за калибрацију система. Геометрија прирубнице робота прецизно је дефинисана ISO стандардом, што значи како је њена спецификација унапријед позната [10]. Ово представља мотив за коришћење прирубнице робота у процесу калибрације. Додатно, она обезбјеђује конзистентност геометријских обиљежја и даје основ за развој процедура калибрације које би могле бити универзалне за различите роботе. Посебну пажњу привукао је центар прирубнице који представља једну од кључних карактеристика робота. Када завршни уређај није постављен на прирубницу робота, центар прирубнице представља референтну тачку завршног механизма, у складу са кинематичким моделом робота [11]. Ова тачка се назива тачка центра алата, а у роботици се означава са TCP (енгл. Tool Center Point). Посебно је значајно што постоји могућност читања података о наведеној тачки из контролера робота. Додатне информације се израчунавају на основу поменутог кинематичког модела робота. Очитавање података из контролера робота, у суштини, елиминира потребу за коришћењем додатне опреме за мјерење координата центра прирубнице. Ово додатно истиче потенцијал предложеног приступа. Стога, TCP је усвојена као јединствена референтна тродимензионална тачка за калибрацију система. Једини предуслов за провођење калибрације система јесте мјерење координата усвојене референтне тачке у односу на координатни систем визуелног сензора. У ту сврху, размотрени су поступци идентификације референтне тродимензионалне тачке и процјене њених координата, потребних за калибрацију. Анализа овог проблема указала је на значај избора конфигурације система робот-визуелни сензор, као и одабира визуелног сензора ради боље детекције геометријских обиљежја прирубнице.

Узимајући у обзир како је потребно процијенити референтну тачку за калибрацију која представља TCP робота, предложена је конфигурација система са непокретним визуелним сензором. Ради оптималне процјене координата TCP-а, потребно је омогућити квалитетне визуелне информације о прирубници те имплементирати алгоритам за процјену њених геометријских карактеристика. Стога, анализиран је избор визуелног система. Као адекватан избор, предложен је индустријски тродимензионални скенер, реализован са једном камером и пројектором, чији рад је заснован на структурираном свјетлу. Одабир визуелног сензора заснован је на његовој способности да генерише квалитетан скуп тродимензионалних података и омогући прецизан и робусан рад током калибрације.

Предложен је алгоритам за обраду скупа тродимензионалних тачака прирубнице генерисаног предложеним скенером. Алгоритам је заснован на процјени координата центра и полупречника унутрашњег кружног отвора прирубнице. Ово се постиже уписивањем кружнице у скуп тродимензионалних тачака коришћењем издвојених тачака које се налазе на рубу унутрашњег отвора. Ради валидације перформанси предложеног алгоритма, предложен је приступ заснован на коришћењу калибрационог прстена, имајући у виду сличност његових геометријских обиљежја и обиљежја прирубнице, као и прецизност његове израде.

Процедуре калибрације робота и скенера, анализа поновљивости робота и одређивање индекса перформанси калибрисаног скенера, ради потврђивања њихове поузданости и прецизности у сврху достизања постављених циљева, су реализоване прије калибрације система. Након проведених калибрација, реализован је систем робот–скенер и проведене су калибрације у складу са предложеном методологијом. У циљу повећања флексибилности и ефикасности калибрације, настојећи да се постигне високо прецизна калибрација система, анализиран је утицај броја и међусобног положаја прирубница у видном пољу камере. Додатно су анализирани аспекти као што су међусобно позиционирање визуелног сензора и робота, као и амбијентални услови у којим се реализује калибрација, тј. температура и освјетљење.

Робусност предложеног приступа је анализирана са становишта утицаја иницијалних вриједности параметара алгорита на квалитет калибрације. На крају, предложени приступ коришћен је за процјену геометријских параметара робота ради оцјене примјењивости предложеног приступа при кинематичкој калибрацији робота.

Докторска дисертација је реализована ради достизања сљедећих циљева:

- Реализација система робот – визуелни сензор у конфигурацији са непокретним визуелним системом,
- Анализа и приједлог одабира визуелног сензора,
- Дефинисање методологије за повећање прецизности и флексибилности система робот – визуелни сензор базирано на калибрацији система без коришћења стандардних калибрационих објеката
- Коришћење једноставног референтног објекта за калибрацију система (прирубница робота),
- Коришћење геометријских карактеристика референтног објекта, као обиљежја за калибрацију система,
- Дефинисање јединствене референтне тродимензионалне тачке за калибрацију система и
- Калибрација система и обрада експерименталних података.

Кандидат у докторској дисертацији тестира сљедеће хипотезе:

X1. Калибрацију система робот-визуелни сензор могуће је реализовати коришћењем геометријских обиљежја прирубнице робота кружног облика без коришћења калибрационог објекта, и без потребе за додатном компензацијом грешке калибрације.

X2. Коришћењем предложеног приступа могуће је постићи веома тачну калибрацију, при чему је грешка калибрације мања од једног милиметра.

X3. Коришћењем предложеног приступа могуће је повећати флексибилност процедуре калибрације при чему се смањује комплексност процедуре калибрације система коришћењем минималног броја адекватно одабраних позиција прирубнице робота у видном пољу визуелног система, уз конзистентно постизање високе тачности процјене резултантне матрице трансформације између робота и визуелног система.

Иако су до сада постигнути веома значајни резултати, калибрација робота и данас представља изазован задатак [23–25].

Повећање флексибилности робота обухвата различите приступе и стратегије, укључујући

могућност једноставног програмирања робота, опремање робота додатним актуаторима и сензорима, а у скорије вријеме и примјену вјештачке интелигенције [6, 26, 27]. Узимајући у обзир ове развојне правце, може се закључити да се развојем различитих приступа настоји постићи потпуна флексибилност робота, у смислу његове механичке флексибилности и флексибилности управљања [28]. Овакав приступ отворио је и нове правце који данас представљају велике изазове у области роботике, а то су сарадња робота и човјека, те оспособљавање робота за аутономно доношење одлука [3–5].

У пракси су заступљене двије основне конфигурације, базиране на роботу и визуелном сензору, и то око-ка-руци (енгл. *Eye-To-Hand*) и око-у-руци (енгл. *Eye-in-Hand*) [6].

Како би се омогућио рад робота заснован на информацијама добијеним визуелним сензором, потребно је дефинисати заједнички радни простор као и релације између робота и визуелног сензора, што се постиже провођењем поступка калибрације, познатог под називом НЕ (енгл. *Hand-Eye*) калибрација [29].

Повећање тачности израчунавања коришћењем различитих математичких приступа и повећање флексибилности при коришћењу, смањењем зависности о калибрационим објектима, постали су главни правци у развоју алгоритама за калибрацију НЕ система [30, 31]. Постизање високе тачности калибрације директно је условљено пажљивим одабиром положаја зглобова робота и употребом специјализованих калибрационих објеката са прецизно дефинисаним обиљежјима [6, 31]. Поред наведених предуслова, важно је истаћи и да је коришћење робусних математичких модела такође веома значајно, с обзиром на то да се њиховом примјеном на ефикасан начин могу умањити утицаји шума и поремећаја [32, 33].

Такође, развој алгоритама за аутоматско детектовање потребе за рекалибрацијом НЕ система, показао је значајан потенцијал за повећање флексибилности система приликом употребе, пружајући могућност континуираног прилагођавања процеса калибрације детекцијом промјена у радном окружењу система [34, 35].

Традиционалне методе калибрације захтијевају позиционирање физичких маркера или калибрационих објеката са унапријед дефинисаним димензијама, у радни простор робота. То подразумијева сценарије у којим се однос робота и визуелног сензора процјењује на бази дводимензионалних или тродимензионалних калибрационих објеката. У пракси су највише заступљени планарни калибрациони објекти попут шаховске табле, табле са мрежом кружница, те различите врсте маркера квадратних и кружних облика [29, 34, 36, 37]. Предност ових објеката је првенствено једноставна идентификација обиљежја маркера и доступност алгоритама који обезбјеђују поуздане резултате, што традиционалне методе и чини најпопуларнијим [6].

