

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Никола М. Кнежевић

УПРАВЉАЊЕ РОБОТА У ФИЗИЧКОЈ
ИНТЕРАКЦИЈИ СА ОКОЛИНОМ И САРАДЊИ
СА ЧОВЕКОМ ЗАСНОВАНО НА ТЕХНИКАМА
УЧЕЊА И ОПТИМИЗАЦИЈЕ

докторска дисертација

Београд, 2024.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Nikola M. Knežević

CONTROL OF ROBOTS IN PHYSICAL
INTERACTION WITH THE ENVIRONMENT AND
COOPERATION WITH HUMANS BASED ON
LEARNING AND OPTIMIZATION TECHNIQUES

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024

Ментор:

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

Чланови комисије:

др Жељко Ђуровић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

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

др Арсо Вукићевић, доцент,
Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука

др Александра Крстић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Андреј Савић, виши научни сарадник,
Универзитет у Београд, Електротехнички факултет

Наслов дисертације: Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације

Апстракт: Дисертација обрађује методе и приступе управљања робота у физичкој интеракцији са околином и човеком.

Као основни елемент Индустрије 5.0 која ставља човека у центар производног процеса, предлаже се изглед неуроергономске радне станице са колаборативним роботом. Предложена архитектура садржи пет модула (процена физичког и менталног стања, физичка, нефизичка, и стратешка подршка) за повећање продуктивности уз смањење менталног оптерећења. Неуроергономска радна станица је демонстрирана у фабричком окружењу на процесу колаборативне монтаже. За потребе демонстрације развијени су модули: неинвазивни интерфејс са роботом, мозак-рачунар интерфејс, асистивни модул у виду колаборативног робота, и адаптивни графички интерфејс.

Даља унапређења ефикасности и безбедности колаборативног рада робота и човека су приказана кроз новоразвијени алгоритам обликовања крутости завршног уређаја. Предложена је геометријска интерпретација у виду елипсоида крутости као интуитивнијег начина презентације и задавања матрице крутости од стране човека. Алгоритам је базиран на секвенцијалном квадратном програмирању погодном за нелинеарне проблеме. Перформансе предложеног приступа су експериментално потврђене на два задатка: провлачење шрафа кроз алуминијумски профил и сечење.

Како би развијене методе управљања интеракцијом биле применљиве и на најновију генерацију колаборативних робота са актуаторима променљиве крутости, предлаже се употреба машинског учења са итеративним особинама за моделовање таквих актуатора. Коришћен је алгоритам заснован на регресији за учење модела уз присуство несиметрије и трења, док су особине инкременталног учења искоришћене за праћење параметра еластичног елемента услед експлоатације. Перформансе управљања робота погоњеног актуаторима променљиве крутости експериментално су верификоване на роботу са четири степена слободе и бидирекционим антагонистичким погонима у присуству случајно генерисаних пертурбација, где је за изазивање пертурбација коришћен колаборативни робот и сензор силе и момента.

Кључне речи: физичка интеракција робота и човека; неуроергономска радна станица, колаборативни роботи, обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, локално пондерисана линеарна регресија, итеративно учење.

Научна област: Електротехника и рачунарство

Научна подобласт: Роботика и управљање системима

Dissertation title: Control of robots in physical interaction with the environment and cooperation with humans based on learning and optimization techniques

Abstract: The dissertation explores methods and approaches for controlling robots in physical interaction with the environment and humans.

As a main pillar of Industry 5.0, which places humans at the center of the production process, a neuroergonomic workstation with a collaborative robot is proposed. The proposed architecture contains five modules (assessment of physical and mental states, physical, non-physical, and strategic support) to increase productivity while reducing mental workload. The neuroergonomic workstation is demonstrated in a factory environment in the collaborative assembly process. For demonstration purposes, modules were developed: a non-invasive robot interface, a brain-computer interface, an assistive module in the form of a collaborative robot, and an adaptive graphical interface.

Further improvements in the efficiency and safety in collaboration of collaborative robots and humans are demonstrated through a newly developed algorithm for shaping the stiffness of the end effector. A geometric interpretation is proposed in the form of a stiffness ellipsoid as a more intuitive way of presenting and setting stiffness matrices by humans. The algorithm is based on sequential quadratic programming suitable for nonlinear problems. The performance of the proposed approach is experimentally confirmed on two tasks: pulling bolt through an aluminum profile and cutting.

