



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ



Велибор Ђалић

**Повећање прецизности и флексибилности  
робота примјеном визуелног система без  
коришћења калибрационог објекта**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Бања Лука, 2025.



UNIVERSITY OF BANJA LUKA  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING



Velibor Đalić

# Improving the precision and flexibility of robots by using a visual system without a calibration object

DOCTORAL DISSERTATION

Banja Luka, 2025

## Информације о ментору и дисертацији

### Ментор I :

Проф. др Петар Марић, редовни професор  
Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет

### Ментор II :

Проф. др Коста Јовановић, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

### Наслов докторске дисертације:

Повећање прецизности и флексибилности робота примјеном визуелног система без коришћења калибрационог објекта

### Резиме:

Тачна и поуздана процјена трансформационе матрице између робота и визуелног сензора представља кључни аспект процеса калибрације система рука-око, неопходног за примјену роботизованих система чији рад је заснован на информацијама добијеним визуелним сензором. У дисертацији је представљен нови приступ калибрацији система рука-око без коришћења калибрационог објекта, који омогућава повећање тачности и флексибилности калибрације, без потребе за компензацијом грешака. Предложен је систем заснован на индустријском роботу и индустријском 3D скенеру. Анализиран је избор визуелног сензора и предложен скенер заснован на технологији структурираног свјетла плаве боје. Предложена процедура калибрације заснована је на коришћењу центра прирубнице робота као референтне тачке за калибрацију. Ова тачка представља исходиште координатног система којим се дефинише положај центра прирубнице, односно положај хватаљке или алата постављених на прирубницу, и за њено означавање се обичајено користи скраћеница ТСП (енгл. *Tool Center Point*). Процјена координата ТСП-а заснива се на обради скупа 3D тачака прирубнице, добијеног визуелним сензором. Изведен је математички модел којим се поједностављује традиционална калибрација робот-визуелни сензор заснована на коришћењу калибрационих објеката. Предложен је нови алгоритам заснован на фитовању 3D кружнице, и коришћењу метода најмањих квадрата и најближих сусједа за аутоматску процјену геометријских обиљежја прирубнице. Прецизност и поузданост перформанси предложеног алгоритма верификована је помоћу калибрационог прстена, као референтног калибрационог еталона. Анализиран је утицај броја и избора позиција прирубница робота на тачност калибрације система. Резултати проведених експеримената показују да процедура калибрације система робот-визуелни сензор, предложена у дисертацији, омогућава тачну процјену трансформације између робота и 3D скенера, чак и када се користе минимално четири позиције прирубнице, чији центри представљају некопланарне тачке у заједничком радном простору. Предложеним приступом побољшана је тачност калибрације у поређењу са актуелним методама калибрације без обзира да ли користе или не користе калибрационе објекте. Представљене анализе експерименталних резултата показују потенцијал предложеног приступа за постизање ефикасније процедуре калибрације система робот-визуелни сензор, затим могућност за постизање једноставније

имплементације и повећање тачности и флексибилности калибрације система, те потенцијал за коришћење предложеног приступа и методологије у процедурама кинематичке калибрације манипулатора заснованог на отвореном кинематичком ланцу.

**Кључне ријечи:** Калибрација система робот-визуелни сензор, кинематичка калибрација робота, прирубница робота, ТСР, облак тачака прирубнице робота, 3D скенер

**Научна област:** Инжењерство и технологија

**Научно поље:** Електротехника, електроника и информационо инжењерство

**Класификациона ознака:** Т 125

**Тип одабране лиценце Креативне заједнице:** СС BY-SA

## Information about mentor and dissertation

### **Mentor I:**

Prof. dr Petar Marić, full professor  
University of Banja Luka, Faculty of Electrical Engineering

### **Mentor II:**

Prof. dr Kosta Jovanović, associate professor  
University of Belgrade, Faculty of Electrical Engineering

### **Title of doctoral dissertation:**

Improving the precision and flexibility of robots by using a visual system without a calibration object

### **Abstract:**

Accurate and reliable estimation of the transformation matrix between the robot and the visual sensor represents a key aspect of the hand-eye calibration process, which is essential for the application of robotic systems whose operation is based on information obtained from the visual sensor. This dissertation presents a novel approach to hand-eye calibration without the use of a calibration object, which enables increased accuracy and flexibility of the calibration process, without the need for error compensation. A system based on an industrial robot and an industrial 3D scanner is proposed. The selection of the visual sensor is analyzed, and a scanner based on structured blue light technology is proposed. The proposed calibration procedure is based on using the robot flange center as the reference point for calibration. This point represents the origin of the coordinate system used to define the position and orientation of the flange center, or the position and orientation of the gripper or tool mounted on the flange. The abbreviation TCP (Tool Center Point) is commonly used to denote this point. The estimation of the TCP coordinates is based on the processing of a set of 3D points of the robot's flange, obtained by the visual sensor. A mathematical model that simplifies the traditional hand-eye calibration based on the use of calibration objects has been derived. A new algorithm based on 3D circle fitting and the use of the least squares method and nearest neighbors for the automatic estimation of the flange's geometric features has been proposed. The precision and reliability of the proposed algorithm's performance have been verified using a calibration ring as the reference calibration standard. The impact of the number and selection of the robot's flange positions on the accuracy of the system calibration has been analyzed. The results of the conducted experiments show that the hand-eye system calibration procedure, proposed in the dissertation, which uses the proposed algorithm, allows for accurate estimation of the transformation between the robot and the 3D scanner, even when a minimum of four flange positions is used, where their centers represent non-coplanar points in the common workspace. The proposed approach improves calibration accuracy compared to current calibration methods, regardless of whether they use calibration objects or not. The presented analysis of the experimental results demonstrates the potential of the proposed approach for achieving a more efficient hand-eye system calibration procedure, enabling simple implementation and increasing the accuracy and flexibility of the system calibration. Furthermore, the proposed approach and methodology show

the potential for application in the kinematic calibration of manipulators that use an open kinematic chain.

**Keywords:** Robot-visual sensor system calibration, robot kinematic calibration, robot flange, TCP, flange point cloud, 3D scanner

**Scientific area:** Engineering and technology

**Scientific field:** Electrical engineering, electronics and information engineering

**Classification code:** T 125

**Creative Commons license type:** CC BY-SA

## Захвалница

Желим да изразим своју захвалност свима који су ми пружили подршку и помоћ током израде моје докторске дисертације. Хвала вам што сте били уз мене, дијелили своје знање и искуство, и мотивисали ме да започети посао приведем крају. Без ваше помоћи, овај пут би био знатно тежи, стога је ова дисертација резултат нашег заједничког труда.

С поштовањем,

Велибор Ђалић  
Бања Лука,  
Република Српска,  
Босна и Херцеговина

Мојим родитељима  
*Драгињи и Миограју*



# Нотација

$x$  Скаларна величина

$\mathbf{x}$  Векторска величина - вектор колона

$\mathbf{X}$  Матрица

$\mathbf{X}(i,:)$  Сви елементи  $i$  - те врсте матрице

$\mathbf{X}(:,i)$  Сви елементи  $i$  - те колоне матрице

$[\mathbf{X} \ \mathbf{x}]$  Композиција елемената  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{x}$

$\mathbf{T}_n^m$  Хомогена матрица трансформације између координатних система  $m$  и  $n$

$\mathbf{I}$  Јединична матрица

$\mathbf{X}$  Тачка у 3D простору

$\mathbf{x}$  Тачка у 2D простору

$\hat{x}$  Процијењена (естимирана) вриједност елемента

$|\cdot|$  Апсолутна вриједност елемента

$\|\cdot\|$  Норма елемента

$\underset{d}{\operatorname{argmin}} f(d)$  Вриједност елемента за коју функција има минималну вриједност

# Садржај

Информације о ментору и дисертацији . . . . .	i
Information about mentor and dissertation . . . . .	iii
Захвалница . . . . .	v
Посвета . . . . .	vi
Нотација . . . . .	vii
Списак табела . . . . .	xi
Списак слика . . . . .	xii
<b>1 Увод . . . . .</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Преглед литературе . . . . .</b>	<b>10</b>
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
<b>3</b>	<b>Калибрација система робот-визуелни сензор . . . . .</b>	<b>20</b>
3.1	Конфигурације система робот-визуелни сензор . . . . .	21
3.2	Методологија калибрације система робот-визуелни сензор . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Кинематичка калибрација робота . . . . .</b>	<b>27</b>
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
<b>5</b>	<b>Визуелни сензори у роботици . . . . .</b>	<b>42</b>
5.1	Модел камере . . . . .	43
5.2	Калибрација камере . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Визуелни системи у задацима калибрације система робот-визуелни сензор . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Експериментална поставка, предложени метод калибрације и алгоритам за процјену геометријских обиљежја прирубнице . . . . .</b>	<b>54</b>
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 ТСП-а прирубнице манипулатора заснован на обради скупа 3D тачака . . . . .	70
7.4	Метрика грешке . . . . .	75
<b>8</b>	<b>Експериментални резултати . . . . .</b>	<b>77</b>
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 ТСП-а прирубнице манипулатора . . . . .	84
8.5	Валидација предложеног поступка калибрације . . . . .	87
8.6	Дискусија . . . . .	90
8.7	Кинематичка калибрација манипулатора заснована на предложеној методологији . . . . .	96
<b>9</b>	<b>Закључак . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>A</b>	<b>Робот Mitsubishi RV-2SDB . . . . .</b>	<b>106</b>
<b>Б</b>	<b>Прирубница робота Mitsubishi RV-2SDB . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>В</b>	<b>3D скенер Comet L3D 5M . . . . .</b>	<b>110</b>
<b>Г</b>	<b>Калибрациони прстен Mitutoyo NO. 177-290 (2011160) . . . . .</b>	<b>111</b>
	<b>Библиографија . . . . .</b>	<b>113</b>
	<b>Прилози . . . . .</b>	<b>128</b>

# Списак табела

8.1	Валидација алгорита коришћењем калибрационог прстена . . . . .	85
8.2	Процјена координата центра прирубнице у зависности од $n_{cp}$ . . . . .	88
8.3	Поновљивност процјене координата центра прирубнице за $n_{cp} = 20$ .	88
8.4	Број комбинација за сваки од могућих експеримената калибрације и валидације . . . . .	89
8.5	Најбоље и најлошије оцијењени резултати калибрације–комбинације позиција прирубнице и одговарајућа норма грешака . . . . .	93
8.6	Поређење методологија и резултата . . . . .	95
8.7	Номинални параметри геометрије манипулатора у складу са стандардном D-H нотацијом . . . . .	97
8.8	Референтне вриједности параметара геометрије манипулатора у складу са дефинисаном корекцијом за пети зглоб $\theta_5 = q_5 - 0.1745 \text{ rad}$ . .	99
8.9	Норма грешке позиције врха манипулатора и вриједности параметра геометрије $\theta_5$ , процијењеног у току калибрације . . . . .	100
8.10	Процијењене вриједности параметара геометрије манипулатора поступком кинематичке калибрације . . . . .	100
A.1	Параметри геометрије манипулатора у складу са стандардном D-H нотацијом . . . . .	107
B.1	Техничке карактеристике различитих типова прирубница робота . .	109
V.1	Техничка спецификација и карактеристике скенера . . . . .	110
Г.1	Техничка спецификација и карактеристике калибрационог прстена .	111

# Списак слика

3.1	Међусобни однос између простора робота, визуелног сензора и објекта	20
3.2	Конфигурације система робот-визуелни сензор: а) Око-ка-руци, б) Око-у-руци . . . . .	21
3.3	Дијаграм тока калибрације система робот-визуелни сензор . . . . .	26
4.1	Типови калибрација роботских манипулатора . . . . .	27
4.2	Дефинисање координатних система за моделовање роботског мани- пулатора . . . . .	29
4.3	Маркер постављен на завршни уређај манипулатора: а) Тренинг сли- ка маркера, б) Локална обиљежја маркера . . . . .	35
4.4	Тренинг слике маркера постављених на завршни уређај манипулатора	36
4.5	Карактеристична обиљежја тренинг слике маркера и одговарајућа обиљежја у слици која се претражује . . . . .	37
4.6	Примјена <i>Canny</i> алгоритма: а) Сегмент слике издвојен SIFT алго- ритмом, б) Резултат примјене <i>Canny</i> алгоритма . . . . .	38
4.7	Одређивање кореспондентних тачака засновано на корелацији обла- сти најсличнијих интензитета . . . . .	38
4.8	Слике добијене стерео камером: а) Слика са лијеве камере, Слика 4.5, б) Слика са десне камере - детекција маркера заснована на коре- лацији области најсличнијих интензитета . . . . .	39

4.9	Графичка репрезентација критеријумске функције за промјену диспаритета дуж еиполарне линије, гдје $u$ и $v$ представљају координате центра прозора при чему се $u$ мијења у складу са помијерањем прозора, док је $v$ фиксирано на вриједност координате центра маркера пронађеног на лијевој слици . . . . .	40
4.10	Графичка репрезентација зависности критеријумске функције за промјену диспаритета дуж еиполарне линије и усвојене величине прозора	41
5.1	Параметри модела камере . . . . .	42
5.2	Геометрија модела камере . . . . .	43
5.3	Ефекти радијалних изобличења . . . . .	44
5.4	Ефекти тангенцијалних изобличења . . . . .	45
5.5	Калибрациони објекти: а) Објекат са двије ортогоналне равни (омогућава скупове компланарних тачака), б) 2D (планарни) објекти . .	47
7.1	Фотографија експерименталне поставке у конфигурацији са фиксном камером . . . . .	55
7.2	Фотографија робота Mitsubishi RV-2SDB: а) Манипулатор, б) Контролер, в) Ручни управљачки уређај . . . . .	56
7.3	Прирубница манипулатора робота RV-2SDB: а) Фотографија прирубнице, б) Техничка спецификација прирубнице . . . . .	57
7.4	Конфигурације за калибрацију нулте позиције робота . . . . .	59
7.5	Спецификација алата за калибрацију нулте позиције робота . . . . .	60
7.6	Фотографија 3D скенера Comet L3D 5M . . . . .	60
7.7	Принцип рада 3D скенера: а) Процедура скенирања, б) Деформација пројектованог обрасца . . . . .	61
7.8	Принцип израчунавања дубине заснован на триангулацији . . . . .	62
7.9	Опрема за калибрацију скенера: а) Калибрационе табла, б) Образац позиционирања . . . . .	64

7.10	Позиционирање скенера и калибрационе табле: (а) Препоруке у складу с документацијом, (б) Фотографија система у току калибрације, (в) Примјер снимљених маркера у току калибрације 3D скенера . . . . .	65
7.11	Калибрациони прстен Mitutoyo NO. 177-290 (2011160) . . . . .	66
7.12	Илустрација система робот-визуелни сензор: (а) Систем подобан за методе које користе традиционалне калибрационе објекте, (б) Систем пројектован за калибрацију коришћењем прирубнице као калибрационог објекта . . . . .	67
7.13	Прирубница манипулатора; (а) Фотографија прирубнице, (б) Скуп 3D тачака прирубнице . . . . .	70
7.14	Блок дијаграм алгоритма . . . . .	71
7.15	Скуп 3D тачака снимљен за једну од позиција прирубнице: (а) Скуп 3D тачака у видном пољу 3D скенера, (б) Скуп 3D тачака прирубнице након уклањања сувишних дијелова, (в) Скуп 3D тачака горње површи прирубнице након процеса фитовања равни . . . . .	71
7.16	Фаза 1 - Иницијална процјена величина $C_f$ , $r_f$ и најближе тачке иницијалном центру $C_f$ : (а) Илустрација резултата фазе 1, (б) Резултат фазе 1 коришћењем реалног скупа података . . . . .	73
7.17	Фаза 2 - Издајање тачака (црвене тачке) најближих дефинисаној кружници на основу иницијалних параметара: (а) Илустрација резултата фазе 2, (б) Резултат фазе 2 коришћењем реалног скупа података . . . . .	73
7.18	Фаза 3 - Коначна процјена координата ТСП-а заснована на фитовању 3D кружнице кроз издвојене тачке: (а) Илустрација резултата фазе 3, (б) Резултат фазе 3 коришћењем реалног скупа података . . . . .	75
8.1	Калибрациони алат . . . . .	78
8.2	Калибрација нулте позиције робота . . . . .	79



8.3	Снимање калибрационе табле у току калибрације скенера: а) Примјер добро детектованих тачака, б) Примјер лоше детектованих тачака . . . . .	80
8.4	Статистички показатељи квалитета калибрације: (а) Калибрација коришћењем 9 позиција калибрационе табле, (б) Калибрација коришћењем 5 позиција калибрационе табле . . . . .	81
8.5	Статистички показатељи квалитета калибрације - најбоље оцијењена калибрација . . . . .	82
8.6	Оцјена верификације . . . . .	82
8.7	Табла за валидацију: а) Физички модел реализоване табле, б) Резултат аутоматске детекције центара маркера . . . . .	83
8.8	Валидација калибрације: (а) Калибрација коришћењем 9 позиција калибрационе табле, (б) Калибрација коришћењем 5 позиција калибрационе табле . . . . .	84
8.9	Калибрациони прстен Mitutoyo NO. 177-290: (а) Фотографија калибрационог прстена, (б) Скуп 3D тачака калибрационог прстена добијен коришћењем 3D скенера . . . . .	85
8.10	Расподјела грешке процјене пречника калибрационог прстена . . . . .	86
8.11	Просторна распоређеност 3D скупа тачака прирубнице у радном простору система . . . . .	87
8.12	Средње вриједности грешака између процијењених и стварних координата ТСП-а за појединачне просторне координате: (а) координата $X$ , (б) координата $Y$ , (в) координата $Z$ , (г) норма средње грешке ТСП-а . . . . .	90
8.13	Позиције прирубнице у радном простору система за које се добија налошији резултат калибрације . . . . .	94
8.14	Калибрација параметара геометрије за случај $\theta_5 = q_5 - 0.1745 \text{ rad}$ : (а) Вриједности норме грешке позиције врха манипулатора, (б) Вриједности коригованог параметра процијењене у току калибрације . . . . .	99

А.1	Спољашње димензије и област радног простора робота . . . . .	106
Б.1	Формат означавања прирубница робота . . . . .	108
Г.1	Скица калибрационог прстена . . . . .	112

# Глава 1

## Увод

Развој роботике, од самог почетка, инспирисан је биолошким принципима на основу којих функционише људски организам [1]. Најбољи показатељ је све бржи развој хуманоидних робота, који у цјелости настоје да опонашају човјека. Међутим, ако се пажња посвети почетку развоја робота, може се уочити да су индустријски работи, намијењени за обављање манипулационих задатака, дизајнирани по узору на људску руку. Доказ ове тврдње произилази из чињенице да и одређени дијелови робота, због лакше идентификације и описа функционисања, носе називе као зглобови људске руке, као на примјер раме, лакат, шака, итд. Такође, развој хватаљки, као завршних уређаја који се постављају на врх робота и служе за хватање и манипулацију објектима, те њихова функционалност, заснована је на принципу функционисања људске шаке и прстију. Осим механичке структуре, функционалност и рад робота су такође засновани на имитацији људског организма. Мозак робота је реализован у виду контролера и задужен је за управљање његовом механичком структуром. Чула вида, слуха и додира у роботици су реализована сензорима који свој рад заснивају на прикупљању визуелних, звучних и тактилних информација, док се обрада информација и доношење одлука реализује коришћењем алгоритама чији развој је такође заснован на основим принципима размишљања и одлучивања карактеристичним за функционисање људског организма.

Развој савремене роботике заснован је на анализи комплекснијих принципа функционисања, у циљу постизања интелигентних и аутономних робота. Овај концепт заснован је на интеграцији сензора и робота у јединствен систем, те развој напредних управљачких структура које омогућавају њихову реализацију [2]. Главни изазови у роботици фокусирани су на сарадњу робота и човјека, те развој роботизованих система који посједују способност аутономног доношења одлука [3–5]. Да би се реализовали поменути изазови потребно је обезбиједити координацију свих елемената система, како би се омогућила њихова примјена у реализацији специфичних задатака. Ово прије свега намеће захтјев за реализацију прецизних и флексибилних роботизованих система. Стога су постизање високог степена прецизности, са циљем побољшања перформанси робота и њихове примјене у веома захтјевним задацима, те повећање флексибилности, са циљем прилагођавања промјенљивом окружењу, задацима и циљевима, у фокусу развоја и унапређења роботизованих система.

---

Визуелни сензори представљају једну од кључних компонената модерне роботике које су значајно допринијеле повећању прецизности и флексибилности робота. Примјена визуелних сензора је утицала на проширење могућности робота у смислу перцепције, навигације и интеракције у радном простору робота, те њихову примјену у широком спектру задатака како у индустрији, тако и областима које захтијевају детекцију, препознавање и манипулацију објектима, интеракцију људи и робота, локализацију и заобилажење препрека, виртуелну реалност, безбједност, итд. Да 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. Посебну популарност стекла је калибрација система који су засновани на интеграцији роботског манипулатора и визуелног сензора, позната под називом калибрација рука-око (енгл. *Hand-Eye calibration*) [6]. У литератури се за термин рука-око често користи скраћеница НЕ (енгл. *Hand-Eye*), те ће ова скраћеница бити коришћена и у дисертацији. Термин рука и око, у складу са излагањем у првом параграфу, односи се на аналогiju роботског манипулатора и руке, те визуелног система и ока. Терминологија није случајно усвојена, с обзиром да је функционисање система роботски манипулатор-визуелни сензор засновано на основним принципима координације руку и очију човјека.

НЕ калибрација представља кључни аспект интеграције робота и визуелних сензора, чији је циљ омогућити прецизнију перцепцију и интеракцију робота са околином. Овај циљ се постиже тачном и поузданом процјеном хомогене трансформације, којом се дефинише међусобни однос (позиција и оријентација) референтних координатних система визуелног сензора и робота, а која представља резултат процеса калибрације. Процес калибрације заснива се на процјени калибрационих параметара коришћењем референтних тачака изражених у референтним координатним системима робота и визуелног сензора, а које се добијају поступком мјерења. Стога је дефинисање референтних тачака за калибрацију и могућност њиховог мјерења од кључног значаја за постизање квалитетне калибрације. У ту сврху користе се различити калибрациони објекти, а у новије вријеме калибрација система заснива се и на детекцији и мјерењу локалних обиљежја као референтних тачака за калибрацију.

Популарност и све учесталија потреба за реализацијом система заснованог на роботу и визуелном сензору, те неопходност квалитетне калибрације система, представљале су мотивацију за дефинисање циљева истраживања представљених у дисертацији. Посебну пажњу привукао је приступ калибрацији система без коришћења традиционалних калибрационих објеката [7]. Методологија калибрације заснована је на коришћењу прирубнице робота као референтног објекта за калибрацију система, што је додатно истакло потенцијал за реализацију методологије калибрације система којом би се постигло повећање прецизности и флексибилности система робот-визуелни сензор.

## 1.1 Предмет истраживања

У дисертацији је предложен 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], послужила је као мотивација за побољшање тачности и флексибилности процеса калибрације заснованог на процјени геометријских обиљежја прирубнице робота, без коришћења традиционалног калибрационог објекта. Додатно, приступ предложен у [8] представља методологију засновану на процјени калибрационих параметара коришћењем само једначине translације и свођењем зависности о калибрационим објектима на употребу једне 3D тачке за калибрацију, што је показало велики потенцијал за повећање тачности и робустности процјене калибрационих параметара.

Методологија калибрације у дисертацији реализована је коришћењем прирубнице робота као референтног калибрационог објекта. Процјена калибрационих параметара система заснована је на једначини translације и коришћењу једне 3D тачке дефинисане координатама 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. Важно је истаћи да је геометрија прирубнице робота прецизно дефинисана ISO стандардом, што значи да је њена спецификација унапријед позната [10]. Ово представља додатни мотив за њено коришћење у процесу калибрације, с обзиром да омогућава конзистентност геометријских обиљежја и ствара потенцијал 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. Наиме, када завршни уређај, односно алат, није постављен на прирубницу робота, центар прирубнице представља референтну тачку завршног механизма, у складу са кинематичким моделом робота [11]. Ова тачка се назива и тачка центра алата, и у роботизици означава са TSP. Посебан значај ове тачке представља могућност читавања њене позиције и оријентације из контролера робота. Очитавање података из контролера заправо елиминише потребу за коришћењем додатне опреме за мјерење координата центра прирубнице, што додатно истиче потенцијал предложеног приступа. Стога је TSP усвојен као јединствена референтна 3D тачка за калибрацију система. Једини предуслов за провођење калибрације система је мјерење координата усвојене референтне тачке у односу на координатни систем визуелног сензора. У ту сврху, најприје је размотрен поступак идентификације референтне 3D тачке и процјена њених координата потребних за калибрацију. Анализа овог проблема надаље је отворила додатна питања у вези са одабиром конфигурације система робот-визуелни сензор и избором визуелног сензора у циљу што боље детекције геометријских обиљежја прирубнице. Узимајући у обзир да је потребно процијенити референтну тачку за калибрацију која представља TSP робота, предложена је конфигурација система са непокретним визуелним сензором. Надаље, у циљу оптималне процјене координата TSP-а потребно је омогућити квалитетне визуелне информације о прирубници, те имплементирати алгоритам за процјену њених

геометријских карактеристика. Стога је анализиран избор визуелног система и предложен индустријски 3D скенер, реализован са једном камером и пројектором, чији рад је заснован на струкурираном свјетлу. Избор визуелног сензора заснован је на могућности добијања квалитетног скупа 3D података, те омогућавање прецизног и робустног рада у току калибрације, што предложени скенер у потпуности испуњава. Надаље, предложен је алгоритам за обраду скупа 3D тачака прирубнице добијеног коришћењем предложеног скенера. Алгоритам је заснован на процјени координата центра и полупречника унутрашњег отвора прирубнице поступком фитовања 3D кружнице коришћењем издвојених тачака које се налазе на рубу унутрашњег отвора. За валидацију перформанси предложеног алгоритма предложен је приступ заснован на коришћењу калибрационог прстена, узимајући у обзир сличност геометријских обиљежја са прирубницом, те прецизност његове израде.

Процедуре калибрација робота и скенера, те анализирана поновљивост робота и индекси перформанси калибрисаног скенера у циљу потврђивања њихове поузданости и прецизности за постизање дефинисаних циљева, су реализоване прије калибрације система. Након проведених калибрација, реализован је систем робот–скенер, те су проведене калибрације у складу са предложеном методологијом.

У циљу повећања флексибилности и ефикасности калибрације, те настојећи да се постигне висока тачност процјене калибрационих параметара, анализиран је утицај избора броја и међусобног положаја прирубница у видном пољу камере. Додатно су анализирани аспекти као што су међусобно позиционирање визуелног сензора и робота, те амбијентални услови у којим се реализује калибрација (температура и освјетљење). Робустност предложеног приступа анализирана је на основу утицаја иницијалних вриједности параметара алгоритма на квалитет калибрације. На крају, предложени приступ коришћен је за процјену геометријских параметара робота у циљу анализе могућности примјене предложеног приступа у сврху кинематичке калибрације робота.

## 1.2 Циљеви истраживања

Описане активности дефинисане су као основни циљеви истраживања, као што слиједи:

- 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 3D тачке за калибрацију система
- Имплементација алгоритма за прецизну процјену геометријских карактеристика прирубнице
- Калибрација система и обрада експерименталних података

У сврху оправданости циљева истраживања дефинисане су сљедеће радне хипотезе:

1. 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.
2. Коришћењем предложеног приступа могуће је постићи веома тачну калибрацију, при чему је грешка калибрације мања од једног милиметра.
3. 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.

У циљу потврђивања дефинисаних хипотеза методологија научно-истраживачког рада и реализација дефинисаних циљева обухватила је сљедеће активности:

- Преглед, анализа и систематизација релевантне литературе
- Дефинисање методолошког приступа за калибрацију система без коришћења калибрационог објекта, заснованог на прегледу литературе и личним запажањима
- Преглед и анализа постојећих метода и техника у калибрацији система робот-визуелни систем без коришћења калибрационих маркера и/или калибрационих објеката, са фокусом на калибрацију коришћењем прирубнице робота
- Дефинисање математичког модела процеса калибрације заснованог на усвојеном методолошком приступу
- Дефинисање метрике за валидацију алгоритма и калибрације система
- Пројектовање и имплементација алгоритма за обраду информација о прирубници робота добијених визуелним системом
- Валидација предложеног алгоритма и оцјена квалитета перформанси коришћењем калибрационог еталона

- Анализа резултата валидације и адаптација алгорита у циљу постизања оптималних резултата
- Дизајн и реализација система робот-визуелни сензор
- Дефинисање ограничења система и предуслова за постизање оптималних резултата
- Калибрација робота
- Калибрација визуелног сензора
- Калибрација система робот-визуелни сензор
- Статистичка анализа резултата добијених предложеним поступком калибрације и поређење са постојећим резултатима

## 1.3 Примјена и значај резултата истраживања

Дефинисане хипотезе и доприноси дисертације потврђени су валидацијом резултата, која је проведена поступком поређења добијених резултата са резултатима објављеним у референтној литератури. 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. Надаље, 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 обезбеђујући високу тачност 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.

## 1.4 Научни допринос

Научно-истраживачки рад који је претходио дисертацији обихватао је аспекте неопходне за реализацију система робот-визуелни сензор. Најприје је размотрен проблем кинематичке калибрације манипулатора са циљем повећања тачности процјене параметара геометрије, при чему су размотрени различити алгоритми и стратегије у поступку калибрације. Предложена је модификација којом се побољшава



конвергенција алгоритама и смањује осјетљивост на почетну процјену параметара геометрије манипулатора. Резултати provedених истраживања објављени су у сљедећим радовима [12, 13].

Имајући у виду да је у процедури калибрације, заснованој на коришћењу отвореног кинематичког ланца, процјена геометријских параметара базирана на мјерењу унутрашњих и вањских координата, даљи ток истраживања усмјерен је на примјену визуелних сензора за мјерење вањских координата робота. У сврху мјерења 3D координата врха робота коришћена је стерео камера, намијењена за детекцију маркера постављеног на врх манипулатора. Подобност предложеног визуелног сензора анализирана је у задацима испитивања поновљивости и кинематичке калибрације манипулатора, а резултати provedених анализа и експеримената објављени су у сљедећим радовима [14, 15].

Аспекти који су показали велики утицај на тачност калибрације манипулатора, као што су проблем кореспонденције тачака на сликама добијеним стерео камером, те поузданост и прецизност детекције маркера постављених на врх робота били су у фокусу даљег научно-истраживачког рада са циљем повећања тачности и флексибилности калибрације индустријског робота чији рад је заснован на информацијама добијеним визуелним сензором. Резултати provedених анализа и експеримената објављени су у сљедећим радовима [16–20].

Даљи ток истраживања обухватио је пројектовање и реализацију система робот-визуелни сензор за обављање хируршког задатка сјечења. Систем је реализован коришћењем индустријског робота и стерео камере, у конфигурацији са непокретном камером, а основни концепт и резултати provedених експеримената објављени су у раду [21].

Узимајући у виду да је за реализацију хируршких задатака потребно обезбједити високу прецизност робота, анализиран је избор визуелног сензора бољих перформанси. Након опсежне анализе предложен је индустријски 3D скенер, а оправданост његове примјене представљена је у раду [22].

Интеграција робота и 3D скенера најприје захтијева калибрацију система робот-скенер, што је довело до резултата који су представљени у дисертацији. Научни допринос дисертације може се систематизовати сљедећим редом. Анализиране су различите методе калибрације система, те предложен приступ заснован на коришћењу прирубнице робота као референтног калибрационог објекта. ТСП робота је усвојен као референтна тачка за калибрацију, те поступак калибрације заснован на коришћењу само једне 3D тачке, за разлику од традиционалних метода које користе скупове тачака. Предложен је алгоритам за процјену координата ТСП-а заснован на обради скупа 3D тачака прирубнице добијеног коришћењем 3D скенера. Предложен је поступак валидације алгоритма коришћењем калибрационог прстена. Анализирана је и предложена процедура калибрације система коришћењем минималног броја компланарних тачака, без компензације грешке, којом се постиже висока тачност процјене калибрационих параметара. Предложени приступ показао је потенцијал за примјену у задацима кинематичке калибрације манипулатора. Резултати provedених анализа и експеримената, осим резултата представљених за

кинематичку калибрацију, објављени су у раду [9].

## 1.5 Организација дисертације

Дисертација је организована у девет глава и четири додатка, на следећи начин.

У другој глави представљен је значај прецизности и флексибилности калибрације система робот–визуелни сензор. Укратко су наведени аспекти који утичу на калибрацију система, те дат преглед метода калибрације са фокусом на методе калибрације које не користе калибрационе објекте.

Трећа глава представља значај и опис калибрације система, са фокусом на преглед конфигурација система и методологије процеса калибрације.

Теоријски аспекти дефинисања кинематичког модела и калибрације геометрије робота представљени су у четвртој глави. Додатно је описана методологија кинематичке калибрације робота коришћењем рачунарског вида, те представљени резултати ранијих истраживања који су претходили дисертацији, у циљу анализе кључних аспеката који утичу на квалитет калибрације робота.

Пета глава описује значај визуелних система у роботизици. Дефинисан је основни модел камере, те представљена калибрација камере са фокусом на методологију и утицај параметара на квалитет калибрације.

У шестој глави анализирани су визуелни системи који се користе у процедурама калибрације система робот-визуелни сензор. Истакнуте су предности и недостаци постојећих визуелних система и образложене предности принципа рада и технологије на којој је заснован предложени 3D скенер.

Седма глава представља опис експерименталне поставке, принципе рада и методологије калибрација робота и 3D скенера. Додатно су описана геометријска обиљежја и спецификације прирубнице робота и калибрационог прстена коришћеног за валидацију предложеног алгоритма, те истакнути основни детаљи софтверске подршке и комуникационих протокола. Након хардверске и софтверске поставке, описан је поступак извођења поједностављеног математичког модела калибрације система, те дат детаљан опис предложеног алгоритма за процјену геометријских обиљежја прирубнице робота заснованог на обради скупа 3D тачака прирубнице снимљених 3D скенером. У посљедњој секцији дефинисана је метрика грешке.

У осмој глави представљени су резултати проведених експеримената. Описан је поступак припреме експерименталне поставке и радног окружења, затим представљени резултати калибрације робота и скенера, те резултати валидације предложеног алгоритма и реализованих процедура калибрација. На крају је дата дискусија резултата у којој су анализирани експериментални резултати и представљена упоредна анализа са резултатима објављеним у релевантној литератури, те представљен потенцијал предложеног приступа у задацима кинематичке калибрације манипулатора.

У посљедњој, деветој глави, изведени су закључци у контексту потврде дефинисаних хипотеза, те истакнути недостаци предложеног приступа и смјернице за будући рад.

У Додатку А је представљена спецификација радног простора предложеног робота са ознакама дужина његових сегмената, као и табела геометријских параметара манипулатора.

У Додатку Б је представљен формат означавања прирубница робота, те истакнуте техничке карактеристике прирубнице предложеног робота.

У Додатку В је представљена техничка спецификација предложеног 3D скенера.

У Додатку Г је представљена техничка спецификација калибрационог прстена.

## Глава 2

# Преглед литературе

Од почетка развоја роботике, један од најзначајнијих праваца развоја био је усмјерен на повећање прецизности и тачности позиционирања робота, са циљем побољшања његових перформанси. Овај апскет развоја првенствено је усмјерен на побољшање перформанси робота његовом калибрацијом. Иако су до сада постигнуте веома значајни резултати, калибрација робота и данас представља изазован задатак [23–25]. Међутим, прецизност савремених робота значајно је повећана усавршавањем производних процеса и коришћењем софистицираних сензора и актуатора приликом производње робота. Стога је развој роботике више усмјерен на повећање флексибилности робота као основног предуслова њихове универзалне примјене.

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]. Актуелни трендови повећања флексибилности робота, као и стварање потенцијала за рјешавање поменутих изазова, засновани су на примјени визуелних система који омогућавају рад робота заснован на информацијама добијеним визуелним сензором.

Визуелни сензори представљају једну од кључних компонената модерне роботике које су значајно допринијеле повећању прецизности и флексибилности индустријских робота. Примјена визуелних сензора је утицала на проширење могућности робота у смислу перцепције, навигације и интеракције у радном простору робота, те њихову примјену у широком спектру задатака како у индустрији, тако и областима које захтијевају детекцију, препознавање и манипулацију објектима, интеракцију људи и робота, локализацију и заобилажење препрека, виртуелну реалност, безбједност, итд.

---

Примјена робота на бази информација добијених коришћењем визуелног сензора, у протеклим деценијама биљежи тенденцију побољшања жељених исхода и смањења утицаја људског фактора на перформансе система. С обзиром на то да не постоје роботизовани системи, нити индустријски роботи са интегрисаним визуелним сензорима, интеграција индустријских манипулатора и/или роботизованих система и визуелних сензора подразумијева постављање визуелног сензора на робота или на позицију поред робота која омогућава да се радни простор робота налази у видном пољу визуелног сензора. 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]. Око-ка-руци конфигурација представља систем код кога је визуелни сензор постављен поред робота и не помјера се у току рада система. С друге стране, конфигурација око-у-руци подразумијева да је визуелни сензор постављен на робота, и то најчешће близу завршног уређаја или уобичајено на посљедњи зглоб робота, те да се помјера у току рада заједно с роботом.

Да 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 калибрација [29]. НЕ калибрација представља кључни аспект интеграције робота и визуелних сензора, чији је циљ омогућити прецизнију перцепцију и интеракцију робота са околином. Овај циљ се постиже тачном и поузданом процјеном хомогене трансформације, којом се дефинише међусобни положај и оријентација референтних координатних система визуелног сензора и робота, а која представља резултат процеса калибрације.

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 робустних математичких модела такође веома значајно, с обзиром на то да се њиховом примјеном на ефикасан начин могу умањити утицаји шума и поремећаја [32, 33]. С друге стране, повећање флексибилности процеса калибрације у пракси усмјерено је на смањење зависности калибрационих метода о калибрационим објектима или чак потпуно уклањање калибрационих објеката из процеса калибрације. 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]. Међутим, ако се анализирају предуслови потребни за постизање високог нивоа тачности калибрације НЕ система коришћењем калибрационих објеката с једне стране, те предуслови за постизање високог нивоа флексибилности који су засновани на методологији без коришћења калибрационих објеката с друге, може се закључити да су наведени предуслови контрадикторни. Надаље, може се извести закључак и да је реали-

зација флексибилне калибрације којом се истовремено постиже висока тачност, практично немогућа. Међутим, развој нових генерација визуелних система, чији рад је заснован на прикупљању и обради скупа 3D тачака, у литератури познат као облак тачака (енгл. *Point cloud*), отворио је нове правце развоја са циљем постизања жељеног исхода. Прецизност 3D визуелних система показала је потенцијал за њихово коришћење у процедурама калибрације НЕ система и постизање високог нивоа тачности калибрације. Надаље, могућност детекције и обраде 3D информација из радног окружења система допринијела је разматрању коришћења специфичних обиљежја као референтних тачака у процесу калибрације, те на тај начин омогућила смањење зависности процедура калибрације о традиционалним калибрационим објектима.

Узимјући у озбир наведене трендове развоја, у циљу постизања прецизне и флексибилне калибрације система робот-визуелни сензор, значајно је размотрити све аспекте почев од одабира одговарајућег робота, затим одабира визуелног система, калибрационог објекта, до дефинисања математичког модела и избора метода за рјешавање проблема калибрације.

## 2.1 Методе калибрације система робот-визуелни сензор

У литератури су познате различите методе калибрације НЕ система. Најчешће се категоришу у односу на методологију реализације поступка калибрације, методологију прикупљања и обраде података, конфигурацију система, те тип визуелног сензора и технологију на којој је рад сензора заснован. Најпознатије методе калибрације засноване су на коришћењу калибрационих објеката. Ове методе се у литератури често називају традиционалне методе, а уобичајено их називају методе на бази маркера (енгл. *Marker-based methods*). 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 2D или 3D 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]. Међутим, проблеми који се појављују приликом позиционирања калибрационих објеката, због ограниченог радног простора, ограничава и универзалну примјену. Такође, нетачност израде калибрационих маркера, непламентарност калибрационих табли, осјетљивост алгоритама идентификације обиљежја на амбијенталне услове, те 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 стан-

дaрдне 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]. Уочени недостаци условили су даљи развој који се првенствено односи на увођење 3D калибрационих објеката, а у новије вријеме и коришћење 3D визуелних система. Коришћење 3D визуелних система омогућило је разматрање развоја метода које поступак калибрације заснивају на информацијама из радног окружења, те стварање предуслова за смањење зависности или чак потпуно елиминисање калибрационих објеката.