Грешке приликом детекције маркера представљале су мотивацију за развој нових приступа. Стога се развијају маркери познати под називом фидуцијални маркери, који омогућавају јединствено кодовање, детекцију у реалном времену, па чак и могућност детекције у присуству оклузије [33]. Ови маркери поред претходно наведених недостатака који су карактеристични за стандардне калибрационе маркере показују недостатке у виду сложености и нетачности алгоритама за детекцију и декодовање кључних обиљежја, што значајно утиче на њихову флексибилност и ефикасност [6].

У категорију пасивних сензора убрајају се визуелни системи базирани на једној камери, погодни у ситуацијама у којим информација о дубини није од кључног значаја [29, 38–42], и системи базирани на више камера као нпр. стерео камера, погодна за екстракцију информација о дубини и реконструкцију сцене [43–45]. У категорију активних сензора, који су значајно утицали на повећање прецизности калибрације, убрајају се RGBD (енгл.

*Red Green Blue, and Depth*) камера, базирана на интеграцији камере у боји и сензора дубине [46, 47], затим ToF (енгл. *Time-of-Flight*) сензор [48], те сензори базирани на коришћењу структурираног свјетла који су привукли посебну пажњу за примјену у процедурама HE калибрације [49–54]. Као што је већ напоменуто, процедура калибрације HE система подразумијева процјену калибрационих параметара који дефинишу релативни однос референтних координатних система робота и визуелног сензора. Овај однос није могуће одредити директним мјерењем [55]. Стога су развијени различити приступи. Најчешће коришћен приступ се заснива на рјешавању једначина хомогених трансформација [29,55–57]. Поред њих, постоје приступи који су засновани на моделу [58, 59], затим пробабилистичкој формулацији задатка калибрације [60–64], приступи засновани на грешкама пројекције и реконструкције у тродимензионалном простору [65–67], те на коришћењу неуронских мрежа [68,69], и техника дубоког учења [70, 71].

Симултана рјешења омогућавају истовремену процјену параметара ротације и translације. Поступак се може провести аналитички [36,74–78] или коришћењем нумеричке оптимизације [37, 39, 79, 80]. Примјеном симултаних метода могуће је постићи висок степен прецизности процјене параметара, те истовремено избјећи недостатак који је карактеристичан за одвојене методе. С друге стране, ове методе су комплексније са аспекта имплементације, брзине процјене параметара, те се могу појавити потешкоће са конвергенцијом алгорита и избором почетне процјене.

Када се промијени положај камере, сви подаци морају бити поново прикупљени за нову конфигурацију, што их чини неподобним у случају промјене задатка или радног окружења. Да би се превазишла ова ограничења, предложени су приступи засновани на неуронским мрежама и дубоком учењу [68–71].

Доказано је да методе засноване на коришћењу калибрационих објеката обезбјеђују врло прецизну калибрацију, али различити аспекти, као што су непрецизност у производњи калибрационих објеката, непланарност калибрационих табли на којим су постављени маркери, осјетљивост алгоритама за детекцију обиљежја на амбијенталне услове, те сложеност и нетачност алгоритама за детекцију и декодовање кључних обиљежја значајно утичу на њихову флексибилност и ефикасност [6].

Постоје приступи засновани на конволуционим неуронским мрежама, без потребе за информацијама о дубини, тренираним за различите конфигурације скупова реалних и синтетичких података [81, 82].

Сличан приступ, заснован на детекцији дводимензионалних тачака коришћењем дубоког учења и процјени односа између робота и камере коришћењем PnP алгорита, представљен је у [83]. За разлику од претходног приступа који су обучавање мреже заснивали на реалним и синтетичким подацима, аутори у [83] предложени приступ заснивају на коришћењу само једне слике робота у боји, те мрежу обучавају искључиво коришћењем синтетичких података.

Поред наведених приступа, детекција инхерентних кључних тачака коришћењем неуронске мреже представљена је и у раду [84]. Међутим, умјесто PnP алгорита, приступ је заснован на нелинеарној оптимизацији којом се директно регресирају позиција и оријентација камере и непознати углови зглобова робота.

Обучавањем мреже, коришћењем синтетичких података, представљена је могућност постизања рјешења заснована на прилагођавању различитих домена. Претходно описани приступ, заснован на предикцији позе робота и углова зглобова робота коришћењем слика у боји, постаје веома популаран. Сличан приступ који је заснован на поступку итеративног усаглашавања CAD (енгл. *Computer Added Design*) модела и слика у боји, са

фокусом на коришћење синтетичког скупа података у сврху обуке неуронске мреже, представљен је у [85].

Даљи напредак метода калибрације без коришћења калибрационих објеката или маркера је истакнут резултатима постигнутим коришћењем дубинских камера, што је значајно умањило потребу за генерисањем синтетичког скупа података. Једна од метода калибрације система без коришћења маркера, која се заснива на учењу заснованом на подацима добијеним дубинском камером, представљена је у [86]. Предложена метода је показала велики потенцијал имајући у виду да је неопходно да завршни уређај робота буде видљив унутар видног поља визуелног сензора, без потребе да се види већи дио роботске руке.

За разлику од претходно поменутих метода, које свој рад заснивају на систему реализованом у конфигурацији око-ка-руци, другачији приступ, заснован на коришћењу синтетичког скупа података и дводимензионалних слика, размотрен је за системе са конфигурацијом око-у-руци [87].

Приступ заснован на коришћењу бијеле кутије, који се показао као веома подобан за постизање свеобухватне тачности позиционирања у цијелом простору конфигурација робота, назван EasyHeC (енгл. *Easy Hand Eye Calibration*), представљен је у [31].

Метода калибрације која је занована на регистрацији, позната под називом RegHEC (енгл. *Registration-Based Hand-Eye Calibration*), елиминира потребу за коришћењем прецизне калибрационе опреме и омогућава употребу произвољних предмета у сврху калибрације, како за конфигурације система око-ка-руци тако и за конфигурације око-у-руци [67].

Једна од метода постала је веома популарна у системима видео базиране хируршке навигације за процјену просторне релације између вањског система за праћење хируршких инструмената и оптичке осе хируршке камере [88]. Ова метода заснована је на примјени Прокрустове регистрације [89] познате под називом тачка-на-линију, којом се омогућава добијање података потребних за калибрацију. На основу сваког фрејма видеа који се прати и пивот-калибрисане лоптице на врху хируршког инструмента, одређује се скуп тродимензионалних позиција лоптице (тачка) и њене кореспондентне пројекције на видеу (линија). У циљу постизања висококвалитетне калибрације предложен је и механизам одмјеравања података за оптимизацију конфигурације просторних референтних тачака за калибрацију.

Надаље, иновативна техника која олакшава калибрацију како камере, тако и координацију хируршког инструмента и визуелног сензора унутар тијела пацијента, без потребе за уклањањем ендоскопа, представљена је у [90].