In order for the developed control methods to be applicable to the latest generation of collaborative robots with variable stiffness actuators, the use of machine learning with iterative properties is proposed to model such actuators. An algorithm based on regression was used to learn the model in the presence of asymmetry and friction, while incremental learning properties were utilized to track the parameters of the elastic element during exploitation. The performance of controlling a robot powered by variable stiffness actuators was experimentally verified on a four-degree-of-freedom robot with bidirectional antagonistic actuators in the presence of randomly generated perturbations, where a collaborative robot and a force and moment sensor were used to induce perturbations.

Keywords: physical human-robot interaction, neuroergonomic workstation, collaborative robots, shaping Cartesian stiffness of end effector, locally weighted linear regression, iterative learning.

Scientific field: Electrical and Computer Engineering

Scientific subfield: Robotics and Control Systems

Садржај

Апстракт	ii
1 Увод	1
1.1 Предмет, циљ и значај истраживања	1
1.2 Полазне хипотезе	5
1.3 Ток истраживања	6
1.4 Научни доприноси дисертације и одабране публикације	7
1.5 Структура докторске дисертације	9
2 Физичка интеракција робота са окружењем	11
2.1 Основни појмови	11
2.1.1 Крутост на нивоу зглоба робота	15
2.1.2 Крутост на нивоу завршног уређаја робота	17
2.2 Приступ и изазови у процени интеракције робота са окружењем	19
2.2.1 Фаза пре интеракције	20
2.2.2 Детекција интеракције	20
2.2.3 Изолација места интеракције	21
2.2.4 Идентификација интеракције	22
2.2.5 Класификација интеракције	23
2.2.6 Реакција на интеракцију	23
2.2.7 Фаза после интеракције	24
2.3 Приступи управљању интеракцијом	25
2.4 Безбедна интеракција и класификација радних места робота и човека	27
3 Сарадња робота и човека - задатак склапања потпомогнут колаборативним роботом	32
3.1 Увод	32
3.2 Дизајн неуроергономске радне станице за потпомогнуто склапање	35
3.2.1 Опис мануелног задатка склапања	37
3.2.2 Опис задатка склапања потпомогнутог колаборативним роботом	37
3.2.3 Психичка процена стања радника – <i>BrainWatch</i> модул	38
3.2.4 Физичка процена стања радника – <i>M2O2P-L</i> модул	40
3.2.5 Нефизичка подршка раднику – <i>ADIN</i> модул	42
3.2.6 Стратешка подршка раднику – <i>Smart task scheduler</i> модул	43
3.2.7 Физичка подршка раднику – <i>Cobot</i> модул	43
3.3 Експериментална поставка и протокол	45
3.4 Анализа и обрада података	47
3.5 Резултати	48
4 Обликовање крутости завршног уређаја колаборативног робота – геометријски приступ	53

4.1	Увод	53
4.2	Моделовање и обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему	57
4.2.1	Моделовање крутости – геометријски приступ	58
4.2.2	Обликовање крутости – секвенцијално квадратно програмирање	59
4.2.3	Иницијално подешавање крутости на нивоу зглоба робота	61
4.3	Експериментална евалуација	63
4.3.1	Евалуација у симулационом окружењу	63
4.3.2	Задатак провлачења шрафа кроз алуминијумски профил	65
4.3.3	Задатак сечења	67
5	Обликовање крутости завршног уређаја робота погоњених актуаторима са променљивом крутошћу – приступ учења и оптимизације	69
5.1	Увод	70
5.2	Учење модела актуатора са променљивом крутошћу	73
5.2.1	Учење модела бидирекционог антагонистичког актуатора	74
5.2.2	Инкрементално обучавање за праћење промена модела бидирекционог антагонистичког актуатора	75
5.3	Обликовање елипсе крутости у Декартовом координатном систему робота погоњених актуатора променљиве крутости применом техника оптимизације	78
5.3.1	Оптимизација дуж једне осе	80
5.3.2	Оптимизација дуж више оса	81
5.3.3	Фаворизовање једне од оса	82
5.4	Експериментална евалуација	84
6	Закључак	89
	Списак слика	92
	Списак табела	94
	Литература	95

Поглавље 1

Увод

1.1 Предмет, циљ и значај истраживања

У протеклих неколико деценија, фокус индустријског развоја се заснивао на повећању продуктивности и ефикасности ослањајући се на рапидан развој технологија у области вештачке интелигенције, роботике и аутоматизације [1–3]. Иако је имплементација концепта Индустрије 4.0 допринела свеобухватној аутоматизацији индустрије, задаци који захтевају велики напор по питању когнитивних и физичких напора најчешће обављају људи [4, 5]. Због тога се у протеклом периоду радило на развоју иновативних концепата код којих ће човек бити централна фигура аутоматизација (Индустрија 5.0). Циљ Индустрије 5.0 је да поред ефикасности у производњи задовољи и основне људске потребе као што су безбедност, здравље и задовољство приликом обављања индустријских послова [6, 7].