Квалитет визуелног сензора и технологија рада на којој је заснован представља веома важан аспект који утиче на квалитет калибрације система. Постоји неколико приступа у дизајну визуелног система зависно од тога да ли се захтијева коришћење пасивних или активних сензора. 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 тачности процјене калибрационих параметара, 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 3D простору [65–67], те на коришћењу неуронских мрежа [68, 69], и техника дубоког учења [70, 71].

### 2.1.1 Традиционалне методе калибрације засноване на коришћењу калибрационих објеката или маркера

Резултантна матрица калибрације може се добити рјешавањем једначине хомогене трансформације, на основу поступка описаног у [33], дефинисане као:

$$\mathbf{A}_{c2}^{c1} \cdot \mathbf{X}_h^c = \mathbf{X}_h^c \cdot \mathbf{B}_{h2}^{h1} \quad (2.1)$$

Хомогене трансформационе матрице,  $\mathbf{A}_{c2}^{c1}$  и  $\mathbf{B}_{h2}^{h1}$ , представљају редом, релативне помјераје визуелног сензора и манипулатора између двије позиције, док је  $\mathbf{X}_h^c$  резултантна матрица трансформације која дефинише релативни однос манипулатора и визуелног сензора. Непозната трансформација  $\mathbf{X}_h^c$  се процјењује разматрањем симултаног скупа од двије једначине које се дефинишу на основу двије различите позе калибрационог објекта у видном пољу визуелног сензора, на основу чега се

добијају следеће релације:

$$\mathbf{A}_{c2}^{c1} = \mathbf{A}_w^{c1} \cdot (\mathbf{A}_w^{c2})^{-1} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{B}_{h2}^{h1} = \mathbf{B}_b^{h1} \cdot (\mathbf{B}_b^{h2})^{-1} \quad (2.3)$$

где су  $\mathbf{A}_w^{c1}$  и  $\mathbf{A}_w^{c2}$ , положаји камере у односу на референтни координатни систем или калибрациони објекат, а  $\mathbf{B}_b^{h1}$  и  $\mathbf{B}_b^{h2}$  положаји завршног уређаја робота у односу на базу робота. Једначина (2.1) се може представити и у матричном облику:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_A & \mathbf{t}_A \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_X & \mathbf{t}_X \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_X & \mathbf{t}_X \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_B & \mathbf{t}_B \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

где је  $\mathbf{R}$   $3 \times 3$  матрица ротације и  $\mathbf{t}$   $3 \times 1$  вектор транслације. Положаји завршног уређаја манипулатора добијају се читавањем вриједности са контролера робота, добијених на основу кинематичког модела манипулатора, док се положај камере процјењује на основу снимљених скупова 3D тачака калибрационог објекта и њихових одговарајућих 2D слика.

Избор метода за рјешавање једначине (2.1) још увијек представља изазован задатак. У литератури је предложено неколико приступа и рјешења. Уобичајено се методе за рјешавање једначине (2.1) категоришу на основу тога да ли се параметри који описују оријентацију и позицију, у једначини (2.4), процјењују као одвојена или симултана рјешења. Отуда и називи ових метода: одвојене (енгл. *Separated methods*) и симултане (енгл. *Simultaneous methods*).

У одвојеним методама, прво се процјењује матрица ротације, на основу једначине (2.4):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_X & \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{t}_X + \mathbf{t}_A \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_X \cdot \mathbf{R}_B & \mathbf{R}_X \cdot \mathbf{t}_B + \mathbf{t}_X \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

те слиједи да је:

$$\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_X = \mathbf{R}_X \cdot \mathbf{R}_B \quad (2.6)$$

$$\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{t}_X + \mathbf{t}_A = \mathbf{R}_X \cdot \mathbf{t}_B + \mathbf{t}_X \quad (2.7)$$

Ако је  $\mathbf{R}_X$  познато, тада је једначина (2.7) линеарна и тада се  $\mathbf{t}_X$  може процијенити. Постоје различите технике које се фокусирају на параметризацију матрице ротације [29, 55–57, 72, 73]. Предности одвојених метода огледају се у брзини процјене рјешења, али њен највећи недостатак је недовољна тачност, нарочито у процјени вектора транслације. Ово је прије свега последица тога што не постоји веза између параметара ротације и транслације, тј. њихове процјене су одвојене. Међутим, ротација и транслација су повезане са високим степеном нелинеарности [73], и њихово одвојено процјењивање може довести до пропагације грешака, добијених у процјени ротације, на касније процјене транслације.

Симултана рјешења омогућавају истовремену процјену параметара ротације и



транслације. Поступак се може провести аналитички [36, 74–78] или коришћењем нумеричке оптимизације [37, 39, 79, 80]. Примјеном симултаних метода могуће је постићи висок степен тачности 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 алгоритма и избором почетне процјене. Поред једначина хомогених трансформација, предложени су и приступи засновани на грешкама пројекције и реконструкције у 3D простору, како би се грешке, које су резултат калибрације визуелног сензора, свеле на најмању могућу мјеру.

Упркос предностима, наведени приступи калибрације не омогућавају флексибилност у случају промјене положаја визуелног сензора или робота. Поменути приступи су показали задовољавајуће резултате само у офлајн режиму рада. 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. Примјена неуронских мрежа показала је велики потенцијал пружајући могућност реализације оптимизационе методе калибрације система робот-визуелни сензор, засноване на неуронској мрежи [68]. Такође, неуронске мреже су показале подобност за примјену у рјешавању проблема инверзне кинематике, сингуларности и контроле кретања робота, са циљем постизања тачније калибрације система [69]. Методе засноване на дубоком учењу (енгл. *Deep learning*) такође су пронашле примјену у рјешавању задатка калибрације система. Метод процјене калибрационих параметара заснован на праћењу једне референтне тачке на роботу, коришћењем дубоке неуронске мреже и 3D визуелног система показао је потенцијал за постизање задовољавајуће тачности калибрације [70]. Обновљање замућених слика, добијених визуелним сензором, коришћењем дубоког учења показала је могућност прецизнијег проналажења референтних тачака и повећања тачности калибрације система робот-визуелни сензор [71].

Доказано је да методе засноване на коришћењу калибрационих објеката обезбјеђују високу тачност калибрације, али различити аспекти, као што су непрецизност у производњи калибрационих објеката, непланарност калибрационих табли на којим су постављени маркери, осјетљивост алгоритма за детекцију обиљежја на амбијенталне услове, те сложеност и нетачност алгоритма за детекцију и декодовање кључних обиљежја значајно утичу на њихову флексибилност и ефикасност [6]. И даље се трага за развојем робустне и флексибилне методе која не захтијева поновно прикупљање података, а истовремено смањује зависност методе од коришћења калибрационих објеката. Методе које су у новије вријеме показале потенцијал за повећање како тачности тако и флексибилности калибрације, засноване су на приступима без коришћења калибрационих објеката. Ове методе у литератури су познате под називом методе без маркера (енгл. *Markerless methods*).

### 2.1.2 Методе калибрације без коришћења калибрационих објеката или маркера

Резултати актуелних истраживања показују сталан напредак у рјешавању проблема и унапређењу процедура калибрације система робот-визуелни сензор, без коришћења калибрационих маркера и/или објеката, те примјени предложених рјешења у различитим областима као што су индустријска роботика, област аутономних возила, виртуелне реалности, као и примјени роботике у медицини. За разлику од традиционалних метода калибрације које користе калибрационе маркере и/или објекте, методе калибрације без калибрационих маркера и/или објеката користе обиљежја из окружења која се налазе у видном пољу визуелног сензора.

Неке од студија које су дале значајне резултате засноване су на процјени обиљежја комплетне роботске руке помоћу слика у боји. Процјена позе на бази коришћења визуелних сензора је неопходна за постизање флексибилности у примјенама роботике, нарочито у задацима који захтијевају интеракцију између робота и мобилних платформи. Постигнути резултати процјене положаја људског тијела коришћењем конволуционих неуронских мрежа, послужили су као инспирација за разматрање аутоматске детекције инхерентних кључних тачака робота које представљају његов 2D модел скелета [81]. Узимајући у обзир чињеницу да се у пракси процјена поза коришћењем једне камере углавном заснива на коришћењу фидуцијалних маркера, аутори предлажу могућност унапређења поступка детекције 2D тачака. Приступ је заснован на конволуционим неуронским мрежама, без потребе за информацијама о дубини, тренираним за различите конфигурације скупова реалних и синтетичких података [81, 82]. Очитавања енкодера робота искоришћена су за дефинисање одговарајућег 3D модела скелета на бази кинематичког модела робота. Коначно, однос између камере и робота процијењен је на основу кореспондентних парова 2D и 3D тачака, коришћењем PnP (енгл. *Perspective-n-Point*) алгоритма.

Сличан приступ, заснован на детекцији 2D тачака коришћењем дубоког учења и процјени односа између робота и камере коришћењем PnP алгоритма, представљен је у [83]. За разлику од претходних 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. Оба приступа су демонстрирала ефикасност прецизне предикције позиције и оријентације робота интегрисањем информација о детектованим обиљежјима са подацима добијеним на основу кинематичког модела робота.

Поред наведених приступа, детекција инхерентних кључних тачака коришћењем неуронске мреже представљена је и у раду [84]. Међутим, умјесто PnP алгоритма, приступ је заснован на нелинеарној оптимизацији којом се директно регресирају позиција и оријентација камере и непознати углови зглобова робота. За разлику од раније поменутих приступа, аутори предлажу алтернативно рјешење које користи 3D модел за генерисање великог броја синтетичких података, затим тренира модел визуелног сензора у виртуелном домену, те примјењује добијене резултате на слике

из реалног радног окружења након прилагођавања домена. Имајући у виду да је за тестирање описаног приступа коришћен једноставан манипулатор без сензора, аутори истичу допринос резултата у могућностима примјене предложеног приступа за анализу и тестирање технологија вјештачке интелигенције и рачунарског вида без потребе за набавком скупе опреме.

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]. Овај приступ се такође заснива на коришћењу једне слике у боји. За разлику од претходних, аутори истичу могућност да се процјена позиције и оријентације камере у односу на робота, добијена обучавањем неуронске мреже коришћењем синтетичких података, може генерализовати на нове, невиђене, конфигурације робота у процесу тренирања, те да се може примјенити на различите врсте робота. Посебно је наглашен значај предложеног приступа у задацима визуелног вођења робота, као и у задацима које извршавају колаборативни роботи без потребе за коришћењем додатних маркера и провођења временски захтјевних калибрација система базираног на роботу и визуелном сензору.

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. Поред тога, метода је заснована на информацијама добијеним 3D сензором, које омогућавају обраду података о дубини. Коришћењем података о дубини, ова метода се заснива на обради реалних података, пружајући могућност примјене итеративног алгорита најближих тачака (енгл. *Iterative Closest Point - ICP*) за корекцију процјене поза робота, чиме се смањује потреба за синтетичким или симулационим подацима.

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 2D слика, размотрен је за системе са конфигурацијом око-у-руци [87]. Овај приступ калибрацији система заснован је на учењу и тестиран на систему у конфигурацији око-у-руци, примјеном дубоког учења, омогућујући директну регресију позе камере коришћењем информација добијених из 2D слика. Међутим, проведени експерименти показали су да овом приступу недостаје робустност у практичним сценаријима.

Поред приступа који се заснивају на учењу, предложени су и приступи који на другачији начин процјењују међусобни однос робота и визуелног сензора. При-

ступ 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]. Аутори су у реализацији предложеног приступа увели двије кључне технологије: оптимизацију позиције камере на основу диференцијабилног рендеровања и претраживања простора зглобова робота засновано на конзистентности. Кроз ове иновације, показали су значајан напредак у постизању прецизне оптимизације цјелокупног процеса калибрације, елиминишући потребу за напорним, најчешће ручним, дефинисањем конфигурација робота неопходним за провођење поступка калибрације.

Метода калибрације која је занована на регистрацији, позната под називом RegHEC (енгл. *Registration-Based Hand-Eye Calibration*), елиминише 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]. Процјена односа робота и визуелног сензора заснована је на симултаном усклађивању више различитих скупова 3D тачака заједничке сцене, дефинисаних у референтном координатном систему робота. За постизање постављеног циља, аутори су предложили модификован ICP алгоритам заснован на Гаус-Њутновој методи и Лијевој алгебри. Предложени алгоритам се базира на процјени међусобног односа робота и визуелног система коришћењем више различитих скупова 3D тачака дефинисаних у референтном координатном систему робота. Додатно побољшање реализовано је минимизацијом еуклидске удаљености између кореспондентних тачака које припадају различитим скуповима 3D тачака.

Поред претходно поменутих метода, које примјену налазе у различитим индустријским задацима, постоје и методе које су анализирани за примјену у медицини, посебно у хируршким гранама. 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 3D 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]. Овај приступ елиминише потребу за коришћењем калибрационих објеката подјелом процеса калибрације на задатке који се реализују у преоперативној и интраоперативној фази. У преоперативној фази се реализује HE калибрација коришћењем методе најмањих квадрата, док се у интраоперативној фази реализује итеративни поступак оптимизације алгоритмом градијентног спуста, коришћењем података са високим визуел-

ним грешкама из претходног корака. Овај приступ, приказивањем врха хируршког инструмента на основу добијених резултата калибрације, омогућава тренутну визуелну процјену тачности калибрације.

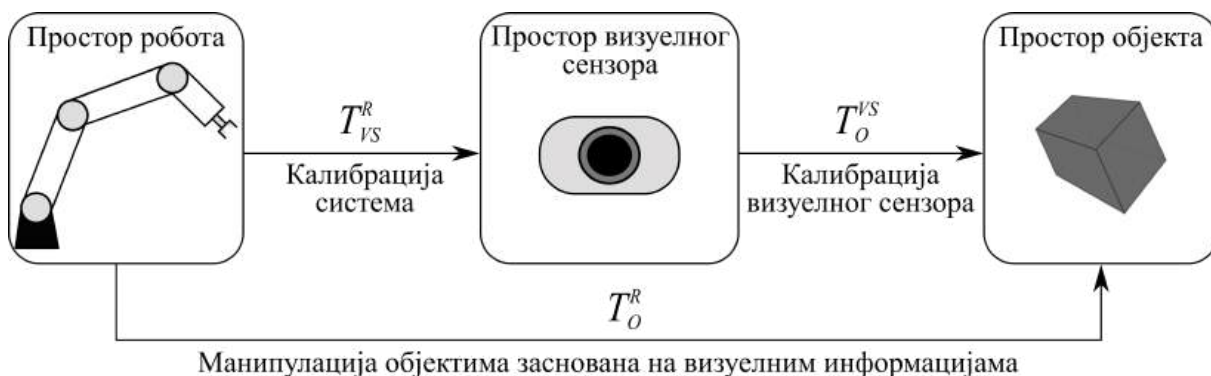
Иако ове методе доприносе повећању флексибилности процеса калибрације, њихова тачност је и даље лошија од тачности метода заснованих на коришћењу калибрационих маркера и/или објеката. Међутим, метод предложен у [30] рјешава проблем калибрације приступом у два корака. У првом кораку израчунава прецизно рјешење позиције у затвореној форми, фокусирано на једначину транслације, уз супериорну тачност и робустност у поређењу са традиционалним методама. Након тога, зависност од објекта калибрације се своди на употребу једне 3D тачке користећи сличну формулацију као у првом кораку, засновану на једначини транслације, минимизирајући утицај грешака у процјени оријентације калибрационог објекта и резултујући повећањем тачности и робустности 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 (ТСП) као јединствену 3D тачку калибрације. За процјену координата тачке центра алата ТСП-а у [44], предложен је алгоритам заснован на итеративном репондерисаном 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 ТСП-а користи се скуп 3D 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 тачност метода калибрације које не користе калибрационе објекте мања у односу на традиционалне методе, 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].

## Глава 3

# Калибрација система робот-визуелни сензор

Калибрација система робот-визуелни сензор представља процедуру којом се дефинише међусобни однос робота и визуелног сензора, са циљем дефинисања заједничког радног простора, који омогућава рад робота заснован на визуелним информацијама. Односи између робота, визуелног сензора и објеката у радном окружењу илустровани су на Слици 3.1, и дефинисани одговарајућим трансформацијама.



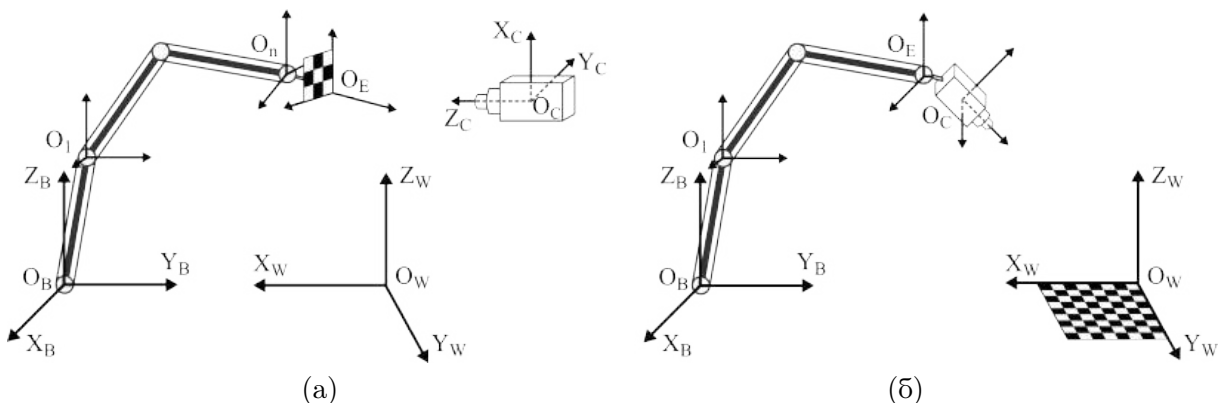
Слика 3.1: Међусобни однос између простора робота, визуелног сензора и објекта

Визуелни сензор, као кључни елемент интегрисаног система, омогућава перцепцију радног простора и аквизицију података из радног простора, те омогућава роботу коришћење прикупљених података у циљу извршавања задатка. Однос визуелног сензора и објеката у сцени која се снима дефинише се калибрацијом визуелног сензора, док се однос између робота и визуелног сензора дефинише калибрацијом интегрисаног система. Као резултат ланчаних процедура калибрација омогућава се дефинисање односа између робота и објеката у радном простору, што је и крајњи циљ калибрације система. Међутим, овај процес није једноставан и по правилу се састоји од неколико фаза, а то су калибрација визуелног система, калибрација робота и на крају калибрација система робот-визуелни сензор. Након проведених калибрација није могуће гарантовати оптималан резултат цјелокупног

процеса. Разлог ове тврдње заснива се на чињеници да постоје бројни аспекти који имају значајан утицај на квалитет процеса, а то су одабир конфигурације система, методологија калибрације, затим методе за процјену параметара калибрације, утицај амбијенталних услова, те квалитет и перформансе визуелног сензора и робота који се користе за реализацију система.

### 3.1 Конфигурације система робот-визуелни сензор

Систем робот–визуелни сензор представља интегрисани систем који се састоји од робота и визуелног сензора. Систем се реализује у једној од двије стандардне конфигурације, познате под називима око-ка-руци (енгл. *Eye-To-Hand*) и око-у-руци (енгл. *Eye-In-Hand*) [94]. Основне конфигурације система приказане су на Слици 3.2.



Слика 3.2: Конфигурације система робот-визуелни сензор: а) Око-ка-руци, б) Око-у-руци

Конфигурација око-ка-руци представља систем са фиксно постављеним визуелним системом у радном простору робота или у близини радног простора. Специфичност ове конфигурације се огледа у томе да се визуелни сензор у току рада система не помјера, те се самим тим не мијења однос референтних координатних система визуелног сензора и робота. Рад робота подржан визуелним сензором могућ је само у заједничком радном простору визуелног сензора и робота, који у суштини представља видно поље визуелног сензора.

Конфигурација система око-ка-руци је највише заступљен приступ у пројектима машинског вида, пружајући предности лакшег постављања, једноставних израчунавања и смањеног ризика од грешака при мјерењу [95]. Осим тога, овај систем је подобан за мобилну и теренску употребу у ситуацијама у којима није изводљиво или чак није могуће унапријед одредити положај визуелног сензора у односу на робот, с обзиром на то да флексибилност коју захтијевају специфични случајеви употребе онемогућава постављање одређених типова визуелних сензора на робот. У таквим сценаријима, често није изводљиво реализовати компликоване

калибрационе процедуре, јер оне повећавају захтјеве у погледу времена и ресурса у окружењима где су ресурси ограничени. Треба нагласити и то да систем у овој конфигурацији захтијева калибрацију сваки пут када се промијени положај визуелног сензора у односу на робот.

За разлику од конфигурације око-ка-руци, конфигурација система око-у-руци реализује се постављањем визуелног сензора на робот, најчешће на посљедњи зглоб, што резултује кретањем визуелног сензора заједно са роботом у току рада. Ова конфигурација омогућава позиционирање визуелног сензора у различите дијелове радног простора и аквизицију потребних визуелних информација.

С обзиром на то да се у конфигурацији система око-у-руци визуелни сензор креће, док се у конфигурацији око-ка-руци визуелни сензор не креће, те узимајући у обзир чињеницу да је за већину визуелних система камера основни сензор, у даљем тексту ће конструкција ”систем са покретном камером” описивати конфигурацију око-у-руци, док ће конструкција ”систем са фиксном камером” описивати конфигурацију око-ка-руци. Избор конфигурације система зависи прије свега од задатка који је потребно реализовати. Према томе, систем са покретном камером је подобан за задатке тзв. фине манипулације објектима и визуелне инспекције за које је неопходно да визуелни систем прикупља податке са мање удаљености, што надаље узрокује снимање малог дијела радног простора. С друге стране, систем са фиксном камером обезбјеђује снимање већег дијела радног простора, што пружа могућност реализације задатака у којима је неопходна навигација робота у радном простору или у ситуацијама у којим је стабилност видног поља од значаја за крајњи исход задатка [2].

Обје конфигурације имају своје предности и недостатке, али избор адекватне конфигурације система, као што је раније истакнуто, у највећој мјери зависи од природе и комплексности задатка за чију реализацију је систем намијењен. Стога, уколико је потребно омогућити већи степен флексибилности у раду, систем са покретном камером је бољи избор. Прије свега због могућности прилагођавања позиције и оријентације визуелног сензора, чиме се омогућава боља перцепција објеката у радном простору. Међутим, уколико је од интереса обезбиједити стабилно видно поље и конзистентност перцепције радног простора робота, препоручује се коришћење система са фиксном камером.

Као резултат анализе предности и недостатака описаних конфигурација система, намеће се и закључак да је систем са покретном камером подобан за задатке манипулације малим објектима, монтаже и прецизне инспекције, док је систем са фиксном камером подобнији за мониторинг радног простора и навигацију робота у радном простору.

Примјери у којим се истиче значај и оправданост реализације система са фиксном камером су апликације попут роботски подржаних хируршких процедура [96–98], те аутоматске монтаже коришћењем робота [99]. С друге стране, системи са покретном камером су своју примјену оправдале у задацима вјештог хватања, као што је брање хортикултурних производа [100], манипулације објектима [101], те задаци инспекције [102].



## 3.2 Методологија калибрације система робот-визуелни сензор

Иако је избор конфигурације система веома важан, квалитетна калибрација система и даље представља кључни аспект за његову примјену. Калибрација система робот-визуелни сензор представља процедуру од суштинског значаја за управљање роботима, засновану на коришћењу информација добијених визуелним сензором. Иако се може окарактерисати као једноставна процедура, проблем калибрације већ деценијама представља изазован задатак како са практичног тако и са научног аспекта [2]. Као што је већ истакнуто, ова калибрација омогућава локализацију објеката у радном простору робота, прецизнију манипулацију објектима и могућност прилагођавања постојеће роботске ћелије промјенама радног окружења, што значајно повећава флексибилност у раду и кандидује постојеће системе за реализацију различитих врста задатака, те коришћење у динамичним процесима аутоматизације индустријских постројења.

Калибрација система робот-визуелни сензор представља процедуру којом се дефинише међусобни однос робота и визуелног сензора, а резултат се најчешће представља у форми хомогене матрице трансформације у којој су садржане информације о позицији и оријентацији робота у односу на визуелни сензор [96]. Информације о радном окружењу дефинисане су у односу на референтни координатни систем визуелног сензора, док је управљање робота реализовано у односу на референтни координатни систем робота. У циљу реализације интегрисаног система робот-визуелни сензор, потребно је обезбиједити да се информације од интереса, детектоване визуелним сензором, могу дефинисати у односу на референтни координатни систем робота. То се управо постиже процедуром калибрације, те се омогућава да робот успјешно и аутономно реализује задатке манипулације у заједничком радном простору робота и визуелног сензора коришћењем информација добијених од визуелног сензора.

Важно је напоменути да је код система са покретном камером координатни систем визуелног сензора покретан, док је за системе са фиксном камером координатни систем визуелног сензора непокретан. Сматра се да је калибрација система са покретном камером једноставнија узимајући у обзир чињеницу да се међусобни однос референтног координатног система визуелног сензора не мијења у односу на референтни координатни систем завршног уређаја робота. Као резултат калибрације система у овој конфигурацији процјењује се матрица трансформације између координатних система визуелног сензора и завршног уређаја робота, Слика 3.2б. У случају коришћења система са фиксном камером, да би се обезбиједио оптималан рад система, потребно је обезбиједити прецизност управљања роботом у видном пољу визуелног сензора, што захтијева квалитетну калибрацију, а самим тим и комплекснију процедуру процеса калибрације. Као резултат калибрације система са фиксном камером процјењује се матрица трансформације која представља однос између референтних координатних система базе робота и визуелног сензора, Слика 3.2а.

Процедура калибрације подразумева провођење задатака по унапријед дефинисаном редоследу, а сама методологија обухвата следеће кораке [2]:

#### 1. *Поставка система робот-визуелни сензор*

Систем заснован на роботу и визуелном сензору реализује се у једној од двије стандардне конфигурације. Прва конфигурација подразумева постављање визуелног сензора у радном простору робота или изван радног простора и њихов међусобни однос се не мијења како у процесу калибрације тако и у даљем раду система. Друга конфигурација подразумева постављање визуелног сензора на робота, те се визуелни сензор креће заједно с роботом и у процесу калибрације и у току рада система. Поставка система подразумева да су и робот и визуелни сензор калибрисани прије почетка калибрације система, те да су управљачки и комуникациони модули конфигурисани и функционишу исправно.

#### 2. *Прикупљање података*

Процес прикупљања података се реализује помјерањем робота на начин да се врх робота доводи у различите позиције у видном пољу визуелног сензора, након чега се визуелним сензором снимају подаци од интереса. Ови подаци се најчешће обезбјеђују постављањем калибрационих објеката и/или маркера на врх робота, за калибрацију система са фиксном камером, или у радном простору робота у случају калибрације система са покретном камером. Калибрациони објекти као што су шаховске табле, различите врсте маркера или 3D објекти садрже карактеристична обиљежја која представљају референтне тачке за примјену у процесу калибрације. Који калибрациони објекат ће се користити у процесу калибрације зависи од система који се калибрише, одабране методе калибрације и задатка за чије рјешавање је систем намијењен. Управљање роботом у процесу калибрације може бити реализовано ручним вођењем робота или аутоматизованим поступком са унапријед дефинисаним позама (позицијама и оријентацијама) врха робота за потребе калибрације. Након позиционирања робота, за сваку дефинисану позу, подаци о роботу и подаци добијени снимањем визуелног сензора се прикупљају у циљу даље обраде и припреме за калибрацију.

#### 3. *Претпроцесирање података*

Претпроцесирање најчешће подразумева поступак филтрирања прикупљених података у циљу уклањања шума и елиминације аномалија (енгл. *Outliers*). Овај процес омогућава повећање квалитета података који ће бити коришћени за калибрацију, а уједно и поједностављује процедуру елиминисањем непотребних података.

#### 4. *Издвајање референтних података за калибрацију*

Након филтрирања података неопходно је из филтрираног скупа издвојити 2D или 3D податке неопходне за калибрацију система. Ова процедура подразумева издвајање карактеристичних обиљежја са калибрационих објеката

и/или маркера снимљених визуелним сензором. Поступак може да се реализује примјеном алгоритама за детекцију и издвајање јединствених обиљежја шаховске табле, затим детекцију и декодовање података са калибрационих маркера, идентификацију специфичних обиљежја 3D објеката и слично. Поступак се понавља за све позиције робота у којим су снимљени потенцијални калибрациони подаци, те се даљом идентификацијом тих података формирају уређени парови који одговарају подацима о позицији робота и одговарајућим подацима идентификованим визуелним сензором за конкретну позицију робота.

#### 5. *Процјена параметара система*

Коришћењем издвојених референтних тачака проводи се поступак калибрације система, који као резултат дефинише однос између референтних координатних система визуелног сензора и робота. Резултат се добија у форми хомогене матрице трансформација, која садржи информације о међусобној позицији и оријентацији визуелног сензора и робота.

#### 6. *Валидација резултата калибрације*

Процјена тачности калибрације се најчешће заснива на метрици грешке. Поступак се проводи поређењем и статистичком анализом резултата добијених на основу унапријед познатих података о позицији и оријентацији врха робота и података процијењених коришћењем резултантне матрице калибрације.

Након калибрације система проводи се поступак процјене квалитета калибрације. У случају да добијени резултати одступају од унапријед дефинисаних толеранција, поступак калибрације се понавља, а врло често се разматрају и додатни аспекти побољшања процеса калибрације. Побољшање калибрације често се реализује повећањем броја позиција калибрационих објеката током процеса калибрације, сходно чињеници да већи број позиција омогућава бољи резултат калибрације [29]. Такође, увођење додатних ограничења и информација разматрано је као веома важан аспект повећања квалитета калибрације. Конкретно, проширење модела калибрације подацима о изобличењу сочива визуелног сензора, затим присуству мјерног шума визуелног сензора, системским грешкама робота, амбијенталним условима и слично. Поред поменутих аспеката, често се намеће потреба за коришћењем итеративних оптимизационих метода као и напредних алгоритама заснованих на вјештачкој интелигенцији у циљу оптимизације поступка калибрације система.

Важно је истаћи и чињеницу да калибрација система не представља завршни процес, већ почетну фазу од које зависи поуздан и прецизан рад система. Такође, калибрација система није поступак који се реализује само једном и гарантује жељени рад система на дужи период. Напротив, током рада често се мијења позиција визуелног сензора и/или робота, затим долази до замора материјала, промјене амбијенталних услова, повећања системских грешака робота и визуелног сензора, због чега је процес калибрације неопходно поновити како би се постигла жељена тачност калибрације и оптималне перформансе система.

### 3.2. Методологија калибрације система робот-визуелни сензор

У складу са претходно наведеним, може се закључити да на квалитет калибрације система робот-визуелни сензор највише утичу квалитет калибрације робота, визуелног сензора и на крају калибрација самог система [6], Слика 3.3.



Слика 3.3: Дијаграм тока калибрације система робот-визуелни сензор

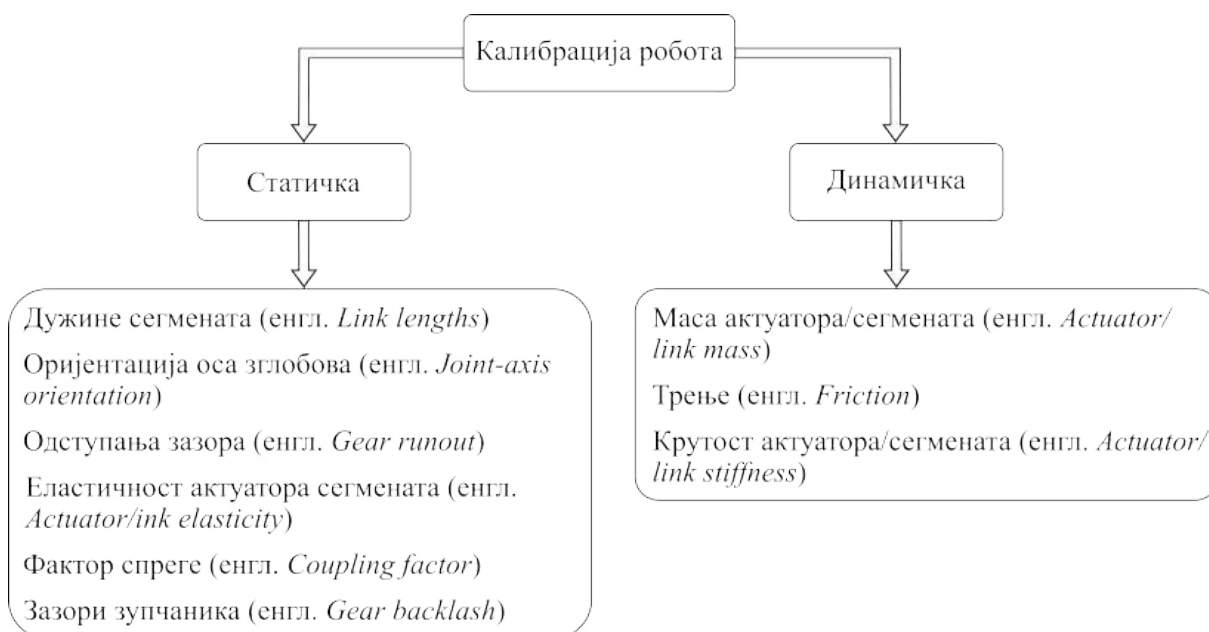
Са Сликe 3.3 се може уочити да не постоји јединствен начин за калибрацију система. Методологија калибрације, као и саме технике, могу да се разликују у зависности од конфигурације система, затим избора робота и визуелног сензора, избора приступа за калибрацију робота и калибрацију визуелног сензора, захтијеваног квалитета калибрације, као и одабране методе за калибрацију система робот-визуелни сензор. Стога се калибрација система, и поред јасно дефинисане процедуре, прилагођава специфичностима окружења, те жељеним циљевима и постојећим ограничењима.

У наредним главама посебна пажња ће бити посвећена наведеним аспектима представљеним на Слици 3.3. Поред описа општих модела и принципа калибрације манипулационих робота и визуелних сензора, те аспеката који утичу на избор технологија и компонената система са циљем постизања прецизне и флексибилне процедуре калибрације, те оптималних перформанси система рука-око, биће изложена анализа резултата научно-истраживачког рада који је претходио дисертацији, те указано на мотивацију која је резултовала закључцима изведеним у дисертацији.

## Глава 4

# Кинематичка калибрација робота

Позу робота, која представља позицију и оријентацију врха робота у односу на његов референтни координатни систем, карактерише поновљивост и апсолутна тачност позиционирања врха робота у радном простору. Треба напоменути да се проблем позиционирања уобичајено своди на позиционирање врха роботског манипулатора, односно врха алата постављеног на завршни механизам манипулатора којим се реализују жељени задаци манипулације објектима у радном простору робота. Као што је познато, апсолутна грешка позиционирања врха манипулатора најчешће је последица непрецизне монтаже, те оштећења и дотрајалости његових елемената током дуготрајног рада. Побољшање апсолутне тачности позиционирања и компензација системских грешака може се постићи калибрацијом манипулатора. У пракси постоје два основна типа калибрације роботских манипулатора: статичка и динамичка, Слика 4.1.



Слика 4.1: Типови калибрација роботских манипулатора

---

Најпопуларнија метода калибрације је метода која се заснива на процјени геометријских параметара манипулатора, позната под називом кинематичка калибрација. Захваљујући својој ефикасности, ова метода је популарна како у практичној индустријској примјени тако и у истраживању [23–25]. Циљ калибрације геометријских параметара заснива се на минимизацији разлике између функције стварних промјенљивих манипулатора и одговарајућег математичког модела [20]. За реализацију задатка калибрације користе се два приступа, заснована на диференцијалном моделу, и то калибрација помоћу отвореног и покретног затвореног кинематичког ланца. Први приступ захтијева мјерење вањских координата завршног уређаја манипулатора у 3D простору, за различите вриједности унутрашњих координата [28]. Под појмом вањских координата завршног уређаја подразумијева се позиција и оријентација координатног система дефинисаног за завршни уређај у односу на усвојени референтни координатни систем робота. У пракси је за референтни координатни систем индустријског манипулационог робота најчешће усвојен координатни систем са исходиштем у бази манипулатора. Унутрашње координате представљају релативни однос између сусједних сегмената кинематичког ланца, конкретно унутрашња координата ротационог зглоба је угао закретања око осе зглоба, док код транслационог зглоба представља линеарни помјерај дуж осе зглоба. Значајни резултати процјене кинематичких параметара у отвореној спрези, засновани на мјерењу унутрашњих координата зглобова и вањских (Декартових) координата завршног уређаја, представљени су у радовима [103–105]. Предложени приступи за процјену параметара усвајају претпоставку да постоји мјерни уређај за мјерење вањских координата. Међутим, треба нагласити да је мјерење позе завршног уређаја манипулатора у односу на референтни координатни систем робота несумњиво најкритичнији корак ка успјешној калибрацији. У ту сврху су коришћени различити мјерни уређаји од механичких координатних мјерних машина, система за мјерење близине, теодолита и интерферометара за ласерско праћење, до јефтиних, намјенски израђених фиксатора [106, 107]. Поменути мјерни уређаји су скупи, врло често захтијевају сложене поступке и стручност за њихово коришћење, те имају ограничен радни простор. Стога се мјерење позе завршног уређаја манипулатора и даље сматра изазовним задатком, при чему се као главни циљ побољшања процеса калибрације истиче потреба за развојем јефтиног и прецизног мјерног уређаја са могућношћу аутоматизације поступка калибрације, што би омогућило смањење времена потребног за калибрацију и недоступност робота [20]. Други приступ, захваљујући ограничењима која намеће коришћење покретног кинематичког ланца, елиминише потребу за мјерењем координата завршног уређаја и процјену параметара геометрије заснива само на мјерењу унутрашњих координата [108]. Овај поступак има спорију конвергенцију и мањи број параметара који се могу процјењивати, те је у пракси значајно мање заступљен у поређењу са калибрацијом помоћу отвореног кинематичког ланца [109].

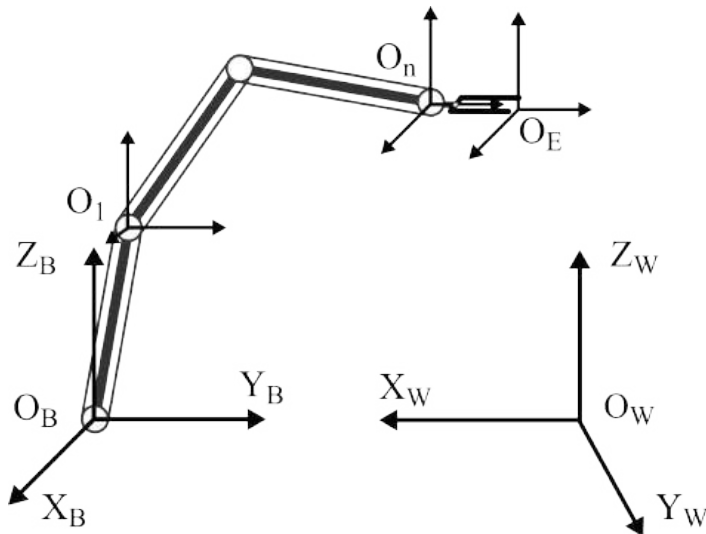
У општем случају, процес кинематичке калибрације манипулатора помоћу отвореног кинематичког ланца се реализује у четири корака и то: дефинисање кинематичког модела, мјерење позиције и оријентације завршног уређаја, одабир математичког приступа за процјену параметара геометрије коришћењем добијених мјерних података и адаптација кинематичког модела заснована на процјени параметара [110].

## 4.1 Дефинисање кинематичког модела манипулатора

Калибрација заснована на кинематичком моделу сматра се методом калибрације која побољшава прецизност манипулатора у цијелом радном простору. Кинематички модел представља математички опис геометрије манипулатора. Модел дефинише везу између геометријских параметара, промјенљивих величина које описују стања зглобова, те позе завршног уређаја. Многи кинематички модели су предложени за дефинисање кинематичког модела манипулатора, а најпознатији су D-H модел (енгл. *Denavit-Hartenberg model*) [111], POE модел (енгл. *Product of exponentials model*) [112], CPC модел (енгл. *Complete and parametrically continuous model*) [113] и модел заснован на кватернионима (енгл. *Quaternion model*) [114].

Најпопуларнију методу предложили су Денавит и Хартенберг, познату као D-H нотација [111]. Проширење ове нотације, познато под називом модификована D-H нотација [115], популарна по томе што уводи проширење којим се омогућава елиминација проблема сингуларитета који се појављују у стандардној D-H нотацији, показала је потенцијал за постизање побољшања. Међутим, методе засноване на модификованој нотацији, описане у [115–118], резултовале су повећањем сложености и комплексности оптимизационих метода за процјену параметара геометрије, те потребом за дефинисање додатних ограничења, због чега је стандардна нотација и даље најпопуларнија и у пракси највише заступљена.