Иако ове методе доприносе повећању флексибилности процеса калибрације, њихова тачност је и даље лошија од тачности метода заснованих на коришћењу калибрационих маркера и/или објеката. Међутим, метод предложен у [30] рјешава проблем калибрације приступом у два корака. У првом кораку израчунава прецизно рјешење позиције у затвореној форми, фокусирано на једначину транслагације, уз супериорну тачност и робусност у поређењу са традиционалним методама. Након тога, зависност од објекта калибрације се своди на употребу једне тродимензионалне тачке користећи сличну формулацију засновану на једначини транслагације, минимизирајући утицај грешака у процјени оријентације калибрационог објекта и резултујући повећањем тачности и робусности резултата постигнутих у првом кораку. Предности предложеног приступа су препознате у методама заснованим на коришћењу калибрационих објеката [44], а и у методама које не користе калибрационе објекте [7]. Посљедња наведена метода користи координате централне тачке прирубнице робота (TCP) као јединствену тродимензионалну

тачку калибрације. За процјену координата тачке центра алата TCP-а у [44], предложен је алгоритам заснован на итеративном наново пондерисаном методу најмањих квадрата, заснованом на процјени углова шаховске табле, као стандардног калибрационог објекта, детектованих са грешком прецизности мањом од једног пиксела (енгл. *Subpixel accuracy*). С друге стране, директни метод калибрације система заснован на коришћењу прирубнице робота, представљен у [7], користи геометријска обиљежја прирубнице робота како у статичком тако и динамичком режиму мјерења, пружајући могућност и калибрације система и праћења трајекторије. За процјену координата тачке центра алата TCP-а користи се скуп тродимензионалних тачака прирубнице дефинисан ISO стандардом [10]. Предложени приступ калибрације система омогућава добијање резултата са грешком реда милиметра. Стога је предложен поступак компензације грешке у циљу побољшања резултата калибрације.

И поред тога што је прецизност метода калибрације које не користе калибрационе објекте мања од прецизности традиционалних метода, ове методе представљају актуелну област истраживања у циљу побољшања до сада постигнутих резултата, а значај и потенцијал ових метода већ је истакнут кроз њихову примјену у задацима као што су роботско узимање и постављање (енгл. *Pick-and-Place*) [91] и роботска хирургија [90, 92, 93].

При изради докторске дисертације, кандидат је користио сљедеће литературне изворе.

[1] Veljko Potkonjak, Bratislav Svetozarevic, Kosta Jovanovic, and Owen Holland. Biologically-inspired control of a compliant anthropomorphic robot. pages 182–189, 01 2010.

[2] Petar Marić. Computer vision systems for the enhancement of industrial robots flexibility. *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Automatic Control and Robotics*, 10(1):1–18, 2011.

[3] Shoudong Ma, Yong Lu, Deng Kenan, Qinghe Guan, and Xu Xu. Optimal measurement poses using lssa for robot kinematics-flexibility calibration. *IEEE Robotics and Automation Letters*, PP:1–8, 06 2024.

[4] Canjun Yang, Yuanchao Zhu, and Yanhu Chen. A review of human-machine cooperation in the robotics domain. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, PP:1–14, 12 2021.

[5] Oleksandr Tsybmal and Artem Bronnikov. Collaborative decision-making models for flexible manufacturing robotic system. In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, pages 01–06, 2022.

[6] Jianfeng Jiang, Xiao Luo, Qingsheng Luo, Lijun Qiao, and Minghao Li. An overview of hand-eye calibration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119:77–97, 03 2022.

[7] Fang Wan and Chaoyang Song. Flange-based hand-eye calibration using a 3d camera with high resolution, accuracy, and frame rate. *Frontiers in Robotics and AI*, 7:65, 05 2020.

[8] Bjarne Großmann and Volker Krüger. Continuous hand-eye calibration using 3d points. *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pages 311–318, 2017.

[9] Velibor Đalić, Vedran Jovanović, and Petar Marić. Submillimeter-accurate markerless hand-eye calibration based on a robot's flange features. *Sensors*, 24(4), 2024.

[10] ISO Central Secretary. Manipulating industrial robots – mechanical interfaces - part 1: Plates. Standard ISO 9409-1:2004, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2023.

[11] Jacques Denavit and Richard S. Hartenberg. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 22(2):215–221, 06 1955.

[12] Dino Kosić, Velibor Đalić, and Petar Marić. Poboљšanje konvergencije algoritama za kalibraciju geometrije robota. In *INFOTEH-JAHORINA, Zbornik radova*, volume 9, pages 92–95, 2010.



- [13] Dino Kosić, Velibor Đalić, and Petar Marić. Kalibracija geometrije manipulatora primjenom genetskog algoritma. In Zbornik radova 55. Konferencije za ETRAN, 2011.
- [14] Dino Kosić, Velibor Đalić, and Petar Marić. Ispitivanje ponovljivosti manipulatora korištenjem stereo vida. In INDEL, Zbornik radova, volume 9, pages 293–295, Banja Luka, 11 2010.
- [15] Dino Kosić, Velibor Đalić, and Petar Marić. Robot geometry calibration in an open kinematic chain using stereo vision. Naučna konferencija Unitech 2010, pages 528–531, 2010.
- [16] Velibor Đalić, Petar Marić, and Dino Kosić. Praktično rješenje problema kore spondentnih tačaka pri kalibraciji geometrije manipulatora. In Zbornik radova 55. Konferencije za ETRAN, 2011.
- [17] Petar Marić and Velibor Đalić. Choice of window size in calibrating the geometry of manipulators based on the regions correlation. Electronics, 15(1):45–53, 2011.
- [18] Velibor Đalić and Petar Marić. Reliable automatic recognition of manipulator's end-effector using robot vision. In Proc. of International Scientific Conference UNITECH'11, pages 564–568, 2011.
- [19] Petar Maric and Velibor Djalic. Automatic Detection of Robots' Manipulator End-Effector Position Using Sift Algorithm, pages 1581–1582. 01 2011.
- [20] Petar Maric and Velibor Djalic. Improving accuracy and flexibility of industrial robots using computer vision. In Constantin Volosencu, editor, New Technologies, chapter 7. IntechOpen, Rijeka, 2012.
- [21] Velibor Djalic, Ole Jakob Elle, and Petar Maric. Automation of robotic cutting surgical action in an open surgery using computer vision. In PROCEEDINGS OF The 20th International Conference on Transformative Science and Engineering, Business and Social Innovation, pages 224–230, Fort Worth, Texas, USA, Nov 2015.
- [22] Vedran Jovanović, Velibor Đalić, and Petar Marić. Accuracy assessment of structured-light based industrial optical scanner. In 2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), pages 1–6, 2022.
- [23] Tadej Petric and Leon Zlajpah. Kinematic model calibration of a collaborative redundant robot using a closed kinematic chain. Scientific Reports, 13, 10 2023.
- [24] Mohammadreza Dehghani, Ryan McKenzie, Rishad Irani, and Mojtaba Ahmadi. Robot-mounted sensing and local calibration for high-accuracy manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 79:102429, 02 2023.
- [25] Zizhen Jiang, Wenbin Gao, and Xiaoliu Yu. Position-based robot calibration and compensation using an improved adjoint error model. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 108, 07 2023.
- [26] Manuel Garcia, Erwin Rauch, Renato Vidoni, and Dominik Matt. AI and ML for Human-Robot Cooperation in Intelligent and Flexible Manufacturing, pages 95–127. 05 2021.
- [27] Mohsen Soori, Behrooz Arezoo, and Roza Dastres. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. Cognitive Robotics, 04 2023.
- [28] Petar Marić. Prilog formiranju algoritma za identifikaciju matematičkog modela robota. Doktorska disertacija, Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, 1998.
- [29] Roger Y. Tsai and Reimar K. Lenz. A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 5(3):345–358, 1989.
- [30] Tingwu Yan, Peijuan Li, Yiting Liu, Tong Jia, Hanqi Yu, and Guangming Chen. Research on hand–eye calibration accuracy improvement method based on iterative closest point algorithm. Agriculture, 13:2026, 10 2023.