Циљ дисертације је анализа и дизајн радних станица које ће човеку омогућити да са што мање стреса, физичког и когнитивног оптерећења извршава задатке заједно са колаборативним роботом, као и развој концепата и алгоритама који ће омогућити безбедну интеракцију човека са роботима.

На примеру задатка склапања демонстриран је рад кооперативног система за мануелно склапање фискалних уређаја. У контексту задатака склапања, Индустрија 5.0 треба да предложи иновативна решења као што су колаборација робота и човека, да смањи когнитивни напор приликом извођења монотоних и репетитивних задатака и слично. Иновативна радна станица садржи неколико кључних компоненти:

- Интерфејс машина-човек дизајниран тако да што мање омета већ постојећу рутину радника;
- Актуаторске јединице које сачињавају роботски системи као и аудио-визуелни системи који подстичу интеракцију човека са окружењем;
- Платформа за размену података која на поуздан и ефикасан начин врши размену података у циљу примене софтвера за паметну алокацију ресурса у производњи.

Такође, ова дисертација обрађује и различите роботске системе и алгоритме у циљу остваривања безбедне интеракције са човеком и/или окружењем. Развојем роботских технологија (колаборативних робота, сензора, интерфејса...), роботи су примењени у великом дијапазону задатака. Међутим, како би роботи радили у неструктурираном окружењу, морају бити сигурни и безбедни за непосредан рад са човеком, окружењем, и

безбедни по себе. Да би се осигурала безбедност између робота и човека [8], као и робу-сност у контактним задацима, робот треба да има способност да контролише физичку интеракцију са окружењем кроз хардверски реализовану и/или софтверски контролисану механичку попустљивост, односно крутост као њену реципрочну меру. Постоје три главна приступа за контролисање крутости односно попустљивости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему којим се дефинишу и перформансе интеракције робота са околином, где се графичка репрезентација ових матрица може приказати елипсоидом крутости:

1. Софтверски контролисана (активна) крутост при чему је могуће користити имплементацију са или без сензора силе и момента на завршном уређају [9, 10];
2. Софтверски контролисана (активна) крутост код робота који поседују сензоре момента на сваком зглобу [11];
3. Хардверски контролисана (пасивна) крутост где се примењују иновативни приступи у дизајну самих актуатора (актуатори са серијском еластичношћу односно актуатори са променљивом крутошћу) [12].

Приступ 1) се заснива на контроли крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, док се приступи 2) и 3) заснивају на контроли крутости на нивоу зглоба робота. Свакако, сва три приступа се могу побољшати експлоатацијом реду-дантности (нултог простора) за кинематички реду-дантне задатке. Овим приступом је могуће вршити обликовање крутости на нивоу завршног уређаја усвајајући одређена ограничења као што су геометрија и конфигурација робота, број степени слободе по-требних за извршавање задатка или оствариве крутости на нивоу зглоба робота [13, 14].

Такође, крутост завршног уређаја се може поделити на ону која зависи од конфи-гурације робота (енг. *configuration-dependent stiffness, CDC*) и ону која зависи од зајед-ничког утицаја крутости на нивоу зглоба (енг. *common mode stiffness, CMS*) [15]. *CDC* има смисла разматрати код реду-дантних робота и највећи утицај има на оријентацију елипсоида крутости, док *CMS* утиче на запремину елипсоида. Крутост завршног уређаја зависи од конфигурације у којој се робот налази (осликава се кроз Јакобијан матрицу) и од крутости на нивоу зглоба, представљајући нелинеарну везу између позиције и крутости зглоба до крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему [11, 16].

Контролисање тачних вредности крутости завршног уређаја робота у Декарто-вом координатном систему (енг. *end-effector, EE*) представља изазован задатак због одређених потешкоћа у естимацији саме крутости и могућности контролисања ком-плетне матрице крутости завршног уређаја. Међутим, у већини практичних примена су потребне само квалитативне вредности крутости (висока/ниска) у правцу кретања завршног уређаја (или правцу који је нормалан на правац кретања). Потпуна контрола матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему захтева велики број контролисаних улаза [16], што је тешко постићи у реалним апликацијама.

Како би се осигурала ефикасност при контроли крутости завршног уређаја у Де-картовом координатном систему, за различите реду-дантне роботе, матрица крутости завршног уређаја се може представити елипсоидом крутости. Овај приступ пружа ин-туитивнију и визуелно пријемчиву репрезентацију крутости. Применом оптимизације засноване на секвенцијалном квадратном програмирању (енг. *sequential least square pro-gramming, SLSQP*) контролисање крутости, претрага нултог простора, итд. као нелинеар-ни проблеми могу бити решени у реалном времену [17, 18]. Циљ је пронаћи оптималне

вредности крутости зглобова и путању зглобова робота, користећи истраживање нултог простора (енг. *null space*) за одређени задатак, поштујући ограничења која се намећу од стране самог робота и/или задатка [19, 20].