Стандардна D-H нотација омогућава јединствен и ефикасан начин за дефинисање кинематичког модела постављањем везаних координатних система за осу сваког зглоба и дефинисањем хомогених матрица трансформација за представљање међусобног односа два узастопна зглоба. У сврху дефинисања кинематичког модела, усвојени су основни координатни системи приказани на Слици 4.2.



Слика 4.2: Дефинисање координатних система за моделовање роботског манипулатора

За дефинисане координатне системе је усвојена сљедећа нотација:

$O_B - X_B Y_B Z_B$  – координатни систем базе манипулатора.

$O_E - X_E Y_E Z_E$  – координатни систем завршног уређаја (енгл. *End Effector - EE*) манипулатора. Искодиште координатног система  $O_E$  представља референтну тачку завршног уређаја или алата постављеног на врх манипулатора.

$O_i - X_i Y_i Z_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) – координатни систем везан за  $i$ -ти зглоб, при чему  $O_n - X_n Y_n Z_n$  – представља координатни систем везан за посљедњи зглоб манипулатора.

$O_W - X_W Y_W Z_W$  – глобални координатни систем, у литератури познат и као координатни систем свијета (енгл. *World coordinate system*).

Стандардна D-Н нотација сваког сегмента кинематичког ланца зависи од четири параметра геометрије означених са  $\theta$ ,  $d$ ,  $a$ , и  $\alpha$ , који редом означавају угаони помјерај, дужину зглоба манипулатора, померај зглоба и угао зглоба. Композитна  $4 \times 4$  хомогена матрица трансформација  $T_i^{i-1}$ , позната као D-Н трансформациона матрица за два сусједна координатна система  $i$  и  $i - 1$ , дефинисана је на сљедећи начин:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \cdot \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cdot \sin \theta_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cdot \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cdot \cos \theta_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Надаље, хомогена матрица трансформација  $T_i^B$ , која дефинише позу координатног система  $i$ -тог зглоба у односу на координатни систем базе манипулатора, израчунава се као ланчани производ матрица трансформација  $T_i^{i-1}$ , за сукцесивне координате зглобова:

$$T_i^B = T_1^B \cdot T_2^1 \cdot \dots \cdot T_i^{i-1} \quad (4.2)$$

За случај када је  $i = n$ , добија се матрица трансформација  $T_n^B$ , која дефинише позу координатног система посљедњег зглоба у односу на координатни систем базе манипулатора. Матрица  $T_n^B$  је функција  $4n$  геометријских параметара који су константни за фиксну геометрију манипулатора, и функција  $n$  промјенљивих координата зглобова које мијењају своју вриједност када се манипулатор креће. Додатно, треба имати у виду да манипулатор није намијењен да обавља само један задатак, већ се у зависности од потребе захтијева коришћење различитих алата, који се мијењају у зависности од захтјева задатка. Стога, како би се олакшало програмирање робота за извршавање различитих задатака, практикује се дефинисање матрице трансформације  $T_E^n$ , између координатних система завршног уређаја (алата) и посљедњег зглоба манипулатора. У складу са Сликаом 4.2, може се дефинисати сљедећа матрица трансформација:

$$T_E^W = T_B^W \cdot T_n^B \cdot T_E^n \quad (4.3)$$



С обзиром на то да корисник може произвољно изабрати референтни координатни систем робота или роботске ћелије, потребно је шест параметара да се дефинише позиција и оријентација координатног система базе манипулатора у односу на референтни координатни систем. Због независности одређених параметара манипулатора, узастопни координатни системи могу се представити највише са четири независна параметра. Надаље, координатни систем завршног уређаја може се такође дефинисати произвољно у односу на посљедњи зглоб манипулатора, те је за дефинисање матрице  $\mathbf{T}_E^n$  потребно шест параметара, три за позицију и три за оријентацију. Ако проширимо нотацију манипулатора на дефиницију координатног система завршног уређаја (алата), слиједи да дефинисани координатни систем уводи четири независна параметра [119].

На основу релација (4.1), (4.2) и (4.3), поза завршног уређаја у зависности од вриједности унутрашњих координата и параметара геоматрије манипулатора може се изразити сљедећом једначином:

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{q}, \mathbf{g}^0) \quad (4.4)$$

гдје  $\mathbf{x}$  представља вектор позе завршног уређаја у односу на референтни координатни систем,  $\mathbf{q}$  означава вектор промјенљивих зглобова (унутрашњих координата), а  $\mathbf{g}^0$  означава вектор параметара геометрије манипулатора [104]. Димензија вектора  $\mathbf{x}$  је 6 ако су измјерене и позиција и оријентација завршног уређаја. Међутим, чешће се мјери само позиција завршног уређаја, па је димензија вектора  $\mathbf{x}$  једнака 3. Димензија вектора  $\mathbf{q}$  одговара броју степени слободе (енгл. *Degree Of Freedom – DOF*) манипулатора, односно броју његових зглобова. Димензија вектора  $\mathbf{g}^0$  је највише  $4n + 6$ , гдје је  $n$  број зглобова манипулатора.

## 4.2 Процјена геометријских параметара манипулатора заснована на диференцијалном моделу

Калибрација помоћу отвореног кинематичког ланца, коришћењем вањских координата завршног уређаја, представља најпопуларнији метод калибрације. Модел представљен једначином (4.4) је нелинеаран по параметрима геометрије  $\mathbf{g}^0$ , и потребно га је линеаризовати како би било могуће примијенити методе линеарне естимације параметара. Диференцијални модел омогућава диференцијалну варијацију позе завршног уређаја као функцију диференцијалне варијације геометријских параметара. Разлика између израчунатог положаја завршног уређаја  $\mathbf{x}$  и мјерења  $\mathbf{x}^m$  представља критеријумску функцију за минимизацију грешке процјене параметара.

Нека  $\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^m$ , и  $\Delta\mathbf{g} = \mathbf{g} - \mathbf{g}^0$ , представљају редом вектор грешке положаја завршног уређаја и вектор грешке геометријских параметара, при чему је са  $\mathbf{g}$  означен вектор процијењених параметара геометрије, а са  $\mathbf{g}^0$  означен вектор номиналних виједности параметара геометрије. Из једначине (4.4), модел калибрације

за мале грешке може бити представљен линеарном диференцијалном једначином:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}_g \cdot \Delta \mathbf{g} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^m \quad (4.5)$$

гдје су параметри дефинисани као што слиједи:

$\mathbf{g}$  представља вектор процијењених параметара геометрије димензија ( $p \times 1$ ),

$\Delta \mathbf{x}$  представља вектор грешке положаја завршног уређаја димензија ( $r \times 1$ ),

$\Delta \mathbf{g}$  представља вектор грешке геометријских параметара,

$\mathbf{J}_g$ , представља матрицу осјетљивости положаја завршног уређаја на промјене вектора геометрије, димензија ( $r \times p$ ), позната као Јакобијева матрица [104, 120].

Параметри  $r$  и  $p$  редом представљају број мјерљивих вањских координата и број параметара геометрије манипулатора.

За процјену вектора грешке геометријских параметара користи се једначина (4.5), за више различитих конфигурација манипулатора у радном простору. Скуп података добијених промјенама конфигурација омогућава дефинисање система једначина:

$$\Delta \mathbf{X} = \Phi \cdot \Delta \mathbf{g} \quad (4.6)$$

гдје  $\Delta \mathbf{X}$  представља матрицу чије су врсте вектори грешака положаја завршног уређаја за  $k$ -ту конфигурацију манипулатора, а  $\Phi$  регресиону матрицу чије врсте дефинишу зависност номиналних вриједности параметара геометрије, које су константне, и вриједности унутрашњих координата, које су промјенљиве и познате за сваку  $k$ -ту конфигурацију манипулатора. Дате матрице се дефинишу сљедећим релацијама:

$$\Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}^1 \\ \Delta \mathbf{x}^2 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{x}^k \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_g^1(\mathbf{q}^1, \mathbf{g}) \\ \mathbf{J}_g^2(\mathbf{q}^2, \mathbf{g}) \\ \vdots \\ \mathbf{J}_g^k(\mathbf{q}^k, \mathbf{g}) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

С обзиром да је систем представљен једначином (4.6) линеаран, за процјену параметара геометрије се најчешће користи метода најмањих квадрата [121], којом се постиже рјешење у затвореном облику:

$$\Delta \mathbf{g} = (\Phi^T \cdot \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \cdot \Delta \mathbf{X} \quad (4.8)$$

У свакој итерацији параметри геометрије се ажурирају у складу са релацијом:

$$\mathbf{g} \leftarrow \mathbf{g} + \Delta \mathbf{g} \quad (4.9)$$

Рјешавање једначина (4.8) и (4.9) реализује се итеративно док  $\Delta \mathbf{g}$  не достигне

вриједности мање од прага који је одређен захтијеваном тачношћу.

Кинематичка калибрација манипулатора у суштини представља процес идентификације, због чега је важно сагледати који параметри се могу независно процјени. Ови параметри се у литератури називају базни параметри [120]. Општа метода за одређивање базних параметара предложена је у раду [122]. Одређивање базних параметара геометрије заснива се на рангу матрице  $\Phi$ . Неке параметре манипулатора који се односе на закључане пасивне зглобове није могуће идентификовати у алгоритму калибрације због ограничења њихове покретљивости. То уопштено смањује број базних параметара у процедурама калибрације помоћу затвореног кинематичког ланца, у поређењу са приступом помоћу отвореног кинематичког ланца.

Будући да је процес мјерења генерално временски захтјеван, циљ је користити скуп конфигурација манипулатора који користи ограничен број тачака при процјени параметара, те умањити утицај шума на процјену параметара. Кондициони број матрице  $\Phi$  пружа добру процјену трајне екситације [119], што потврђује и чињеница да је уложено много напора са циљем проналажења оптималне екситације. Избор оптималних конфигурација манипулатора за провођење процедуре калибрације и приједлози рјешења, представљени су у радовима [120, 122, 123]. Важно је напоменути да већина метода геометријске калибрације омогућава прихватљив кондициони број користећи насумично одабране конфигурације манипулатора.

Ажурирани алгоритам за смањење сложености рачунања и индекса опсервабилности, за кинематичку калибрацију робота, представљен је у [124]. Развијен је активан алгоритам калибрације који укључује ажурирани алгоритам у процесу селекције конфигурација манипулатора. Надаље, примјена општег итерационог метода, Levenberg-Marquardt метода, те генетског алгоритма за рјешавање система једначина (4.6), представљена је у радовима [12, 13]. Поред примјене, предложена је модификација за побољшање конвергенције алгоритама и смањење осјетљивости на почетну процјену. Представљени резултати су посебно значајни у случајевима када су почетне процјене параметара геометрије лоше. Овај ефекат карактеристичан је код модуларних робота, код којих конфигурацију манипулатора формира корисник према специфичностима задатка [119].

Као што је истакнуто, процедура калибрације, заснована на приступу отвореног кинематичког ланца, процјену геометријских параметара базира на мјерењу унутрашњих и вањских координата. Сви индустријски роботи су опремљени сензорима за мјерење унутрашњих координата, међутим не постоје индустријски роботи који су опремљени сензорима за мјерење вањских координата. Стога је за реализацију поступка калибрације неопходно коришћење додатних сензора за мјерење вањских координата, при чему је једно од основних ограничења примјене таквих сензора могућност мјерења без помјерања робота из његовог радног простора.

У пракси постоје различити типови сензора за мјерење вањских координата који се генерално сврставају у двије групе. Прву групу чине сензори који у поступку мјерења захтијевају механички контакт са врхом манипулатора, и ови сензори су укратко описани у претходном поглављу. Другу групу чине сензори који не захти-

јевају физички контакт са врхом манипулатора. Ови сензори свој рад заснивају на коришћењу звучних и свјетлосних сигнала, при чему су визуелни системи, засновани на технологијама рачунарског вида, показали велики потенцијал, те су широко прихваћени у задацима кинематичке калибрације манипулатора у сврху мјерења вањских координата.

### 4.3 Калибрација манипулатора коришћењем рачунарског вида

Коришћење визуелних система за мјерење вањских координата у процесу калибрације подразумева мјерење 3D координата, што уводи и одређена ограничења у погледу сензора који испуњавају постављене захтјеве. Стерео камера се у почетку показала као веома погодан визуелни систем [125]. Заснована на имитацији људског вида, стерео камера омогућава реконструкцију 3D сцене коришћењем више димензионалних слика. Међутим, да би се стерео камером процјенила информација о трећој димензији, потребно је да постоји дио простора који је видљив за обје камере. Такође, да би се добила информација о трећој димензији за тачно одређену тачку у сцени, потребно је идентификовати ту тачку на обје слике добијене стерео камером. Овај проблем је у литератури познат као проблем проналажења кореспондентних тачака, који није једнозначан и због чега су у циљу поједностављења поступка њиховог проналажења уведена ограничења као нпр. да оптичке осе камера буду паралелне што омогућава коришћење ефеката епиполарне геометрије у процесу претраживања, те да се за реализацију стерео система користе идентичне камере [126].

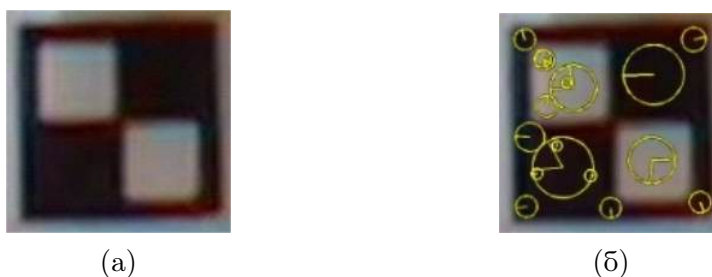
Постоји велики број алгоритама који на различите начине рјешавају проблем кореспонденције на сликама добијеним стерео камером [127]. Један од приступа који представља практично рјешење проблема кореспондентних тачака при калибрацији геометрије манипулатора коришћењем стерео камере предложен је у [16]. У циљу поједностављења поступка мјерења вањских координата, на врх манипулатора је постављен маркер. Поступак проналажења кореспондентних тачака заснован је на корелацији области најсличнијег интензитета на сликама добијеним стерео камером. Области, чија корелација се процјењује, у литератури су познате као прозори, чији централни пиксел представља референтну тачку за калибрацију. Промјеном позиција прозора у сликама на којима се претражују кореспондентне тачке и поређењем интензитета пиксела који припадају одређеном прозору, процјењују се области са највећом корелацијом интензитета. С обзиром да се упоређују интензитети прозора, разлика се рачуна за цијели прозор, у чијем центру се налази кореспондентни пиксел. Мјера сличности интензитета два прозора дефинише се као минимална вриједност суме квадрата разлике интензитета два прозора (енгл. *Sum of Squared Differences - SSD*). Поступак проналажења кореспондентних тачака, представљен у [16], није у потпуности аутоматизован. У почетку се маркер на слици једне камере селекује ручно, а затим се слика друге камере претражује аутоматски. Овакав начин функционисања представља недостатак, имајући у виду предности потпуне аутоматизације поступка. Међутим, аутоматизација по-

ступка калибрације намеће многе изазове, почев од комплексности и осјетљивости поступка мјерења вањских координата, затим дефинисање референтних тачака за калибрацију које се поуздано могу детектовати, идентификацију дефинисаних тачака на сликама добијеним визуелним системом, кореспонденцију идентификованих тачака, те процјену 3D координата референтних тачака за калибрацију. Иако се наведени аспекти могу сматрати дјелимично и у потпуности ријешеним, постоје и додатни аспекти који утичу на квалитет калибрације. Стога ће у наставку бити дат кратак преглед истраживања које је претходило резултатима приказаним у дисертацији и које приказује основне проблеме и приједлоге рјешења за кинематичку калибрацију манипулатора примјеном технологија рачунарског вида.

Процедура аутоматске калибрације манипулатора заснована на технологијама рачунарског вида и коришћењу стерео камере представљена је у раду [20]. Предложено поступак заснован је на постизању аутоматске калибрације манипулатора без интервенције оператера и без додатне опреме. Као први и кључни корак предложено је постављање маркера на завршни уређај манипулатора и коришћење стерео камере за његову детекцију [17].

У наредном кораку реализује се поступак идентификације маркера. Овај задатак представља типичан проблем препознавања објеката. Стога је дефинисање облика и текстуре маркера истакнуто као један од значајних аспеката у циљу постизања поуздане детекције маркера. Посебну пажњу у поступку разматрања и дефинисања облика и текстуре маркера привукла је парадигма заснована на локалним обиљежјима слике, која омогућавају не само процјену локација од интереса на слици, већ и нови вид репрезентације слике без потребе за њеном сегментацијом. Додатни мотив за разматрање локалних обиљежја представљале су особине инваријантности на скалирање, ротацију и промјену амбијенталних услова, робусност на оклузију, замућеност слике, утицај шума, дискретизацију, па чак и на компресију. Због своје специфичности поједина обиљежја се могу подударати са обиљежјима великог броја објеката, што је показало потенцијал за ефикасно препознавање референтних објеката коришћењем локалних обиљежја слике узоркованих на великом броју поновљивих локација [128].

Имајући у виду предности које омогућавају локална обиљежја, у раду [18] је размотрено коришћење маркера једноставне текстуре, приказаног на Слици 4.3.



Слика 4.3: Маркер постављен на завршни уређај манипулатора: а) Тренинг слика маркера, б) Локална обиљежја маркера

Избор дизајна заснован је на сљедећим претпоставкама: једноставан за креирање и постављање на завршни уређај манипулатора, погодан за аутоматско препознавање, пресјек црних и бијелих квадрата који се налази у центру маркера, може се усвојити као референтна тачка за калибрацију, те има потенцијал за прецизну детекцију коришћењем већ постојећих алгоритама.

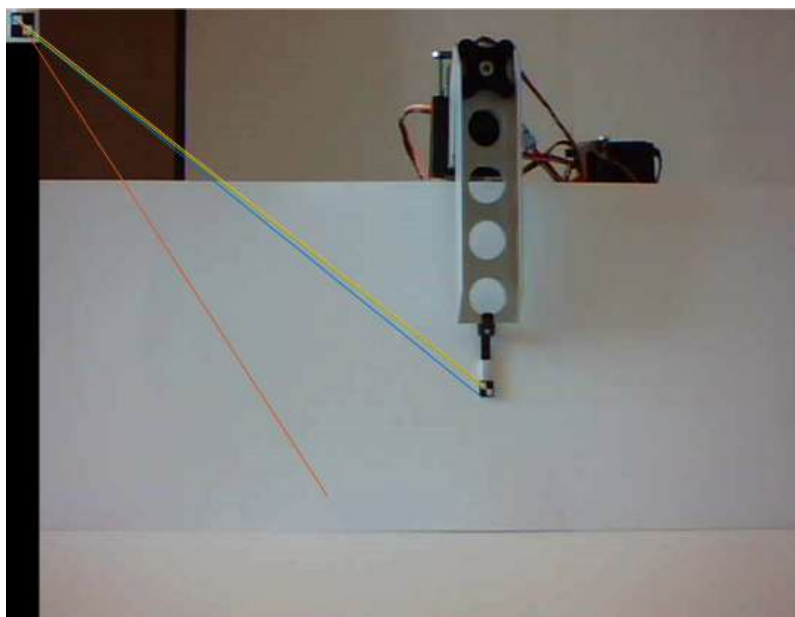
Поузданост детекције предложеног маркера анализирана је коришћењем SIFT алгоритама (енгл. *Scale-Invariant Feature Transform*) [129]. SIFT представља алгоритам који се користи за детекцију и опис локалних обиљежја слика у области рачунарског вида. Омогућава издвајање кључних тачака за жељени објекат било ког типа на слици, које одговарају центрима карактеристичних обиљежја, те лоцирање објеката на слици уз присуство мноштва других објеката. Погодан је и за усклађивање одговарајућих тачака које могу бити корисне за реконструкцију 3D сцене. Основни циљ SIFT алгорита је идентификација локалних обиљежја у слици које су препознатљиве у различитим оријентацијама и скалама слике, инваријантних у односу на величину објекта, транслацију, ротацију, препреке, варијације освјетљења, 3D пројективне трансформације објеката и деформације. Модели објеката су представљени као 2D локације SIFT обиљежја која су инваријантна на афине трансформације.

Резултати проведених експеримената показали су да предложени маркер посједује локална обиљежја која се могу детектовати SIFT алоритмом, Слика 4.3б. Надаље, проведеним експериментима потврђена је инваријантност на скалу, ротацију, промјену освјетљења као и ефикасност детекције маркера у присуству додатних објеката, постављањем позадина различитих текстура, чиме је демонстрирана робустност и поузданост детекције предложеног маркера. У циљу додатних анализа, поред предложеног маркера проведени су експерименти за неколико додатних маркера, различитих боја и текстура, Слика 4.4.



Слика 4.4: Тренинг слике маркера постављених на завршни уређај манипулатора

Такође, резултати проведених експеримената су потврдили да је предложени маркер погодан за практичну примјену, те да је поузданост његове аутоматске детекције, у поређењу са осталим маркерима, коришћењем SIFT алгоритма највећа [19]. Међутим, и поред наведених предности предложеног маркера, његова текстура и густина локалних обиљежја, у појединим експериментима, резултују недовољно прецизном детекцијом локалних обиљежја маркера тренинг слике и слике која се претражује [130]. Ово се манифестује препознавањем обиљежја, у слици која се претражује, на позицији која се налази изван области маркера, Слика 4.5. Стога се SIFT алгоритам, нарочито за предложени маркер, не може користити за детекцију центра маркера као референтне тачке за калибрацију.



Слика 4.5: Карактеристична обиљежја тренинг слике маркера и одговарајућа обиљежја у слици која се претражује

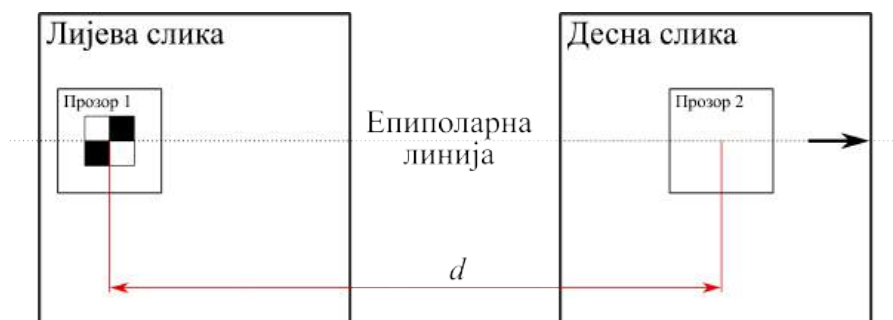
Узимајући у обзир изведене закључке, у наставку истраживања, SIFT алгоритам је коришћен искључиво за одређивање области маркера на слици. Област маркера се поуздано детектује на слици која се претражује коришћењем SIFT алгоритма, док су за предложени маркер и алгоритми засновани на детекцији ивица показали потенцијал за даљи поступак процјене центра маркера, тј. референтне тачке за калибрацију. За детекцију ивица маркера предложен је *Canny* алгоритам. Резултат *Canny* алгоритма, који је примјењен на сегмент слике приказан на Сlici 4.6а, илустрован је на Сlici 4.6б. На основу детектованих ивица маркера, даљи поступак процјене центра маркера, као референтне тачке за калибрацију, не представља захјеван задатак.



Слика 4.6: Примјена *Canny* алгоритма: а) Сегмент слике издвојен SIFT алгоритмом, б) Резултат примјене *Canny* алгоритма

Иако се описана процедура процјене позиције референтне тачке може сматрати компликованом, она представља само један дио процедуре за процјену 3D координата референтне тачке која се налази у центру маркера. Након одређивања позиције, потребно је одредити координате референтне тачке маркера у 3D простору. За рјешавање овог задатка неопходно је поновно одредити кореспондентне тачке на обје слике снимљене стерео камером. Претпоставке о захтјевима за кореспонденцију значајно се разликују у овој фази калибрационог поступка. Слике манипулатора добијене стерео камером садрже слике маркера које су снимљене истовремено. Из тога слиједи да у процесу одређивања кореспонденције није неопходна инваријантност у односу на величину објекта, ротацију, освјетљење и деформације објекта. Инваријантност на оклузију и 3D пројективне трансформације је пожељна, док инваријантност транслације није дозвољена због могућности потрешне идентификације тачака дуж еиполарне линије. Разлика локација кореспондентних тачака на сликама снимљеним стерео камером назива се диспаритет  $d$  (енгл. *Disparity*), и представља основну информацију коју је потребно прецизно одредити.

У раду [17] предложен је алгоритам за рјешавање проблема кореспондентних тачака заснован на корелацији области најсличнијег интензитета. Усвојена је претпоставка да више пиксела има сличан интензитет (боју), без посебне текстуре. Због тога корелација два пиксела не обезбјеђује довољно информација јер постоји више могућих кандидата. Зато се одређује корелација више суседних пиксела који формирају прозоре. Сличан концепт усвојен је и за проналажење кореспондентних тачака предложеног маркера на сликама добијеним стерео камером. Када се користи стерео камера са паралелним оптичким осама, подразумијева се да се кореспондентне тачке налазе на еиполарној линији, Слика 4.7.



Слика 4.7: Одређивање кореспондентних тачака засновано на корелацији области најсличнијих интензитета



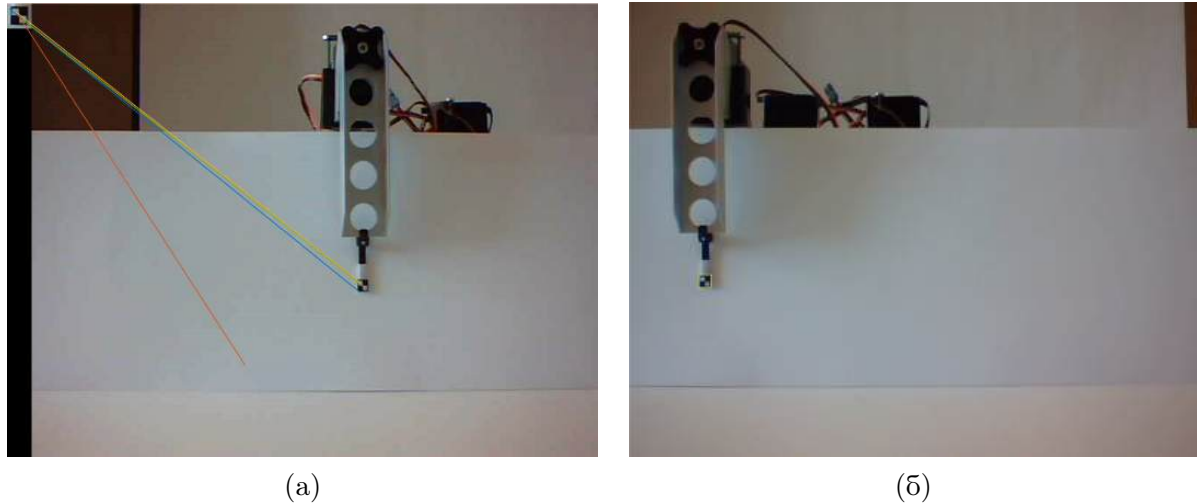
Формира се прозор димензија  $(h \times w)$  пиксела, гдје  $h$  и  $w$  представљају димензије прозора у пикселима. Централни пиксел прозора представља референтну тачку маркера (центар маркера на пресеку црних и бијелих квадрата) на једној од двије слике стерео камере (на пример, лијевој слици). Овај прозор се користи као референтна област са којом се упоређује област исте величине на другој слици, у овом случају десној слици приказаној на Слици 4.7. Промјеном диспаратета  $d$ , прозор у другој слици се помјера дуж епиполарне линије. Мјера сличности интензитета два прозора, односно критеријумска функција, рачуна се као сума квадрата разлике интензитета свих пиксела у оба прозора:

$$c(u,v,d) = \sum_{(h,w)} [\mathbf{I}m_L(u+h, v+w) - \mathbf{I}m_R(u+h+d, v+w)]^2 \quad (4.10)$$

гдје  $\mathbf{I}m_L$  и  $\mathbf{I}m_R$  редом представљају ознаке за лијеву и десну слику,  $u$  и  $v$  координате пиксела у слици,  $h$  и  $w$  димензије прозора у пикселима, док  $d$  представља диспаратет. Вриједност диспаратета  $d$ , за коју се добија минимална вриједност критеријумске функције, представља позицију прозора на другој слици, најбоље корелисаног са референтним прозором у првој слици, а може се описати релацијом:

$$\hat{d} = \underset{d}{\operatorname{argmin}} c(u,v,d) \quad (4.11)$$

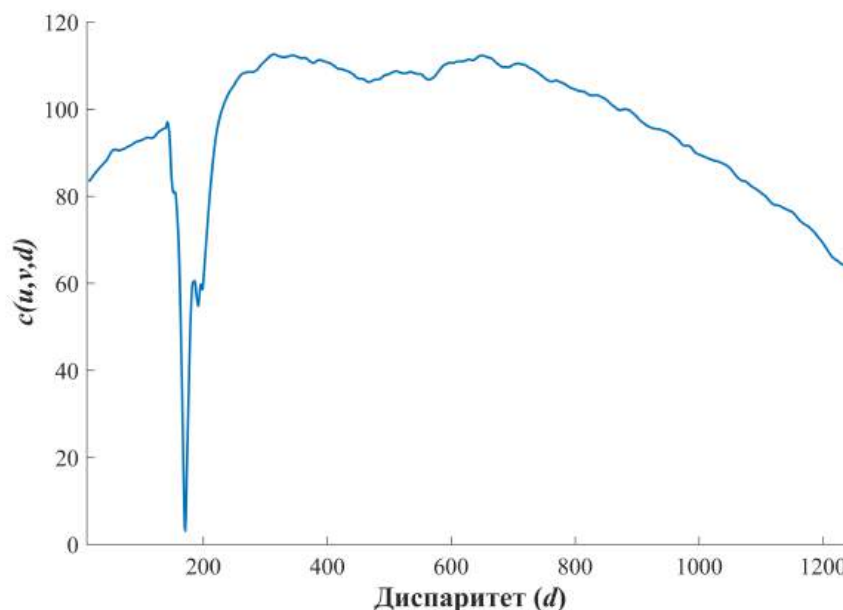
Валидација предложеног приступа реализована је коришћењем маркера приказаног на Слици 4.6. Маркер је постављен на завршни уређај модуларног манипулатора *Robix Rascal*, који је интегрисан са стерео камером у конфигурацији са фиксном камером [15]. Слике добијене стерео камером приказане су на Слици 4.8.



Слика 4.8: Слике добијене стерео камером: а) Слика са лијеве камере, Слика 4.5, б) Слика са десне камере - детекција маркера заснована на корелацији области најсличнијих интензитета

Графичка репрезентација критеријумске функције за промјену диспаратета  $d$  дуж епиполарне линије, од минималне до максималне вриједности, приказана је на Слици 4.9. Глобални минимум је јасно изражен, што указује да предложени

приступ омогућава поуздану идентификацију кореспондентних тачака на сликама снимљеним стерео камером.

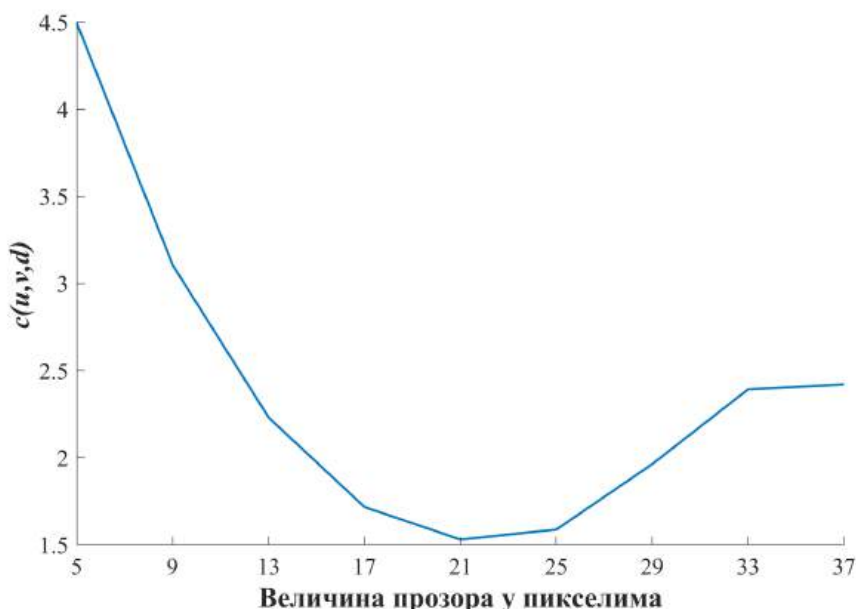


Слика 4.9: Графичка репрезентација критеријумске функције за промјену диспаратитета дуж епиполарне линије, гдје  $u$  и  $v$  представљају координате центра прозора при чему се  $u$  мијења у складу са помијерањем прозора, док је  $v$  фиксирано на вриједност координате центра маркера пронађеног на лијевој слици

Додатни аспект који може утицати на поузданост и прецизност предложеног приступа представља избор величине прозора у процесу претраживања слика. Величина прозора утиче на број потенцијалних кандидата за кореспонденцију и на прецизност одређивања диспаратитета. У класичном проблему кореспонденције, ако је величина прозора сувише мала, повећава се вјероватноћа појаве већег броја кандидата за кореспонденцију, што повећава вјероватноћу погрешног избора кореспондентних тачака. С друге стране, ако је величина прозора сувише велика, постоји могућност повећања грешке, која настаје због константне вредности диспаратитета унутар прозора. Стога, не постоји јединствена препорука за оптималну величину прозора. У неким случајевима се предлаже адаптивна величина прозора. Међутим, алгоритми засновани на адаптивним величинама прозора су комплексни и захтјевни за израчунавање, те нису популарни у практичној примјени [131].

У складу са претходним приказом, величина прозора директно зависи од величине маркера када је потребно одредити кореспонденцију маркера на двије слике. У конкретном случају, маркер представља област са два константна интензитета (боје). Ефекти избора величине прозора (у односу на величину маркера) на поузданост одређивања кореспондентних тачака анализирани су у раду [17]. Предложен је маркер чије су физичке димензије  $5 \times 5$  милиметара, што одговара величини од  $21 \times 21$  пиксела у сликама стерео камере. У сврху тестирања усвојене су различите величине прозора од  $5 \times 5$  до  $37 \times 37$  пиксела. Израчуната вриједност критеријумске функције је подијељена са бројем пиксела који припадају прозору. На овај начин,

критеријумска функција представља просјечну мјеру неусаглашености за сваки пиксел два прозора. Зависност промјене вриједности критеријумске функције од величине прозора приказана је на Слици 4.10. Приказ резултата provedених експеримената потврђује да се најбољи резултати постижу усвајањем величине прозора која је приближно једнака величини маркера.



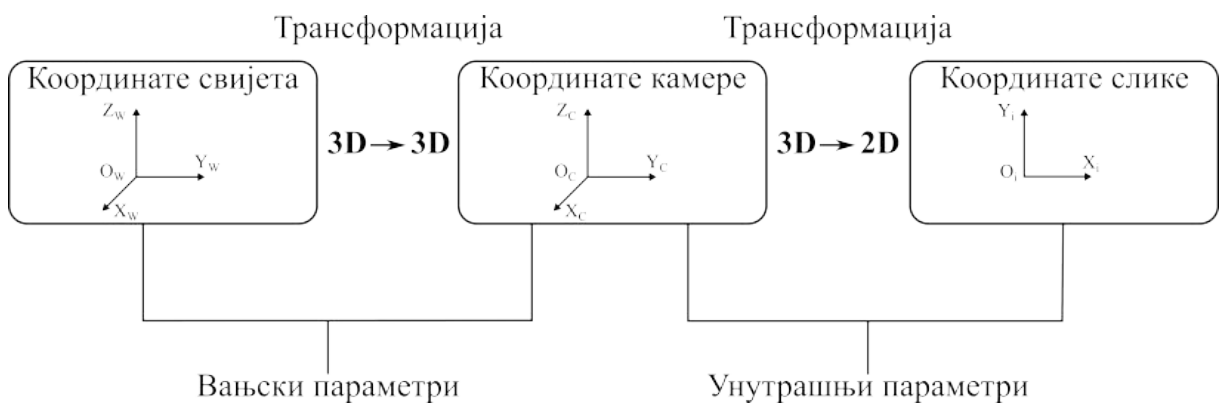
Слика 4.10: Графичка репрезентација зависности критеријумске функције за промјену диспаратитета дуж епиполарне линије и усвојене величине прозора

Резултати provedених истраживања показали су оправданост предложеног приступа за мјерење вањских координата завршног уређаја у сврху кинематичке калибрације манипулатора. Међутим, поновљивост и апсолутна тачност позиционирања *Robix Rascal* манипулатора показали су ограничење за практичну примјену предложеног система [14]. Стога је систем побољшан коришћењем индустријског манипулатора. Систем са фиксном камером је предложен за примјену у поступку аутоматизације роботске хирургије, реализован коришћењем стерео камере и манипулатора на чији врх је постављен хируршки скалпел. Основни концепт и приједлог методологије роботизованог сјечења у отвореној хирургији представљен је у раду [21]. Концепт функционисања система заснован је на пројектовању путање сјечења коришћењем визуелних информација добијених стерео камером. Путања сјечења дефинисана је линеарним сегментима, а почетак и крај путање, те контролне тачке на путањи означене су маркерима чија поузданост детекције је потврђена у претходном истраживању. Резултати provedених експеримената су показали да је предложени концепт подобан за реализацију задатка роботизованог сјечења у хируршким процедурама. Међутим, прецизност предложеног система не задовољава захтјеве који су предвиђени у реализацији хируршких задатака. Стога је даље истраживање усмјерено на разматрање избора визуелног сензора бољих перформанси, у циљу постизања прецизног и флексибилног система робот-визуелни сензор погодног за примјену у хируршким процедурама.

# Глава 5

## Визуелни сензори у роботизи

Напредак у области рачунарског вида резултовао је коришћењем визуелних сензора као стандардних компонента аутоматизације. Овај напредак представља значајан искорак у области мјерења и сензора, те додатно омогућава мноштво информација о радном окружењу, без потребе за директним физичким контактом [20, 132]. Основни елементи рачунарског вида су визуелни сензори, који су најчешће засновани на коришћењу камере као главног оптичког сензора. Да би се омогућили задаци роботске манипулације на основу слика добијених камером, неопходно је координате пиксела у равни слике трансформисати у координате глобалног координатног система [133]. Стога, да би се омогућила пројекција 3D тачака из радног окружења на раван слике описане 2D координатама пиксела, потребно је познавати модел камере. Дефинисање модела камере захтијева процјену унутрашњих и вањских параметара камере, што се постиже калибрацијом, Слика 5.1.

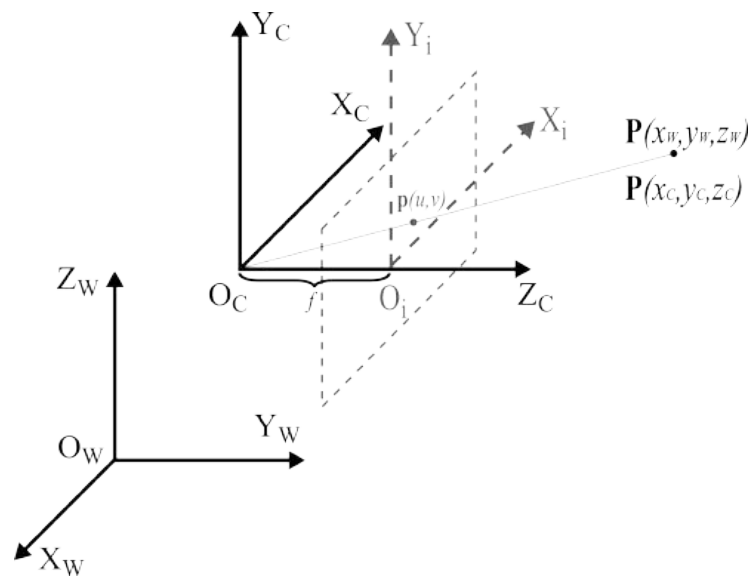


Слика 5.1: Параметри модела камере

Унутрашњи, интринзични (енгл. *Intrinsic*), параметри, се користе за трансформацију 3D координата камере у 2D координате слике, и обрнуто. Вањски, екстринзични (енгл. *Extrinsic*), параметри описују положај камере у односу на референтни координатни систем, и користе се за трансформацију 3D координата тачака изражених у координатном систему камере у односу на координате изражене у референтном координатном систему, Слика 5.1.