- [31] Linghao Chen, Yuzhe Qin, Xiaowei Zhou, and Hao Su. Easyhec: Accurate and automatic hand-eye calibration via differentiable rendering and space exploration. *IEEE Robotics and Automation Letters*, PP:1–8, 11 2023.
- [32] Sara Sharifzadeh, Istvan Biro, and Peter Kinnell. Robust hand-eye calibration of 2d laser sensors using a single-plane calibration artefact. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 61, 02 2020.
- [33] Ikenna Enebuse, Mathias Foo, Babul Salam Ksm Kader Ibrahim, Hafiz Ahmed, Fhon Supmak, and Odongo Steven Eyobu. A comparative review of hand-eye calibration techniques for vision guided robots. *IEEE Access*, 9:113143–113155, 2021.
- [34] Wenwei Lin, Peidong Liang, Guantai Luo, Ziyang Zhao, and Chentao Zhang. Research of online hand-eye calibration method based on charuco board. *Sensors*, 22:3805, 05 2022.
- [35] Krittin Pachtrachai, Francisco Vasconcelos, Philip Edwards, and Danail Stoyanov. Learning to calibrate- estimating the hand-eye transformation without calibration objects. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4):7309–7316, 2021.
- [36] Kostas Daniilidis and Eduardo José Bayro-Corrochano. The dual quaternion approach to hand-eye calibration. In *Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition*, volume 1, pages 318–322 vol.1, 1996.
- [37] Zhiqiang Zhang, Lin Zhang, and Guang-Zhong Yang. A computationally efficient method for hand-eye calibration. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 12, 07 2017.
- [38] Zijian Zhao. Hand-eye calibration using convex optimization. pages 2947–2952, 05 2011.
- [39] Jan Heller, Didier Henrion, and Tomas Pajdla. Hand-eye and robot-world calibration by global polynomial optimization. 06 2014.
- [40] Jan Heller, Michal Havlena, and Tomas Pajdla. Globally optimal hand-eye calibration using branch-and-bound. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(5):1027–1033, 2016.
- [41] Atanas Gotchev Ali Ihtisham, Olli Suominen and Emilio Ruiz Morales. Methods for simultaneous robot-world-hand-eye calibration: A comparative study. *Sensors*, 19:2837, 06 2019.
- [42] Haihua Cui, Ruichao Sun, Zhou Fang, Huacheng Lou, Wei Tian, and Wenhe Liao. A novel flexible two-step method for eye-to-hand calibration for robot assembly system. *Measurement and Control*, 53:002029402096484, 11 2020.
- [43] Mingyou Chen, Yunchao Tang, Xiangjun Zou, Zhaofeng Huang, Hao Zhou, and Siyu Chen. 3d global mapping of large-scale unstructured orchard integrating eye-in-hand stereo vision and slam. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187:106237, 08 2021.
- [44] Jiahao FU, Hongdi LIU, Minqi HE, and Dahu Zhu. A hand-eye calibration algorithm of binocular stereo vision based on multi-pixel 3d geometric centroid relocalization. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 1:51 60, 01 2021.
- [45] Jiming Sa, Shuai Liu, Xuecheng Zhang, Yuyan Song, and Ziang Hu. Research on hand-eye calibration method based on binocular camera. In Shaowen Yao, Zhenli He, Zheng Xiao, Wanqing Tu, Kenli Li, and Lipo Wang, editors, *ICSAI*, pages 1–6. IEEE, 2022.
- [46] Petra Durovic, Ratko Grbic, and Robert Cupec. Visual servoing for low-cost scara robots using an rgb-d camera as the only sensor. *Automatika*, 58:495–505, 10 2017.
- [47] Hongzhi Du, Guoli Song, Yiwen Zhao, and Jianda Han. Hand-eye calibration method for manipulator and rgb-d camera using 3d-printed ball. *Jiqiren/Robot*, 40:835–842, 11 2018.
- [48] Xiangsheng Zhang, Meng Yao, Qi Cheng, Gunan Liang, and Feng Fan. A novel hand-eye calibration method of picking robot based on tof camera. *Frontiers in Plant Science*, 13, 01 2023.
- [49] Dayong Tai, Zhixiong Wu, Yang Yang, and Cunwei Lu. Cross line structured light scanning

- system based on measuring arm. In 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), pages 1–6, 2022.
- [50] Geng Wang, Wanlong Quan, Yaonan Li, Siwen Fang, Heping Chen, and Ning Xi. Fast and accurate 3d eye-to-hand calibration for large-scale scene based on halcon. In 2021 IEEE 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), pages 230–234, 2021.
- [51] Ilaria Mileti and Fabrizio Patané. Accuracy of position and orientation for consumer-grade tracking sensors with hand-eye calibration. In 2023 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), pages 1–6, 2023.
- [52] Yuxiang Du, WenYan Xu, and Yunli Cheng. Research on industrial robot sorting technology based on binocular vision. In 2022 3rd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE), pages 16–23, 2022.
- [53] Nan Zhang, Yixin Xie, Xiansheng Yang, Haopeng Hu, and Yunjiang Lou. High precision pose estimation method of the 3c parts by combining 2d and 3d vision for robotic grasping in assembly applications. In 2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), pages 548–553, 2021.
- [54] Harikrishnan Madhusudanan, Xingjian Liu, Wenyan Chen, Dahai Li, Linghao Du, Jianfeng Li, Ji Ge, and Yu Sun. Automated eye-in-hand robot-3d scanner calibration for low stitching errors. In 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 8906–8912, 2020.
- [55] Yiu C. Shiu and Shaheen Ahmad. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $ax=xb$ . IEEE Transactions on Robotics and Automation, 5(1):16–29, 1989.
- [56] Frank C. Park and Bryan J. Martin. Robot sensor calibration: solving  $ax=xb$  on the euclidean group. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 10(5):717–721, 1994.
- [57] Jack C. K. Chou and Mohamed S. Kamel. Finding the position and orientation of a sensor on a robot manipulator using quaternions. The International Journal of Robotics Research, 10(3):240–254, 1991.
- [58] Guo-Qing Wei, Klaus Arnter, and Gerd Hirzinger. Active self-calibration of robotic eyes and hand-eye relationships with model identification. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 14(1):158–166, 1998.
- [59] Lee Sukhan and Ro Sookwang. A self-calibration model for hand-eye systems with motion estimation. Mathematical and Computer Modelling, 24(5):49–77, 1996.
- [60] Kendal M. Ackerman and Gregory Chirikjian. A probabilistic solution to the  $ax=xb$  problem: Sensor calibration without correspondence. 01 2013.
- [61] Qianli Ma, Haiyuan Li, and Gregory S. Chirikjian. New probabilistic approaches to the  $ax=xb$  hand-eye calibration without correspondence. In 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 4365–4371, 2016.
- [62] Jonathan Brookshire and Seth Teller. Extrinsic calibration from per-sensor ego motion. 07 2012.
- [63] Jonathan Brookshire and Seth Teller. Articulated pose estimation using tangent space approximations. The International Journal of Robotics Research, 35(1-3):5–29, 2016.
- [64] Jonathan Brookshire and Seth Teller. Automatic calibration of multiple coplanar sensors. volume VII, 06 2011.
- [65] Kenji Koide and Emanuele Menegatti. General hand-eye calibration based on re projection error minimization. IEEE Robotics and Automation Letters, 4(2):1021–1028, 2019.
- [66] Gang Peng, Zhenyu Ren, Qiang Gao, and Zhun Fan. Reprojection error analysis and