Користећи декомпозицију сопствених вредности матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, алгоритам треба да минимизује разлику у оријентацији главне осе тренутне и жељене елипсоиде крутости, као и фактор скалирања између главне и споредних оса елипсоиде. Овакав приступ се може искористити за обликовање крутости у задацима монтаже, сечења, fine обраде површина, итд. Односно, код оваквих задатака дуж правца кретања је потребно постићи одговарајуће особине по питању крутости завршног уређаја (висока крутост), док је по бочним осама пожељно имати ниске вредности крутости како би робот био способан да се прилагоди неструктурираним променама у окружењу или при судару. Такође, овај приступ ће омогућити корисницима боље разумевање и контролу робота, без обзира на њихово знање о распону крутости које је могуће остварити на нивоу зглоба/завршног уређаја и међусобним зависностима елемената матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Да би се омогућила безбедна интеракција између робота и његове околине, потребно је у реалном времену пратити екстерне силе и моменте који делује на робота, како би се у случају колизије могло реаговати на одговарајући начин. Уколико је колизија неизбежна, потребно је да робот осигура безбедност [21] и да при томе управља позицијом и крутошћу на одговарајући начин [22, 23].

Иницијални кораци за одређивање на који начин је потребно да робот одговори на судар јесте детекција да се судар заправо десио, изоловати локацију на којој се тај судар десио, и извршити естимацију амплитуде екстерне силе, односно момента [24]. За детектовање и естимирање екстерних сила и момената постоји неколико предложених решења као што су посебне врсте навлака за роботе [25] као и решења базирана на прикупљању информација са сензора силе и момента монтираног или на зглобу робота или на завршном уређају [26]. Такође, постоје и решења која на основу опсервације енергије, брзине или момента реконструишу информацију о екстерној сили и моменту, ослањајући се на информације са сензора позиције и струје [25].

Код робота погоњених актуаторима који модулишу крутост користећи еластични елемент уграђен између мотора и самог линка, безбедна интеракција је гарантована дизајном [27–29]. Ови актуатори се деле на две велике подгрупе, оне који имају константну крутост (еластични елемент је повезан на ред између мотора и линка) и називају се серијски еластични актуатори (енг. *Serial Elastic Actuators, SEA*), и на оне који своју крутост могу да мењају током времена (постоје два мотора помоћу којих је могуће симултано мењати позицију линка робота и подешавати крутост еластичног елемента) и називају се актуатори променљиве крутости (енг. *Variable Stiffness Actuator, VSA*). Коришћење роботских система са попустљивим актуаторима са уграђеним еластичним елементом поред уграђене безбедности пружа кориснику и одређена побољшања по питању енергетске ефикасности (овакви актуатори могу енергију судара да сачувају у еластичном елементу и искористе је у каснијој експлоатацији), или пак пружају боље перформансе код репетитивних задатака као што су закупавање ексера, бацање и други (пројектовањем одговарајућег управљања се могу постићи већи излазни моменти него код класичних крутих актуатора) [30, 31]. Са друге стране, овакве актуаторе је теже моделовати због своје сложене конструкције, али и због уграђеног еластичног елемента који има нелинеарну природу, па је изазовно и пројектовати одговарајуће контролере којима би се вршило управљање овог типа актуатора [32–36]. Моделовању актуатора са променљивом крутошћу могуће је приступити кроз различите приступе машинског учења. Коришћењем алгоритама машинског учења омогућава се мапирање улазно изла-

зне карактеристике ових актуатора без потребе познавања конструкције актуатора. Алгоритми машинског учења пружају могућност обучавања и оног дела модела актуатора променљиве крутости који се стандардним приступом моделовања занемарује или се не може моделовати, као што су несиметрије актуатора или трења, чиме се додатно подиже ефикасност при експлоатацији [37–40]. Такође, коришћењем алгоритама машинског учења са особинама инкременталног обучавања могуће је, током фазе експлоатације актуатора променљиве крутости, вршити додатна обучавања на основу података добијених током саме експлоатације. Овакви алгоритми су веома корисни јер сам еластични елемент може да промени своје карактеристике услед експлоатације и самим тим се деградирају перформансе модела актуатора, па се овим алгоритмима модел актуатора по потреби може додатно обучити како би се надоместиле промене параметара [41, 42].