## 5.1 Модел камере

Модел камере који је најзаступљенији у области рачунарског вида примјењеног у роботици познат је под називом пин-хол модел камере (енгл. *Pin-hole camera model*). На Слици 5.2 илустрована је геометрија пин-хол модела камере. У основи, камера омогућава пројекцију из 3D простора у 2D раван слике. Пројекција се преноси оптичким зраком који потиче од рефлексије из тачке  $\mathbf{P}$ , која се налази у 3D простору сцене коју снима камера. Оптички зрак пролази кроз оптички центар камере  $O_C$  и пада на раван слике у тачки  $\mathbf{p}$ . Прије дефинисања модела камере и перспективне трансформације неопходно је дефинисати основне координатне системе илустроване на Слици 5.2.



Слика 5.2: Геометрија модела камере

Координатни систем са индексом  $W$ , представља глобални координатни систем чије исходиште, означено са  $O_W$  може бити постављено у било коју подобну позицију у радном окружењу. Даље, координатни систем са индексом  $C$ , представља координатни систем камере чије исходиште, означено са  $O_C$ , представља оптички центар камере. Овај координатни систем уједно представља и референтни координатни систем у процесу калибрације камере. Координатни систем са индексом  $i$ , представља координатни систем слике, чије исходиште означено са  $O_i$ , представља пресјек равни слике и оптичке осе камере. Растојање између исходишта  $O_C$  и  $O_i$ , на слици означено са  $f$ , представља жижну даљину сочива (оптичког система).

Ако се усвоји да је тачка  $\mathbf{P}(x_w, y_w, z_w)$  дефинисана координатама глобалног координатног система, и да је  $\mathbf{p}(u, v)$  тачка чије координате одговарају позицији пиксела у слици камере, пројекција тачке  $\mathbf{P}$  из 3D простора на тачку равни слике  $\mathbf{p}$  може се представити матрицом пројекције  $\mathbf{M}$  димензија  $3 \times 4$ , на следећи начин [125, 134]:

$$\mathbf{p} = \mathbf{K} \cdot [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \cdot \mathbf{P} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{P} \quad (5.1)$$

Матрица пројекције  $\mathbf{M}$  формирана је коришћењем унутрашњих и вањских параметара камере. Конкретно, матрица  $\mathbf{K}$  у једначини (5.1) представља матрицу унутрашњих параметара камере без изобличења. Матрица  $\mathbf{K}$  се представља као 3x3 матрица на следећи начин:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u \\ 0 & \beta & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

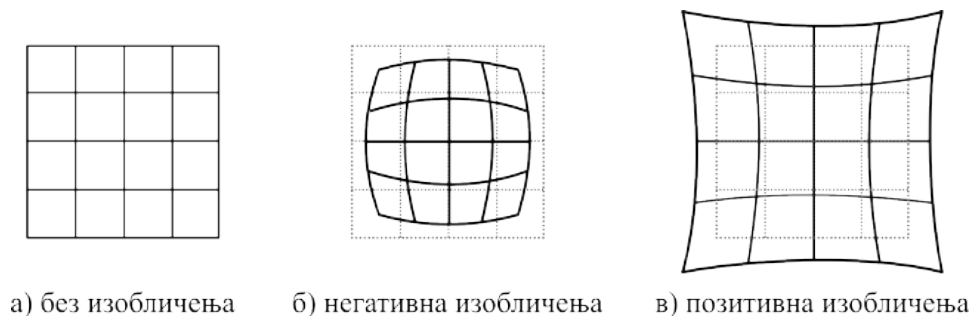
гдје параметри  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $u$  и  $v$  представљају унутрашње параметре без изобличења. Надаље, матрица  $\mathbf{R}$  и вектор  $\mathbf{t}$  редом представљају оријентацију и позицију камере у 3D простору, а дефинишу се на следећи начин:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

гдје параметри  $r_{1,1}$ ,  $r_{1,2}$ ,  $r_{1,3}$ ,  $r_{2,1}$ ,  $r_{2,2}$ ,  $r_{2,3}$ ,  $r_{3,1}$ ,  $r_{3,2}$ ,  $r_{3,3}$ ,  $t_x$ ,  $t_y$ ,  $t_z$ , представљају вањске параметре камере, којим се дефинише положај камере у односу на глобални координатни систем.

Матрица камере не узима у обзир изобличење објектива, с обзиром да идеализовани пин-хол модел камере нема сочива. Стога, да би се тачно дефинисао модел камере потребно је узети у обзир радијална и тангенцијална изобличења сочива.

Радијална изобличења настају као последица разлике идеалног и реалног сочива. Идеалним сочивом се сматра сочиво које нема дебљину и закривљеност, за разлику од реалног сочива. Што је дебљина сочива већа, већа је и закривљеност, а самим тим и израженији ефекат радијалних изобличења. Најчешћи ефекти радијалних изобличења приказани су на Слици 5.3.



Слика 5.3: Ефекти радијалних изобличења

Ефекат негативних радијалних изобличења представља изобличење слике које је највише заступљено у центру слике, и које се смањује према ивицама, док је код позитивних радијалних изобличења ефекат супротан. Изобличења се повећавају са повећањем удаљености од оптичке осе и строго су симетрична у односу на њу.

Моделовање радијалних изобличења постиже се проценом коефицијената изобличења. За идеално центрирано сочиво камере радијална изобличења се дефини-

шу слѣдећим релацијама:

$$\Delta x_r = x_i \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + \dots) \quad (5.4)$$

$$\Delta y_r = y_i \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + \dots) \quad (5.5)$$

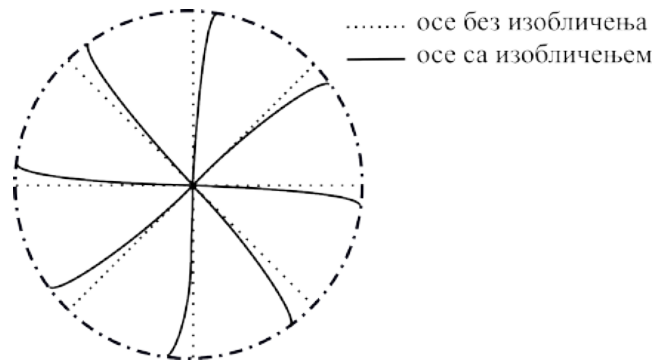
гдје је  $r$  растојање између центра изобличења и тачке у изобличеној слици, а  $k_1, k_2, \dots$  представљају коефицијенте радијалних изобличења. Може се уочити да се у релацијама појављују само парни степени параметра  $r$ , а обично се задржавају само први, или први и други члан у полиному.

Тангенцијална изобличења настају као последица неправилног постављања сочива и камере. За разлику од радијалних изобличења, тангенцијална изобличења узрокују изобличења која су нормална на оптичку осу камере. Ефекат тангенцијалних изобличења се, као и код радијалних, повећава са повећањем удаљености од оптичког центра. Модел тангенцијалних изобличења се дефинише слѣдећим релацијама [127, 134, 135]:

$$\Delta x_t = -y_i \cdot (l_1 \cdot r^2 + l_2 \cdot r^4 + \dots) \quad (5.6)$$

$$\Delta y_t = x_i \cdot (l_1 \cdot r^2 + l_2 \cdot r^4 + \dots) \quad (5.7)$$

гдје је  $r$  растојање између центра изобличења и тачке у изобличеној слици, а  $l_1, l_2, \dots$  представљају коефицијенте тангенцијалних изобличења. Ефекат тангенцијалних изобличења приказан је на Слици 5.4.



Слика 5.4: Ефекти тангенцијалних изобличења

Променљива  $r$  у једначинама радијалних и тангенцијалних изобличења се може заснивати или на стварним координатама слике или на координатама без ефекта изобличења. Узимајући у обзир ефекте радијалних и тангенцијалних изобличења, однос између координата са слике без изобличења и координата са ефектом изобличења може се описати слѣдећим релацијама:

$$x_d = x_i + \Delta x_r + \Delta x_t \quad (5.8)$$

$$y_d = y_i + \Delta y_r + \Delta y_t \quad (5.9)$$

гдје  $x_i$  и  $y_i$  представљају координате са слике без изобличења, док остали параметри представљају координате са изобличењем, описане у претходним једначинама.

## 5.2 Калибрација камере

Калибрација камере се сматра важним аспектом у примјенама рачунарског вида, нарочито у роботизи, а њен значај посебно је изражен због све веће потребе за прецизним мјерењима, која се постављају као основни предуслов за извршавање захтјевних манипулационих задатака. Као што је већ истакнуто, основни задатак калибрације камере је процјена матрице пројекције  $M$ . Процјена матрице пројекције је заснована на кореспонденцији скупова тачака из сцене на основу слика добијених камером. Под кореспонденцијом се подразумијева скуп  $\{(\mathbf{p}_i, \mathbf{P}_i)\}_{i=1}^m$ , гдје  $\mathbf{p}_i$  представља хомогени вектор тачака на слици, док  $\mathbf{P}_i$  представља хомогени вектор тачака у 3D простору, за  $i$ -ти корак, а  $m$  кардиналност скупа. Пројекција тачака  $\mathbf{P}_i$  из 3D простора у тачке  $\mathbf{p}_i$  на слици, дефинисана је линеарном трансформацијом која се може описати једначином:

$$\mathbf{p} = M \cdot \mathbf{P} \quad (5.10)$$

Матрица  $M$  није квадратна матрица, што значи да дефинисана трансформација није једнозначно одређена, односно све тачке 3D простора које се налазе на оптичком зраку ће бити трансформисане у исту тачку на слици. Да би се матрица  $M$  израчунала, потребно је ријешити систем хомогених линеарних једначина облика:

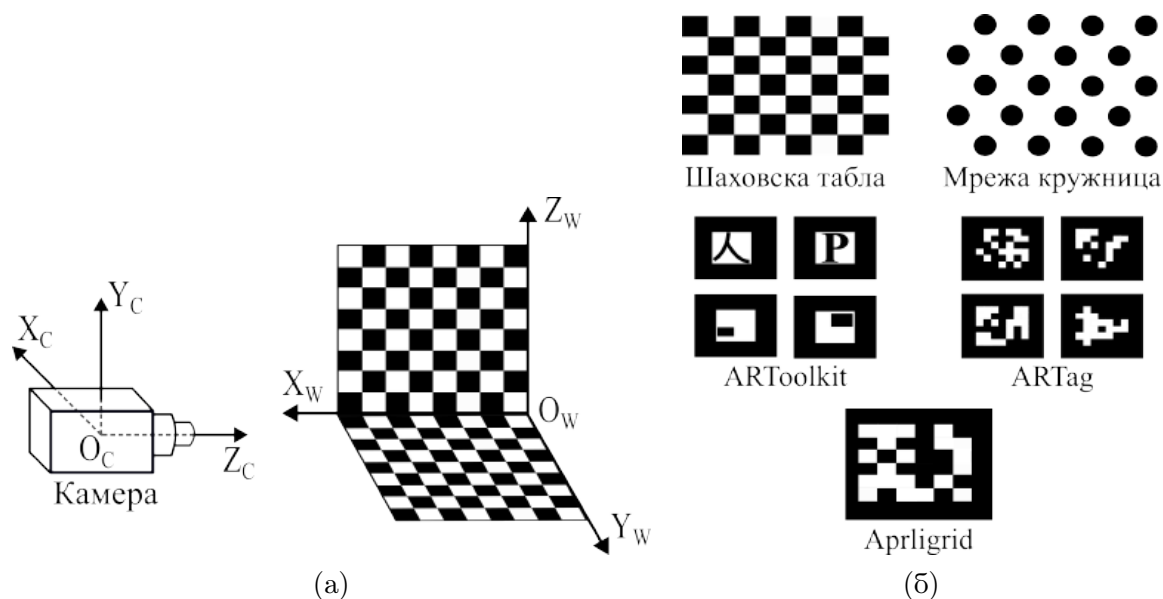
$$s_i \cdot \mathbf{p}_i = M \cdot \mathbf{P}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.11)$$

гдје  $s_i$  представља фактор скалирања.

Калибрација камере се реализује снимањем калибрационог објекта са јасно дефинисаним референтним тачкама, чија је геометрија у 3D простору позната са високом прецизношћу. Калибрациони објекти се обично састоје од двије или три међусобно ортогоналне равни, Слика 5.5а. Ови приступи захтијевају веома комплексну и скупу калибрациону опрему. Стога се у пракси често користе планарни калибрациони објекти, који су једноставнији за израду у поређењу са тродимензионалним калибрационим објектима, Слика 5.5б.

Постоји значајан број техника које су засноване на калибрацији камере коришћењем планарног калибрационог објекта, при чему је неопходно да се калибрациони објекат сними за више различитих позиција и оријентација објекта у односу на камеру. За дефинисање скупова тачака на бази чијих кореспонденција се процјењује матрица пројекције, неопходно је дизајнирати одговарајући калибрациони објекат. Најчешће коришћени калибрациони објекти засновани су на шаблонима црних и бијелих квадрата или црних тачака на бијелој планарној подлози [125].





Слика 5.5: Калибрациони објекти: а) Објекат са двије ортогоналне равни (омогућава скупове компланарних тачака), б) 2D (планарни) објекти

Тјемена квадрата се усвајају као калибрационе тачке. С обзиром да су тјемена у слици најчешће заобљена као последица оптичких изобличења, лошег квалитета камере, утицаја освјетљења, непланарности калибрационе табле и слично, препоручује се да се мјере координате неколико тачака дуж ивице квадрата, те да се екстраполирају ивице како би се добила прецизнија позиција координата тјемена разматрањем пресека сусједних ивица квадрата.

У циљу постизања високог квалитета калибрације камере, настоји се постићи тачност процјене координата калибрационих тачака са грешком мањом од једног пиксела (енгл. *Subpixel accuracy*). Овим приступом се постиже већа прецизност процјене карактеристичних обиљежја на слици него што је то уобичајено могуће, узимајући у обзир ограничења која уводи сам поступак дискретизације. Међутим, узимајући у обзир ниску резолуције камера, нарочито оних заснованих на тзв. CCD (енгл. *Charge-Coupled Device*) технологији, постизање прецизности са грешком мањом од једног пиксела намеће се као веома важан аспект, нарочито у случајевима када се CCD камере користе у задацима рачунарски интегрисане производње [136, 137].

Калибрација камере подразумијева процјену великог броја калибрационих параметара, што резултује комплексним нелинеарним претрагама. Ефикасан начин избјегавања великих нелинеарних претрага је коришћење двокорачног приступа, описаног у [134]. Овај приступ у првом кораку користи рјешење затвореног облика за већину калибрационих параметара, док се у другом кораку користи итеративно рјешење за преостале параметре.

Двокорачни приступ калибрацији камере са одређеним модификацијама представљен је и у раду [135]. У првом кораку калибрациони параметри се процјењују коришћењем рјешења затвореног облика заснованог на моделу камере без изобли-

чења. Овај поступак није итеративан, што доводи до закључка да је веома брз и у општем случају гарантује рјешење. Надаље, у овом кораку се користе калибрационе тачке које се налазе у близини оптичке осе. То значи да изобличења у слици не утичу значајно на рјешење у затвореној форми, те се може сматрати довољно поузданим и релевантним као почетна претпоставка за даљу оптимизацију. У другом кораку се параметри, процијењени у првом кораку, итеративно побољшавају коришћењем нелинеарне оптимизације, усвајајући модел камере са изобличењима. Уколико се апроксимативно рјешење, добијено у првом кораку, усвоји као почетна претпоставка, могуће је значајно смањити број итерација у другом кораку, те повећати вјероватноћу за постизање оптималног глобалног рјешења.

Иако су претходно наведени приступи најчешће заступљени у процедурама калибрације камере, њихов квалитет у великој мјери зависи од алгоритама који се користе за детекцију калибрационих тачака. Додатно, наведене методе су погодне само за калибрацију у офлајн режиму рада. Да би се елиминисао утицај детекције калибрационих тачака на квалитет калибрације, развијени су приступи који свој рад заснивају на коришћењу фидуцијалних маркера. Најзаступљенији фидуцијални маркери који се користе у процедурама калибрације камере као и у задацима локализације робота примјеном рачунарског вида, познати су под називима ARToolkit, ARTag и Aprilgrid, Слика 5.5б [6, 67, 138].

Калибрација камере коришћењем ARToolkit маркера предложена је у [139]. Приступ заснован на процјени унутрашњих параметара модела камере коришћењем епиполарне геометрије показао је задовољавајуће резултате. Детекција калибрационих тачака захтијевала је најмање три различите конфигурације камере за процјену унутрашњих параметара, да би се коришћењем добијених параметара поступак завршио процјеном вањских параметара камере. За разлику од ARToolkit маркера ARTag маркери су се показали погоднијим за калибрацију камере. Захваљујући бијелим квадратима који представљају саставни дио маркера, омогућена је стабилнија детекција и идентификација маркера у поређењу са резултатима добијеним коришћењем ARToolkit маркера. Калибрација камере коришћењем Aprilgrid маркера, који имају веома сличан узорак као ARTag, показала је велики потенцијал у раду заснованом на корелацији центара сегментираних квадрата и њихових координата у слици камере, коришћењем директне линеарне трансформације [140].

Иако су приступи калибрацији камере коришћењем калибрационих објеката показали велики потенцијал, и даље су ови поступци остали у домену офлајн калибрације. Стога се појавио приступ познат под називом самокалибрација, заснован на процјени параметара камере коришћењем карактеристичних обиљежја слике, умјесто калибрационих објеката [141, 142]. У овим приступима се на почетној слици одаберу обиљежја од интереса, која се прате у току помјерања камере у сцени. Затим се на основу разлика одабраних кључних обиљежја на различитим сликама процјењују параметри модела камере. Поред предности које доносе методе самокалибрације у односу на стандардне офлајн методе, основни недостатак је потреба да се унапријед дефинише кретање камере или робота да би се гарантовала квалитетна калибрација. Ови приступи нису стекли велику популарност и због чињенице да је потребан велики број покрета, као и специфична текстура радног

окружења којом би се гарантовало прецизно детектовање и праћење карактеристичних обиљежја.

Нови приступ самокалибрације показује велики потенцијал елиминисањем потребе за богатством текстуре радног окружења и детекцију карактеристичних обиљежја. Наиме, за разлику од стандардне самокалибрације, нови приступи процедуру самокалибрације заснивају на усвајању само једне тачке, најчешће на роботу, која представља референтну тачку за калибрацију [70]. Међутим, иако се проблем своди на дефинисање једне референтне тачке за калибрацију, поуздана детекција и праћење референтне тачке и даље представља изазов.

Предложени концепт нашао је примјену и у калибрацији система робот-визуелни сензор, с тим да се поред постојећих и развоја нових алгоритама за детекцију и праћење референтне тачке, разматра и избор визуелног сензора којим би се рјешавање овог проблема олакшало и створили предуслови за постизање како жељеног квалитета калибрације тако и поузданог функционисања робота чији рад је заснован на информацијама добијеним визуелним сензором.

## Глава 6

# Визуелни системи у задацима калибрације система робот-визуелни сензор

Системи реализовани интеграцијом робота и визуелног система претежно користе визуелне сензоре базиране на камерама, као основним сензорима за аквизицију података потребних за калибрацију. Постоје различите имплементације визуелних система. Најједноставнији визуелни сензор је монокуларна (једна) камера. Коришћење једне камере као визуелног сензора погодно је у случајевима када информација о дубини није од суштинског значаја за провођење поступка калибрације [29, 38–42]. Напреднији визуелни системи засновани су на коришћењу више од једне камере, а најпопуларнији тип ових система је бинокуларни визуелни систем, који се састоје од двије камере. Ови системи познати су под називом стерео камера, која се показала погодном за издвајање информација о дубини и реконструкцију сцене, доприносећи повећању тачности у процесу калибрације [43–45]. Поред монокуларних и стерео камера, које представљају пасивне сензоре, у пракси се све чешће користе активни визуелни сензори, који су показали потенцијал за значајно повећање тачности и прецизности калибрације. Најједноставнији активни сензор је RGBD камера, која представља визуелни сензор заснован на коришћењу камере у боји и сензора дубине. Интеграција ова два сензора у јединствен систем омогућава добијање информација о дубини и боји, пружајући робустне могућности перцепције у 3D простору [46, 47, 143]. Ефикасност и побољшање резултата калибрације додатно су постигнуте употребом сензора познатих под називом ToF. Ови сензори аквизицију података заснивају на принципу мјерења времена за које се сигнал, послат од сензора, рефлектује од објеката у сцени и враћа поново до сензора [48]. Поред наведених, системи базирани на технологији структуриране свјетлости привукли су посебну пажњу за примјену у калибрацији система робот-визуелни сензор [49–54].

Не постоји јасно дефинисан стандард за избор визуелног сензора са којим се интегрише робот или се реализује управљање роботом засновано на визуелним информацијама. Избор визуелног сензора зависи од специфичних захтјева задатка,

---

као што су жељена тачност, доступан хардвер, услови радног окружења, потребни рачунарски ресурси и слично. Сваки тип сензора има своје предности и ограничења, тако да се избор најчешће заснива на специфичним потребама конкретног задатка који је потребно реализовати. Постоји неколико стандардних технологија, а све су углавном засноване на генерисању 2D или 3D информација.

Технологије засноване на генерисању 2D информација углавном користе једну камеру и адекватан софтвер за анализу дигиталне слике, односно за анализу 2D позиције и оријентације објекта на слици, који је намијењен за руковање или обраду коришћењем робота [144, 145]. Сlike добијене камером представљају 2D пројекцију објеката из 3D простора. У поређењу са сензорима који су базирани на генерисању 3D информација, 2D базирани системи фокусирани су на контраст у сцени, имају релативно мању тачност, те су подложни утицају освјетљења и не пружају могућност генерисања 3D података на основу података добијених снимањем једне слике. Калибрација ових система је једноставна, али захтијева коришћење калибрационих објеката и алгоритама за детекцију референтних тачака. Цијена камера значајно је нижа од цијена 3D сензора, због чега су и даље заступљени у различитим примјенама у роботизици.

С друге стране, технологије засноване на генерисању 3D информација користе или више камера (стерео камера) или се реализују помоћу камере и додатног сензора, попут сензора дубине, ласера и пројектора. Тренутно постоје разне технике које се користе у области 3D површинског снимања, а најпопуларније су: ласерско скенирање, структурирана свјетлост, интерферометрија, стерео-визија, итд. Ови системи генеришу скупове 3D тачака, такозвани облак тачака, који представљају информације о 3D простору који се снима [146–148].

Облак тачака омогућава просторну реконструкцију 3D сцене, као и мјерење геометријских карактеристика на површини, независно од боје и контраста. То значајно олакшава руковање разноврсним и комплексним објектима у изазовном окружењу, те ствара потенцијал за унапређење перформанси робота намијењеног за реализацију задатка на бази визуелних информација. Предност коју пружа коришћење облака тачака је могућност манипулације објектима постављеним насумично у радном простору, а посебно објектима који се налазе на површини неправилног облика и висине, што представља велики изазов за 2D визуелне системе [33].

Техничке спецификације, као што су резолуција камере, тачност и брзина снимања, значајно утичу на квалитет 3D визуелних сензора. Стерео камере пружају значајно боље перформансе од монокуларних камера. Рад стерео камере заснован је на принципу триангулације података добијених из слика двије камере [149]. Системи се реализују коришћењем двије камере, те су самим тим подложне утицају освјетљења и захтијевају комплекснији рачунски поступак за генерисање 3D информација. Иако омогућују релативно широко видно поље, ограничене су за примјену у задацима који захтијевају високу резолуцију и тачност за објекте који немају велики број локалних обиљежја. С друге стране, RGBD сензори комбинују слике у боји и информације о дубини, те омогућавају прецизну 3D перцепцију и реконструкцију. Калибрација система захтијева калибрацију и камере и сензора дубине, што представља комплекснији задатак у поређењу са монокуларним и стерео

---

камерама. RGBD сензори су мање осјетљиви на промјену освјетљења те пружају робустнију перцепцију 3D информација, али нису погодни за снимање провидних и рефлектујућих површина.ToF сензори, за разлику од горе наведених, омогућавају перцепцију 3D информација у реалном времену [150, 151]. Калибрација је слична RGBD систему. Мање су осјетљиви на утицај промјене освјетљења и погодни су за снимање различитих површина, чак и на већим удаљеностима. Међутим, ови сензори имају лошију тачност, те је и примјена ограничена на задатке који не захтјевају високу тачност. Сензори базирани на структурираном свјетлу, у поређењу са претходно описаним сензорима, омогућавају најпрецизнију 3D реконструкцију и перцепцију 3D сцене. Принцип рада заснован је на поређењу изобличења структурираног свјетлосног обрасца пројектованог на 3D сцену са неизобличеним пројекционим обрасцем, те процјени и генерисању 3D геометријског облика скениране површине [152].

Од свих горе наведених, потенцијално водећа технологија је технологија заснована на структурираној свјетлости, првенствено због својих предности у погледу брзине, тачности и просторне резолуције [153]. Системи засновани на технологији структуриране свјетлости су врста активних стерео система, који се углавном састоје од једне камере и једног пројектора или ласера [154]. Постоје и друге реализације ових система засноване на употреби више камера заједно са једним пројектором [155] или употреби тзв. дубинских камера [156]. Главни циљ ових система је добијање мапе дубине скениране 3D сцене или објекта, односно добијање 3D облака тачака. То значи да се од мјерних система очекује да издвоје локацију и дубину за сваку тачку у сцени, у односу на неки унапријед дефинисани координатни систем.

Да би се добио прецизан 3D модел, развијене су различите технике структуриране светлости [156]. Иако веома различите, ови приступи имају сличан начин рада, у којем се, између осталог, истичу три кључна корака: освјетљење сцене коришћењем специјално дизајнираних образаца просторно промјенљивих интензитета, које емитује пројектор, затим аквизиција свјетлосних рефлексија освјетљене сцене коришћењем одговарајућег сензора за снимање, и на крају израчунавање 3D профила површине коришћењем различитих математичких алгоритама.

Главна разлика између ових техника произилази из типа, дизајна и броја узорака који се користе за освјетљење сцене. Ови параметри углавном су условљени практичним захтјевима, као што су тип сцене коју је потребно скенирати и очекивано вријеме скенирања. Ако је сцена статична и нема строго ограничено вријеме за аквизицију, приступи засновани на коришћењу више пројектованих образаца су погоднији јер пружају прецизније и поузданије 3D податке. Најпопуларније технике засноване на коришћењу више пројектованих образаца користе секвенцијалне бинарне кодове, сиве кодове или кодове боја [157], фазно помјерање [158] или хибридне методе које користе комбинацију техника заснованих на коришћењу више пројектованих образаца [159, 160]. За разлику од приступа заснованог на статичној сцени, ако се сцена динамички мијења или је вријеме аквизиције кључни фактор, препоручују се технике снимања једним снимком. Главна предност ових техника је брзина аквизиције, док су главни недостаци ограничена просторна резолуција и губитак детаља, јер прецизан модел не може бити потпуно издвојен због простор-

---

ног заглађивања [161]. Најпопуларније технике снимања једним снимком базиране су на континуирано промјенљивим структурираним свјетлосним обрасцима или коришћењу приступа индексирања линија и мрежа [162]. 3D скенери засновани на технологији структурираног свјетла често се користе у калибрацији система робот-визуелни сензор, нарочито системи засновани на пројекцији образаца у виду пруга (енгл. *Fringe projection*). Предности ових система огледају се у брзини мјерења, високој прецизности, поузданости система и могућности генерисања облака тачака високог квалитета и кардиналности [163, 164]. С обзиром да роботизовани системи углавном раде у затвореним окружењима и под контролисаним условима освјетљења, неприкладност употребе у спољашњем окружењу и под јаким свјетлом, као главни недостатак ових система, може се занемарити. Ови типови скенера раде на принципу пројекције бијелог и плавог свјетла, при чему се даје предност скенерима са плавим свјетлом због краћих таласних дужина плаве свјетлости, мање осјетљивости на топлоту, веће конзистентности извора свјетлости и дужег времена рада. У случајевима свјетлијег окружења и благо прозирних површина, плаво свјетло омогућава квалитетније мјерење. Скенери који комбинују плаво свјетло и систем мерења заснован на пројекцији образаца у виду пруга, постижу боље резултате јер је пројектоване пруге лакше детектовати кроз плаво свјетло које није пренесено нити рефлектовано са површине која се скенира [165, 166]. Узимајући у обзир карактеристике наведених визуелних система, те њихове предности и недостатке, за реализацију и калибрацију система робот-визуелни сензор, представљену у дисертацији, предложен је индустријски 3D скенер Comet L3D 5M, произвођача Steinbichler Optotechnik GmbH. Скенер је реализован са једном камером и једним пројектором који пројектује плаво свјетло. Узимајући у обзир претходно наведене предности скенера који користе плаво свјетло, затим хибридне методе засноване на пројекцији више образаца, те утицају резолуције камере, брзине скенирања и поузданости рада, предложени скенер испуњава све захтјеве за примјену у процедурама калибрације система робот-визуелни сензор. Принцип рада, калибрација скенера и анализа оцјене индекса перформанси калибрације скенера дати су у сљедећој глави.

## Глава 7

# Експериментална поставка, предложени метод калибрације и алгоритам за процјену геометријских обиљежја прирубнице

Циљ истраживања представљен у дисертацији заснован је на реализацији процедуре калибрације система робот-визуелни сензор, коришћењем TCP-а манипулатора као референтне тачке калибрације, која у конкретном случају представља координате центра горње равни прирубнице. Предложен је систем реализован у конфигурацији са фиксном камером, коришћењем манипулатора и 3D скенера чији рад је заснован на структурираном свјетлу. Такође, дат је кратак опис прирубнице манипулатора и калибрационог прстена, те спецификација њихових геометријских карактеристика. С обзиром на то да калибрација система подразумијева да су робот и визуелни сензор калибрисани, описане су процедуре калибрације робота и скенера. Процедура калибрације заснована је на поједностављеном математичком моделу изведеном на основу традиционалног приступа калибрацији система робот-визуелни сензор, који захтијева коришћење калибрационог објекта или маркера. Такође, поуздана детекција и процјена координата референтних тачака за калибрацију истакнута је као кључни аспект квалитетне калибрације. Након калибрација робота и 3D сензора представљено је извођење поједностављеног математичког модела за калибрацију система засновано на коришћењу прирубнице манипулатора као референтног објекта, те описан поступак предложеног алгоритма за детекцију и процјену координата центра прирубнице на основу облака тачака прирубнице добијеног коришћењем 3D скенера. На крају је дефинисана метрика грешке те описане процедуре верификације које ће бити коришћене за процјену квалитета проведених калибрација.



## 7.1 Експериментална поставка

Експериментална поставка је реализована коришћењем индустријског робота Mitsubishi RV-2SDB, произвођача Mitsubishi Electric Corporation, Tokio, Japan и индустријског оптичког 3D скенера заснованог на коришћењу структурираног свјетла, Comet L3D 5M, произвођача Steinbichler Optotechnik GmbH, Neubeuern, Germany, Слика 7.1. Имајући у виду димензије скенера и његову специфицирану радну удаљеност, као и потребу да се добије скуп 3D тачака прирубнице манипулатора, систем заснован на роботу и 3D скенеру је реализован у конфигурацији са фиксном камером. Скенер је постављен на трипод, и усмјерен према радном окружењу робота.



Слика 7.1: Фотографија експерименталне поставке у конфигурацији са фиксном камером

У наставку су дате основне информације и принципи рада робота и скенера, затим спецификације прирубнице и калибрационог прстена, те подаци о коришћеним софтверским и комуникационим модулима.

### 7.1.1 Робот Mitsubishi RV-2SDB

Индустријски робот приказан на Слици 7.2а, представља вертикално артикулисан робот са 6 степени слободe, чији зглобови омогућавају флексибилност покрета, што ове типове робота кандидује као веома погодне за примјену у широком спектру задатака као што су фарбање, паковање, заваривање, опслуживање машина, руковање материјалима, те за примјене у различитим областима као што су индустрија, медицина, итд. Робот чија је носивост 2 kg представља робот модерног дизајна са поновљивошћу позиционирања од  $\pm 0.02$  mm и максималним досегом од 504 mm. Напредно серво управљање робота и изузетно чврст дизајн обезбјеђују

већи опсег покрета и приступачност као и високу прецизност позиционирања при великим брзинама. Вишеструки интерфејси омогућавају повећање флексибилности и лакшу интеграцију са другим системима. Управљање роботом реализовано је коришћењем контролера CR1DA-771-S15, Слика 7.2б, и ручног управљачког уређаја R32ТВ, Слика 7.2в. Подаци о техничкој спецификацији робота, контролера и ручног управљачког уређаја, доступни су у документацији произвођача [167].

Управљање манипулатора робота реализовано је на бази кинематичког модела дефинисаног стандардном D-H нотацијом. Параметри геометрије манипулатора, те илустрација радног простора дати су у Додатку А.



Слика 7.2: Фотографија робота Mitsubishi RV-2SDB: а) Манипулатор, б) Контролер, в) Ручни управљачки уређај

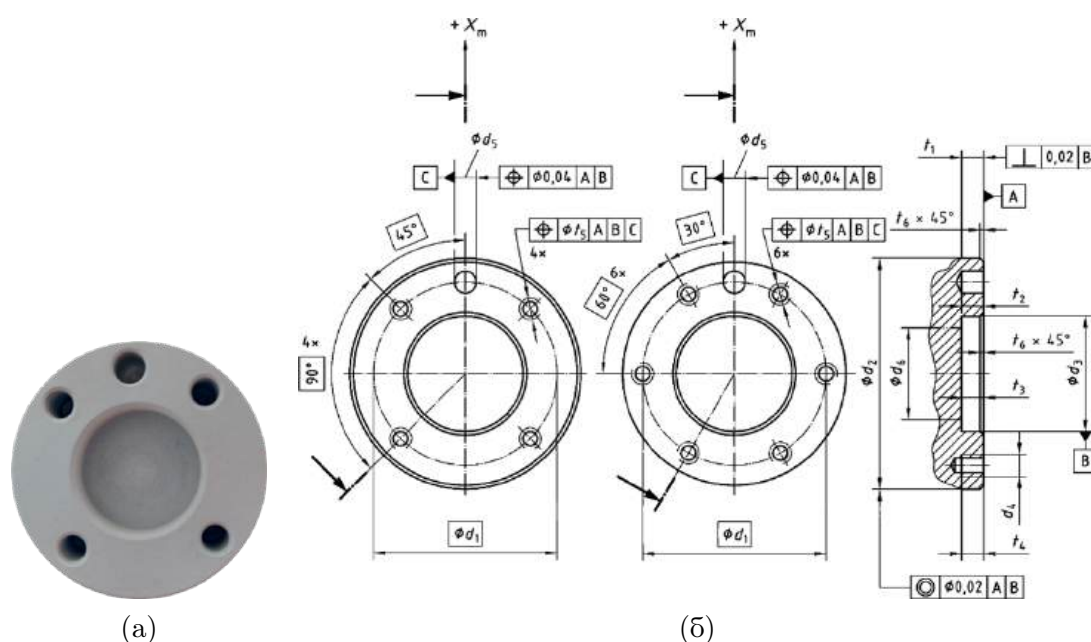
### 7.1.1.1 Прирубница манипулатора

Прирубница манипулатора (енгл. *Robot flange*), у литератури позната и под називима крајња прирубница или прирубница зглоба, представља механизам који се налази на последњем зглобу манипулатора, односно на његовом врху. Користи се за повезивање манипулатора и завршног уређаја или алата који се поставља на манипулатор. Прирубнице су најчешће кружног или правоугаоног облика. Величина и облик прирубнице углавном зависе од модела манипулатора, његове носивости и намене за коју је манипулатор конструисан.

Прирубница обезбјеђује потребан механички интерфејс, који се састоји од монтажних рупа и навоја како би се олакшало постављање различитих алата или завршних уређаја. Такође, прирубница осигурава да је алат исправно усклађен са кинематичком структуром манипулатора, што омогућава тачно и прецизно кретање алата током рада робота. Површина прирубнице, позната и под називом горња

раван прирубнице, је равна и паралелна у односу на манипулатор, те додатно повећава стабилност и сигурност постављања алата.

Како би се омогућило да прирубнице свих произвођача буду у складу са заједничким спецификацијама за димензије, механичке интерфејсе и остале значајне карактеристике, те обезбиједила компатибилност и једноставна употреба завршних механизма и алата на манипулаторима, извршена је стандардизација која прописује основну спецификацију прирубница манипулатора. Прирубница постављена на манипулатор Mitsubishi RV-2SDB и њена техничка спецификација у складу са ISO 9409-1:2004 стандардом [10], приказана је на Слици 7.3. Спецификација прирубнице, начин означавања и карактеристике сличних типова прирубница дати су у Додатку Б.



Слика 7.3: Прирубница манипулатора робота RV-2SDB: а) Фотографија прирубнице, б) Техничка спецификација прирубнице

За истраживање представљено у дисертацији, координате центра прирубнице представљају тачку од кључног значаја. Раније је истакнуто да је ова тачка у роботичкој познатој под називом ТСП и да у пракси најчешће описује референтну тачку алата постављеног на манипулатор. Међутим, када на манипулатор није постављен алат, ТСП представља центар прирубнице манипулатора, чије координате се могу добити на основу његовог кинематичког модела [11]. У циљу обезбеђења бољег квалитета 3D скупа тачака прирубнице коришћен је спреј за скенирање, чиме се избегавају губици информација настали због рефлексије од прирубнице у процесу скенирања, као што је приказано на Слици 7.3а.

### 7.1.1.2 Калибрација манипулатора

Када се разматра калибрација манипулатора, у пракси се најчешће реализује кинематичка калибрација која се заснива на процјени геометријских параметара

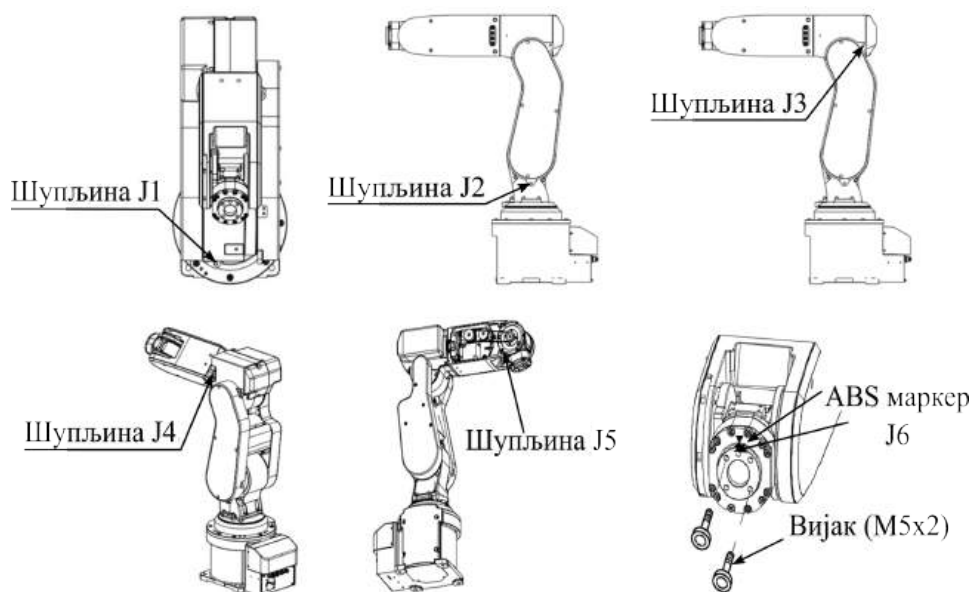
кинематичког модела манипулатора. Међутим, често је грешка позиционирања врха манипулатора узрокована грешком у нултој позицији, те се дефинисање нулте позиције манипулатора такође може сматрати једним видом калибрације. Нулта позиција представља позицију у којој су све вриједности унутрашњих координата једнаке нули. Поступком дефинисања нулте позиције се у суштини дефинише и исходиште референтног координатног система робота, а процедура је позната под називом ресетовање исходишта (енгл. *Reset origin*). Значај ресетовања исходишта произилази из чињенице да се сва кретања манипулатора реализују у односу на претходно дефинисану нулту позицију. Стога је поступак њеног дефинисања од кључног значаја за постизање жељених перформанси робота, нарочито у смислу прецизности и тачности позиционирања завршног уређаја манипулатора у радном простору. Треба имати у виду да кинематичка калибрација манипулатора и калибрација нулте позиције нису међусобно независне. Уколико се прецизно дефинише нулта позиција, али постоје одступања геометријских параметара или утицај системских грешака, робот и даље неће бити у могућности да обезбједи оптималне перформансе. С друге стране, уколико не постоје системске грешке робота, као ни деформација геометрије манипулатора, нетачна нулта позиција условиће непоуздан рад робота.