- algorithm optimization of hand-eye calibration for manipulator system. *Sensors* (Basel, Switzerland), 24, 12 2023.
- [67] Shiyu Xing, Fengshui Jing, and Min Tan. Reconstruction-based hand-eye calibration using arbitrary objects. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19(5):6545–6555, 2023.
- [68] Jiang Hua and Liangcai Zeng. Hand-eye calibration algorithm based on an optimized neural network. *Actuators*, 10:85, 04 2021.
- [69] Haiyan Wu, Walter Tizzano, Thomas Timm Andersen, Nils Axel Andersen, and Ole Ravn. Hand-Eye Calibration and Inverse Kinematics of Robot Arm Using Neural Network, pages 581–591. Springer International Publishing, Cham, 2014.
- [70] Ozan Bahadir, Jan Paul Siebert, and Gerardo Aragon-Camarasa. A deep learning based hand-eye calibration approach using a single reference point on a robot manipulator. In 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pages 1109–1114, 2022.
- [71] Hyun-Su Kim, Tae-Yong Kuc, and Kwang-Hee Lee. Hand-eye calibration using images restored by deep learning. In 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia), pages 1–4, 2020.
- [72] Rong-hua Liang and Jian-fei Mao. Hand-eye calibration with a new linear decomposition algorithm. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 9:1363–1368, 10 2008.
- [73] Huy Nguyen and Quang-Cuong Pham. On the covariance of  $x$  in  $aaxx = xxbb$ . *IEEE Transactions on Robotics*, 34(6):1651–1658, 2018.
- [74] Ying-Cherng Lu and Jack C. K. Chou. Eight-space quaternion approach for robotic hand-eye calibration. In 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century, volume 4, pages 3316–3321 vol.4, 1995.
- [75] Homer H. Chen. A screw motion approach to uniqueness analysis of head-eye geometry. In Proceedings. 1991 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 145–151, 1991.
- [76] Nicolas Andreff, Radu Horaud, and Bernard Espiau. On-line hand-eye calibration. pages 430–436, 02 1999.
- [77] Condurache Daniel and Burlacu Adrian. Orthogonal dual tensor method for solving the  $ax=xb$  sensor calibration problem. *Mechanism and Machine Theory*, 104:382–404, 2016.
- [78] Condurache Daniel and Ioan-Adrian Ciureanu. A novel solution for  $ax=yb$  sensor calibration problem using dual lie algebra. 04 2019.
- [79] Seungwoong Gwak, Junggon Kim, and Frank C. Park. Numerical optimization on the euclidean group with applications to camera calibration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(1):65–74, 2003.
- [80] Zijian Zhao. Simultaneous robot-world and hand-eye calibration by the alternative linear programming. *Pattern Recognition Letters*, 127, 08 2018.
- [81] Jens Lambrecht. Robust few-shot pose estimation of articulated robots using monocular cameras and deep-learning-based keypoint detection. In 2019 7th International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications (RiTA), pages 136–141, 2019.
- [82] Jens Lambrecht and Linh Kästner. Towards the usage of synthetic data for marker-less pose estimation of articulated robots in rgb images. In 2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), pages 240–247, 2019.
- [83] Timothy E. Lee, Jonathan Tremblay, Thang To, Jia Cheng, Terry Mosier, Oliver Kroemer, Dieter Fox, and Stan Birchfield. Camera-to-robot pose estimation from a single image. In 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 9426–9432, 2020.
- [84] Yiming Zuo, Weichao Qiu, Lingxi Xie, Fangwei Zhong, Yizhou Wang, and Alan L. Yuille. Craves: Controlling robotic arm with a vision-based economic system. In 2019 IEEE/CVF

- Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pages 4209–4218, 2019.
- [85] Yann Labbé, Justin Carpentier, Mathieu Aubry, and Josef Sivic. Single-view robot pose and joint angle estimation via render & compare. In 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pages 1654–1663, 2021.
- [86] Bugra Can Sefercik and Barış Akgün. Learning markerless robot-depth camera calibration and end-effector pose estimation. In Conference on Robot Learning, 2022.
- [87] Eugene Valassakis, Kamil Dreczkowski, and Edward Johns. Learning eye-in-hand camera calibration from a single image. In Conference on Robot Learning, 2021.
- [88] Tara N. Kemper, Daniel R. Allen, Adam Rankin, Terry M. Peters, and Elvis C. S. Chen. Open source video-based hand-eye calibration. In Cristian A. Linte and Jeffrey H. Siewerdsen, editors, *Medical Imaging 2023: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*, volume 12466, page 1246606. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [89] Jin Wu, Yuxiang Sun, Miaomiao Wang, and Ming Liu. Hand-eye calibration: 4-d procrustes analysis approach. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(6):2966–2981, 2020.
- [90] Megha Kalia, Prateek Mathur, Nassir Navab, and Septimiu Salcudean. Marker less real time intra-operative camera and hand-eye calibration procedure for surgical augmented reality. *Healthcare Technology Letters*, 11 2019.
- [91] Yong Zhou, Qiang Fang, Kuang Zhao, Dengqing Tang, Han Zhou, Guoqi Li, Xiang Xiaojia, and T. J. Hu. Robust task-oriented markerless extrinsic calibration for robotic pick-and-place scenarios. *IEEE Access*, PP:1–1, 05 2019.
- [92] Sangkyun Shin, Hyunchul Cho, Siyeop Yoon, Kyusic Park, Youngjun Kim, Se hyung Park, Laehyun Kim, and Deukhee Lee. Markerless surgical robotic system for intracerebral hemorrhage surgery. In 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pages 5272–5275, 2015.
- [93] Junlei Hu, Dominic Jones, and Pietro Valdastrì. Coordinate calibration of a dual arm robot system by visual tool tracking. In 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 11468–11473, 2023.
- [94] Eurico Pedrosa, Miguel Oliveira, Nuno Lau, and Vitor Santos. A general approach to hand-eye calibration through the optimization of atomic transformations. *IEEE Transactions on Robotics*, PP:1–15, 03 2021.
- [95] Shaohui Su, Shang Gao, Dongyang Zhang, and Wanqiang Wang. Research on the hand-eye calibration method of variable height and analysis of experimental results based on rigid transformation. *Applied Sciences*, 12(9), 2022.
- [96] Wenyuan Sun, Jihao Liu, Yuyun Zhao, and Guoyan Zheng. A novel point set registration-based hand-eye calibration method for robot-assisted surgery. *Sensors*, 22:8446, 11 2022.
- [97] Jihao Liu, Wenyuan Sun, Yuyun Zhao, and Guoyan Zheng. Ultrasound probe and hand-eye calibrations for robot-assisted needle biopsy. *Sensors*, 22:9465, 12 2022.
- [98] Yanding Qin, Pengxiu Geng, Lv Bowen, Yiyang Meng, Zhichao Song, and Jian da Han. Simultaneous calibration of the hand-eye, flange-tool and robot-robot relationship in dual-robot collaboration systems. *Sensors*, 22:1861, 02 2022.
- [99] Peidong Liang, Wenwei Lin, Guantai Luo, and Chentao Zhang. Research of hand-eye system with 3d vision towards flexible assembly application. *Electronics*, 11:354, 01 2022.
- [100] Ruud Barth, Jochen Hemming, and Eldert J. van Henten. Design of an eye in-hand sensing and servo control framework for harvesting robotics in dense vegetation. *Biosystems Engineering*, 146, 01 2016.
- [101] Chin-Sheng Chen and Nien-Tsu Hu. Eye-in-hand robotic arm gripping system based on