1.2 Полазне хипотезе

Полазне хипотезе докторске дисертације су:

- Колаборација између робота и човека може повећати ефикасност приликом обављања монотоних/тешких/опасних послова али и побољшати опште услове и задовољство радника приликом обављања тих задатака.
- Ефикасност у кооперативним/колаборативним задацима се може унапредити коришћењем иновативних решења попут адаптивних интерфејса, напредних сензорских система, алгоритама за естимацију човекових намера и психо-физичког стања.
- Промена крутости завршног уређаја редувантног робота се може постићи променом кинематичке конфигурације робота или поменом крутости у зглобовима робота.
- Интуитивна графичка репрезентација еквивалентне крутости завршног уређаја може омогућити једноставније и интуитивније управљање физичком интеракцијом робота у односу на обликовање потпуне матричне интерпретације механичке крутости.
- Обликовање елипсоида крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се може посматрати као нелинеарни оптимизациони проблем са ограничењима.
- Коришћењем метода машинског учења, модел актуатора променљиве крутости се може унапредити и затим користити у управљачким задацима.
- Технике итеративног учења пружају могућност континуалног учења параметара модела чиме се смањују значаји промена механичких карактеристика модела.
- Увођењем случајно генерисаних пертурбација код робота погоњеног актуаторима променљиве крутости могуће је естимирати параметре матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему.

1.3 Ток истраживања

Истраживања су спроведена кроз следеће кораке:

1. Преглед научно-стручне литературе ради анализе постојећих праваца истраживања у области кооперативног/колаборативног рада робота и човека;
2. Преглед научно-стручне литературе ради анализе метода машинског учења за потребе учења модела актуатора променљиве крутости;
3. Преглед научно-стручне литературе ради анализе метода за обликовање крутости завршног уређаја;
4. Развој и тестирање роботске ћелије за роботом потпомогнуто мануелно склапање;
5. Развој модула за ефикаснију кооперацију између робота и човека (системи за физичку подршку, психолошку подршку, не-физичку подршку и стратешку подршку човеку приликом интеракције са роботом);
6. Реализација симулационих и математичких модела потребних за тестирање алгоритама оптимизације за обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;
7. Развој оптимизационих алгоритама са ограничењима за потребе обликовања крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;
8. Експериментална евалуација резултата добијених на симулационом окружењу у задацима обликовања крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;
9. Развој алгоритама машинског учења за учење модела актуатора са променљивом крутошћу (QB Advanced Pro);
10. Припрема симулационог и експерименталног окружења за тестирање алгоритама машинског учења;
11. Примена алгоритама естимације у циљу процене параметара матрице крутости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему.

1.4 Научни доприноси дисертације и одабране публикације

Научни доприноси дисертације су:

- Систематичан преглед литературе из области кооперативног/колаборативног рада робота и човека, нових модела актуатора и њиховог моделирања и управљања заснованог на учењу и примени техника оптимизације.
- Развој неуроергономске радне станице за мануелно склапање потпомогнуто колаборативним роботом.
- Развој нових алгоритама за управљање роботима у задацима физичке интеракције заснованих на нивоу контроле момента и/или крутости зглоба робота и реконфигурацијом робота.
- Развој техника управљања крутости завршног уређаја у Декартовом систему дуж оса примарних за ефикасније и безбедније извођење типичних индустријских задатака.
- Реализација алгорита машинског учења за обучавање модела актуатора променљиве крутости као и итеративног алгорита за компензацију несавршености које настају услед експлоатације актуатора.
- Реализација система за естимацију крутости завршног уређаја у Декартовом - координатном систему.

Одабране публикације проистекле током израде ове докторске дисертације су:

- Радови објављени у међународним часописима са импакт фактором:
 - **Knežević, N**, Lukić, B, Petrič, T, Jovanović K, A Geometric Approach to Task-Specific Cartesian Stiffness Shaping. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 110, 14 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10846-023-02035-6>
 - **Knežević, N**, Petrović M, Jovanović K, Cartesian Stiffness Shaping of Compliant Robots-Incremental Learning and Optimization Based on Sequential Quadratic Programming. *Actuators* 13, no. 1:32 (2024). <https://doi.org/10.3390/act13010032>
- Радови објављени у часописима без импакт фактора:
 - **Knežević, N**, Lukić, B, Jovanović K, Žlajpah L, Petrič, T, Endeffector Cartesian Stiffness Shaping - Sequential Least Squares Programming Approach. *Serbian Journal of Electrical Engineering* 18, 1 (2021). <https://doi.org/10.2298/SJEE2101001K>
- Радови објављени на међународним конференцијама:
 - Lukić, B, **Knežević, N**, Jovanović K, Robot's Cartesian Stiffness Adjustment Through the Stiffness Ellipsoid Shaping. *Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 32nd International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2023)*. pp. 289 - 296. Springer. Bled. Slovenia. (2023).