Смањење утицаја грешке нулте позиције на тачност и поузданост рада робота, у пракси се реализује на неколико начина. Први од њих је редовно одржавање и провјера исправности робота. Једнако важан приступ представља прецизна калибрација сензора за одређивање нулте позиције робота, у конкретном случају апсолутних енкодера. Овај приступ представља и један од најзначајнијих, узимајући у обзир да процедуру калибрације дефинише произвођач, уз спецификацију неопходних алата и мјерних инструмената. Поред ових, постоје и други приступи које сами оператери реализују у циљу смањења комплексности и времена потребног за провођење поступка калибрације. Ти приступи су базирани на дефинисању помоћних референтних тачака у радном простору робота, затим коришћењу додатних сензора (оптичких или сензора који захтијевају механички контакт), те имплементацији алгоритама за компензацију грешке нулте позиције.

За робот предложен у дисертацији није разматрана могућност одступања кинематичких параметара, нити утицај евентуалних системских грешака на тачност позиционирања врха манипулатора. Стога је робот калибрисан позиционирањем у нулту позицију и ресетовањем вриједности енкодера. Важно је истаћи да сам дизајн манипулатора укључује и одговарајуће интерфејсе неопходне за провођење описаног поступка калибрације. То су најчешће механички интерфејси у виду референтних маркера или одговарајућих механичких отвора на конструкцији манипулатора, у које се постављају специјално дизајнирани алати за поравнање. Поред интерфејса, калибрацију је могуће реализовати постављањем додатних сензора као што су крајњи прекидачи, сензори силе и слично.

Процедура калибрације је реализована коришћењем методологије описане у [168]. Дефинисане су три методе засноване на ресетовању апсолутних енкодера. Прва се односи на коришћење крајњих прекидача, названа механички стоп (енгл. *Mechanical stop*), која се реализује помјерањем зглобова до крајњих положаја у

којим се активира одговарајући гранични прекидач. Сличан приступ је и у другој методи, у којој се користе маркери или Вернијерове скале. Ово су помоћни маркери у виду стрелица или мјерних скала при чему се сматра да је сензор у нултој позицији када су маркери или нека њихова карактеристична обиљежја идеално поклопљени. На манипулатор робота који је предложен у дисертацији постављени су маркери у виду стрелица, а у документацији су названи ABS маркери. Претходна два метода сматрају се једноставним за реализацију али не и прецизним, узимајући у обзир да процјена поравнања маркера и позиционирање зглоба у крајњи положај представља субјективни став оператера. Трећи метод, који се сматра најпрецизнијим али и најзахтјевнијим, познат је под називом JIG метод. Назив JIG се у литератури често користи и за представљање специјалног алата за калибрацију, којим се сусједни зглобови манипулатора фиксирају и на тај начин гарантују најпрецизнији поступак ресетовања енкодера, те у коначници прецизну и поуздану калибрацију. У циљу постизања прецизне калибрације, овај метод је одабран за калибрацију предложеног робота. Процедура се заснива на поравнању специјално дизајнираних цилиндричних отвора на конструкцији манипулатора робота и постављању алата за фиксирање сусједних зглобова. Конфигурације у којим се реализује процедура калибрације приказане су на Слици 7.4.

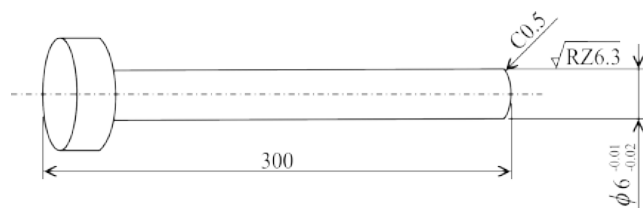


Слика 7.4: Конфигурације за калибрацију нулте позиције робота

На Слици 7.4 је могуће уочити отворе за постављање алата, те постављен алат у процесу калибрације за првих 5 зглобова. Посљедњи зглоб не захтијева постављање калибрационог алата с обзиром да је опсег његовог кретања  $\pm 360^\circ$ . Стога се ресетовање апсолутног енкодера за посљедњи зглоб реализује поравнавањем ABS маркера. У складу са процедуром дефинисаном у [168], робот је калибрисан ресетовањем нулте позиције. Очекивани квалитет калибрације потврђен је тестирањем поновљивости позиционирања врха манипулатора, коришћењем 3D скенера. Резултати проведених тестова су представљени у наредној глави.

## 7.1. Експериментална поставка

Спецификација алата за калибрацију нулте позиције робота Mitsubishi RV-2SDB приказана је на Слици 7.5 [168].



Слика 7.5: Спецификација алата за калибрацију нулте позиције робота

### 7.1.2 3D скенер Comet L3D 5M

Индустријски оптички скенер Comet L3D 5M, приказан је на Слици 7.6.



Слика 7.6: Фотографија 3D скенера Comet L3D 5M

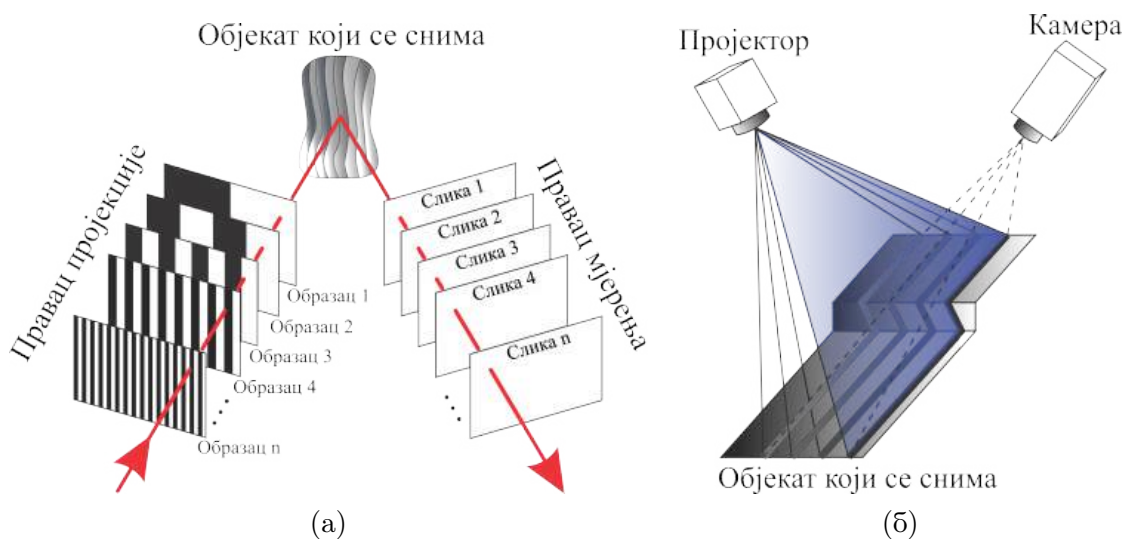
Скенер је реализован са једном CCD камером и пројектором, смјештеним у компактно кућиште. Принцип мјерења без контакта, заснован на технологији плавог LED (енгл. *Light-Emitting Diode*) структурираног свјетла, омогућава му да прикупи до 5 милиона тачака у интервалу од једне до двије секунде. Импулсна техника скенирања обезбјеђује веома високу снагу излазног свјетлосног снопа који побољшава однос сигнал-шум [169]. Такође, гарантује изузетно квалитетне податке о мјерењу и омогућава тренутно снимање површине, чак у неким случајевима и без потребе за претходном припремом, која обично подразумијева употребу спреја за скенирање ради елиминације сјајних дијелова површине и ефеката рефлексије. Додатна предност овог система је могућност коришћења различитих сочива за камеру и пројектор, која се једноставно мијењају, што резултује промјеном како величине видног поља тако и 3D радног простора који систем може да скенира, односно просторне

запремине у којој је могуће реализовати мјерење. Све ове предности омогућиле су коришћење скенера у различитим индустријским примјенама које захтијевају високу прецизност мјерења података, као што су контрола квалитета, производња калупа, реверзибилни инжењеринг, археологија, дигитализација умјетности, итд.

Уобичајени недостаци који су типични за системе чији рад је заснован на технологији структурираног свјетла су утицај амбијенталних параметара (температура, влажност и амбијентално освјетљење) на параметре система и квалитет мјерења. Поред наведених, један од главних недостатака овог система је ограничено видно поље (енгл. *Field of View* - *FOV*), што овај систем чини непогодним за велике радне просторе. Величина видног поља углавном зависи од резолуције камере и сочива која се користе. За овај систем доступне су различите конфигурације FOV-а, а волумен мјерења за сваки FOV прецизно је дефинисан спецификацијом коју дефинише произвођач. За примјену у процесу калибрације, скенер се користи у конфигурацији FOV 250, која подразумева запремину простора за мјерење димензија  $260 \times 215 \times 140 \text{ mm}$ , и радну удаљеност од  $760 \text{ mm}$ . Радна удаљеност (одстојање) се једноставно подешава на основу пресека помоћних ласерских зрака, који уједно омогућавају и иницијално дефинисање референтног координатног система скенера. Техничке карактеристике скенера, које се односе на избор FOV-а, резолуцију камере, брзину мјерења и друге карактеристичне особине дате су у Додатку В.

#### 7.1.2.1 Принцип рада 3D скенера Comet L3D 5M

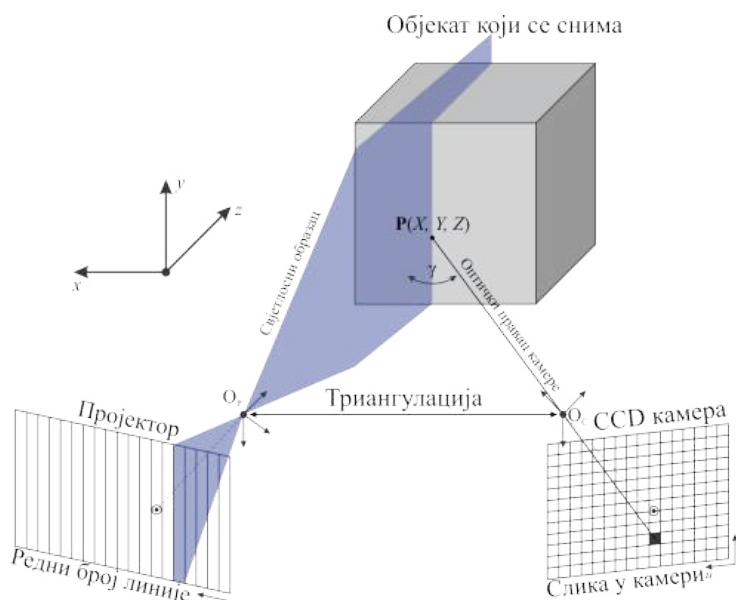
Принцип рада предложеног 3D скенера заснован је на технологији структурираног свјетла, а као мјерне податке сензор генерише облак тачака чији елементи представљају координате тачака у 3D простору. За потребе добијања облака тачака (мапе дубине), сцена се активно освјетли пројектором који емитује одређени број специјално дизајнираних просторно промјенљивих 2D образаца, познатих и као слике пројектора, као што је приказано на Слици 7.7.



Слика 7.7: Принцип рада 3D скенера: а) Процедура скенирања, б) Деформација пројектованог образаца

Обрасци се емитују на површину која се скенира пројектовањем ламинарних секвенци образаца хибридном методом која користи шеме образаца сивих кодова у комбинацији са техником фазног помјераја.

Сљедећи корак у процесу скенирања је аквизиција свјетлосних рефлексија пројектованих образаца са скенираног објекта. У ту сврху користи се веома осјетљива камера високе брзине и резолуције. За сваки пројектовани образац снима се једна слика, позната као слика камере. Ако је скенирана површина глатка и равна, слика камере ће бити врло слична пројектованој слици. У супротном, слика камере ће бити изобличена верзија пројектованог обрасца, узрокована варијацијама дубине на скенираној површини, као што је приказано на Слици 7.7б. На основу свих слика камере и пројектора, те шеме кодовања структуриране светлости скенера, могуће је одредити дио пројекције који одговара сваком пикселу на слици камере. На основу добијених кореспондентних тачака и примјеном принципа триангулације, израчунава се дубина за сваки пиксел, и генерише тродимензионални скуп тачака, тј. облак тачака. Описани поступак, за појединачни пиксел слике, илустрован је на Слици 7.8.



Слика 7.8: Принцип израчунавања дубине заснован на триангулацији

Координате тачке  $\mathbf{P}(X, Y, Z)$  могу се израчунати рјешавањем сљедећег система једначина:

$$X = u \cdot \frac{Z}{f} \quad (7.1)$$

$$Y = v \cdot \frac{Z}{f} \quad (7.2)$$

$$A \cdot X + B \cdot Y + C \cdot Z + D = 0 \implies Z = \frac{-D \cdot f}{A \cdot u + B \cdot v + C \cdot f} \quad (7.3)$$



Параметри  $u$  и  $v$  представљају координате пиксела у слици камере,  $f$  је жижна даљина, док параметри  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  представљају коефицијенте равни одговарајуће траке, емитоване пројектором и представљене плавом бојом на Слици 7.8.

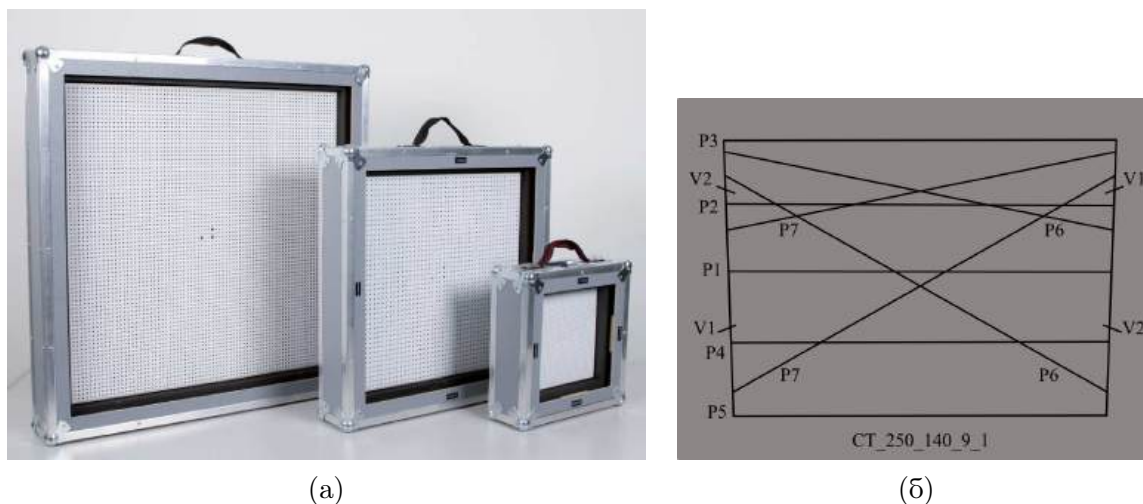
Једначине (7.1) и (7.2) представљају једначине линија (свјетлосних зрака) кроз оптички центар камере и пиксел на слици, док (7.3) представља једначину равни одговарајуће свјетлосне траке пројектора која освјетљава тачку  $P$ . Понављањем описаног поступка за сваки пиксел на слици, генерише се мапа дубине дијела сцене који је у видном пољу камере. Анализом система једначина (7.1) - (7.3), може се утврдити да су координате  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  зависне од параметара система који се добијају током процеса калибрације, што доводи до закључка да је калибрација система једна од најосјетљивијих и најзначајнијих фаза од којих зависи поузданост и прецизност мјерења.

### 7.1.2.2 Калибрација 3D скенера

Калибрација скенера подразумева калибрацију комплетног визуелног система, тачније процјену унутрашњих и спољашњих геометријских параметара камере и пројектора, те процјену међусобног односа камере и пројектора. На основу процјене параметара дефинише се математички модел система у циљу компензације грешака у мјерењу, насталих као посљедица неидеалности камере и пројектора, те утицаја услова радног окружења на параметре система. Најчешћи видови неидеалности изражени су у виду геометријских и перспективних дисторзија или оптичке аберације. Процес калибрације потребно је пажљиво и редовно проводити прије сваког поступка мјерења, а нарочито у случајевима када се промијени конфигурација система, замјеном сочива за камеру и пројектор, или у случају промјене амбијенталних услова у току рада система.

Калибрација скенера представља процедуру која се састоји из неколико корака. Први корак подразумева процедуру припреме скенера и калибрационог објекта те снимање калибрационог објекта, док се у другом кораку проводи поступак верификације и процјене квалитета добијених резултата калибрације.

За калибрацију предложеног скенера дизајнирано је више калибрационих објеката различитих величина, Слика 7.9а. Избор одговарајућег калибрационог објекта зависи од избора сочива за камеру и пројектор, односно од избора конфигурације. У претходном поглављу наглашено је да је одабрана FOV 250 конфигурација скенера, а калибрациони објекат предвиђен за калибрацију скенера у одабраној конфигурацији представља највећи калибрациони објекат приказан на Слици 7.9а. Калибрациони објекат, приказан на Слици 7.9а, реализован је као идеално планарна табла са мрежом еквиливантно распоређених маркера кружног облика. Број маркера и растојања између центара два сусједна маркера прецизно су дефинисани од стране произвођача и користе се у виду конфигурационе датотеке за потребе калибрације. Три већа кружна маркера представљају референтне маркере који се користе за дефинисање оријентације калибрационе табле.



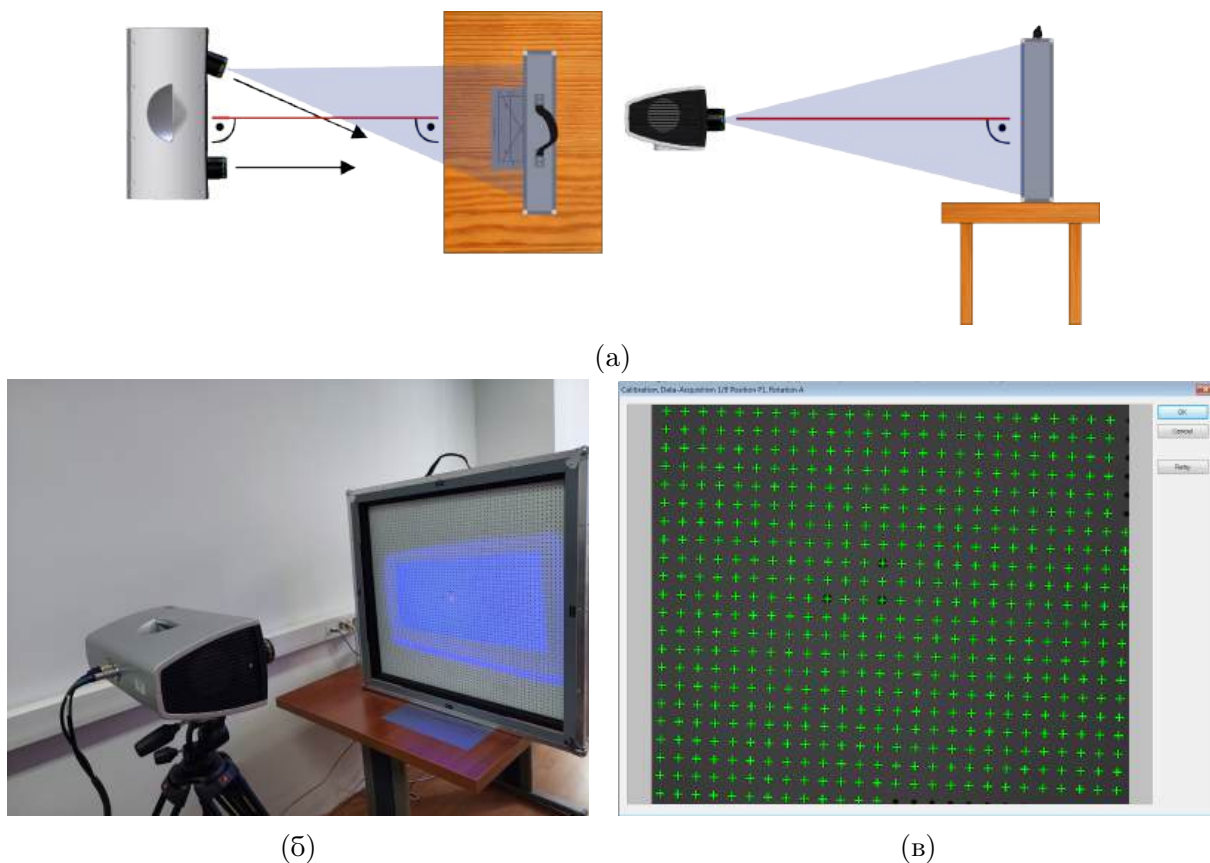
Слика 7.9: Опрема за калибрацију скенера: а) Калибрационе табла, б) Образац позиционирања

Осим калибрационог објекта, неизоставни дио опреме за калибрацију представља и образац позиционирања, Слика 7.9б. Образац представља таблу са означеним правим линијама, и користи се за позиционирање калибрационог објекта у процесу калибрације. Ознаке линија представљају редни број позиције на коју је потребно поставити калибрациони објекат у току калибрације. Ознаке Р представљају позиције које се користе у току калибрације, док V представљају позиције које се користе у процесу верификације. Процес калибрације захтијева да се калибрациона табла оријентише на одговарајући начин и позиционира на позицију означену на обрасцу позиционирања, у складу са препорукама изабране калибрационе методе.

Поступак калибрације је прецизно дефинисан а процедура се реализује коришћењем софтверског алата COMETplus [170], посебно дизајнираног за рад са скенером. COMETplus омогућава избор једног од два калибрациона метода. Основна разлика између ова два метода је у броју позиција калибрационе табле које се користе у калибрационом процесу. Прва метода се сматра прецизнијом и захтијева 9 позиција за калибрацију, док друга метода захтијева свега 5 позиција. Прије почетка калибрације неопходно је припремити скенер и радно окружење за калибрацију. То подразумева постизање радне температуре скенера, подешавање параметара система којим се постиже хомогено освјетљење калибрационог објекта и одговарајући контраст на његовим рубовима, у свим позицијама које се користе за калибрацију.

Процес калибрације започиње позиционирањем калибрационе табле на положај са ознаком P1, који се налази на средини обрасца за позиционирање. За ову позицију потребно је позиционирати скенер на начин да се ласерски зраци сијеку у тачки која представља центар калибрационе табле, те да је оптичка оса сочива камере нормална у односу на калибрациону таблу. Позиционирање скенера и калибрационе табле приказано је на Слици 7.10.

## 7.1. Експериментална поставка



Слика 7.10: Позиционирање скенера и калибрационе табле: (а) Препоруке у складу с документацијом, (б) Фотографија система у току калибрације, (в) Примјер снимљених маркера у току калибрације 3D скенера

Референтне тачке, које представљају веће маркере на табли, треба да се налазе у центру слике добијене камером, за сваку позицију у току калибрације. У ту сврху, прије сваког снимања, калибрациона табла се помјера дуж линија обрасца позиционирања са циљем позиционирања референтних маркера на жељену позицију. Овај поступак омогућава снимање максималног броја маркера калибрационе табле у видном пољу камере, као што је приказано на Сlici 7.10в. Поступак процјене квалитета снимљене слике је аутоматизован и покреће се након сваког снимања калибрационе табле. Квалитет снимљене слике процјењује се на основу броја детектованих тачака на калибрационој табли. За успјешну калибрацију, неопходно је да све добијене слике задовоље захтјеве дефинисане у софтверском модулу. Ако софтверски модул из било ког разлога не прихвати тренутну слику, поступак за ту позицију се мора поновити. Најчешћи узроци за понављање поступка су: погрешно позиционирање и оријентација калибрационе табле, те недовољан број детектованих кружних маркера на слици. Након снимања на позицији P1, калибрациона табла се помјера у сљедећи положај и ротира за  $90^\circ$ . Овај поступак се понавља за све позиције калибрационе табле дефинисане обрасцем позиционирања за одабрану методу.

Процјена параметара заснована је на поступку минимизације одступања мјере-

них података (детектованих центара кружних маркера на сликама) од очекиваних резултата (одређених на основу техничке спецификације коришћене калибрационе табле), као што је описано у [153, 171]. Као оцјену перформанси параметара калибрације, израчунавају се три параметра позната под називима резидуал пиксела камере (енгл. *Camera pixel residual*), резидуал фазе (енгл. *Phase residual*) и средња грешка тачке објекта (енгл. *Mean object point error*). Израчунати параметри представљају статистичке показатеље квалитета калибрације чије су максималне вриједности унапријед дефинисане. Вриједности израчунатих параметара веће од унапријед дефинисаних граница указују да калибрациони процес није адекватно проведен, и да мјерења калибрисаним системом могу бити нетачна. У противном, уколико су сви параметри у границама дефинисаних толеранција оператер доноси одлуку о прихватању процијењених параметра калибрације који се затим уписују у конфигурациону датотеку.

По завршетку калибрације проводи се поступак верификације тачности и прецизности мјерења калибрисаног скенера. Овај поступак се реализује снимањем двије додатне слике калибрационе табле, постављене на позиције означене на обрасту са V1 и V2, и разликује се од поступка који се користи за процјену параметара калибрације. Током калибрације процјена параметара заснована је на минимизацији грешке између мјерених и идеалних тачака калибрационе табле, док се током верификације процјењује тачност система на основу одступања мјерења добијених коришћењем процијењених параметара система и оптималних координата тачака калибрационе табле дефинисаних у конфигурационој датотеци.

### 7.1.3 Калибрациони прстен Mitutoyo NO. 177-290 (2011160)

Прстен за подешавање или калибрациони прстен (енгл. *Setting ring*) представља еталон који се користи у индустријској метрологији за потребе калибрације и тестирања мјерних инструмената на основу мјерења његовог унутрашњег пречника. С обзиром на спецификацију и прецизност израде, те геометријске сличности са прирубницом манипулатора, калибрациони прстен, приказан на Слици 7.11 је у дисертацији коришћен као поуздан еталон за тестирање перформанси предложеног алгорита за процјену координата TCP-а прирубнице манипулатора. Техничка спецификација калибрационог прстена дата је у Додатку Г.



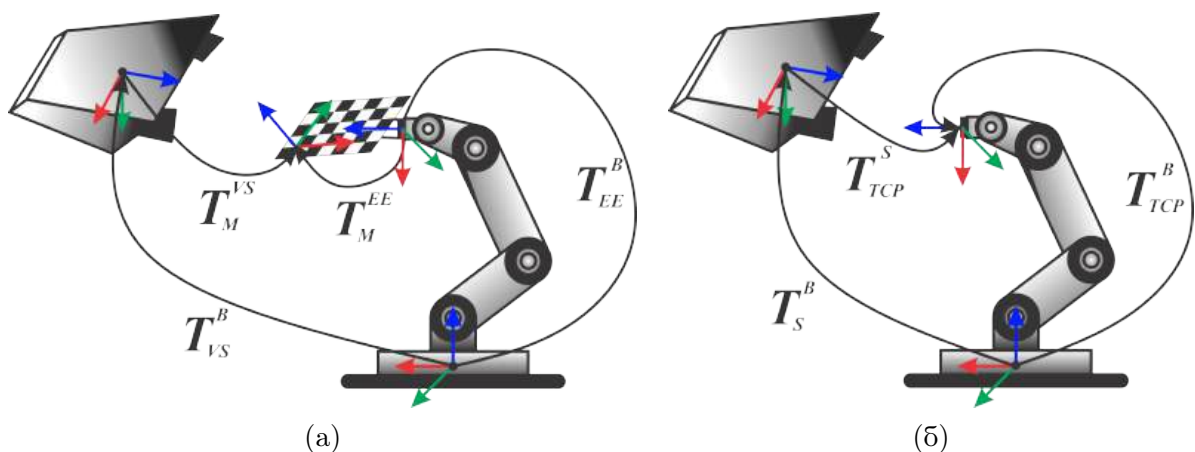
Слика 7.11: Калибрациони прстен Mitutoyo NO. 177-290 (2011160)

### 7.1.4 Софтверска подршка и комуникациони протоколи

Као софтверска подршка за рад са поменутиим скенером коришћен је софтверски алат познат под називом COMETplus 9.63 [170]. Осим калибрације, овај софтвер омогућава низ функционалности као што су скенирање објеката, генерисање њихових 3D модела, издвајање података, избор жељених тачака ручним означавањем, аутоматско проналажење карактеристичних тачака у моделу, те подршку додатним алатима за рад са генерисаним облаком тачака. Међутим, софтвер COMETplus није могуће користити за аутоматску идентификацију специфичних својстава прирубнице манипулатора, те је коришћен искључиво за скенирање и филтрирање облака тачака прирубнице. Идентификација и процјена геометријских обиљежја прирубнице заснована на обради генерисаног облака тачака, те калибрација предложеног система и статистичка анализа добијених резултата, реализовани су коришћењем Matlab програмског окружења [172]. У поменутом програмском окружењу је развијен и комуникациони модул за аутоматско управљање роботом у току процеса калибрације. Комуникација је заснована на стандардном TCP/IP протоколу, којим се омогућава директно учитавање програма на основу којег се реализује промјена конфигурација манипулатора робота у току процеса калибрације.

## 7.2 Математички модел калибрације система

Дефинисање математичког модела заснива се на симплификацији класичног метода који користи калибрациони објекат, те прилагођавање поступка за коришћење прирубнице манипулатора као референтног објекта за калибрацију. Центар прирубнице усвојен је као референтна тачка за калибрацију. Илустрација система заснованог на коришћењу традиционалног калибрационог објекта у сврху калибрације приказан је на Слици 7.12а, док је илустрација система заснованог на коришћењу прирубнице као калибрационог објекта приказана на Слици 7.12б.



Слика 7.12: Илустрација система робот-визуелни сензор: (а) Систем погодан за методе које користе традиционалне калибрационе објекте, (б) Систем пројектован за калибрацију коришћењем прирубнице као калибрационог објекта

Потребне трансформације су дефинисане за оба система, при чему су коришћене различите ознаке у циљу истицања основних разлика. Ознака  $B$  означава базу манипулатора,  $EE$  завршни уређај,  $TCP$  тачку центра алата манипулатора, затим  $M$  означава маркер који се користи за калибрацију, док  $VS$  и  $S$  представљају визуелни сензор. Може се уочити да су трансформације између референтних координатних система базе робота и визуелног сензора исте за оба система, те се може сматрати да је  $\mathbf{T}_{VS}^B = \mathbf{T}_S^B$ , односно може се сматрати да  $VS$  и  $S$  представљају ознаку исте тачке, тј. исходишта референтног координатног система визуелног сензора. Аналогно, трансформације између референтних координатних система базе робота и завршног уређаја ( $TCP$ -а) су такође једнаке, тј.  $\mathbf{T}_{EE}^B = \mathbf{T}_{TCP}^B$ , што доводи до закључка да  $EE$  и  $TCP$  такође представљају ознаку исте тачке, у овом случају исходишта референтног координатног система везаног за посљедњи зглоб манипулатора. Узимајући у обзир наведене аналогije може се закључити да вриједи и сљедеће једнакости:  $\mathbf{T}_M^{EE} = \mathbf{T}_M^{TCP}$ ,  $\mathbf{T}_M^{VS} = \mathbf{T}_M^S$ . Усвојена нотација има за циљ да истакне основне разлике предложеног система заснованог на коришћењу прирубнице као калибрационог објекта и 3D скенера као визуелног сензора, приказаног на Слици 7.12б, док систем приказан на Слици 7.12а представља илустрацију система у општем случају за коју се може користити произвољан визуелни сензор и било који тип стандардног калибрационог објекта и/или маркера. Све трансформације представљају хомогене трансформације дефинисане матрицама димензија  $4 \times 4$ , као:

$$\mathbf{T}_n^m = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & s \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

гдје  $\mathbf{R}$  представља матрицу ротације димензија  $3 \times 3$ ,  $\mathbf{t}$  представља вектор translације димензија  $3 \times 1$ , скалар  $s$  представља фактор скалирања, док ознаке  $n$  и  $m$  означавају да се ради о положају координатног система  $n$  у односу на координатни систем  $m$ .

Ако се посматра поставка система са Слике 7.12а, те усвоје претходно описане аналогije трансформација, у општем случају када се за калибрацију система користи калибрациони маркер постављен у близини врха манипулатора, однос трансформација може се представити релацијом:

$$\mathbf{T}_{TCP}^B \cdot \mathbf{T}_M^{TCP} = \mathbf{T}_S^B \cdot \mathbf{T}_M^S \quad (7.5)$$

Ако се узме у обзир чињеница да је систем реализован у конфигурацији са фиксном камером, може се уочити да се у овој конфигурацији однос између базе манипулатора и скенера не мијења у току поступка калибрације, што важи и за однос између врха манипулатора и маркера за калибрацију. Стога се може закључити да се трансформације  $\mathbf{T}_S^B$  и  $\mathbf{T}_M^{TCP}$  не мијењају у току поступка калибрације и представљају непознате трансформације које је потребно процијенити. Остале трансформације из релације (7.5) су познате, односно трансформација  $\mathbf{T}_{TCP}^B$  се дефинише на основу кинематичког модела манипулатора, док се трансформација  $\mathbf{T}_M^S$  процјењује калибрацијом скенера.

У складу с једначином (7.5) непозната трансформација  $\mathbf{T}_S^B$  се процјењује раз-

матрањем симултаног скупа од двије једначине које се дефинишу на основу двије различите позе калибрационог маркера у видном пољу скенера. За разлику од претходно дефинисаног модела калибрације, поједностављени модел калибрације представљен у овом истраживању заснован је на процедури процјене трансформације  $\mathbf{T}_S^B$  за систем приказан на Слици 7.12б, на основу директне процјене координата центра прирубнице манипулатора, без коришћења додатних маркера за калибрацију. Стога се поједностављење поступка калибрације, са традиционалног приступа коришћењем калибрационих објеката или маркера на поступак заснован на коришћењу прирубнице манипулатора, у суштини ослања на употребу прирубнице као референтног објекта, односно центра прирубнице ( $TCP$ ) као референтне тачке за калибрацију. Аналогично ова два поступка може се закључити да центар прирубнице у суштини представља тзв. „виртуелни маркер“ за калибрацију, док у исто вријеме представља и референтну тачку завршног механизма робота. Такође, може се уочити да је скуп референтних тачака за калибрацију коришћењем калибрационог објекта сведен на коришћење само једне референтне тачке. Сходно наведеној аналогичној, те имајући у виду да предложени поступак калибрације подразумијева коришћење робота без постављеног алата на прирубници, може се закључити да се координатни системи завршног уређаја ( $EE$ ), маркера ( $M$ ), и  $TCP$  за робот без постављеног алата, приказаног на Слици 7.12б, могу сматрати идеално поклопљеним са заједничким исходиштем у координатном систему  $TCP$ . Стога се матрица трансформације  $\mathbf{T}_M^{TCP}$ , дефинисана за систем приказан на Слици 7.12а, може дефинисати јединичном матрицом  $\mathbf{T}_M^{TCP} = \mathbf{I}$  за систем приказан на Слици 7.12б. Коначно, једначина (7.5) за поједностављени модел калибрације заснован на коришћењу прирубнице, који описује међусобни однос између  $TCP$ -а манипулатора и кореспондентних података добијених 3D скенером може се записати као:

$$\mathbf{T}_S^B = \mathbf{T}_{TCP}^B \cdot (\mathbf{T}_{TCP}^S)^{-1} \quad (7.6)$$

У једначини (7.6), непозната трансформација  $\mathbf{T}_S^B$  дефинише међусобни однос између робота и скенера, и представља трансформацију која се процјењује током процедуре калибрације, односно представља резултантну хомогену матрицу којом се дефинише позиција и оријентација 3D скенера у односу на референтни координатни систем робота. Предложени процес калибрације заснован је на кореспонденцији скупова 3D тачака директном процјеном позиције  $TCP$ -а, без коришћења његове оријентације. Стога, да би се ријешила једначина (7.6), потребно је обезбиједити два независна скупа података и то  $\{\mathbf{P}_{ri} = [x_i, y_i, z_i, 1]^T \in R^4 \mid i = 1, 2, \dots, m\}$  за робот и  $\{\mathbf{P}_{si} = [x_i, y_i, z_i, 1]^T \in R^4 \mid i = 1, 2, \dots, m\}$  за скенер, који представљају хомогене координате вектора трансформације који фигуришу у трансформацијама  $\mathbf{T}_{TCP}^B$  и  $\mathbf{T}_{TCP}^S$ . Поступак прикупљања неопходних података проводи се на сљедећи начин: покрети манипулатора робота задају се управљачким командама у циљу позиционирања прирубнице манипулатора у различитим дијеловима заједничког радног простора робота и скенера. Конкретно, положаји прирубнице у радном простору робота унапријед су дефинисани и подаци о координатама  $TCP$ -а  $\{\mathbf{P}_{ri}\}$  очитани из контролера робота. Истовремено, скуп 3D тачака прирубнице се снима помоћу 3D скенера и координате 3D скупа тачака  $\{\mathbf{P}_{si}\}$  процјењују коришћењем предложеног

алгоритма. Ови скупови података корелисани су сљедећом једначином [173]

$$\mathbf{P}_{ri} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_{si} + \mathbf{t} + \mathbf{n}_i \quad (7.7)$$

гдје  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{t}$  редом представљају матрицу ротације и вектор транслације резултантне хомогене матрице трансформације  $\mathbf{T}_S^B$ , док вектор  $\mathbf{n}_i$  представља шум мјерења.

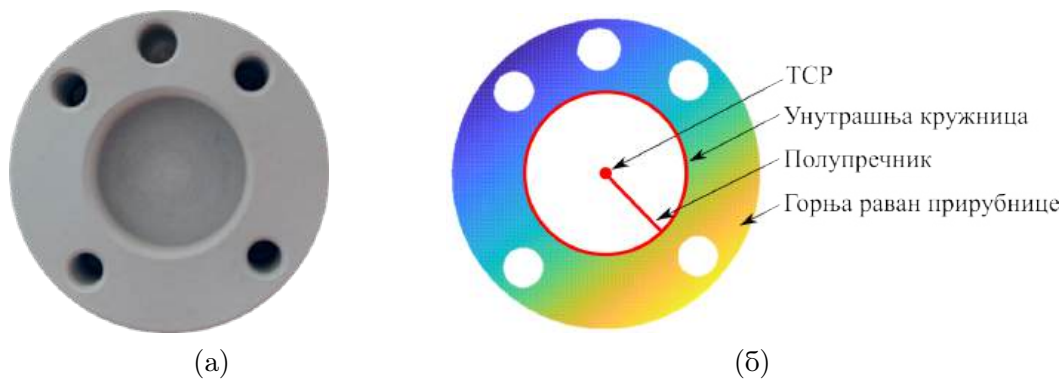
Коначно, непозната резултантна хомогена матрица калибрације  $\mathbf{T}_S^B$ , се у даљем поступку процјењује проналажењем рјешења најмањих квадрата са циљем минимизације средњеквадратне грешке одступања стварних позиција, које се читавају из контролера робота  $\{\mathbf{P}_{ri}\}$ , и координата центара прирубнице процијењених добијеном трансформацијом  $\{\mathbf{P}_{si}\}$ , у складу с релацијом:

$$e^2 = \sum_{i=1}^m \|\mathbf{P}_{ri} - (\mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_{si} + \mathbf{t})\|^2 \quad (7.8)$$

гдје параметар  $m$  представља кардиналност скупова  $\{\mathbf{P}_{ri}\}$  и  $\{\mathbf{P}_{si}\}$ .

### 7.3 Алгоритам за процјену координата ТСР-а прирубнице манипулатора заснован на обради скупа 3D тачака

Као један од кључних корака у процесу калибрације система потребно је детектовати референтне тачке за калибрацију на основу којих је могуће процијенити жељену трансформацију. У ту сврху предложен је алгоритам који се заснива на детекцији и процјени геометријских обиљежја прирубнице, тачније координата центра (ТСР) и полупречника унутрашњег отвора (унутрашњег круга) прирубнице. Дата обиљежја алгоритам процјењује обрадом скупа 3D тачака прирубнице, добијеног 3D скенером, са фокусом на тачке које припадају горњој равни прирубнице. Прирубница са нанесеним слојем спреја за скенирање, те њему припадајући скуп 3D тачака горње равни прирубнице добијен 3D скенером, приказани су на Слици 7.13.