- machine learning and state delay optimization. *Sensors*, 23:1076, 01 2023.
- [102] Paulo Magalhaes and Nuno Ferreira. Inspection application in an industrial environment with collaborative robots. *Automation*, 3:258–268, 04 2022.
- [103] Eric Jackson, Z.C. Lin, and David Eddy. A global formulation of robot manipulator kinematic calibration based on statistical considerations. In *1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*, volume 4, pages 3328–3333 vol.4, 1995.
- [104] Petar Marić and Veljko Potkonjak. Geometrical parameter estimation for industrial manipulators using two-step estimation schemes. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 24(1):89–97, 1999.
- [105] Jean-michel Renders, Eric Rossignol, Marc Becquet, and Raymond Hanus. Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(6):721–732, 1991.
- [106] Markus Vincze, Johann P. Prenninger, and Helmut Gander. A laser tracking system to measure position and orientation of robot end effectors under motion. *The International Journal of Robotics Research*, 13(4):305–314, 1994.
- [107] Morris R. Driels and William E. Swayze. Automated partial pose measurement system for manipulator calibration experiments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(4):430–440, 1994.
- [108] Petar Marić and Milorad Božić. Modifikacija postupka kalibracije manipulatora bez mjerenja vanjskih koordinata. In *Zbornik radova XL Konferencija ETRAN, Sveska IV*, pages 229–232, 1996.
- [109] Petar Marić and Milorad Božić. Overcoming one singularity in geometrical parameters estimation for robot manipulator. In *Proc. of the IASTED International Conference SIPA-96*, pages 127–130, 1996.
- [110] Luciano Ginani and José Motta. Theoretical and practical aspects of robot calibration with experimental verification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 33:15–21, 03 2011.
- [111] A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. 1955.
- [112] Koichiro Okamura and Frank C. Park. Kinematic calibration using the product of exponentials formula. *Robotica*, 14(4):415–421, 1996.
- [113] Hanqi Zhuang, Zvi S. Roth, and Fumio Hamano. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators. In *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 92–97 vol.1, 1990.
- [114] Witold Żorski. Quaternion-based determination of 3d objects orientation. In *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, pages 232–237, 2017.
- [115] Samad A. Hayati. Robot arm geometric link parameter estimation. In *The 22nd IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1477–1483, 1983.
- [116] Samad Hayati, Kam Sing Tso, and Gerald Roston. Robot geometry calibration. In *Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 947–951 vol.2, 1988.
- [117] Yahui Gan, Jinjun Duan, and Xianzhong Dai. A calibration method of robot kinematic parameters by drawstring displacement sensor. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(5):1729881419883072, 2019.
- [118] Qijun Chen, Ziqiang Zhou, Chengju Liu, Xiaoxian Sun, and Xue Zhang. Design of a vision calibration method of kinematic parameters for 6-dof manipulator. *Tongji Daxue*

- Xuebao/Journal of Tongji University, 48:1023–1029, 07 2020.
- [119] Wisama Khalil and Etienne Dombre. Modeling, Identification and Control of Robots. Kogan Page Science paper edition Modeling, identification & control of robots. Elsevier Science, 2004.
- [120] Wisama Khalil, Maxime Gautier, and Ch Enguehard. Identifiable parameters and optimum configurations for robots calibration. *Robotica*, 9:63–70, 01 1991.
- [121] Petar Marić. Materijali sa predavanja- Kalibracije parametara geometrije mani pulatora, Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet. 2024.
- [122] David J. Bennett and John M. Hollerbach. Autonomous calibration of single-loop closed kinematic chains formed by manipulators with passive endpoint constraints. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(5):597–606, 1991.
- [123] John S. Bay. Autonomous parameter identification by optimal learning control. *IEEE Control Systems Magazine*, 13(3):56–61, 1993.
- [124] Yu Sun and John M. Hollerbach. Active robot calibration algorithm. In 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1276–1281, 2008.
- [125] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330–1334, 2000.
- [126] Richard Hartley and Andrew Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2 edition, 2003.
- [127] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle. Image Processing, Analysis, and Machine Vision. Chapman and Hall computing series. Thompson Learning, 2008.
- [128] Matthew Brown and David G Lowe. Invariant features from interest point groups. In *Bmvc*, volume 4, pages 398–410, 2002.
- [129] David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60:91–110, 2004.
- [130] Krystian Mikolajczyk and Cordelia Schmid. Scale & affine invariant interest point detectors. *International journal of computer vision*, 60:63–86, 2004.
- [131] Takeo Kanade and Masatoshi Okutomi. A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(9):920–932, 1994.
- [132] Xiaodong Tian, Xi Zhang, Kazuo Yamazaki, and Adam Hansel. A study on three-dimensional vision system for machining setup verification. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26:46–55, 02 2010.
- [133] Thomas Luhmann, Clive Fraser, and Hans-Gerd Maas. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 11 2015.
- [134] Roger Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(4):323–344, 1987.
- [135] Juyang Weng, Paul Cohen, and Marc Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(10):965–980, 1992.
- [136] Joong Kang, Jong-Eun Ha, Mun-Ho Jeong, and Dong Kang. Detection of calibration patterns for camera calibration with irregular lighting and complicated backgrounds. *International Journal of Control Automation and Systems*, 6, 10 2008.
- [137] Perez Ulises, Cho Sohyung, and Asfour Shihab. Volumetric calibration of stereo camera in visual servo based robot control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 6, 01 2009.

- [138] Huijuan Zhang, Chengning Zhang, Wei Yang, and Chin-Yin Chen. Localization and navigation using qr code for mobile robot in indoor environment. In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pages 2501–2506, 2015.
- [139] Junaidi Abdullah and Kirk Martinez. Camera self-calibration for the artoolkit. In The First IEEE International Workshop Augmented Reality Toolkit, pages 5 pp.–, 2002.
- [140] Edwin Olson. Apriltag: A robust and flexible visual fiducial system. In 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3400–3407, 2011.
- [141] Stephen J. Maybank and Olivier D. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera. *Int. J. Comput. Vision*, 8(2):123–151, aug 1992.
- [142] Francis Li, Hicham Sekkati, Jason Deglint, Christian Scharfenberger, Mark Lamm, David Clausi, John Zelek, and Alexander Wong. Simultaneous projector-camera self-calibration for three-dimensional reconstruction and projection mapping. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 3(1):74–83, 2017.
- [143] SQ Ge, YH Yang, and ZW Zhou. Research and application of robot hand-eye calibration method based on 3d depth camera. *Modern Electron. Technique*, 45(02):172–176, 2022.
- [144] Rahul Kumar, Sunil Lal, Sanjesh Kumar, and Praneel Chand. Object detection and recognition for a pick and place robot. In Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering, pages 1–7, 2014.
- [145] Lili Mu, Pantao Yao, Yuchen Zheng, Kai Chen, Fangfang Wang, and Nana Qi. Research on slam algorithm of mobile robot based on the fusion of 2d lidar and depth camera. *IEEE Access*, 8:157628–157642, 2020.
- [146] Binghua Guo, Hongyue Dai, Zhonghua Li, and Wei Huang. Efficient planar surface-based 3d mapping method for mobile robots using stereo vision. *IEEE Access*, 7:73593–73601, 2019.
- [147] Adil Shahzad, Xueshan Gao, Awais Yasin, Kamran Javed, and Syed Muhammad Anwar. A vision-based path planning and object tracking framework for 6-dof robotic manipulator. *IEEE Access*, 8:203158–203167, 2020.
- [148] Sining Yang, Shaowu Yang, and Xiaodong Yi. An efficient spatial representation for path planning of ground robots in 3d environments. *IEEE Access*, 6:41539–41550, 2018.
- [149] Juan-José Aguilar, F Torres, and MA Lope. Stereo vision for 3d measurement: accuracy analysis, calibration and industrial applications. *Measurement*, 18(4):193–200, 1996.
- [150] Andreas Kolb, Erhardt Barth, Reinhard Koch, and Rasmus Larsen. Time-of-flight cameras in computer graphics. *Computer Graphics Forum*, 29:141–159, 03 2010.
- [151] Sergi Foix, Guillem Alenya, and Carme Torras. Lock-in time-of-flight (tof) cameras: A survey. *IEEE Sensors Journal*, 11(9):1917–1926, 2011.
- [152] Joaquim Salvi, Sergio Fernandez, Tomislav Pribanic, and Xavier Llado. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition*, 43(8):2666–2680, 2010.
- [153] Xiaobo Chen, Juntong Xi, Ye Jin, and Jin Sun. Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection. *Optics and Lasers in Engineering*, 47:310–319, 03 2009.
- [154] Aamir Saeed Malik. *Depth Map and 3D Imaging Applications: Algorithms and Technologies: Algorithms and Technologies*. Premier reference source. Information Science Reference, 2011.
- [155] Wojciech Kurzydło, B. Stach, Aleksandra Bober, Mariola Wodzinska, and Mirosława Długosz. Structured-light 3d scanner in use to assess the human body posture in physical therapy- a pilot study. *Folia medica Cracoviensia*, 54:21–35, 01 2014.
- [156] Wonkwi Jang, Changsoo Je, Yongduek Seo, and Sangwook Lee. Structured-light stereo:



Comparative analysis and integration of structured-light and active stereo for measuring dynamic shape. *Optics and Lasers in Engineering*, 51:1255–1264, 11 2013.