- **Knežević, N**, Trumić M, Fagiolini A, Jovanović K, Input-Observer-Based Estimation of the External Torque for Single-Link Flexible-Joint Robots. *Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 32nd International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2023)*. pp. 97 - 105. Springer. Bled. Slovenia. (2023).
 - Rodić J, Golubović D, **Knežević N**, Jovanović K, Natural Non-Invasive Human-Machine Interface Based on Hand Gesture Recognition. *Proceedings of the 9th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETTRAN 2017)*. Društvo za ETRAN. (2022).
 - Lukić B, Jovanović K, **Knežević N**, Žlajpah L, Petrič T, Maximizing the End-Effector Cartesian Stiffness Range for Kinematic Redundant Robot with Compliance, *Advances in Service and Industrial Robotics. (RAAD 2020)*. Mechanisms and Machine Science, Springer, Cham, (2020).
 - **Knežević N**, Lukić B, Jovanović K, Feedforward Control Approaches to Bidirectional Antagonistic Actuators Based on Learning, *Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2019)*, pp. 337 - 345, Springer, Kaiserslautern, Germany, (2019).
 - **Knežević N**, Lukić N, Jovanović K, Petrič T, Žlajpah L, End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadrating Programming Approach. *Proceedings of (Ic)ETTRAN 2019 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering. ETRAN Society. Belgrade. Academic Mind. Belgrade. Srebrno Jezero. Srbija. Srebrno Jezero. Jun, (2019)*.
- Радови објављени на домаћим конференцијама:
 - Klasanović D, Jugović L, **Knežević N**, Realization and Model Identification of Variable Stiffness Actuator Based on Torsion Spring. *Proceedings of the 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETTRAN 2017)*. Društvo za ETRAN. (2023).
 - **Knežević, N**, Lukić, B, Jovanović K, Upravljanje Pasivnom Krutošću Završnog Uređaja Robota Oblikovanjem Elipsoida Krutosti. LXVI konferencija ETRAN. pp. 672-677. Društvo za ETRAN. Novi Pazar. Jun. (2022).

1.5 Структура докторске дисертације

Главни резултати и доприноси ће бити илустровани кроз три различита евалуациона окружења су реализована ради анализе и провере постављених хипотеза. Валидација хипотеза је прво изведена на одговарајућим симулационим моделима реализованих користећи *MuJoCo* симулационо окружење и *ROS* (енг. *Robot Operating System*) а затим и на реалним експерименталним поставкама.

Друго поглавље даје преглед основних појмова као што су механичка импеданса, пасивна и активна крутост. Такође пружа преглед основних методологија за обликовање крутости код робота (на нивоу зглоба робота или на нивоу завршног уређаја робота). Дат је преглед приступа и изазова у процени интеракције робота са окружењем где су неки од најважнијих изазова детекција, идентификација и класификације интеракције као и реакција на интеракцију. Такође, представљено је које особине робот остварује решавањем представљених изазова. Описане су основне методе за управљање роботом у задацима интеракције са окружењем као што су контрола силе, импедансно и адмитансно управљање. Представљена је класификација радних места у којима робот и човек раде и направљена је подела између врсте интеракције између робота и човека, као и безбедносне мере и особине које роботски системи морају поседовати у одређеним нивоима интеракције између робота и човека.

Треће поглавље описује изазове интеракције човека и робота и даје предлог једног решења неуроергономске радне станице за сарадњу човека и робота. У том духу разматра се типичан задатак у индустрији у којем робот и човек сарађују – задатак монтаже или склапања. Првобитно је дизајнирана и реализована радна станица за мануелно склапање потпомогнуто *7DoF* (енг. *degrees of freedom* – степени слободе) колаборативним роботом (*Franka Emika Panda*), као модул за физичку подршку раднику током обављања задатка. Поред тога, реализовани су системи подршке рада човека и робота базираних на *Fiware* софтверском решењу. Затим модул за нефизичку подршку раднику (аудио–визуелну), као што је систему за пружање правовремених упутстава раднику (*ADIN – Adaptive Interfaces*). Онда модул за процену физичких стања радника (мониторинг и предикција кретања или ергономије радника), где је представљен систему за неинвазивну интеракцију човека са целокупним системом заснован на *LeapMotion* сензорском систему. Следећи модул је модул за процену психичког (менталног) стања радника (мозак-рачунар интерфејси или системи за процену менталног стања на основу праћења покрета очију), као што је систему за естимацију менталног фокуса, задовољства и когнитивног оптерећења коришћењем ЕЕГ уређаја (*MBTrain Smartphones*). Као и модул за пружање стратешке подршке (коришћење експертских система, анализе података за доношење одлука), где је представљен систем за интелигентну прераспodelу радних задата *Smart Task Scheduler*. Како би се утврдиле перформансе система и допринос робота унапређењу когнитивним аспектима радника на радном месту користиће се субјективни тестови као и мерења система за естимацију мождане активности.