Слика 7.13: Прирубница манипулатора; (а) Фотографија прирубнице, (б) Скуп 3D тачака прирубнице



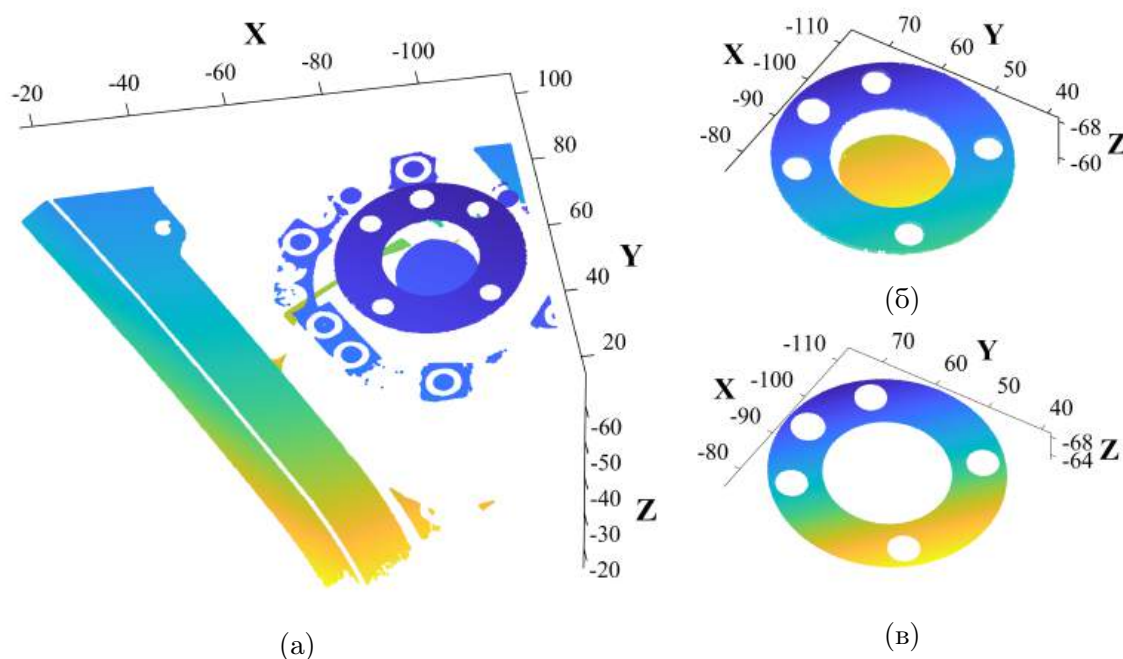
Скуп 3D тачака на Слици 7.13б приказан је у RGB колор простору којим је представљена удаљеност тачака (дубина) од исходишта референтног координатног система скенера. Црвена боја представља ближе тачке, док су даље тачке представљене плавом бојом. Приказани скуп 3D тачака показује да оптичка оса камере није усмјерена нормално на горњу површину прирубнице, те се тачке приказаног скупа налазе на различитим удаљеностима од исходишта референтног координатног система 3D скенера.

Алгоритам је имплементиран у четири корака. Блок дијаграм предложеног алгоритма који представља поједине кораке извршавања приказан је на Слици 7.14.



Слика 7.14: Блок дијаграм алгоритма

Прва три корака алгоритма илустрани су на слици 7.15.



Слика 7.15: Скуп 3D тачака снимљен за једну од позиција прирубнице: (а) Скуп 3D тачака у видном пољу 3D скенера, (б) Скуп 3D тачака прирубнице након уклањања сувишних дијелова, (в) Скуп 3D тачака горње површи прирубнице након процеса фитовања равни

Почетни корак алгоритма представља учитавање 3D скупа тачака прирубнице манипулатора снимљеног 3D скенером. Скуп 3D тачака снимљен за једну од

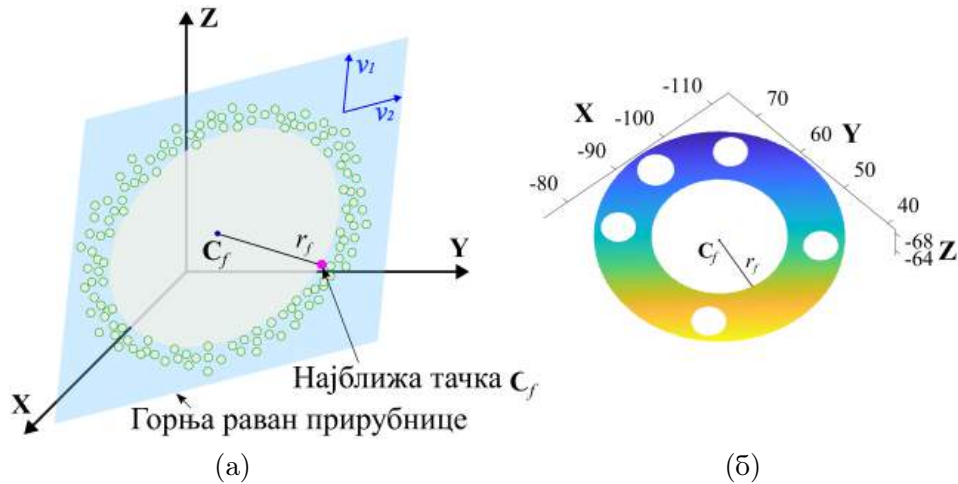
позиција прирубнице у видном пољу 3D скенера приказан је на Слици 7.15а. Имајући у виду да се у току снимања прирубнице манипулатора снимају и друга обиљежја која су видљива у видном пољу скенера, у сљедећем кораку алгоритма врши се обрада добијеног скупа тачака са циљем уклањања сувишних информација снимљених у радном окружењу, а које нису од интереса за калибрацију, Слика 7.15б. Овај поступак се реализује мануелно. С обзиром на то да се исходште координатног система ТСП-а налази у центру унутрашњег отвора горње равни прирубнице, у наредном кораку обрада скупа 3D тачака укључује процјену параметара горње равни прирубнице, те екстракцију тачака које припадају горњој равни прирубнице коришћењем MSAC (енгл. *M-estimator Sample Consensus*) алгоритма [174]. Овим поступком се из скупа 3D тачака добијених у претходном кораку издвајају тачке које припадају горњој равни прирубнице. Издвојене тачке чине скуп 3D тачака области од интереса за калибрацију система, означен са  $\mathbf{CLP} = \left\{ \mathbf{CLP}_i = [x_i, y_i, z_i]^T \in R^3 \mid i = 1, 2, \dots, n \right\}$  и подобан за процјену геометријских обиљежја прирубнице, Слика 7.15в.

Наредни корак алгоритма подразумијева коришћење добијеног скупа тачака  $\mathbf{CLP}$  као улазних података за процјену координата ТСП-а прирубнице. Овај процес је имплементиран у три фазе. Прва фаза има за циљ добијање почетне процјене координата центра (ТСП-а) и радијуса унутрашњег отвора (круга) прирубнице. Циљ друге фазе је издвајање тачака које се налазе на ивици унутрашњег круга прирубнице, а избор тачака се заснива на процјени растојања тачака прирубнице и кружнице дефинисане параметрима добијеним у првој фази. Током треће фазе, коначна процјена координата ТСП-а се одређује поступком фитовања 3D кружнице кроз тачке издвојене у току друге фазе. Поједностављена илустрација сваке фазе, са фокусом на тачке у близини ивице унутрашњег отвора прирубнице, затим резултати добијени коришћењем скупа тачака  $\mathbf{CLP}$ , као и детаљи имплементације сваке од фаза алгоритма, дати су у наставку.

Фаза 1: Почетна процјена координата ТСП-а, означена са  $\mathbf{C}_f$ , одређује се усредњавањем свих тачака скупа  $\mathbf{CLP}$ , коришћењем сљедеће релације:

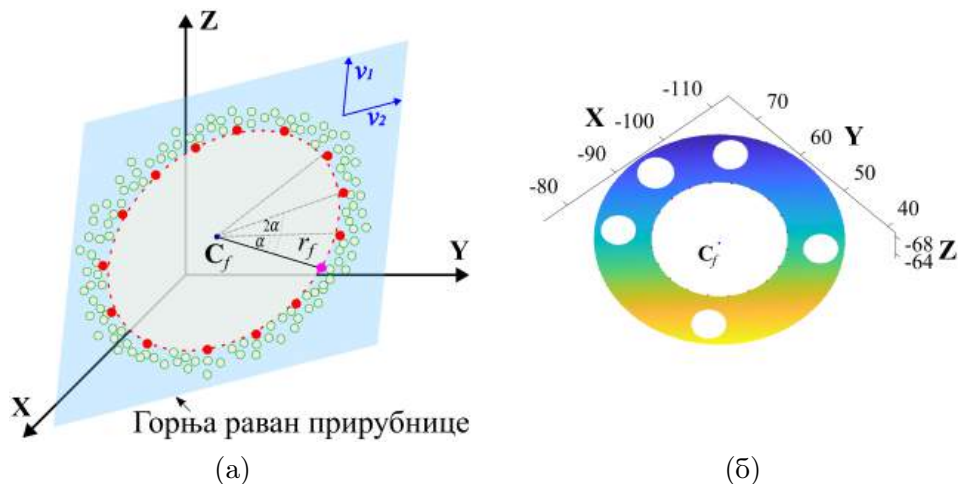
$$\mathbf{C}_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{CLP}_i \quad (7.9)$$

Надаље, примјеном методе најближих сусједа (енгл. *Nearest Neighbors - NN*), проналази се тачка на унутрашњем ободу прирубнице која је најближа процијењеном центру. Растојање између пронађене тачке и процијењеног центра  $\mathbf{C}_f$  се усваја као почетна процјена полупречника унутрашњег круга прирубнице, означеног са  $r_f$ . На Слици 7.16а, почетна процјена центра  $\mathbf{C}_f$  приказана је као плава тачка, затим тачка розе боје представља усвојену најближу тачку центру  $\mathbf{C}_f$ , док је црном линијом представљена почетна процјена радијуса  $r_f$ , усвојеног на претходно описан начин. Резултати прве фазе приказани су на Слици 7.16б.



Слика 7.16: Фаза 1 - Иницијална процјена величина  $C_f$ ,  $r_f$  и најближе тачке иницијалном центру  $C_f$ : (а) Илустрација резултата фазе 1, (б) Резултат фазе 1 коришћењем реалног скупа података

Фаза 2: Након усвајања почетних процјена центра унутрашњег круга прирубнице и полупречника  $C_f$  и  $r_f$ , усвојени параметри се даље користе за дефинисање кружнице, приказане испрекиданом црвеном линијом на Сlici 7.17а. Надаље се проводи поступак издвајања тачака заснован на  $NN$  методи, издвајањем тачака из скупа  $CLP$  које су најближе дефинисаној кружници. Нови скуп издвојених тачака означен је са  $CRP = \{CRP_i = [x_i, y_i, z_i]^T \in R^3 \mid i = 1, 2, \dots, n_{cp}\}$ , гдје  $n_{cp}$  представља укупан број издвојених тачака. Додатно, у току поступка издвајања тачака користи се линеарно одмјеравање претходно дефинисане кружнице, са угаоним кораком  $\alpha$  у интервалу  $[0, 2\pi)$ . Угаони корак одмјеравања дефинисан је са  $\alpha_i = i \cdot \alpha = i \cdot 2\pi/n_{cp}$ , што резултује равномјерно распоређеним дискретним тачкама на кружници, у интервалу  $[0, 2\pi)$ .



Слика 7.17: Фаза 2 - Издвајање тачака (црвене тачке) најближих дефинисаној кружници на основу иницијалних параметара: (а) Илустрација резултата фазе 2, (б) Резултат фазе 2 коришћењем реалног скупа података

Процедура издвајања једне тачке за одређени угао  $\alpha$  може се описати сљедећом релацијом:

$$\mathbf{CRP}_i = NN(\mathbf{CLP}, \mathbf{C}_f + \sin(\alpha_i) \cdot r_f \cdot \mathbf{v}_1 + \cos(\alpha_i) \cdot r_f \cdot \mathbf{v}_2) \quad (7.10)$$

Параметри  $\mathbf{v}_1$  и  $\mathbf{v}_2$  представљају векторе ортонормалне базе горње равни прирубнице, израчунате коришћењем методе декомпозиције сингуларних вриједности (енгл. *Singular Value Decomposition* - *SVD*) примјене на усредњене центриране тачке скупа  $\mathbf{CLP}$ , како слиједи:

$$\mathbf{USV}^T = svd(\mathbf{CLP} - \mathbf{C}_f) \quad (7.11)$$

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{V}(:, 1); \quad \mathbf{v}_2 = \mathbf{V}(:, 2) \quad (7.12)$$

Слика 7.17а илуструје резултат друге фазе, гдје црвене тачке представљају издвојене тачке најближе кружници дефинисаној иницијалним параметрима  $\mathbf{C}_f$ ,  $r_f$  и  $\alpha$ . Резултат друге фазе коришћењем реалних података приказан је на Слици 7.17б.

Фаза 3: На крају, након поступка издвајања тачака, описаног у другој фази, реализује се поступак прецизније процјене координата ТСП-а. Поступак се заснива на фитовању 3D кружнице кроз издвојене тачке у другој фази, коришћењем методе најмањих квадрата. Коришћењем SVD методе, проводи се поступак фитовања нове равни дефинисане издвојеним тачкама, а затим се усредњене центриране тачке скупа  $\mathbf{CRP}$  пројектују на дефинисану раван на сљедећи начин:

$$\mathbf{X}_p = (\mathbf{CRP} - \mathbf{C}_{fnew}) \cdot [\mathbf{v}_{1new} \quad \mathbf{v}_{2new}] \quad (7.13)$$

гдје се  $\mathbf{C}_{fnew}$ ,  $\mathbf{v}_{1new}$  и  $\mathbf{v}_{2new}$  израчунавају на основу једначина (7.9), (7.11) и (7.12) и тачака из скупа  $\mathbf{CRP}$ . Прецизнија процјена координата центра кружнице се добија фитовањем кружнице са координатама центра  $(x_c, y_c)$  и полупречником  $r$ , кроз 2D тачке израчунате коришћењем једначине (7.13) на сљедећи начин:

$$(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 = r^2 \quad (7.14)$$

$$p_1 \cdot x_i + p_2 \cdot y_i + p_3 = x_i^2 + y_i^2 \quad (7.15)$$

гдје је  $p_1 = 2 \cdot x_c$ ,  $p_2 = 2 \cdot y_c$ , и  $p_3 = r^2 - x_c^2 - y_c^2$ , док су координате тачака пројектованих на нову раван дефинисане са  $x_i = \mathbf{X}_p(i, 1)$ ;  $y_i = \mathbf{X}_p(i, 2)$ ;  $i = 1, 2, \dots, n_{cp}$ . Вектор непознатих параметара  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3]^T$  се израчунава рјешавањем система линеарних једначина као што слиједи:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & & \\ x_{n_{cp}} & y_{n_{cp}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \vdots \\ x_{n_{cp}}^2 + y_{n_{cp}}^2 \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

Процјена рјешења добија се коришћењем методе најмањих квадрата, а може се представити на следећи начин:

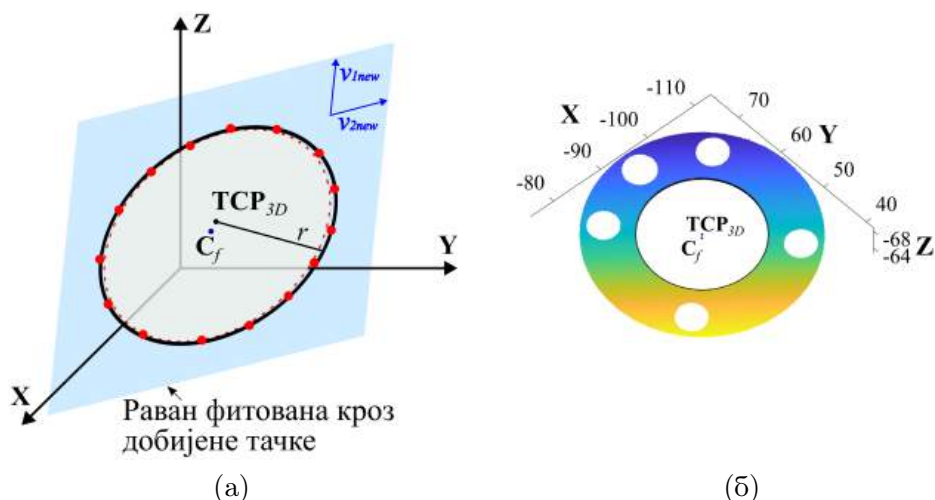
$$x_c = \frac{p_1}{2}; \quad y_c = \frac{p_2}{2} \quad (7.17)$$

$$r = \frac{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 4 \cdot p_3}}{2} \quad (7.18)$$

Коначна процјена 3D координата TCP-а израчунава се релацијом:

$$\text{TCP}_{3D} = C_{fnew} + [v_{1new} \ v_{2new}] \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

Илустрација процјене TCP-а и полупречника у трећој фази представљена је на Слици 7.18а. Такође, кружница фитована кроз тачке издвојене у посљедњој фази имплементације алгоритма приказана је црном линијом у циљу боље илустрације постигнутих резултата посљедње фазе алгоритма и истицања разлике у односу на резултате добијене на основу иницијално процјењених параметара. Резултат треће фазе алгоритма, реализован на реалном скупу података, приказан је на Слици 7.18б.



Слика 7.18: Фаза 3 - Коначна процјена координата TCP-а заснована на фитовању 3D кружнице кроз издвојене тачке: (а) Илустрација резултата фазе 3, (б) Резултат фазе 3 коришћењем реалног скупа података

## 7.4 Метрика грешке

Анализа перформанси предложеног алгоритма, у контексту поузданости и прецизности детекције и процјене геометријских обиљежја прирубнице, квантификована је одступањем између процијењеног пречника калибрационог прстена, означеног као  $d_{SRE}$ , и стварног пречника калибрационог прстена, означеног као  $d_{SRA}$ ,

израчунатог коришћењем следеће једначине:

$$e_{SR} = |d_{SRE} - d_{SRA}| \quad (7.20)$$

Квалитет калибрације се процјењује на основу одступања између стварне позиције ТСП-а и позиције ТСП-а добијене коришћењем матрице трансформације  $\mathbf{T}_S^B$  процијењене у процесу калибрације. Процијењене координате центра прирубнице, коришћењем предложеног алгоритма, се примјеном резултантне матрице калибрације  $\mathbf{T}_S^B$  трансформишу у координате изражене у референтном координатном систему робота на следећи начин:

$$\hat{\mathbf{P}}_{si} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_{si} + \mathbf{t} \quad (7.21)$$

гдје  $\hat{\mathbf{P}}_{si}$  представља процјену позиције ТСП-а изражену у односу на референтни координатни систем робота,  $\mathbf{P}_{si}$  представља позицију ТСП-а изражену у односу на референтни координатни систем скенера, док  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{t}$  представљају редом матрицу ротације и вектор translације садржане у резултатној матрици калибрације  $\mathbf{T}_S^B$ . Одступања између процијењених позиција ТСП-а, изражених у односу на референтни координатни систем робота и израчунатих једначином (7.21), и позиција ТСП-а добијених на основу кинематичког модела, раније означених са  $\mathbf{P}_{ri}$ , коришћена су као модел грешке за анализу тачности калибрације. Усвојени модел грешке може се дефинисати следећом релацијом:

$$\mathbf{e}_{KAL} = \frac{1}{n_{fp}} \sum |\mathbf{P}_{ri} - (\mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_{si} + \mathbf{t})| = \frac{1}{n_{fp}} \sum |\mathbf{P}_{ri} - \hat{\mathbf{P}}_{si}| \quad (7.22)$$

гдје  $\mathbf{e}_{KAL}$  представља вектор усредњених вриједности одступања (средње апсолутну грешку) за сваку просторну координату,  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  у односу на референтни координатни систем робота, док  $n_{fp}$  представља број позиција прирубнице у видном пољу скенера који се користи за верификацију. Средње апсолутна грешка за процјену тачности калибрационих параметара пружа реалнији приказ стварне величине грешке у односу на средњеквадратну грешку, због чега је и усвојена као модел грешке.

## Глава 8

# Експериментални резултати

Истраживање је усмјерено на поступак калибрације система робот-визуелни сензор, као фазу која претходи коришћењу система и неопходна је за постизање високе прецизности у примјенама система чији рад се заснива на визуелним информацијама. С обзиром на то да је калибрација у општем случају процес који се реализује према унапријед дефинисаном протоколу и са унапријед дефинисаним и контролисаним условима, предложена процедура укључује неколико предуслова који су идентификовани као неопходни за постизање високе прецизности и флексибилности калибрације, и то:

- Робот и скенер морају бити калибрисани у складу са препорукама произвођача прије калибрације система робот-визуелни сензор,
- Систем је потребно реализовати у конфигурацији са фиксном камером, а предложена процедура је дизајнирана да ради у статичком режиму,
- Облак тачака прирубнице се добија помоћу 3D скенера у складу са прописаним процедурама наведеним у упутству за коришћење скенера,
- Прирубница мора бити позиционирана у видном пољу камере на начин да је видљива горња површина прирубнице,
- На прирубницу се наноси спреј за скенирање чиме се обезбјеђује бољи квалитет облака тачака.

Проведени експерименти намијењени процјени прецизности и ефикасности предложеног приступа калибрације обухватају сљедеће:

- припрему експерименталне поставке и радног окружења,
- калибрацију робота,
- калибрацију скенера,
- верификацију и валидацију калибрације скенера,

- испитивање поновљивости робота,
- валидацију перформанси предложеног алгоритма коришћењем калибрационог прстена,
- калибрацију система робот-скенер,
- валидацију калибрације система,
- анализу параметара предложеног алгоритма и њиховог утицаја на резултате калибрације,
- анализу броја и избора јединствених позиција прирубнице манипулатора робота у видном пољу скенера и њихов утицај на резултате калибрације, и
- поређење добијених резултата калибрације са резултатима објављеним у релевантној литератури.

## 8.1 Припрема експерименталне поставке и радног окружења

Систем је реализован у конфигурацији са фиксном камером, као што је приказано на Слици 7.1. Скенер је постављен на радну удаљеност у складу са спецификацијом и оријентисан без настојања да оптичка оса камере буде нормална на горњу раван прирубнице у току снимања. Коришћена је конфигурација система FOV 250. На горњу површину прирубнице нанесен је спреј за скенирање. Експерименти су реализовани у стандардним лабораторијским условима. Температура радног окружења се мијењала у распону од 20 °C до 25 °C, док услови освјетљења нису строго контролисани. Управљање роботом реализовано је аутоматски, а експериментална поставка реализована у циљу да предложена процедура не захтијева интервенцију оператера током калибрације система.

## 8.2 Калибрација робота

Процедура калибрације је реализована коришћењем методологије описане у [168]. Коришћен је JIG метод за калибрацију предложеног робота. Процедура се заснива на поравнању специјално дизајнираних цилиндричних отвора на конструкцији манипулатора робота и постављању алата за фискирање сусједних зглобова. Алат који се користи у сврху калибрације предложеног робота приказан је на Слици 8.1, док је приказ позиција робота са постављеним алатом за калибрацију дат је Слици 8.2.



Слика 8.1: Калибрациони алат





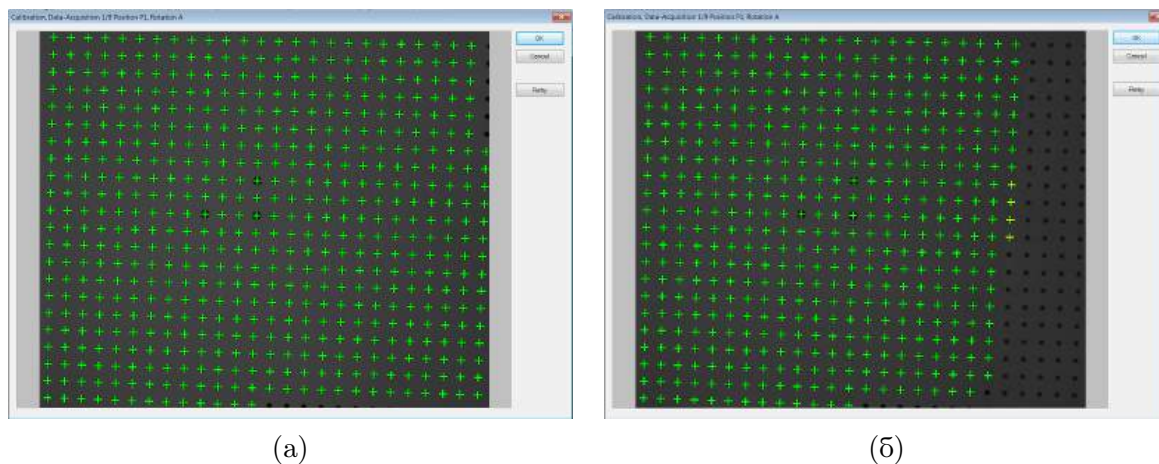
Слика 8.2: Калибрација нулте позиције робота

На сликама је могуће уочити отворе за постављање алата, те постављен алат у процесу калибрације за првих 5 зглобова. Посљедњи зглоб не захтијева постављање калибрационог алата с обзиром да је опсег његовог кретања  $\pm 360^\circ$ . Стога се ресетовање апсолутног енкодера за посљедњи зглоб реализује поравнавањем ABS маркера. У складу са процедуром дефинисаном у [168], робот је калибрисан ресетовањем нулте позиције.

Квалитет калибрације анализира се мјерењем вањских координата робота и поређењем са унапријед дефинисаним координатама локација у коју се робот позиционира. Имајући у виду комплексност мјерења вањских координата, описан у глави 4, анализа поступка верификације проведене калибрације и процјене параметара геометрије заснована је на коришћењу предложеног алгорита за процјену координата ТСП-а. Проведена анализа ће бити представљена након приказа резултата о процјени квалитета предложеног скенера и подобности предложеног алгорита за поуздану и прецизну процјену координата центра прирубнице.

## 8.3 Калибрација 3D скенера

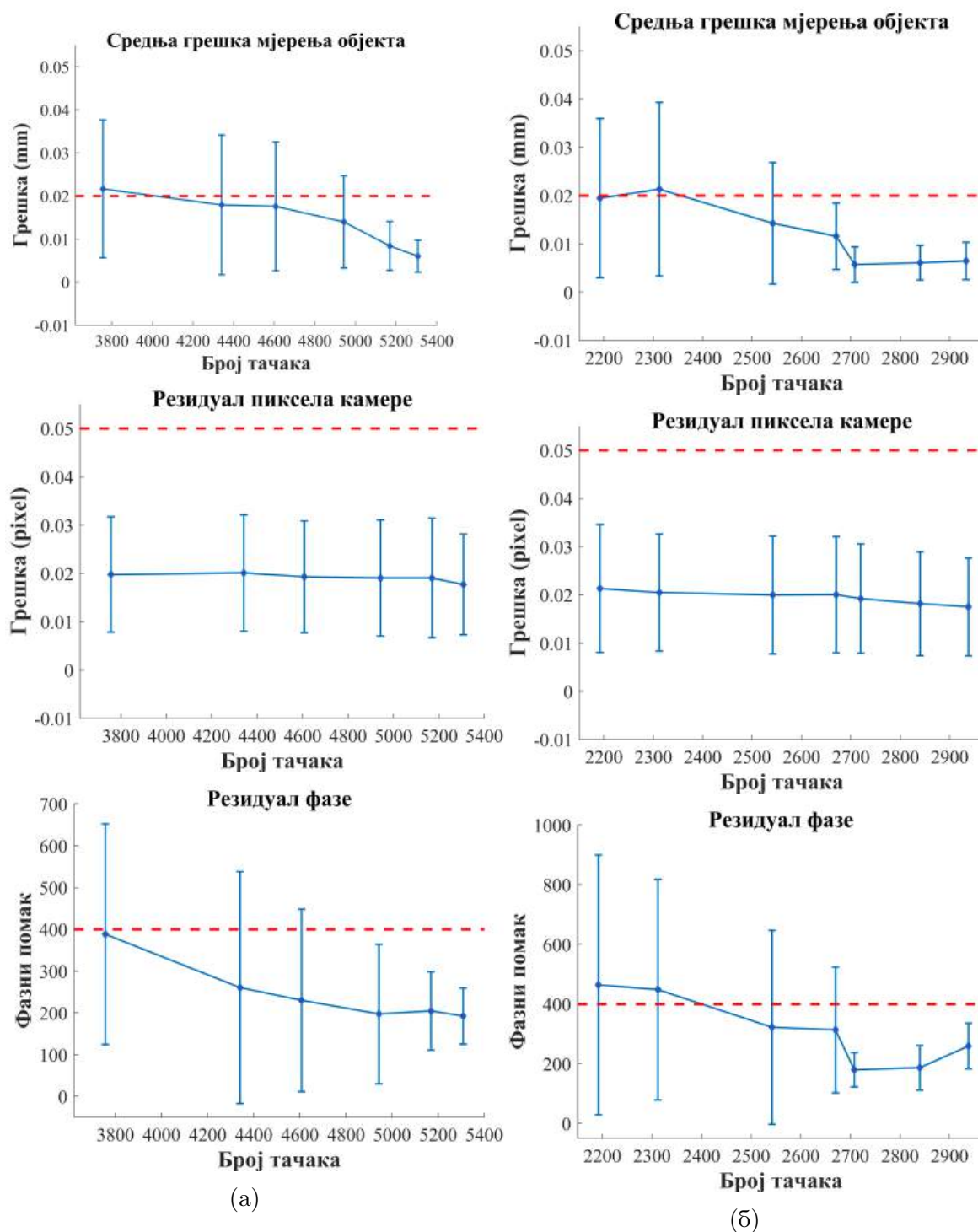
У оквиру експеримената проведене су процедуре калибрације и верификације оптичког 3D скенера Comet L3D 5M, у складу са процедуром описаном у 7.1.2.2. Као што је раније истакнуто, скенер је могуће калибрисати коришћењем пет или девет позиција калибрационе табле. Оба приступа су анализирана у експериментима. У складу са изабраном конфигурацијом, коришћена је одговарајућа калибрациона табла и узорак позиционирања, приказани на Слици 7.9. Калибрационе процедуре су проведене у два одвојена експеримента. Први експеримент се заснивао на калибрацији система коришћењем девет позиција, док се за други експеримент користио метод са пет позиција. Ефикасност проведених калибрација анализирана је оцјеном индекса перформанси који се односе на резидуал пиксела камере, резидуал фазе и средњу грешку тачке објекта. Утицаји резидуала пиксела камере и средње грешке објекта на тачност калибрације анализирани су у [175], док су утицаји резидуала фазе, као и приједлог компензације фазне грешке, дати у [176]. Имајући у виду резултате анализа проведених у поменутих истраживањима, у овом раду је додатно анализиран утицај броја тачака калибрационе табле, детектованих на сликама током калибрације, на индексе перформанси система. Разноликост у броју тачака, измјерених у току калибрације, реализована је додавањем препрека испред калибрационе табле током процеса калибрације. Детектоване тачке калибрационе табле приказане су на Слици 8.3.



Слика 8.3: Снимање калибрационе табле у току калибрације скенера: а) Примјер добро детектованих тачака, б) Примјер лоше детектованих тачака

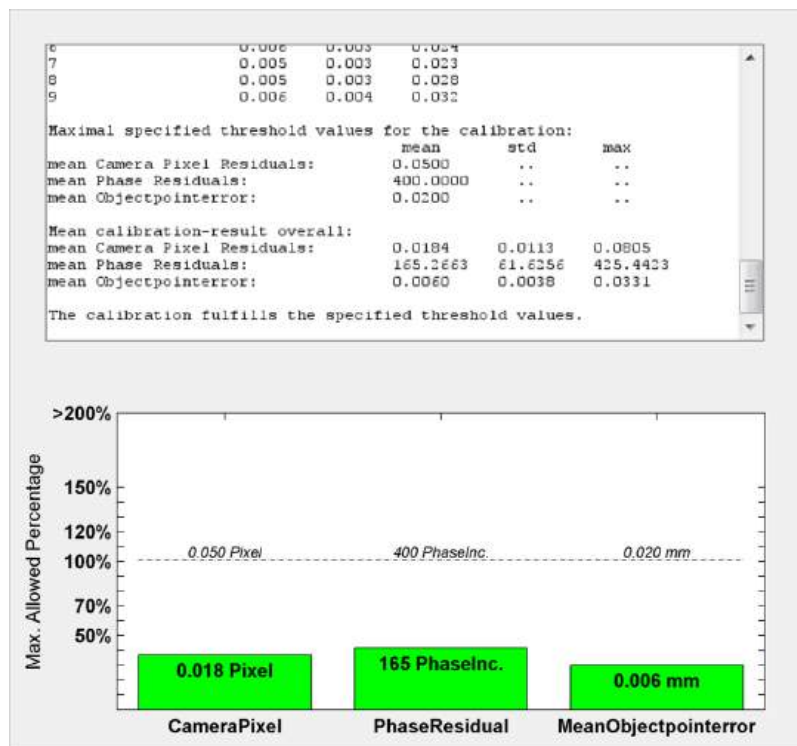
Резултати експеримената у којим је додавањем препрека омогућено снимање различитог броја тачака за калибрацију приказани су на Слици 8.4 [22]. Средња вриједност и стандардна девијација индекса перформанси су приказани плавом пуном линијом, док црвена испрекидана линија представља унапријед дефинисану максималну вриједност грешке за сваки параметар.

### 8.3. Калибрација 3D скенера



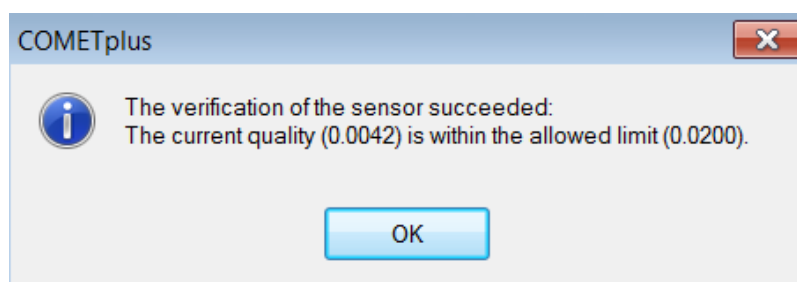
Слика 8.4: Статистички показатељи квалитета калибрације: (а) Калибрација коришћењем 9 позиција калибрационе табле, (б) Калибрација коришћењем 5 позиција калибрационе табле

Резултати provedених калибрација изабрани су на основу најбоље оцијењених статистичких показатеља квалитета калибрације. Индекси перформанси најбоље оцијењене калибрације коришћењем девет позиција приказани су на Слици 8.5.



Слика 8.5: Статистички показатељи квалитета калибрације - најбоље оцијењена калибрација

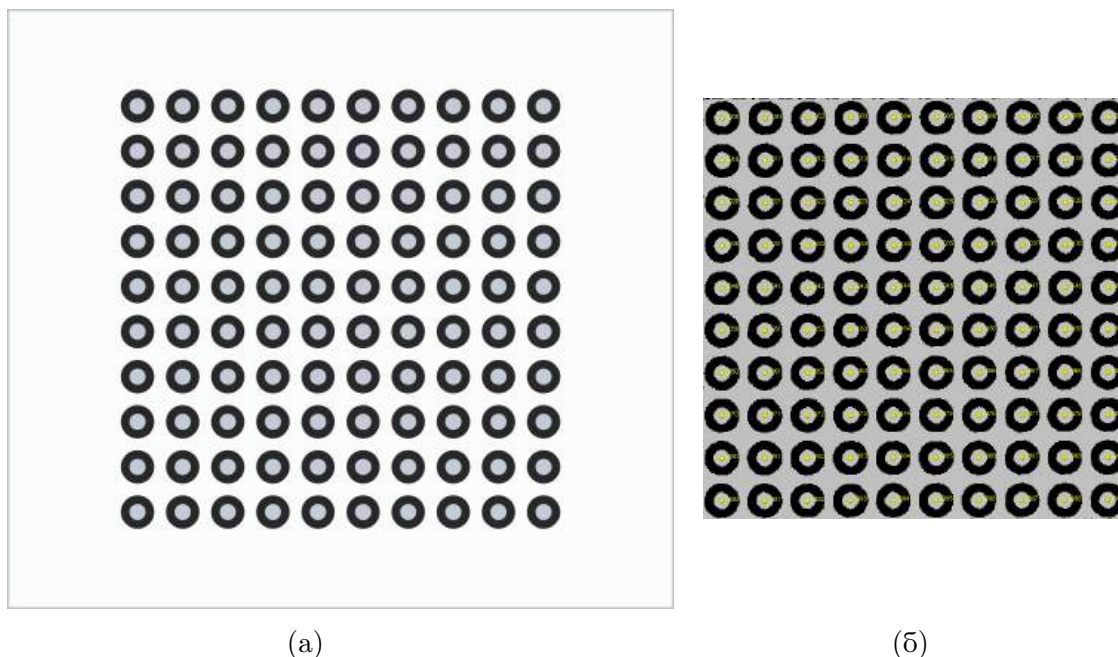
Додатни експерименти проведени су у циљу верификације и валидације проведених калибрација. Уграђени процес верификације описан у 7.1.2.2 прецизно је дефинисан и заснован на коришћењу исте калибрационе табле и узорка позиционирања као и у процесу калибрације. Поступком уграђене верификације проведена је анализа и процјена тачности мјерења калибрисаног скенера. Оцјена квалитета калибрације, која износи 0.0042 mm, добијена на основу поређења измјерених и референтних вриједности координата тачака калибрационе табле, указује да је тачност калибрисаног скенера у оквиру дефинисане толеранције која износи 0.02 mm, Слика 8.6.



Слика 8.6: Оцјена верификације

Поред поступка уграђеног у софтверском модулу COMETplus, предложена је додатна процедура валидације, чији поступак се реализује мануелно. За разлику од уграђене, додатно предложена валидација проводи се позиционирањем валидационе табле на произвољне позиције унутар видног поља скенера, без потребе

за коришћењем обрасца за позиционирање. Као и калибрациона табла, додатна табла за валидацију је реализована коришћењем кружних маркера са прецизно дефинисаном величином и растојањем њихових центара, Слика 8.7а.

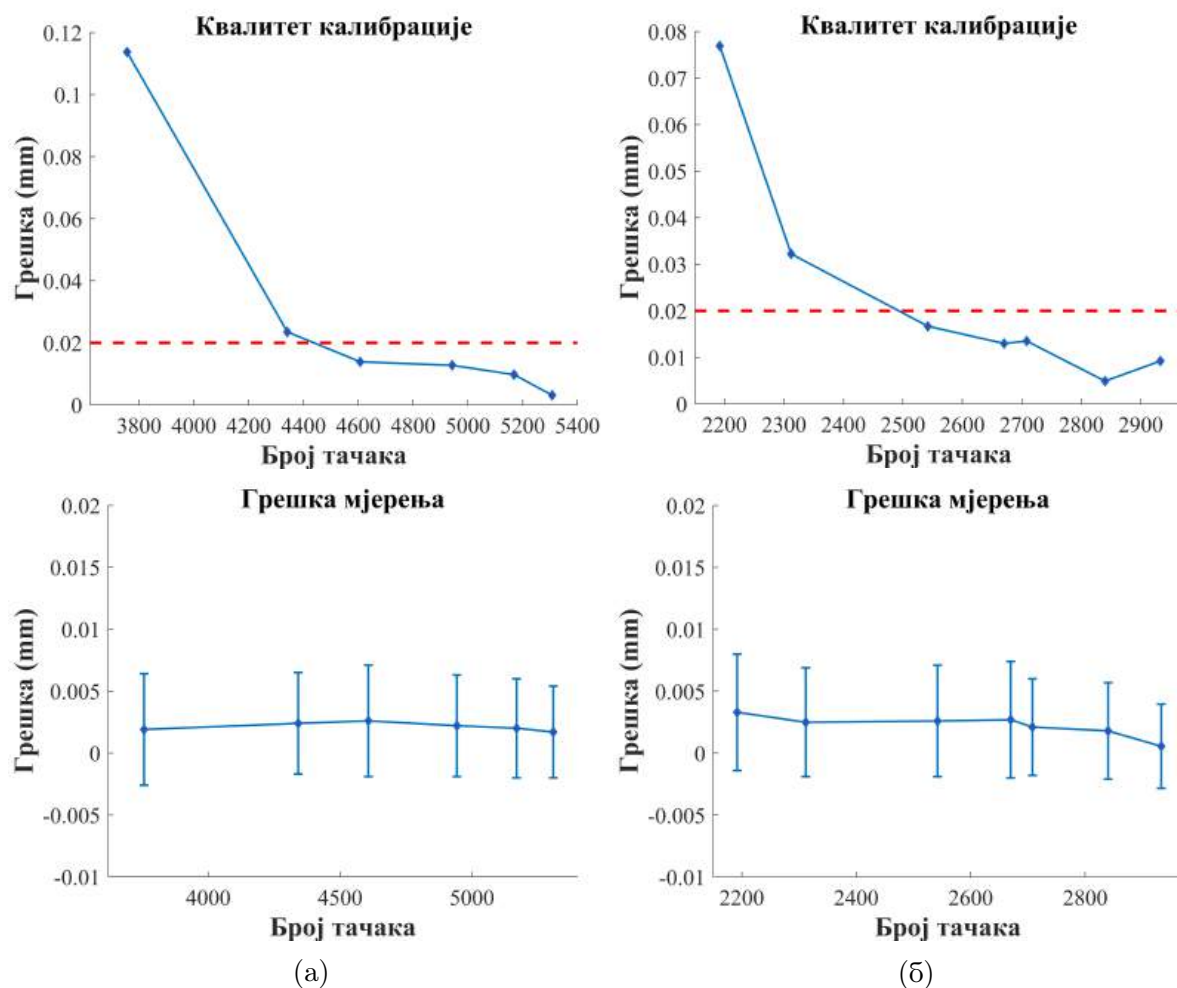


Слика 8.7: Табла за валидацију: а) Физички модел реализоване табле, б) Резултат аутоматске детекције центара маркера

Табла за валидацију реализована је у виду планарне мреже димензија 10x10 маркера кружног облика. Растојање центара сусједних маркера износи 8 mm. Током прикупљања мјерних података за валидацију, табла је скенирана три пута, на различитим позицијама у видном пољу камере. Могућност детекције центра маркера кружног облика представља једну од функционалности које омогућава СОМЕТplus, те је та функционалност искоришћена за аутоматску детекцију центара свих маркера на табли. Овај процес се реализује након скенирања табле и покретања поменуте функције, која омогућава детекцију свих центара истовремено. Приказ детектованих центара маркера на табли за валидацију приказан је на Слици 8.7б.