[157] Konstantinos Falaggis and Rosario Porras-Aguilar. Grey-level coding for structured-light illumination systems. In *Interferometry XIX*, volume 10749, pages 109–121. SPIE, 2018.

[158] Song Zhang and Shing-Tung Yau. High-resolution, real-time 3d absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method. *Optics express*, 14:2644–9, 05 2006.

[159] Ruiming Yu, Hongshan Yu, Xianqiang Liang, Wei Sun, Zirong Zeng, and Naveed Akhtar. Phase-domain modulated hybrid phase-shifting structured light based efficient 3d measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 172:107875, 2024.

[160] Yujia Zhang and Alper Yilmaz. Structured light based 3d scanning for specular surface by the combination of gray code and phase shifting. *ISPRS- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B3:137–142, 06 2016.

[161] Mohit Gupta and Nikhil Nakhate. A geometric perspective on structured light coding. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 87–102, 2018.

[162] Jason Geng. Structured-light 3d surface imaging: a tutorial. *Advances in optics and photonics*, 3(2):128–160, 2011.

[163] Jinsheng Fu, Yabin Ding, Tian Huang, and Xianping Liu. Hand-eye calibration method with a three-dimensional-vision sensor considering the rotation parameters of the robot pose. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17:172988142097729, 12 2020.

[164] Song Zhang. High-speed 3d shape measurement with structured light methods: A review. *Optics and lasers in engineering*, 106:119–131, 2018.

[165] Abid Haleem, Mohd Javaid, Ravi Pratap Singh, Shanay Rab, Rajiv Suman, Lalit Kumar, and Ibrahim Haleem Khan. Exploring the potential of 3d scanning in industry 4.0: An overview. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 3:161–171, 2022.

[166] Jianhua Wang, Yuguo Zhou, and Yanxi Yang. Three-dimensional shape detection for non uniform reflective objects: Combination of color light projection and camera's exposure adjustment. *IEEE Sensors Journal*, 20(19):11474–11483, 2020.

[167] Mitsubishi Electric Corporation. Mitsubishi Industrial Robot, SD Series, RV-2SD/2SDB, Standard Specifications Manual, CR1DA-700 series Controller, 2024. Dostupno na <https://suport.siriustrading.ro/02.DocArh/07.RI/03.Seria%20RV%20%28Vertical%29/05.RV-SD/01.Manuale/RV-2SD%20-%20Standard%20Specifications%20Manual%20BFP-A8790-R%20%2807.12%29.pdf>.

[168] Mitsubishi Electric Corporation. Mitsubishi Industrial Robot, SD Series, RV 2SD/2SDB, Instruction Manual, Robot Arm Setup & Maintenance, 2024. Dostupno na [https://suport.siriustrading.ro/02.DocArh/07.RI/03.Seria%20RV%20\(Vetical\)/05.RV-SD/01.Manuale/RV-2SD%20-%20Instruction%20Manual%20\(Arm%20Setup,%20Maintenance\)%20BFP-A8791-D%20\(05.11\).pdf](https://suport.siriustrading.ro/02.DocArh/07.RI/03.Seria%20RV%20(Vetical)/05.RV-SD/01.Manuale/RV-2SD%20-%20Instruction%20Manual%20(Arm%20Setup,%20Maintenance)%20BFP-A8791-D%20(05.11).pdf).

[169] Steinbichler Optotechnik GmbH. Comet L3D 5M User Manual.

[170] Steinbichler Optotechnik GmbH. COMETplus Operating instructions.

[171] Chrsitain Bernal, Beatriz de Agustina, Marta M. Marín, and Ana Maria Camacho. Performance evaluation of optical scanner based on blue led structured light. *Procedia Engineering*, 63:591–598, 2013. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013.

[172] The MathWorks, Inc. MATLAB version: 9.13.0 (R2022b), 2022. Dostupno na <https://www.mathworks.com>.

[173] Kaxlamangla S. Arun, Thomas S. Huang, and Steven D. Blostein. Least-squares fitting of two 3-d point sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-

9(5):698–700, 1987.

[174] Philip H. S. Torr and Andrew Zisserman. Mlesac: A new robust estimator with application to estimating image geometry. *Computer Vision and Image Understanding*, 78(1):138–156, 2000.

[175] Yuping Ye and Zhan Song. A practical means for the optimization of structured light system calibration parameters. In *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 1190–1194, 2016.

[176] Zhongwei Li, Yusheng Shi, Congjun Wang, and Yuanyuan Wang. Accurate calibration method for a structured light system. *Optical Engineering- OPT ENG*, 47, 05 2008.

[177] Wei Li, Mingli Dong, Naiguang Lu, Xiaoping Lou, and Peng Sun. Simultaneous robot–world and hand–eye calibration without a calibration object. *Sensors*, 18(11), 2018.

[178] Liao Wu, Jiaole Wang, Lin Qi, Keyu Wu, Hongliang Ren, and Max Q.-H. Meng. Simultaneous hand–eye, tool–flange, and robot–robot calibration for comanipulation by solving the  $AXB = YCZ$  problem. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(2):413–428, 2016.

[179] Dahu Cao, Wei Liu, Shun Liu, Jia Chen, Wang Liu, Jimin Ge, and Zhaohui Deng. Simultaneous calibration of hand-eye and kinematics for industrial robot using line-structured light sensor. *Measurement*, 221:113508, 2023.

У поређењу са раније објављеним резултатима, реализован је побољшан алгоритам за обраду информација о прирубници робота кружног облика, те омогућена прецизна и тачна процјена њених геометријских обиљежја без коришћења података дефинисаних ISO стандардом.

Користећи предложени приступ, омогућена је висока тачност калибрације без потребе за додатном компензацијом грешке у поређењу са претходно објављеним резултатима који су засновани на сличним методама, без обзира да ли користе или не користе калибрационе објекте. Предложени поступак калибрације представља приступ заснован на коришћењу реалних података добијених визуелним сензором и преузимањем са контролера робота.

Такође, процес калибрације је поједностављен, тако да ће бити потребан мањи број позиција прирубнице робота у видном пољу визуелног сензора, истовремено обезбјеђујући високу прецизност и поузданост уз адекватно одабране позиције прирубнице током процеса калибрације.

Коначно, предложени метод калибрације показује велики потенцијал за значајна побољшања у процесу калибрације система робот-визуелни сензор, као што су поједностављење и убрзавање процеса калибрације, смањење времена припреме и минимизирање утицаја људског фактора на ефикасност и прецизност процеса калибрације.

Дакле, кандидат је реализованом докторском дисертацијом остварио постављене циљеве и потврдио тестиране хипотезе.

1. Укратко описати разлоге због којих су истраживања предузета и представити проблем, предмет, циљеве и хипотезе.
2. На основу прегледа литературе, сажето приказати резултате претходних истраживања у вези проблема који је истраживан (водити рачуна да обухвата најновија и најзначајнија сазнања из те области код нас и у свијету).
3. Навести допринос тезе у рјешавању изучаваног предмета истраживања.
4. Навести очекивани научни и практични допринос дисертације.

## 5. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДОЛОГИЈА РАДА

При изради докторске дисертације, како је и планирано, кориштена је сљедећа опрема:

- Индустијски робот RV2SDB, Mitsubishi Electric Corporation,
- 3D скенер, LED 5M, Steinbichler Optotechnik GmbH,
- софтверски пакет MATLAB,
- персонални рачунар, оперативни системи Windows 10, UBUNTU Linux 18.04, Microsoft Office апликације, као и
- остала помоћна опрема и програмска подршка.

Сви експерименти су реализовани у лабораторијама Катедре за аутоматiku, Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци.