Затим, у тези је обрађен алгоритмима за обликовање крутости завршног уређаја колаборативног робота у Декартовом координатном систему коришћењем геометријског приступа. Иницијално су развијени симулациони и математички модели како би се евалуација алгоритама извршила на одговарајући начин. Као алгоритми за подешавање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, разматрана је одговарајућа подгрупа оптимизационих алгоритама погодних за нелинеарне системе (секвенцијално квадратно програмирање). Предлаже се коришћење елипсоида крутости као интуитивније репрезентације матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Резултати добијени у симулационим окружењима су експери-

ментално потврђени на реалном *Franka Emika Panda* роботу, у два експериментална сценарија – провлачење шрафа кроз алуминијумски профил и сечење траке.

Пето поглавље дисертације обрађује одабране методе машинског учења погодне за учење нелинеарних модела као што су модели актуатора променљиве крутости. Разматрани тип актуатора је актуатор са променљивом крутошћу са нелинеарним опругама у антагонистичкој конфигурацији. Конкретан модел актуатора коришћен у овом поглављу је *QB Advanced Pro*. Код оваквих актуатора нелинеарне опруге у антагонистичкој конфигурацији омогућавају линеарну промену крутости целокупног система. Валидација модела је извршена на реалним актуаторима који се нису користили за прикупљање обучавајућег скупа података. Затим је имплементирано и итеративно учење како би се модел актуатора прилагодио евентуалним променама у механичкој структури насталих експлоатацијом актуатора.

Последњи део тезе се фокусира на естимацију крутости и екстерних сила и момената робота са актуаторима са променљивом крутошћу. За потребе тестирања постигнутих резултата приликом примена алгоритама за планирање/обликовање крутости завршног уређаја попустљивог робота у Декартовом координатном систему, реализован је алгоритам за естимацију крутости. Увођењем случајних пертурбација над роботом погоњеног актуаторима променљиве крутости (*4DoF QB Advanced Pro*) добијен је одговарајући одзив система (помераји и силе/моменти који се том приликом генеришу). На основу мерења одзива система услед пертурбација, извршена је процена крутости завршног уређаја.

Поглавље 2

Физичка интеракција робота са окружењем

Роботи су све ближи човеку у различитим сферама деловања као што су производња, рехабилитација, физичка колаборација, медицинске операције, итд. што неминовно доводи до све чешће потребе за физичком интеракцијом између робота и човека, чиме се отвара велики спектар изазова које треба решити. Односно, новокреирани изазови не могу бити превазиђени коришћењем класичних метода управљања робота који су се базирали на контролисању позиције/брзине робота. Уопштено, физичка интеракција робота са човеком подразумева физичку интеракцију између робота и човека у циљу извршавања задатка (заједничког или независног), у дељеном радном простору, у непосредној близини робота и човека, уз обезбеђивање одговарајућих особина код робота али и безбедности и ергономије за човека. У овом поглављу дефинисани су основни појмови који омогућавају физичку интеракцију робота и човека, као и основне методологије које се у литератури срећу, а које омогућавају роботима одговарајуће перформансе како би се обезбедила сигурна и ефикасна сарадња између робота и човека. Такође, дефинисани су различити нивои сарадње (потпуна сепарација, коегзистенција, кооперација и колаборација), као и типови задатака код којих је неопходно разматрати употребу колаборативних робота (роботи који имају особине потребне за безбедну физичку интеракцију робота и човека).

2.1 Основни појмови

Убрзани развој роботских технологија доводи до тога да се роботски системи све чешће интегришу ван стандардних индустријских окружења као што су домаћинства, спољашња окружења, односно окружења која по својој природи могу бити неструктурирана. Самим тим, роботи морају бити дизајнирани да се прилагоде таквом недовољно познатом окружењу. Спектар задатака које робот треба у том случају да обавља, подразумевају интеракцију са окружењем или кооперативан рад са човеком. Како би робот успешно обавио постављене задатке, неопходно је да обезбеди сигурну интеракцију, односно, да силе/моменти који се јављају као последица интеракције са окружењем буду контролисани.