Резултати валидације приказани су на Слици 8.8, на којој горњи графички представљају резултате уграђене верификације система, док доњи графички представљају резултате додатно предложене валидације.

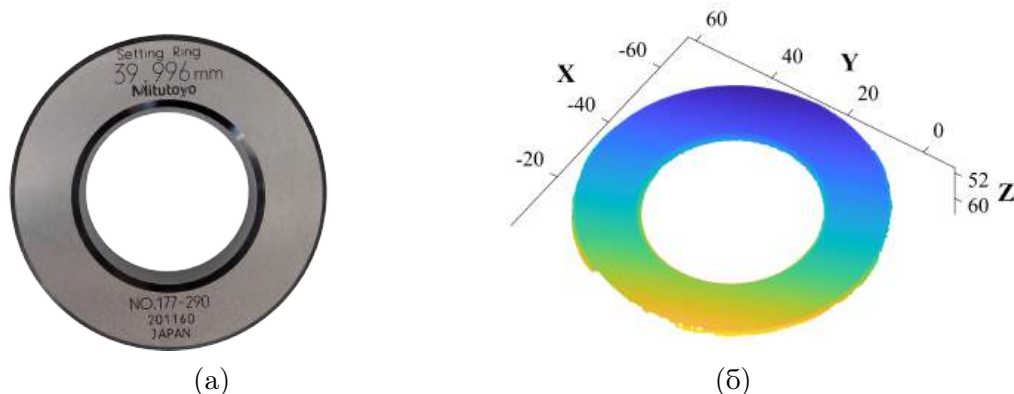
Резултати валидације показују средњу грешку процјене растојања између два сусједна центра маркера у зависности од броја тачака коришћених у одређеној процедури калибрације. Плава пуна линија представља процијењену грешку и њену стандардну девијацију, док црвена испрекидана линија представља унапријед дефинисану максимално дозвољену грешку. Узимајући у обзир вриједности статистичких показатеља квалитета калибрације и резултата верификације, може се закључити да је предложени скенер калибрисан у складу с дефинисаном процедуром и да се може очекивати висока тачност и поузданост мјерења.



Слика 8.8: Валидација калибрације: (а) Калибрација коришћењем 9 позиција калибрационе табле, (б) Калибрација коришћењем 5 позиција калибрационе табле

## 8.4 Валидација перформанси алгоритма за процјену координата ТСР-а прирубнице манипулатора

Након опсежног претраживања доступне релевантне литературе није пронађен алгоритам погодан за упоредну анализу перформанси са предложеним алгоритмом, те је за процјену прецизности и поузданости предложеног алгоритма предложено коришћење калибрационог прстена, као поузданог референтног мјерног еталона, приказаног на Слици 8.9а. Поступак валидације заснован је на анализи 3D скупа тачака калибрационог прстена, који је добијен коришћењем 3D скенера, као што је приказано на Слици 8.9б.



Слика 8.9: Калибрациони прстен Mitutoyo NO. 177-290: (а) Фотографија калибрационог прстена, (б) Скуп 3D тачака калибрационог прстена добијен коришћењем 3D скенера

Конкретно, предложени калибрациони прстен служи као алат за прецизно мјерење у сврху калибрације и валидације, са фокусом на мјерење унутрашњег пречника, који износи тачно 39.996 mm. Стога је циљ његове примјене у проведеним експериментима валидација прецизности предложеног алгоритма приликом детекције и процјене, како координата центра, тако и пречника унутрашњег круга.

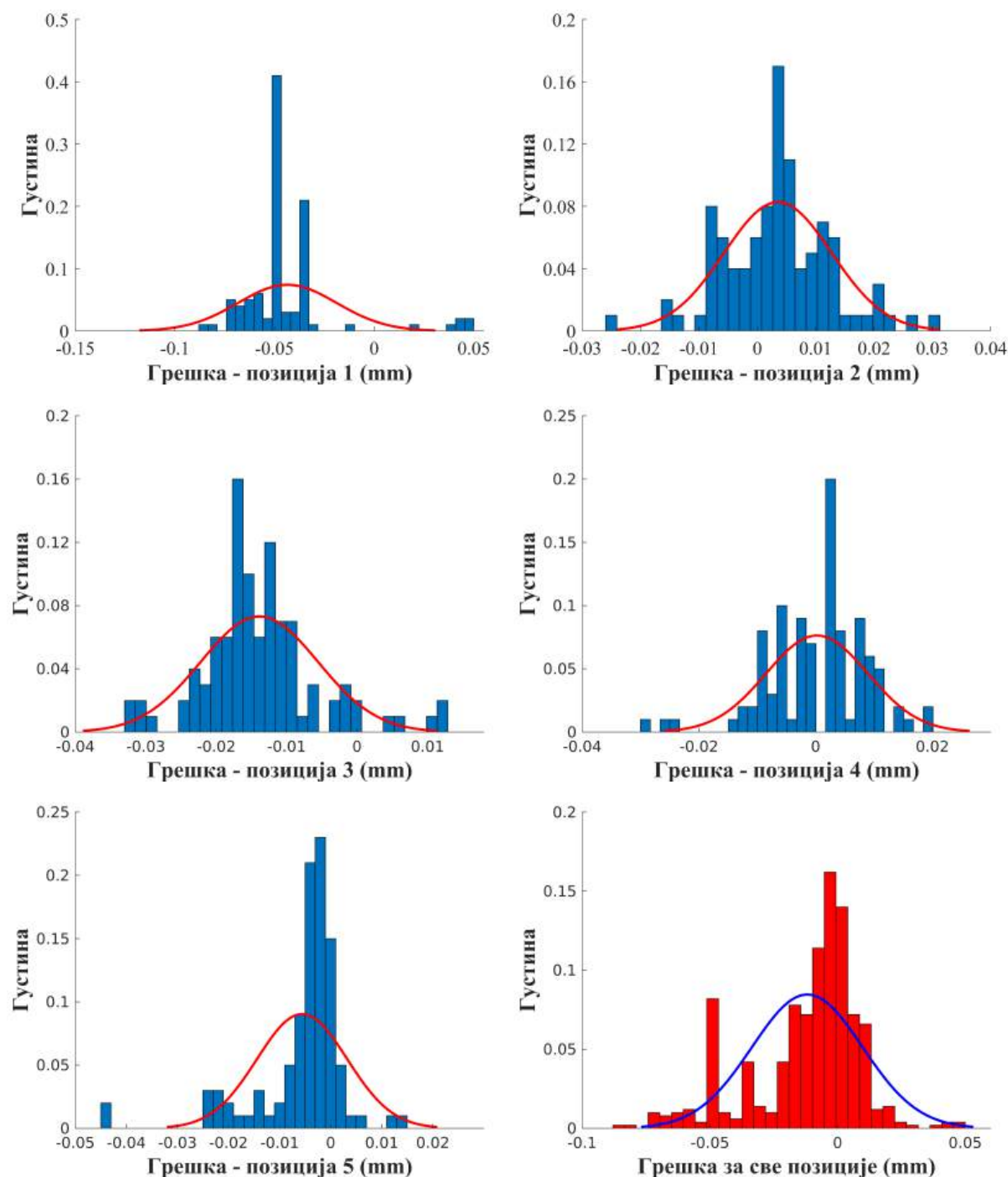
Експерименти су проведени за пет позиција калибрационог прстена постављеног у видно поље камере. Узимајући у обзир препоруке за снимање 3D скенером, на калибрациони прстен је нанесен спреј за скенирање са циљем добијања бољег квалитета скупа 3D тачака. За сваку позицију, експерименти процјене жељених параметара коришћењем предложеног алгоритма, те оцјена прецизности и поновљивости учитавања и обраде скупа 3D тачака калибрационог прстена, проведени су у 100 итерација. За анализу добијених резултата коришћени су усредњени резултати свих проведених итерација. Треба истаћи и то да је изабрани број позиција калибрационог прстена обухватио значајан дио видног поља скенера за потребе мјерења. Стога, предложена величина узорка сматрана је довољном, са претпоставком да анализа додатних позиција не би значајно допринијела процесу валидације, нити би значајно утицала на закључке изведене на основу анализираних резултата.

Резултати проведених експеримената, који приказују процјене координата центра и пречника калибрационог прстена за одговарајућу позицију, приказани су у Табели 8.1.

Табела 8.1: Валидација алгоритма коришћењем калибрационог прстена

Позиција прстена	Пречник [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	$39.95 \pm 0.02$	$-36.21 \pm 0.01$	$26.82 \pm 0.01$	$55.03 \pm 0.01$
2	$40.00 \pm 0.01$	$-44.04 \pm 0.01$	$27.42 \pm 0.00$	$56.57 \pm 0.01$
3	$39.98 \pm 0.01$	$-52.67 \pm 0.01$	$25.58 \pm 0.00$	$59.71 \pm 0.01$
4	$39.99 \pm 0.01$	$-17.76 \pm 0.00$	$18.63 \pm 0.00$	$41.81 \pm 0.01$
5	$39.99 \pm 0.01$	$-0.39 \pm 0.00$	$1.18 \pm 0.00$	$6.29 \pm 0.00$

Додатно, расподеле грешака процјене пречника за сваку позицију калибрационог прстена, као и за све позиције заједно, приказане су на Слици 8.10. Грешка мјерења пречника добијена је према једначини (7.20), где је за  $d_{SRE}$  усвојен процијењени пречник калибрационог прстена добијен коришћењем предложеног алгоритма, а за  $d_{SRA}$  вриједност пречника калибрационог прстена која износи тачно 39.996 mm, у складу са декларисаном спецификацијом произвођача.



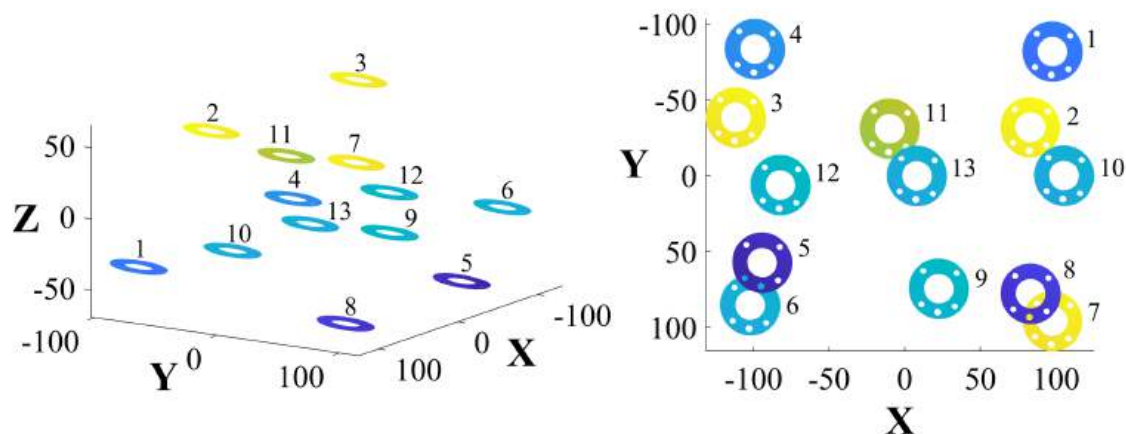
Слика 8.10: Расподела грешке процјене пречника калибрационог прстена



Првих пет графикана са стубићима плаве боје и кривом расподеле црвене боје представљају расподелу грешке за сваку од позиција калибрационог прстена у видном пољу скенера, док последњи графикон, са стубићима црвене боје и кривом расподеле плаве боје, представља расподелу грешке за све позиције калибрационог прстена.

## 8.5 Валидација предложеног поступка калибрације

Експерименти калибрације система коришћењем предложеног алгоритма за обраду скупа 3D тачака прирубнице манипулатора, проведени су на сљедећи начин: скуп од 13 позиција прирубнице манипулатора дефинисан је унутар заједничког радног простора, који подразумева радни простор робота у видном пољу скенера. Затим је завршни уређај позициониран у сваку дефинисану позицију, те прирубница скенирана 3D скенером. Приказ скенираних прирубница и њихова просторна расподела у заједничком радном простору робота и скенера приказани су на Слици 8.11.



Слика 8.11: Просторна распоређеност 3D скупа тачака прирубнице у радном простору система

Дефинисање позиција прирубница у процесу калибрације имало је за циљ да се постигне равномјеран избор тачака у радном простору система. Након снимања прирубница, сваки од добијених скупова 3D тачака обрађен је предложеним алгоритмом и координате ТСП-а прирубнице процијењене су у односу на референтни координатни систем скенера. Овај поступак је проведен у 100 итерација за сваку позицију прирубнице у видном пољу скенера, а усредњене вриједности добијених резултата коришћене су за калибрацију система. У другој фази алгоритма неопходно је дефинисати параметар  $n_{cp}$ , односно број тачака које се издвајају, а које су најближе кружници дефинисаној иницијалним параметрима. С обзиром на то да не постоји генерална препорука за усвајање броја тачака, проведени су експерименти неопходни за анализу утицаја параметра  $n_{cp}$  на тачност процјене координата центра унутрашње кружнице прирубнице. Експерименти обухватају осам случаје-

### 8.5. Валидација предложеног поступка калибрације

ва, и то:  $n_{cp} = 3, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 360$ , за сваки положај прирубнице. У раду су представљени резултати за прву позицију прирубнице у радном простору. Резултати експеримената за све позиције показују веома блиске резултате, те се анализа резултата за наведени експеримент може сматрати општим закључком. Резултати експеримента који приказују вриједности координата центра прирубнице и вријеме обраде скупа 3D тачака прирубнице у зависности од параметра  $n_{cp}$ , дати су у Табели 8.2.

Табела 8.2: Процјена координата центра прирубнице у зависности од  $n_{cp}$

Број $n_{cp}$	$X$ [mm]	$Y$ [mm]	$Z$ [mm]	Вријеме извршавања [s]
<b>3</b>	97.8173	-81.8799	-36.4174	0.4231
<b>5</b>	97.8161	-81.8847	-36.4174	0.4242
<b>10</b>	97.8155	-81.8881	-36.4169	0.4213
<b>20</b>	97.8197	-81.8906	-36.4170	0.4263
<b>50</b>	97.8200	-81.8943	-36.4171	0.4341
<b>100</b>	97.8191	-81.8945	-36.4167	0.4369
<b>200</b>	97.8203	-81.8947	-36.4175	0.4378
<b>360</b>	97.8188	-81.8948	-36.4168	0.4555
$\mu \pm \sigma$	$97.8184 \pm 0.0018$	$-81.8948 \pm 0.0056$	$-36.4168 \pm 0.0003$	$0.4324 \pm 0.011$

Може се уочити да је одступање од средње вриједности, по свакој од координата, веома мало, те да је вријеме обраде скупа 3D тачака прирубнице приближно исто за све дефинисане случајеве. Стога се може закључити да параметар  $n_{cp}$  неће значајно утицати на перформансе предложеног алгорита. Стога је за даље експерименте усвојено  $n_{cp} = 20$ . У Табели 8.3 су приказане средње вриједности, стандардне девијације и норме грешака добијене анализом резултата поновљивости процјене координата центра прирубнице за све позиције, када се усвоји  $n_{cp} = 20$ .

Табела 8.3: Поновљивност процјене координата центра прирубнице за  $n_{cp} = 20$

Позиција прирубнице	$X$ [mm]	$Y$ [mm]	$Z$ [mm]	Норма грешке [mm]
<b>1</b>	$97.824 \pm 0.0083$	$-81.888 \pm 0.0062$	$-36.420 \pm 0.0035$	0.0109
<b>2</b>	$83.372 \pm 0.0192$	$-31.991 \pm 0.0222$	$62.322 \pm 0.0041$	0.0297
<b>3</b>	$-111.520 \pm 0.0200$	$-38.394 \pm 0.0236$	$60.051 \pm 0.0068$	0.0317
<b>4</b>	$-98.991 \pm 0.0105$	$-83.504 \pm 0.0102$	$-26.331 \pm 0.0047$	0.0153
<b>5</b>	$-94.293 \pm 0.0078$	$57.414 \pm 0.0095$	$-65.857 \pm 0.0031$	0.0127
<b>6</b>	$-102.140 \pm 0.0076$	$85.519 \pm 0.0127$	$-12.006 \pm 0.0039$	0.0153
<b>7</b>	$97.926 \pm 0.0182$	$95.970 \pm 0.0166$	$58.833 \pm 0.0056$	0.0253
<b>8</b>	$83.382 \pm 0.0119$	$77.940 \pm 0.0091$	$-59.146 \pm 0.0036$	0.0154
<b>9</b>	$22.757 \pm 0.0080$	$74.591 \pm 0.0132$	$-7.568 \pm 0.0033$	0.0158
<b>10</b>	$105.530 \pm 0.0086$	$-0.041 \pm 0.0113$	$-13.460 \pm 0.0031$	0.0145
<b>11</b>	$-9.719 \pm 0.0139$	$-31.022 \pm 0.0160$	$27.325 \pm 0.0055$	0.0219
<b>12</b>	$-82.116 \pm 0.0139$	$6.192 \pm 0.0141$	$-7.669 \pm 0.0040$	0.0203
<b>13</b>	$8.182 \pm 0.0079$	$0.193 \pm 0.0107$	$-13.251 \pm 0.0037$	0.0138

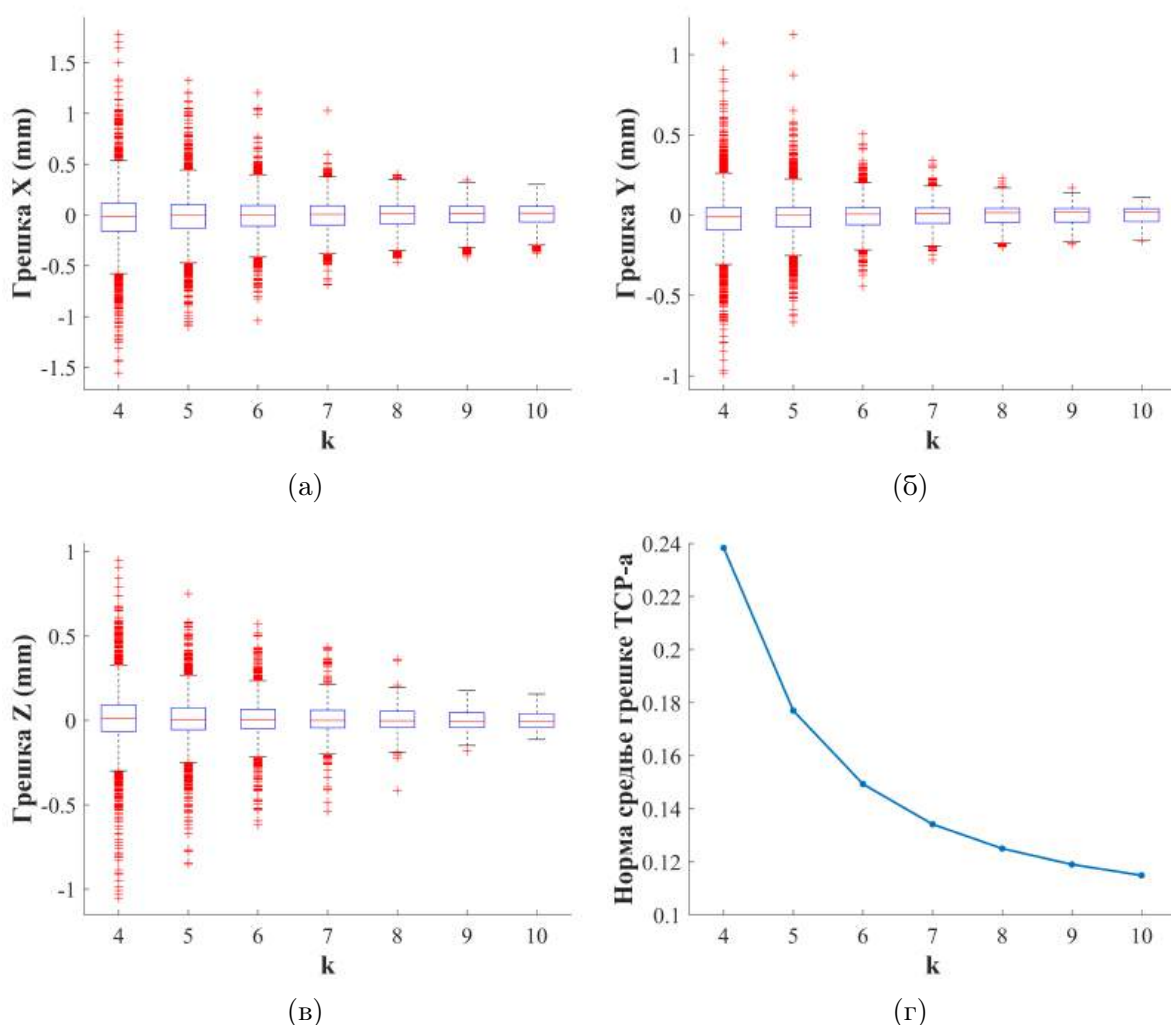
На основу добијених мјерних података, проведена је калибрација система робот-скенер и процијењена резултантна хомогена матрица калибрације  $\mathbf{T}_S^B$ . Имајући у виду препоруку да се повећањем броја позиција калибрационих објеката постиже бољи квалитет калибрације, проведени су додатни експерименти у циљу анализе утицаја броја и избора позиција прирубница у радном простору на тачност процјене калибрационих параметара и ефикасност поступка калибрације система. У овом дијелу анализе полази се од претпоставке да је потребно минимално четири некомпланарне тачке, које представљају ТСП робота, за реализацију процеса калибрације [29].

У циљу анализе утицаја броја и избора јединствених позиција прирубнице на резултате калибрације, проведени су експерименти калибрације на следећи начин. Калибрациони процес је проведен за сваку комбинацију јединственог скупа  $k$  позиција прирубнице,  $k \in \{4,5,6,7,8,9,10\}$ . Затим је проведена валидација добијених резултата калибрације за сваку комбинацију изабраних позиција прирубнице. Поступак валидације заснован је на моделу грешке из једначине (7.22), у којој фигуришу процијењена резултантна матрица калибрације  $\mathbf{T}_S^B$  за сваку комбинацију појединачно, и одговарајући скупови тачака добијени на основу преосталих  $n_{fp} = 13 - k$  позиција прирубнице, које нису коришћене за калибрацију. Појединостављено, ако је калибрација проведена за једну од комбинација четири одабране позиције прирубнице, валидација резултата калибрације проведена је на основу скупа тачака преосталих 9 позиција прирубница, које нису коришћене за калибрацију. Поступак валидације заснован је на израчунавању одступања координата центра прирубнице (ТСП-а) добијених једначином (7.21) и координата центра прирубнице добијених на основу кинематичког модела. Укупан број могућих сценарија калибрације и њој одговарајуће валидације приказан је у Табели 8.4.

Табела 8.4: Број комбинација за сваки од могућих експеримената калибрације и валидације

Број позиција за калибрацију	Број позиција за валидацију	Број могућих комбинација
4	9	715
5	8	1287
6	7	1716
7	6	1716
8	5	1287
9	4	715
10	3	286

Резултати валидације за сваки експеримент калибрације, који представљају грешку процјене координата ТСП-а, приказани су на Слици 8.12а-в док је норма грешке између процијењених и стварних координата ТСП-а, за сваки сценарио калибрације и одговарајућу валидацију, приказана на Слици 8.12г.



Слика 8.12: Средње вриједности грешака између процијењених и стварних координата ТСР-а за појединачне просторне координате: (а) координата  $X$ , (б) координата  $Y$ , (в) координата  $Z$ , (г) норма средње грешке ТСР-а

## 8.6 Дискусија

У дисертацији је предложено побољшање методологије представљено у [7], са циљем постизања прецизне и флексибилне калибрације система без коришћења калибрационих објеката. Предложен је и реализован систем базиран на роботу и визуелном сензору у конфигурацији са фиксном камером. Предложена методологија калибрације система прилагођена је за систем у статичком режиму рада и заснована на процјени геометријских обиљежја прирубнице манипулатора робота, те коришћењу координата ТСР-а као референтне тачке за калибрацију система.

Узимајући у обзир прецизност и флексибилност процедуре калибрације као једног од основних циљева дисертације, указано је на утицај избора робота и визуелног сензора на постизање жељених исхода. Након анализе постојећих визуелних система који се користе у сврху калибрације, предложен је индустријски 3D скенер

заснован на структурираном свјетлу, као оптималан избор за постизање дефинисаних циљева. Анализом перформанси система може се закључити да предложени скенер посједује значајне предности у односу на већину других визуелних сензора у погледу принципа рада, затим технологије коришћења плаве светлости и других технолошких унапређења. Описан је принцип рада и указано на ограничења предложеног скенера, те проведени експерименти калибрације. Међутим, треба истаћи да поузданост рада скенера директно зависи од квалитета калибрације скенера, док квалитет калибрације зависи од квалитета скупа тачака снимљених у 3D простору. Квалитет снимљених података утиче на резултате калибрације, с обзиром да се користе као референтне тачке, те свака грешка унесена у процес скенирања може довести до грешака у калибрацији и утицати на поузданост рада система. Резултати експеримената верификације, приказани на Слици 8.4, показују лошије индексе перформанси калибрисаног система за мањи број тачака коришћен у процесу калибрације. Овај закључак би се могао сматрати посљедицом постављања препрека с циљем да се постигне заклањање дијела маркера калибрационе табле и постигне губитак тачака за калибрацију. Препреке су углавном позициониране испред рубних дијелова калибрационе табле, што је у процесу калибрације утицало на лошију процјену параметара дисторзије камере, те самим тим и на већу грешку добијену након верификације. У циљу валидације прецизности калибрисаног скенера предложен је додатни експеримент. Резултати експеримената приказани на Слици 8.8 показују боље резултате за предложени поступак валидације у поређењу са процесом који се покреће након процеса калибрације подржан софтверским окружењем за рад са скенером. Међутим, треба узети у обзир да предложена додатна валидација користи значајно мању таблу са мањим бројем маркера, у поређењу са калибрационом таблом. Такође, узимајући у обзир да је мања табла позиционирана на начин да се у свим мјерењима налази у близини центра слике, утицај параметара дисторзије значајно је умањен, што оправдава боље резултате, али намеће додатни захтјев да се за прецизна мјерења објекат од интереса мора позиционирати у центру слике камере. Додатно, предложени поступак валидације истиче потенцијал за употребу анализираног скенера изван оквира прописаног од стране произвођача, те потврђује да је предложени скенер као визуални сензор подобан за употребу у различитим областима примјене, као што је калибрација система заснованог на роботу и визуелном сензору без коришћења калибрационих објеката, те се може сматрати да је приједлог коришћења предложеног скенера као визуелног сензора у потпуности оправдан.

У дисертацији је такође истакнут значај кинематичке калибрације робота као кључног аспекта за поуздано функционисање система. С обзиром да у разматрање нису узета потенцијална одступања геометријских параметара од номиналних вриједности, као ни системске грешке робота, предложена је процедура калибрације ресетовањем нулте позиције робота. Реализовани поступак верификован је анализом поновљивости робота коришћењем предложеног концепта процјене центра прирубнице снимљене 3D скенером. Резултати проведених експеримената резултовали су процјеном поновљивости која износи 0.0214 mm, што представља веома блиску вриједност поновљивости декларисаној у спецификацији произвођача робота.

Истакнуто је да је за калибрацију система робот-визуелни сензор потребно

калибрисати и робот и скенер. Стога, разматране процедуре калибрација скенера и робота, те верификације проведених калибрација, показују да предложени робот и скенер показују задовољавајуће перформансе за провођење калибрације система робот-визуелни сензор.

Надаље, процјена калибрационих параметара заснована је на поједностављеном математичком моделу предложене калибрације, коришћењем центра прирубнице као референтне тачке за калибрацију. Такође, предложен је нови алгоритам за процјену координата ТСП-а заснован на обради скупа 3D тачака прирубнице манипулатора. У поређењу са приступом у [7], гдје су координате ТСП-а процјењене на основу фитовања спољашњег круга прирубнице, усвајајући познату вриједност полупречника дефинисану ISO стандардом, у дисертацији се приступ заснива на идентификацији унутрашњег круга у скупу 3D тачака прирубнице и издвајању тачака које се налазе на идентификованом унутрашњем ободу круга користећи NN методу, без потребе за коришћењем познатих вриједности геометријских обиљежја прирубнице. Предложени приступ не зависи од геометрије прирубнице те потенцијално представља приступ подобан за калибрацију система реализованог произвољним роботом на који је постављена прирубница кружног облика.

Валидација перформанси алгоритма квантификована је коришћењем калибрационог прстена и представља такође нови приступ предложен у дисертацији. Резултати валидације перформанси алгоритма показују висок степен прецизности и поузданости предложеног алгоритма у процјени унутрашњег пречника. Конзистентност перформанси алгоритма потврђена је у свим експериментима, као што је приказано у Табели 8.1. Највеће одступање од средње вриједности пречника износи 0.025 mm. Будући да није било могуће измјерити стварне вриједности координата центра калибрационог прстена изражених у референтном координатном систему скенера, њихову апсолутну вриједност није било могуће узети у разматрање. Стога је анализирана поновљивост алгоритма у контексту процјене координата центра и унутрашњег пречника калибрационог прстена. Резултати, приказани у Табели 8.1, показали су изузетно висок степен поновљивости, при чему највеће процијењено одступање од средње вредности, за појединачну координату, износи 0.013 mm. Додатно, анализирајући расподјелу грешке, приказане на Слици 8.10, за све коришћене позиције калибрационог прстена се може закључити да перформансе предложеног алгоритма показују високу прецизност и поузданост, како у погледу поновљивости процјене координата центара, тако и процјене унутрашњег пречника калибрационог прстена.

Коначно, проведени су експерименти калибрације, као и анализа утицаја броја позиција прирубнице и њихове међусобне просторне конфигурације у радном простору система на резултате калибрације. Током експеримената реализовано је више од 130 снимања прирубнице скенером. На основу добијених скупова 3D тачака, проведено је више од 7700 анализа резултата калибрације система, за све комбинације од 4 до 10 позиција прирубница, те валидација резултата користећи позиције прирубнице које нису коришћене у процесу калибрације. Анализа је започета усвајањем претпоставке да је потребно минимално четири некомпланарне тачке за процјену трансформације између робота и скенера [7]. Као што је очеки-

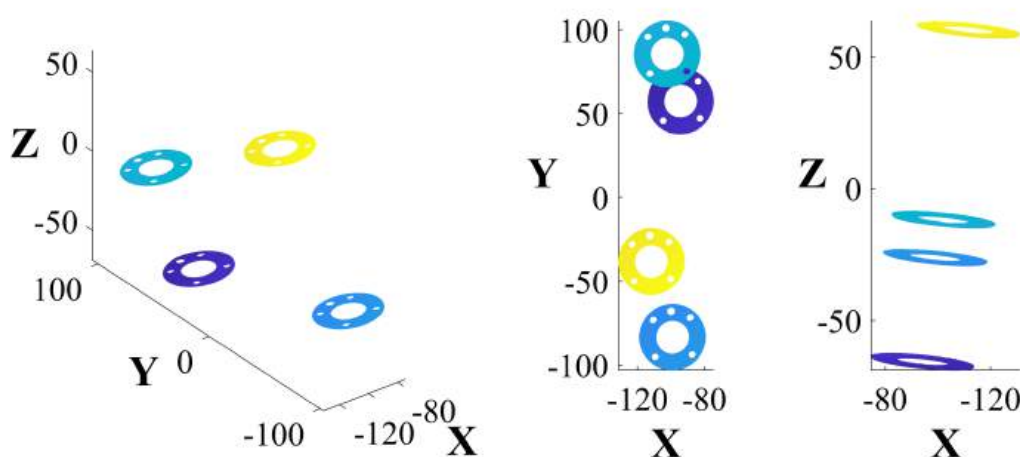
вано, веће грешке се могу уочити у случајевима када се за калибрацију система користи мањи број позиција прирубница, конкретно 4 или 5 позиција прирубница, Слика 8.12. С друге стране, резултати преосталих експеримената, у којим је број позиција прирубница коришћен за калибрацију већи од 5, показали су већу тачност процјене калибрационих параметара којим се постиже прецизност позиционирања ТСП-а са грешком мањом од 0.2 mm за сваку појединачну координату, без обзира на просторну конфигурацију прирубница. Норма грешке, која представља одступање позиција између ТСП-а процијењеног предложеним приступом и кореспондентних позиција ТСП-а добијених на основу кинематичког модела, приказана на Слици 8.12г, показује утицај броја референтних тачака (позиција прирубнице) на квалитет калибрације. Очекивано, са повећањем броја референтних тачака смањује се и грешка одступања, што је ефекат веће тачности процјене калибрационих параметара.

С обзиром на то да је минимизација броја неопходних позиција прирубнице за калибрацију један од основних циљева дисертације, у сврху повећања флексибилности предложене методологије проведена је додатна анализа утицаја броја позиција прирубница и њихових позиција у радном простору на квалитет калибрације. У ту сврху, анализирани су најбољи и најлошији резултати калибрације, приказани у Табели 8.5.

Табела 8.5: Најбоље и најлошије оцијењени резултати калибрације–комбинације позиција прирубнице и одговарајућа норма грешака

Најбоље оцијењени резултати		Најлошије оцијењени резултати	
Комбинација	Норма грешке[mm]	Комбинација	Норма грешке[mm]
1 4 6 7	0.0077	3 4 5 6	331.2842
1 2 3 7 13	0.0019	3 4 5 6 12	1.1011
1 2 4 6 8 12	0.0049	3 5 10 11 12 13	0.3908
2 3 7 9 10 11 13	0.0074	1 2 3 4 11 12 13	0.2562
2 3 8 9 10 11 12 13	0.0071	5 6 7 8 9 10 12 13	0.2284
1 2 3 4 5 7 9 10 13	0.0060	2 3 4 5 6 7 11 12 13	0.2214
1 3 4 5 7 8 10 11 12 13	0.0135	2 3 4 5 6 7 9 11 12 13	0.2229

Табела 8.5 приказује информације о издвојеним резултатима експеримената са фокусом на најбоље и најлошије оцијењене резултате, те комбинацијама позиција прирубница коришћених у поступку калибрације и норме грешке израчунате за издвојене комбинације. Најлошији резултат постигнут је за калибрацију у којој се користе 4 позиције прирубнице, конкретно за избор позиција означених бројевима 3, 4, 5 и 6. Њихов просторни распоред у радном простору система приказан је на Слици 8.13.



Слика 8.13: Позиције прирубнице у радном простору система за које се добија најлошији резултат калибрације

Са Сlike 8.13 се може уочити да су сви центри прирубница готово компланарни, што резултује недостатком информација о простору у ком се налазе остали центри прирубница који се користе за валидацију. Стога, трансформација добијена као резултат калибрације није довољно квалитетна да обезбиди прецизну процјену координата центара прирубница, у односу на референтни координатни систем робота, за прирубнице које нису у близини прирубница коришћених за калибрацију. Надаље, може се закључити да су најлошији резултати очекивано добијени за калибрације које су проведене коришћењем 4 позиције прирубница, те се лако може показати да су и у преосталим комбинацијама, за које су постигнути лоши резултати, центри прирубница такође готово компланарни.

Бољи резултати могу се постићи укључивањем додатних позиција прирубница током процедура калибрације. Ако се анализира претходни најлошије оцијењен резултат калибрације који користи 4 позиције прирубнице, укључивањем додатне позиције, конкретно позиције 12, додаје се центар који није компланаран са већ постојећа 4 центра, те пружа додатне просторне информације и значајно побољшава резултат калибрације. Ово побољшање може се примијетити поређењем одговарајућа два случаја приказана у Табели 8.5. Надаље, укључивање више додатних позиција, што значи да се за калибрацију користи 6, 7, 8, 9, и 10 позиција прирубнице, резултује грешкама калибрације мањим од 0.5 mm.

Међутим, важно је истаћи чињеницу да је процјена калибрационих параметара са високом тачношћу и даље могућа коришћењем само 4 или 5 позиција прирубнице. Просторни распоред ових прирубница може се видети на Сlici 8.11, где су прирубнице означене бројевима 1, 4, 6 и 7 коришћене за калибрацију са 4 прирубнице, док су прирубнице означене бројевима 1, 2, 3, 7 и 13 коришћене за калибрацију са 5 прирубница. За разлику од тестова који показују лошије резултате, може се уочити да је распоред ових прирубница много бољи и повољнији, што потврђује постизање мање грешке одступања координата ТСП-а. Представљена анализа резултата истиче значај стратегије избора броја позиција прирубница и њиховог међусобног позиционирања у планирању процеса калибрације, посебно ако је циљ постизање



високе прецизности и флексибилности како саме процедуре калибрације тако и система у цјелини.

Имајући у виду претходне студије у којим је разматрана калибрација система робот-визуелни сензор без коришћења калибрационих објеката, најбољи резултати постигнути су са грешком одступања жељених и процијењених вриједности појединачних координата референтних тачака реда величине 2 mm [177, 178]. Увидом у релевантну и актуелну литературу, највећи напредак у резултатима калибрације без коришћења калибрационих објеката до сада забиљежен је у [7], гдје је калибрисан систем у конфигурацији са непокретном камером, у статичком режиму рада. Оцјена квалитета калибрације система квантификована је грешком процјене сваке појединачне координате референтне тачке. Резултати проведених експеримената показују да је грешка процјене за сваку од координата референтне тачке мања од грешке постигнуте у раније поменутих радовима, али и даље није мања од 1 mm. Као једну од могућности побољшања тачности аутори су предложили технику компензације грешке. Поред приступа који су засновани на методологији без коришћења калибрационих објеката, уочене су сличности предложеног приступа у дисертацији и са методологијама заснованим на коришћењу калибрационих објеката. У раду [44] предложен је приступ заснован на свођењу референтних тачака калибрационе табле на једну референтну 3D тачку. Сличност предложеног приступа се заснива на коришћењу једне референтне тачке за процјену параметара калибрације методом најмањих квадрата, као што је предложено и у дисертацији. Поређење методологија, резултата и перформанси предложеног приступа са кореспондентним приступима предложеним у [7, 44] дато је у Табели 8.6.

Табела 8.6: Поређење методологија и резултата

Својства	Метод [44]	Метод [7]	Предложени метод [9]
<b>Конфигурација</b>	Са фиксном камером	Са фиксном камером	Са фиксном камером
<b>Антивибрациони сто</b>	Не	Да	Не
<b>Режим рада</b>	Статички	Статички и динамички	Статички
<b>Визуелни сензор</b>	Стерео камера	3D скенер	3D скенер
<b>Референтна тачка</b>	ТСР прирубнице	ТСР прирубнице	ТСР прирубнице
<b>Број коришћених ТСР позиција</b>	80	16	Од 4 до 10
<b>Број коришћених парова тачака</b>	10	16	Од 4 до 10
<b>Минималан број парова тачака</b>	10	16	4
<b>Грешка [mm]</b>	0.45	1 (статички)	0.15

У поређењу с актуелним достигнућима, резултати проведених експеримената калибрације система коришћењем само четири позиције прирубнице истичу знача-

јан допринос приступа предложеног у дисертацији. Анализа експерименталних резултата, показује да предложени приступ омогућава калибрацију система са мањим бројем потребних позиција прирубница, а самим тим и мањим бројем потребних скупова података за калибрацију, и то четири пута мањим у односу на приступ у [7], и скоро три пута у односу на приступ у [44]. Такође, може се закључити да предложени приступ доприноси смањењу сложености како система тако и процеса калибрације, те омогућава смањење времена потребног за поступак калибрације система. Додатно, у поређењу са резултатима представљеним у [7], предложени приступ омогућава процјену калибрационих параметара којом се постиже висока тачност процјене координата ТСП-а, без компензације грешке. Коначно, предложени приступ омогућава процјену координата ТСП-а са мањом грешком у поређењу са горе наведеним приступима, и то више од пет пута мањом грешком у односу на грешку постигнуту у [7], и више од два пута у поређењу са грешком постигнутом у [44].