Методолошки, докторска дисертација је реализована на основу:

- прегледа, анализе и систематизације релевантних литературних извора,
- дефинисаном поступку за калибрацију система без коришћења калибрационог објекта, тј. примјеном прирубнице робота као референтног калибрационог објекта, заснованог на анализи референтне литературе и личним запажањима кандидата,
- формирања математичког модела процеса калибрације заснованог на усвојеном приступу калибрацији система, гдје се процјена калибрационих параметара система заснива на једначини транслације и коришћењу (координата центра прирубнице) једне тродимензионалне тачке као референтне тачке за калибрацију
- специфициране метрике за валидацију алгоритма и калибрације система,
- пројектованог и имплементираног алгоритма за обраду информација о прирубници робота добијених визуелним системом,
- валидације предложеног алгоритма и оцјени његових перформанси,
- калибрације система коришћењем предложеног приступа и
- статистичке анализе резултата добијених предложеним поступком калибрације, уз поређење са постојећим публикованим резултатима.

У процесу калибрације кориштени су реални подаци добијени визуелним сензором и преузимањем података са контролера робота. Кориштена опрема, остварени експериментални услови, као и примијењени поступци за прикупљање и обраду експерименталних података подржавају и штите интегритет остварених резултата. Валидација резултата истраживања је потврђена поређењем са резултатима публикованим у референтној литератури. Остварена тачност калибрације боља је за ред величине у односу на резултате публиковане у референтној литератури.

Иницијални план истраживања је реализован у потпуности.

Статистичка обрада података је адекватна, коректно примијењена те омогућава непристрасну оцјену добијених резултата.

1. Описати и дати основне карактеристике материјала који је обрађиван, критеријуме који су узети у обзир за избор материјала.
2. Дати кратак увид у примијењени метод истраживања, при чему је важно оцијенити сљедеће:
  - 2.1. Да ли су примијењене методе истраживања адекватне, довољно тачне и савремене, имајући у виду достигнућа на том пољу у свјетском оквиру;
  - 2.2. Образложити евентуалне измјене првобитног плана истраживања;
  - 2.3. Да ли је обим истраживања довољан за доношење поузданих закључака или је потребно проширити постојеће или увести нове методе;
  - 2.4. Да ли је статистичка обрада података адекватна, ако је кориштена при обради резултата.

## 6. РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

Кандидат је презентовао и критички анализирао литературне изворе релевантне за област истраживања. Анализа је урађена објективно, уз уважавање принципа научно-истраживачког рада. Резултати анализе су приказани систематизовано и концизно. Стога, преглед релевантних литературних извора може представљати полазну тачку за свако наредно истраживање из предметне области.

У поређењу са објављеним резултатима, побољшан је алгоритам за обраду информација о прирубници робота, која је кружног облика, те је омогућена прецизна и тачна процјена њених геометријских обиљежја. Процјена се реализује без кориштења података дефинисаних релевантним ISO стандардом. Такође, омогућена је висока тачност калибрације кориштењем предложеног приступа. Наведена оцјена је дата поређењем предложеног поступка са претходно објављеним резултатима који су засновани на сличним методама, без обзира користе ли калибрационе објекте.

Даље, поједностављен је процес калибрације, стога је потребан мањи број позиција прирубнице робота у видном пољу визуелног сензора. Истовремено, адекватно одабране позиције прирубнице обезбјеђују високу прецизност и поузданост процеса калибрације.

Коначно, предложени метод калибрације показује велики потенцијал за побољшања у процесу калибрације система робот-визуелни сензор, као што су поједностављење и убрзавање процеса калибрације, смањење времена припреме и минимизирање утицаја људског фактора на ефикасност и прецизност процеса калибрације те потенцијал за примјену предложеног приступа у задацима кинематичке калибрације манипулатора.

Сви остварени резултати су представљени концизно, систематизовано и технички коректно, а њихова интерпретација и оцјена је логички конзистентна, објективна и недвосмислена.

1. Укратко навести резултате до којих је студент дошао.
2. Оцијенити да ли су добијени резултати јасно приказани, правилно, логично и јасно тумачени, упоређујући их са резултатима других аутора и да ли је студент при томе испољавао довољно критичности.
3. Посебно је важно истаћи до којих нових сазнања се дошло у истраживању, који је њихов теоријски и практични допринос, те да ли указују на нове правце истраживања.

## 7. ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

Полазећи од информација представљених у овом Извјештају, Комисија закључује како је докторска дисертација кандидата Велибора Ђалића, ма, која носи наслов „Повећање прецизности и флексибилности робота примјеном визуелног система без коришћења калибрационог објекта”, реализована у складу са образложењем које је кандидат навео у пријави теме.

Такође, докторска дисертација је урађена у складу са постављеним циљевима истраживања, коришћењем адекватних материјала и ресурса, примјењујући сва правила и принципе научно-истраживачког рада и уважавајући високе академске и етичке стандарде.

Кандидат је реализовао докторском дисертацијом дао сљедеће доприносе ужој научној области Аутоматика и роботика.

Показао је како је могуће реализовати калибрацију система робот-визуелни сензор коришћењем геометријских обиљежја прирубнице робота кружног облика без коришћења

калибрационог објекта, и без потребе за додатном компензацијом грешке калибрације.

Даље, показао је како је, коришћењем предложеног приступа, могуће постићи високу тачност процјене калибрационих параметара, при чему је грешка калибрације мања од једног милиметра.

Такође, показао је како је могуће, коришћењем предложене методологије, повећати флексибилност процедуре калибрације при чему се смањује комплексност процедуре калибрације система коришћењем минималног броја адекватно одабраних позиција прирубнице робота у видном пољу визуелног система. Повећана флексибилност се постиже уз конзистентно достизање високо прецизне процјене резултантне матрице трансформације између робота и визуелног система.

Кандидат је демонстрирао темељно познавање и дубоко разумијевање предмета истраживања, способност да организује и успјешно реализује комплексно научно истраживање, а резултате истраживања и научне доприносе ваљано оцијени и квалитетно презентује. Стога, Комисија сматра да је кандидат Велибор Ђалић, ма у потпуности одговорио на проблематику која је разматрана у докторској дисертацији те предлаже Научно-наставном вијећу Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци и Сенату Универзитета у Бањој Луци да прихвати докторску дисертацију, а кандидату одобри јавну одбрану дисертације.

1. Навести најзначајније чињенице које дају научни значај тези.
2. На основу укупне оцјене дисертације, комисија предлаже:
  - да се докторска дисертација прихвати, а студенту одобри одбрана,
  - да се докторска дисертација враћа студенту на дораду (да се допуни или измијени) или
  - да се докторска дисертација одбија.

Бања Лука, 5. 12. 2024. године:

---

*Проф. др Игор Крчмар, ванредни професор, с.р.*

Предсједник комисије

---

*Проф. др. Александар Ракић, редовни професор,  
с.р.*

Члан

---

*Проф. др Владимир Рисојевић, ванредни  
професор, с.р.*

Члан

ИЗДВОЈЕНО МИШЉЕЊЕ: Члан комисије који не жели да потпише извјештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије дужан је да у извјештај унесе образложење, односно разлоге због којих не жели да потпише извјештај.

У прилогу Извјештаја доставити:

1. Одлуку о прихватању извјештаја Комисије за оцјену подобности студента, теме и ментора за израду докторске дисертације;

2. Одлуку о именовану Комисије за оцјену урађене докторске дисертације;
3. Доказе о подобности чланова Комисије за оцјену урађене докторске дисертације (радови и пратећи докази из члана 16. Правила студирања на III циклусу студија за студије започете закључно са академском годином 2021/2022, односно докази из члана 35. Правила студирања на трећем циклусу студија за студије започете од академске 2022/2023. године); и
4. Доказе о подобности студента (радови и пратећи докази из члана 15. Правила студирања на III циклусу студија за студије започете закључно са академском годином 2021/2022, односно докази из члана 34. Правила студирања на трећем циклусу студија за студије започете од академске 2022/2023. године).