Предност приступа описаног у [7], у односу на приступ предложен у дисертацији, огледа се у могућности калибрације система у динамичком режиму рада. Међутим, средња вриједност грешке процијењена у овом режиму рада је реда величине десетака милиметара, што представља ограничења могућих примена у пракси. Приступ предложен у статичком режиму рада је сличан приступу предложеном у дисертацији. Међутим, експериментална поставка предложена у [7] подразумијева постављање манипулатора на антивибрациони сто, што није случај са поставком предложеном у дисертацији. Надаље, визуелни систем је такође заснован на технологији структурираног свјетла, али је уведено ограничење постављања визуелног сензора чија је оптичка оса нормална на хоризонталну раван у радном простору робота, те подразумијева позиционирање прирубница на начин да је горња површина прирубнице такође нормална на оптичку осу камере визуелног сензора. За разлику од горе описане поставке, у експериментима представљеним у дисертацији, предложени сензор је постављен поред радног простора робота и оријентисан произвољно, без ограничења да је горња површина прирубнице нормална на оптичку осу камере. Стога је предложени систем погоднији за рад, омогућава брже постављање и не захтијева строга ограничења постављена за експерименталну поставку у [7]. Метод предложен у [7] такође омогућава постизање високе тачности процјене координата ТСП-а са грешком од 0.15 mm. Међутим, за постизање дате тачности, за разлику од метода предложеног у дисертацији, метод представљен у [7] захтијева провођење поступка компензације грешке. Поред значајних квалитета приступа представљеног у [7], приступ предложен у дисертацији показује боље перформансе коришћењем мањег броја тачака без потребе за провођењем поступка компензације грешке.

## 8.7 Кинематичка калибрација манипулатора заснована на предложеној методологији

Тачност и прецизност позиционирања врха алата постављеног на манипулатор робота представљају кључни аспект за поуздано извршавање задатака. Поред ка-

либрације система заснованог на роботу и визуелном сензору, више пута је истакнут значај калибрације робота. Описани су поступци засновани на коришћењу отвореног и затвореног кинематичког ланца те истакнуте њихове предности и недостаци. Наглашено је да мјерење вањских координата манипулатора представља најкритичнији аспект кинематичке калибрације коришћењем методе која се заснива на отвореном кинематичком ланцу. С обзиром на то да је у дисертацији предложен приступ за процјену координата ТСР-а, које у суштини представљају вањске координате манипулатора када на његов врх није постављен алат, анализирана је и могућност примјене предложеног приступа у задацима кинематичке калибрације манипулатора помоћу отвореног кинематичког ланца. Систем заснован на роботу и скенеру калибрисан је уз претпоставку да се за дефинисање кинематичког модела робота користе номинални параметри геометрије, чије су референтне вриједности приказане у Табели 8.7.

Табела 8.7: Номинални параметри геометрије манипулатора у складу са стандардном D-H нотацијом

Редни број зглоба	$\theta$ [rad]	$d$ [mm]	$a$ [mm]	$\alpha$ [rad]	$s$
1	0	295	0	-1.5708	0
2	-1.5708	0	230	0	0
3	1.5708	0	-50	1.5708	0
4	0	270	0	-1.5708	0
5	0	0	0	1.5708	0
6	0	70	0	0	0

У сврху анализе и процјене могућности коришћења предложеног приступа и методологије за калибрацију геометрије манипулатора, предложен је поступак заснован на корекцији референтних вриједности геометрије са циљем добијања нових стварних вриједности параметара геометрије. Најједноставнији приступ који омогућава практичну реализацију заснива се на корекцији вриједности параметра  $\theta$ , који представља угао ротације зглоба. Вриједност параметра  $\theta$ , за сваки од зглобова манипулатора, може се дефинисати као  $\theta_i = q_i + \theta_0^i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , гдје  $q_i$  представља вриједност унутрашње координате  $i$ -тог зглоба, а  $\theta_0^i$  вриједност офсета. Вриједност офсета представља помак угла ротације у односу на референтну вриједност, и последица је иницијалне позиције зглоба или реализоване конструкције самог манипулатора. За разлику од унутрашњих координата које се мијењају у току кретања манипулатора, вриједности офсета су константне. Стога корекције вриједности офсета директно утичу на промјену параметара геометрије, што заправо представља и основну идеју за практичну реализацију кинематичке калибрације манипулатора.

Вриједности у Табели 8.7, које се односе на параметар  $\theta$ , представљају вриједности офсета када се усвоји да су све унутрашње координате једнаке нули. Про-мјена параметара геометрије заснована је на корекцији референтне вриједности офсета  $\theta_0^i$ , за један од зглобова манипулатора. Даљи поступак захтијева довођење

врха манипулатора на позиције у радном простору коришћењем истих вриједности унутрашњих координата као у процесу калибрације интегрисаног система. На овај начин је могуће одредити одступање положаја ТСР-а поређењем измјерених координата и координата добијених из контролера робота за манипулатор са номиналним и коригованим референтним вриједностима геометрије.

Након позиционирања, у свакој од позиција, прирубница робота се снима скенером, а затим се процијењују координате ТСР-а манипулатора коришћењем предложеног алгорита. Коришћењем матрице трансформације, добијене калибрацијом система робот-скенер, и једначине (7.21), процијењене вриједности координата ТСР-а дефинисаних у координатном систему скенера трансформишу се у координате дефинисане у односу на референтни координатни систем манипулатора. Овим поступком су добијене координате ТСР-а, односно измјерене су вањске координате манипулатора. Надаље, вањске координате, унутрашње координате, те референтне вриједности номиналних параметара геометрије су усвојени као улазни параметри у процесу процјене стварних параметара геометрије манипулатора. Кинематичка калибрација заснована је на рјешавању једначине (4.6) коришћењем Levenberg-Marquardt методе, поступком који је описан у раду [12]. Подразумијева се да је претходно проведена калибрација система робот-скенер и да је процијењена трансформациона матрица која описује однос референтних координатних система робота и скенера.

Реализовано је укупно четири експеримента, а у сваком од њих је коригована референтна вриједност једног параметра геометрије и то:

1.  $\theta_2 = q_2 - 0.0349 \text{ rad}$ ,  $0.0349 \text{ rad} \approx 2^\circ$
2.  $\theta_4 = q_4 - 0.1745 \text{ rad}$ ,  $0.1745 \text{ rad} \approx 10^\circ$
3.  $\theta_4 = q_4 + 0.1745 \text{ rad}$ ,  $0.1745 \text{ rad} \approx 10^\circ$
4.  $\theta_5 = q_5 - 0.1745 \text{ rad}$ ,  $0.1745 \text{ rad} \approx 10^\circ$

Даљи ток експеримента обухвата сљедеће кораке:

- Врх манипулатора се позиционира у 13 позиција, као у експериментима описаним за калибрацију система робот-скенер
- Након позиционирања, скенером се снима прирубница робота и проводи раније описана процедура процјене координата ТСР-а
- Процијењене координате ТСР-а се трансформишу у координате дефинисане у референтном координатном систему робота коришћењем матрице трансформације добијене калибрацијом система робот-скенер
- Коришћењем добијених података о вањским и унутрашњим координатама манипулатора, те референтних вриједности номиналне геометрије манипулатора као почетне процјене, реализује се поступак процјене стварних параметара геометрије манипулатора.

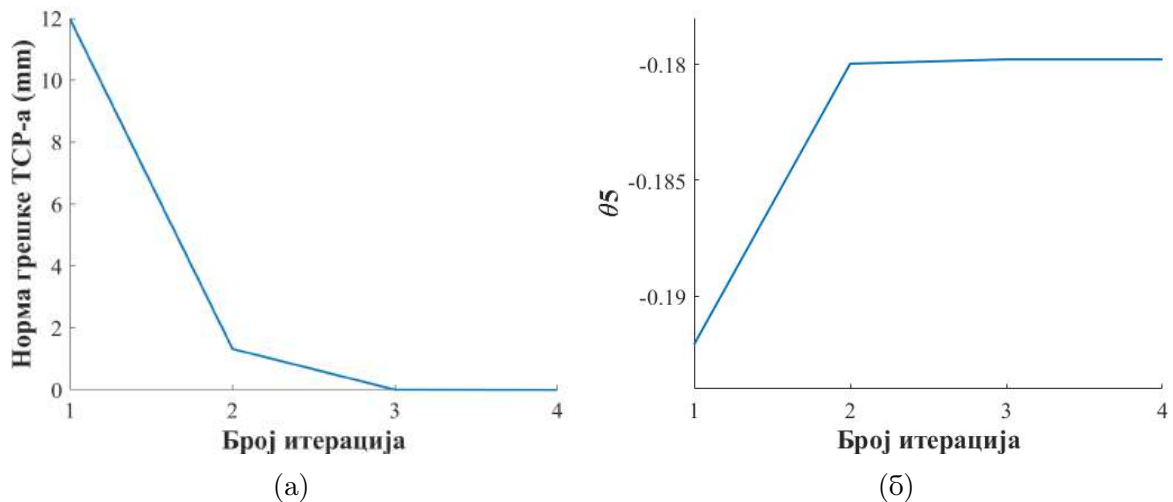
Како би се фокус ставио на детаљнију анализу добијених резултата, у даљем тексту ће бити изложени резултати посљедњег експеримента ( $\theta_5 = q_5 - 0.1745 \text{ rad}$ ), с обзиром да су резултати осталих експеримената веома слични.

Усвојене су референтне вриједности номиналних параметара геометрије датих у Табели 8.7, док су референтне вриједности геометрије манипулатора за одабрани експеримент приказане у Табели 8.8.

Табела 8.8: Референтне вриједности параметара геометрије манипулатора у складу са дефинисаном корекцијом за пети зглоб  $\theta_5 = q_5 - 0.1745 \text{ rad}$

Редни број зглоба	$\theta[\text{rad}]$	$d[\text{mm}]$	$a[\text{mm}]$	$\alpha[\text{rad}]$	$s$
1	0	295	0	-1.5708	0
2	-1.5708	0	230	0	0
3	1.5708	0	-50	1.5708	0
4	0	270	0	-1.5708	0
5	<b>-0.1745</b>	0	0	1.5708	0
6	0	70	0	0	0

Процјена параметара геометрије манипулатора заснована је на минимизацији грешке позиције врха манипулатора, при чему се као критеријум користи разлика позиција добијених моделом на бази номиналних и процијењених параметара геометрије. Задата толеранција норме грешке позиције врха манипулатора износи  $\Delta X = 0.00001 \text{ mm}$ . За експеримент који подразумијева корекцију референтне вриједности петог зглоба, означену црвеном бојом у Табели 8.8, резултати калибрације приказани су на Слици 8.14.



Слика 8.14: Калибрација параметара геометрије за случај  $\theta_5 = q_5 - 0.1745 \text{ rad}$ : (а) Вриједности норме грешке позиције врха манипулатора, (б) Вриједности коригованог параметра процијењене у току калибрације

На Слици 8.14а су приказане вриједности норме грешке позиције врха манипулатора, док су на Слици 8.14б приказане вриједности коригованог параметра процијењене у току калибрације. Вриједности параметра геометрије и норме грешке позиције ТСП-а за сваку итерацију дате су у Табели 8.9.

Табела 8.9: Норма грешке позиције врха манипулатора и вриједности параметра геометрије  $\theta_5$ , процијењеног у току калибрације

Редни број итерације	Норма грешке ТСП-а [mm]	$\theta_5$ [rad]
1	11.97003	-0.19208
2	1.32575	-0.17998
3	0.00794	-0.17979
4	0.00002	-0.17979

Коначно, процијењене вриједности параметара геометрије манипулатора дате су у Табели 8.10.

Табела 8.10: Процијењене вриједности параметара геометрије манипулатора поступком кинематичке калибрације

Редни број зглоба	$\theta$ [rad]	$d$ [mm]	$a$ [mm]	$\alpha$ [rad]	$s$
1	-0.0066	294.9965	-0.0029	-1.5935	0
2	-1.5703	0.0002	229.9951	0.0133	0
3	1.5700	0.0002	-50.0018	1.5678	0
4	0.0060	270.0025	0.0013	-1.5893	0
5	<b>-0.1798</b>	-0.0000	-0.0026	1.5721	0
6	0.0000	69.9972	0.0025	0.0000	0

Резултати provedеног експеримента показују задовољавајућу процјену параметара геометрије. На Слици 8.14а се може уочити да уколико се референтна вриједност параметра  $\theta_5$  промијени за  $-0.1745$  радијана, врх манипулатора одступа за 11.97 милиметара у односу на позицију са номиналном геометријом. Међутим, предложени алгоритам за калибрацију врло брзо конвергира, при чему своди грешку позиције врха манипулатора на вриједност испод задане толеранције. Брзина конвергенције огледа се и у малом броју итерација потребном за процјену параметара геометрије. Ово је прије свега посљедица коришћења номиналне геометрије као почетне процјене у поступку калибрације, као и чињенице да је коригован само један параметар геометрије манипулатора. Надаље, са Слике 8.14б се може закључити да вриједност параметра геометрије  $\theta_5$  достиже вриједност блиску заданом помјерају. Имајући у виду да је офсет петог зглоба за номиналну геометрију једнак нули, у овом експерименту је очекивано да вриједност параметра геометрије конвергира ка дефинисаној корекцији која износи  $-0.1745$  rad.

Анализа резултата експеримената проведених коришћењем предложене методологије, показује велики потенцијал за примјену у процедурама кинематичке калибрације манипулатора помоћу отвореног кинематичког ланца. Уколико се узме у обзир поузданост и тачност процјене координата ТСП-а манипулатора, представљених у дисертацији, може се закључити да би се предложени поступак могао користити за мјерење координата врха манипулатора, односно мјерење вањских координата у сврху калибрације геометрије манипулатора. Поред чињенице да су се стекли услови за мјерење вањских координата, треба имати у виду да је проблем кинематичке калибрације манипулатора разматран у радовима [12, 13], те да су предложени алгоритми за побољшање конвергенције алгоритама за калибрацију геометрије робота. Додатна мотивација за разматрање кинематичке калибрације манипулатора дата је у раду [179]. Аутори у раду предлажу поступак симултане калибрације система робот-визуелни сензор и калибрације геометрије манипулатора. Овакав приступ пружа могућност значајног побољшања тачности позиционирања робота.

Представљени резултати потврђују претпоставку да се предложени приступ може користити у сврху кинематичке калибрације манипулатора. Процјена параметара геометрије у свим експериментима резултовала је конвергенцијом ка вриједностима које су веома блиске вриједностима номиналних параметара геометрије. Посебно је важно напоменути конвергенцију процјене параметара чији офсет је коригован, што додатно потврђује претпоставку да је предложени приступ погодан за калибрацију параметара геометрије манипулатора. С друге стране, постоје и правци истраживања који би потенцијално могли побољшати представљене резултате. Поред раније изведених закључака, треба истаћи да тачност одређивања позиције ТСП-а, коју одређује визуелни систем, зависи од положаја ТСП-а у радном простору и квалитета визуелног система. Представљени резултати показују утицај промјене само једног параметра геометрије, што отвара могућност даљег проширења анализе. Треба нагласити и то да је као почетна процјена параметара геометрије коришћена номинална геометрија, те да нису анализирани велике промјене параметара нити промјене више од једног параметра, што би додатно допринијело анализи робустности и ефикасности предложеног приступа и алгоритма за кинематичку калибрацију манипулатора. Узимајући у обзир наведене препоруке може се закључити да постоји потенцијал за даље унапређење представљених резултата, те ће наведени аспекти као и цјелокупан поступак кинематичке калибрације манипулатора коришћењем приступа предложеног у дисертацији бити у фокусу будућег научно-истраживачког рада.

# Глава 9

## Закључак

Савремени трендови развоја роботике усмјерени су на развој прецизних и флексибилних роботизованих система који се могу користити у различитим задацима, при чему се посебан значај истиче у областима сарадње робота и човјека, те развоју роботизованих система који посједују способност аутономног доношења одлука.

Проблеми позиционирања алата постављеног на врх манипулатора у његовом радном простору и генерисање путања за тачно и прецизно кретања алата постали су кључни разлог за опремање роботских ћелија, као и самих манипулатора, додатним сензорима који омогућавају прецизно и ефикасно извршавање поменутих задатака. Повећање флексибилности роботизованих система се у почетку заснивало на могућности брзе и прецизне замјене алата, што је омогућавало рад система на различитим задацима. Међутим, примјена додатних сензора отворила је нове правце којим се постиже повећање и прецизности и флексибилности постојећих система заснованих на роботима.

С тим у вези, кључну компоненту модерне роботике представљају визуелни сензори. Њихова примјена је значајно утицала на повећање прецизности и флексибилности индустријских робота, те пружила могућност перцепције, навигације и интеракције у радном простору робота. За разлику од осталих сензорских технологија, визуелни сензори су омогућили највећи ниво унапређења, имајући у виду да коришћењем адекватних алгоритама и комуникационих протокола обезбјеђују прикупљање и обраду информација из радног простора, омогућавају креирање управљачких структура и рад заснован на информацијама добијеним визуелним сензором, што такве системе сврстава у домен система који су у могућности да аутономно извршавају одређене задатке.

Коришћење визуелног сензора најприје захтијева интегрисање визуелног сензора и манипулатора у јединствен систем. Поступак интеграције подразумијева дефинисање конфигурације система, затим калибрацију визуелног сензора, калибрацију манипулатора, дефинисање математичког модела, избор метода за рјешавање проблема калибрације и коначно калибрацију интегрисаног система заснованог на манипулатору и визуелном сензору. Сваки од наведених задатака представља посебан аспект који утиче на перформансе система.



---

Дисертација је посвећена повећању прецизности и флексибилности работа провођењем поступка калибрације система заснованог на манипулатору и визуелном сензору, која не захтијева коришћење стандардних калибрационих објеката или маркера.

Анализа резултата добијених примјеном традиционалних процедура калибрације, које подразумијевају коришћење калибрационих објеката или маркера, довела је до закључка да је смањење растојања између исходишта референтног координатног система калибрационог објекта или маркера, који се постављају на врх манипулатора у сврху калибрације, и ТСП-а манипулатора један од кључних аспеката који утичу на побољшање резултата у процесу калибрације система манипулатор–визуелни сензор.

Узимајући у обзир чињеницу да координате центра прирубнице манипулатора представљају његов ТСП у складу с кинематичким моделом, у раду је предложена процедура која се заснива на коришћењу прирубнице манипулатора као калибрационог објекта и усвајању центра прирубнице као референтне тачке за калибрацију. На овај начин центар прирубнице представља виртуелни маркер за калибрацију чије исходиште је поклопљено са исходиштем координатног система ТСП-а, чиме је у потпуности задовољена раније истакнута препорука. Прирубница манипулатора као калибрациони објекат додатно је оправдана чињеницом да су њен облик и геометријска обиљежја дефинисани ISO стандардом. Стандардизација прирубница манипулатора додатно истиче значај предложеног рјешења, узимајући у обзир да се резултати предложени у раду могу користити или прилагодити за калибрацију система у које се интегришу различити типови манипулатора, на чији врх је постављена прирубница сличног геометријског облика.

Процјена координата центра прирубнице заснована је на технологијама рачунарског вида, и представља кључни аспект у реализацији процедуре калибрације који је неопходно реализовати тачно и прецизно. Стога је у раду најприје представљена анализа визуелних система, те истакнуте њихове предности и недостаци, са фокусом на могућност снимања прирубнице манипулатора и постизања најбољих могућих предуслова за прецизну процјену координата њеног центра, базирану на обради прикупљених визуелних информација. Узимајући у обзир карактеристике представљених визуелних сензора, индустријски 3D скенер, познат под називом Comet L3D 5M, предложен је као визуелни сензор за реализацију система и прикупљање визуелних информација о прирубници манипулатора у сврху калибрације. Предложени скенер представља оптички мјерни систем реализован са једном камером и једним пројектором, чији рад је заснован на структурираном свјетлу плаве боје. Истакнуте су предности и могућности предложеног скенера за постизање високе тачности калибрације. Поред стандардних карактеристика скенер пружа могућност коришћења различитих објектива за камеру и пројектор, што омогућава постизање видног поља различитих величина, као и промјену радне удаљености, те га чини погодним за употребу са различитим индустријским роботима и радним окружењима. Коришћење предложеног сензора омогућило је снимање веома квалитетног скупа 3D тачака прирубнице, те створило предуслове за квалитетну анализу и процјену њених геометријских обиљежја.

---

Први корак у постизању дефинисаних циљева представља реализација система коришћењем индустријског робота и индустријског 3D скенера. Предложени систем реализован је у конфигурацији са фиксним визуелним сензором. Истакнут је значај калибрације како робота тако и скенера, као кључни предуслов за постизање жељених перформанси система. Описане су процедуре калибрација манипулатора и скенера, те представљени резултати верификација проведених калибрација.

Дефинисан је математички модел предложеног поступка калибрације заснован на коришћењу координата центра прирубнице као референтне тачке за калибрацију. Дефинисање модела базирано је на симплификацији традиционалног поступка калибрације система манипулатор–визуелни сензор, за који је неопходно користити калибрациони објекат. Процјену параметара калибрације система предложени модел заснива на примјени метода најмањих квадрата, коришћењем само једначине транслације и свођењем зависности поступка о калибрационим објектима на употребу једне 3D тачке (ТСР-а) за калибрацију.

За процјену координата ТСР-а, предложен је алгоритам заснован на обради скупа 3D тачака прирубнице, снимљених предложеним 3D скенером. Координате центра прирубнице процјењују се процјеном њених геометријских обиљежја поступком идентификације и издвајања тачака које се налазе у близини обода унутрашњег отвора прирубнице, те коришћењем 3D кружнице која се фитује кроз издвојене тачке.

Имајући у виду раније напомене да је у циљу постизања квалитетне калибрације неопходно најприје обезбиједити прецизну процјену координата ТСР-а, валидација перформанси предложеног алгоритма проведена је коришћењем калибрационог прстена. Поступак валидације предложен је узимајући у обзир сличност калибрационог прстена и прирубнице манипулатора, као и прецизност израде предложеног прстена као калибрационог еталона. Процјена геометријских обиљежја предложеног прстена послужила је за оцјену поузданости и прецизности процјене координата његовог центра, имајући у виду да су дефинисане толеранције калибрационог еталона вишеструко строжије од дозвољених толеранција дефинисаних ISO стандардом за прирубнице манипулатора. Резултати проведених експеримената показали су да је предложени алгоритам погодан за обраду скупа 3D тачака прирубнице, уз могућност прецизне и поуздане процјене координата њеног центра.

Важно је истаћи да је у раду предложена процедура са фокусом на калибрацију система, без разматрања перформанси система које подразумијевају рад система заснован на визуелним информацијама, те да резултати проведених експеримената калибрације система потврђују дефинисане хипотезе.

Анализа резултата показује да предложена процедура омогућава калибрацију система коришћењем прирубнице као калибрационог објекта, са високом прецизношћу. Анализа стратегије избора позиција и броја референтних тачака за калибрацију показала је да предложена процедура омогућава повећање флексибилности система уз конзистентно постизање високе прецизности. Избор мањег броја адекватно одабраних референтних тачака директно утиче на смањење комплексности процедуре калибрације, затим смањује вријеме потребно за припрему и реализаци-

---

ју поступка калибрације система, те смањује рачунарску комплексност, потребу за већим меморијским и процесорским ресурсима и смањује утицај људског фактора на ефикасност и тачност процеса калибрације.

Резултати представљени у дисертацији, у поређењу са резултатима у релевантној литератури, показују да је могуће постићи повећање флексибилности система смањењем броја референтних тачака потребних за калибрацију, те истовремено постићи квалитетну калибрацију система и омогућити процјену координата ТСР-а са високом тачношћу, без потребе за компензацијом грешке.

Важно је истаћи да предложена процедура калибрације не захтијева дефинисање посебних амбијенталних услова, затим додатну опрему попут антивибрационих столова, нити захтијева специфичан начин постављања робота и 3D скенера у циљу добијања представљених резултата. Предложена процедура калибрације, захваљујући поузданом алгоритму за обраду скупа 3D тачака прирубнице и прецизној процјени геометријских обиљежја, представља процедуру која има потенцијал за универзалну примјену у процедурама калибрације система реализованих различитим типовима робота и визуелних система. Ограничење које намеће примјена предложеног алгоритма заснива се на томе да је потребно користити роботски манипулатор на чијем врху је постављена прирубница кружног облика, те да се као визуелни сензор користи сензор чији рад је заснован на снимању 3D скупа тачака.

Наведена ограничења могу се посматрати као смјернице за будући рад. Предложени алгоритам би могао бити унапријеђен у циљу процјене геометријских обиљежја прирубнице произвољног облика. Надаље, систем је реализован у конфигурацији са фиксним визуелним сензором, те је калибрација система могућа само у статичком режиму рада. Разматрање примјене сензора који омогућава рад у динамичком режиму рада омогућио би праћење ТСР-а, те створио потенцијал за реализацију система погодног за рад заснован на визуелним информацијама.

Важно је истаћи и чињеницу да предложена методологија представља платформу погодну за кинематичку калибрацију манипулатора. Истакнуто је да мјерење вањских координата манипулатора представља најтежи и најосјетљивији дио калибрације коришћењем отвореног кинематичког ланца. С обзиром на цијену мјерних уређаја, као и комплексност процедуре мјерења, мјерење вањских координата манипулатора могуће је постићи директним поступком описаним у дисертацији. На овај начин могуће је истовремено реализовати калибрацију система заснованог на манипулатору и визуелном сензору с једне стране, те калибрацију геометрије манипулатора с друге. Наведени приступ поред прецизне и поуздане калибрације интегрисаног система, омогућава и повећање прецизности позиционирања врха манипулатора у радном простору, што омогућава не само постизање квалитетне калибрације већ и унапређење перформанси система. Систем калибрисан на претходно описани начин омогућава реализацију управљачких структура заснованих на визуелним информацијама, и омогућава да се навигација у радном простору, праћење путање и манипулација објектима реализује са високом прецизношћу.



Кинематички модел робота Mitsubishi RV-2SDB, дефинисан стандардном D-H нотацијом, дат је у Табели А.1:

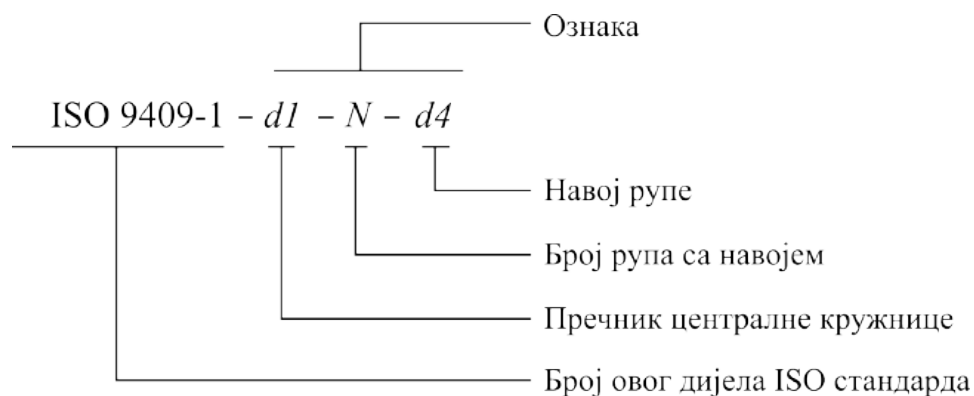
Табела А.1: Параметри геометрије манипулатора у складу са стандардном D-H нотацијом

Редни број зглоба	$\theta$ [rad]	$d$ [mm]	$a$ [mm]	$\alpha$ [rad]	$s$
<b>1</b>	$q_1$	295	0	-1.5708	0
<b>2</b>	$q_2 - 1.5708$	0	230	0	0
<b>3</b>	$q_3 + 1.5708$	0	-50	1.5708	0
<b>4</b>	$q_4$	270	0	-1.5708	0
<b>5</b>	$q_5$	0	0	1.5708	0
<b>6</b>	$q_6$	70	0	0	0

## Додатак Б

# Прирубница робота Mitsubishi RV-2SDB

Формат означавања прирубница робота дефинисан ISO стандардом дат је на Слици Б.1.



Слика Б.1: Формат означавања прирубница робота

Техничке карактеристике различитих типова прирубница, укључујући и карактеристике прирубнице постављене на робот Mitsubishi RV-2SDB, дате су у Табели Б.1.

Табела Б.1: Техничке карактеристике различитих типова прирубница робота

Позиција	Пречник централне кружнице, $d_1$		$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	Број рупа
	Серија 1	Серија 2	$H8$	$H7$		$H7$	
1	25		34	16	M4	4	4
<b>2</b>		<b>31.5</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>M5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
3	40		50	25	M6	6	4
4		50	63	31.5	M6	6	4
5	63		80	40	M6	6	4

Позиција 2, у Табели Б.1, представља спецификацију прирубнице за робот Mitsubishi RV-2SDB. Ознака прирубнице за робот Mitsubishi RV-2SDB представља се на следећи начин: ISO 9409-1-31.5-4-M5.

## Додатак В

# 3D скенер Comet L3D 5M

Техничка спецификација и карактеристике скенера Comet L3D 5M представљене су у Табели В.1

Табела В.1: Техничка спецификација и карактеристике скенера

COMET L3D 5M	
Резолуција камере	2448 × 2050
Волумен мјерења у mm <sup>3</sup>	
45	45 × 38 × 30
75	74 × 62 × 45
100	120 × 100 × 60
250	260 × 215 × 140
500	480 × 400 × 250
800	750 × 630 × 500
3D растојање тачака у μm 45 / 75 / 100	18 / 30 / 50
3D растојање тачака у μm 250 / 500 / 800	100 / 190 / 300
Радна дистанца / Одстојање ( <i>FOV</i> 45 / 75 / 100 / 250 / 800)	760 mm
Радна дистанца / Одстојање ( <i>FOV</i> 800)	1185 mm
Димензије сензора	430 × 158 × 265 mm <sup>3</sup>
Тежина сензора	~ 6 kg
Потрошња енергије током мјерења приближно	120 W
Потрошња енергије са искљученом лампом приближно	40 W
Радна температура	+10 °C ... +35 °C
Температурни опсег за мјерење	±3.5 °C



## Додатак Г

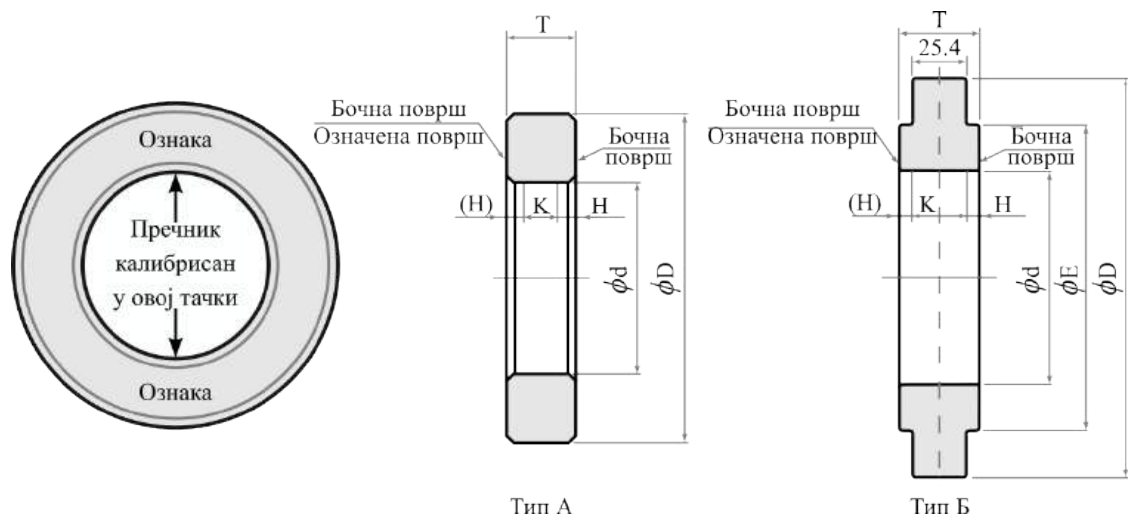
# Калибрациони прстен Mitutoyo NO. 177-290 (2011160)

Техничка спецификација и карактеристике калибрационог прстена Mitutoyo NO. 177-290 (2011160) представљене су у Табели Г.1.

Табела Г.1: Техничка спецификација и карактеристике калибрационог прстена

Mitutoyo NO. 177-290 (2011160)	
Номинална величина	40 mm
Толеранција између номиналног и стварног пречника	$\pm 0.010$ mm
Несигурност означене вриједности пречника	$\pm 0.0015$ mm
Заобљеност/цилиндричност	0.001 mm
Растојање од бочне површине ( $H$ )	3.2 mm
Страна гарантоване калибрационе површине ( $K$ )	8.6 mm
Вањски пречник	71 mm
Дебљина	15 mm
Тип	A

Скица калибрационог прстена и техничке карактеристике коришћеног и сличних калибрационих прстена дати су на Слици Г.1.



Слика Г.1: Скица калибрационог прстена

# Библиографија

- [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 Tsymbal 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. Poboljšanje 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 korendentnih 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 Arbter, 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  $\mathbf{x}$  in  $\mathbf{ax} = \mathbf{xb}$ . *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  $\mathbf{ax}=\mathbf{xb}$  sensor calibration problem. *Mechanism and Machine Theory*, 104:382–404, 2016.
- [78] Condurache Daniel and Ioan-Adrian Ciureanu. A novel solution for  $\mathbf{ax}=\mathbf{yb}$  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. Markerless 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, Sehyung 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 Jianda 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 manipulatora, 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\(VVertical\)/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(VVertical)/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  $\mathbf{AXB} = \mathbf{YCZ}$  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.

## Биографија аутора

Велибор Ђалић, рођен 29.07.1982. године у Чајничу, гдје је завршио основну школу "Јован Дучић" и средњу економску школу "Петар Петровић Његош". Завршио студије на Факултету техничких наука у Новом Саду, на Одсјеку за рачунарство и аутоматику, смјер аутоматика и управљање системима, те стекао звање дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства–мастер. По завршетку студија се запослио у ЗП "Електродистрибуција" а.д. Пале. Од 2010. године запослен као сарадник на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци, у научном звању асистента, а од 2013. године у звању вишег асистента. Аутор је и коаутор научних радова публикованих у часописима и на конференцијама. Његова главна истраживачка интересовања су у области управљања системима, роботизи и примјени технологија рачунарског вида у роботизи.

Изјава 1

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

**Изјављујем  
да је докторска дисертација**

Наслов рада „Повећање прецизности и флексибилности робота примјеном визуелног система без коришћења калибрационог објекта“

Наслов рада на енглеском језику „Improving the precision and flexibility of robots by using a visual system without a calibration object“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да докторска дисертација, у цјелини или у дијеловима, није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци, дана 05.12.2024. године

Потпис докторанта

Велибор Ђалић, с.р.

---

## Изјава 2

### Изјава којом се овлашћује Универзитет у Бањој Луци да докторску дисертацију учини јавно доступном

Овлашћујем Универзитет у Бањој Луци да моју докторску дисертацију под насловом

„Повећање прецизности и флексибилности робота примјеном визуелног система без коришћења калибрационог објекта“,  
која је моје ауторско дјело, учини јавно доступном.

Докторску дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*) за коју сам се одлучио.

- Ауторство
- Ауторство - некомерцијално
- Ауторство - некомерцијално - без прераде
- Ауторство - некомерцијално - дијелити под истим условима
- Ауторство - без прераде
- Ауторство - дијелити под истим условима

У Бањој Луци, дана 05.12.2024. године

Потпис докторанта

Велибор Ђалић, с.р.

### Изјава 3

## Изјава о идентичности штампане и електронске верзије докторске дисертације

Име и презиме аутора Велибор Ђалић

Наслов рада

Повећање прецизности и флексибилности робота  
примјеном визуелног система без коришћења  
калибрационог објекта

Ментор I

Проф. др Петар Марић, редовни професор

Ментор II

Проф. др Коста Јовановић, ванредни професор

Изјављујем да је штампана верзија моје докторске дисертације идентична електронској верзији коју сам предао за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци, дана 05.12.2024. године

Потпис докторанта

Велибор Ђалић, с.р.

---



**ИЗВЈЕШТАЈ**  
*о оцјени урађене докторске дисертације*

**1. ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ**

Орган који је именовао 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:	120	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 публикавању 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>		ДА	<u>НЕ</u>
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	
<i>Кратак опис садржаја:</i> 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 примијенити у поступку испитивања поновљивости манипулатора.			
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u>	НЕ
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	
<i>Кратак опис садржаја:</i> 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>		<u>ДА</u>	НЕ
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	
<i>Кратак опис садржаја:</i> 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>		<u>ДА</u>	НЕ

РБ	Подаци о референци	Категорија
8.	Косић Д., Ђалић В., 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
<p><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.</p>		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u> НЕ
РБ	Подаци о референци	Категорија
9.	Ђалић В., Марић П., “Reliable automatic recognition of manipulator’s end-effector using robot vision”, Proc. of International Scientific Conference UNITECH’11, p. 564-568, Gаброво, November 2011.	Научни рад на научном скупу међународног значаја, штампан у цјелини
<p><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 проведених експеримената потврђују да се помоћу SIFT алгоритма успјешно детектује предложени маркер. Такође, потврђена је инваријантност карактеристичних региона на маркеру.</p>		
<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., Đalić V., “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
<p><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.</p>		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u> НЕ
РБ	Подаци о референци	Категорија
11.	V. Djalic, P. Maric, D. Kotic, 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
<p><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.</p>		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b> НЕ
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
<p><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.</p>		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<b><u>ДА</u></b> НЕ
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
<p><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</p>		

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>		<u>ДА</u> НЕ
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 INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/INFOTEH53737.2022.9751291.	Зборник радова међународног научног скупа прве категорије
<i>Кратак опис садржаја:</i> Овај рад приказује процјену тачности индустријског оптичког скенера заснованог на структурираној свјетлости. Comet LED 5М 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.		
<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u> НЕ
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)
<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.		

<b>Припадност рада ужој научној области којој припада предмет истраживања докторске дисертације</b>		<u>ДА</u>	НЕ
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 INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/INFOTEH60418.2024.10495983	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>		<u>ДА</u>	НЕ
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>		<u>ДА</u>	НЕ

### 3. УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСKE 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 слиједи 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.	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Наслов докторске дисертације.</li> <li>2. Научно поље и ужа научна област.</li> <li>3. Датум прихватања теме докторске дисертације и бројеви одлука одговарајућих органа чланица и Универзитета.</li> <li>4. Датум прихватања Извјештаја комисије за оцјену подобности студента, теме и ментора за израду докторске дисертације и бројеви одлука одговарајућих органа чланица и Универзитета.</li> <li>5. Садржај докторске дисертације уз навођење броја страна.</li> <li>6. Истаћи основне податке о докторској дисертацији: обавезно укључујући обим, број и називе поглавља, број табела, слика, шема, графикана и број литературних навода.</li> </ol>	

#### 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 translације. 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 translације 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 роботизи 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, елиминише 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 алгоритма 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:

Х1. 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.

Х2. Коришћењем предложеног приступа могуће је постићи веома тачну калибрацију, при чему је грешка калибрације мања од једног милиметра.

Х3. 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 НЕ калибрације [49–54]. Као што је већ напоменуто, процедура калибрације НЕ система подразумева 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*), елиминише 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 (ТСП) 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 Tsymbal 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. Pобољшање конвергенције algoritama за kalibraciju geometrije робота. 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, Wenyuan 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 reprojection 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  $axx = xxbb$ . *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 Valdastri. 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) camera: 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, Yongduuk 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://support.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://support.siriustrading.ro/02.DocArh/07.RI/03.Seria%20RV%20\(Vertical\)/05.RV-SD/01.Manuale/RV-2SD%20-%20Instruction%20Manual%20\(Arm%20Setup,%20Maintenance\)%20BFP-A8791-D%20\(05.11\).pdf](https://support.siriustrading.ro/02.DocArh/07.RI/03.Seria%20RV%20(Vertical)/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 аутоматику, 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 РISOЈЕВИЋ, 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).