Контролисање физичке интеракције између робота и окружења је у том случају кротијално за успешно извршавање задатка. Типични примери оваквих задатака су полирање, брисање, бушење, брушење или склапање, али и сви остали задаци код којих

се захтева интеракција са окружењем, односно човеком. Успешно извршавање контактних задатака управљањем кретања робота, односно његовог завршног уређаја је могућа уз апсолутно познавање модела робота (кинематичког и динамичког) и окружења (геометријског и механичког). Модел робота могуће је довољно добро одредити, док добијање прецизног модела окружења није тривијалан задатак. У пракси, уколико се не омогући роботу да приликом интеракције контролише контактне силе/моменте или да се прилагоди окружењу, робот ће тежити да смањи грешку кретања насталу због девијације у окружењу. Овакво понашање ће проузроковати генерисање све веће силе интеракције, што може довести до оштећења окружења, робота или повреде људи који интерагују са роботом. Према томе, потребно је да роботи имају попустљиву природу.

Везу између сила и момената које делују на механички систем и резултујућег кретања (брзине/помераја) тог система називамо механичком импедансом. Механичка импеданса се може дефинисати као комплексна функција која се обично представља у Лапласовом домену као

$$\mathbf{Z}(s) = \frac{\mathbf{F}(s)}{\mathbf{X}(s)}, \quad (2.1)$$

где $\mathbf{X}(s)$ представља излазни померај или брзину, а $\mathbf{F}(s)$ примењену силу или момент.

Механичка импеданса система се може најједноставније приказати кроз посматрање система са масом, опругом и пригушницом (енг. *mass-spring-damper system*):

- Маса: Маса механичког система утиче на његову инерцију, односно на то како ће систем реаговати на промене силе. Систем са већом масом (инерцијом) ће бити мање подложен променама услед деловања екстерне силе/момента, и обратно;
- Опруга: Крутост опруге представља отпор механичког система према деформацији или померају када је изложен спољашњој сили/моменту. Систем са већом крутошћу биће чвршћи, док системи са мањом крутошћу испољавају одређену флексибилност, односно попустљивост.
- Пригушница: Пригушница апсорбује енергију и одређује брзину којом се механички систем враћа у равнотежни положај након поремећаја. Веће пригушење доводи до бржег смиривања, док мање пригушење може довести до осцилаторног понашања система.

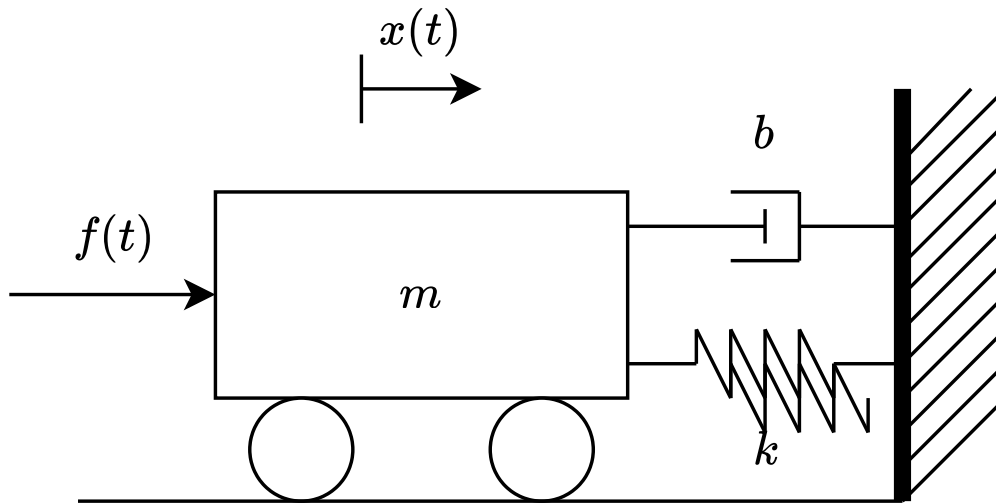
Контролисањем ових параметара система могуће је постићи да систем (робот) буде прилагодљивији и флексибилнији током интеракције са објектима и околином. Једноставан приказ система са масом, опругом и пригушницом дат је на Слици 2.1, где је $x(t)$ стање система, m маса, k крутост, b пригушење и $f(t)$ екстерна сила примењена на систем.

У случају линеарне опруге, $f(x) = kx$, док у општем случају f представља нелинеарну и временски зависну променљиву, која може зависити и од неких унутрашњих параметара u (који представљају стања или улазе система). У том случају се крутост σ дефинише као

$$k(x, u) = -\frac{\partial f(x, u)}{\partial x}. \quad (2.2)$$

За приказани систем релација између екстерне силе $f(t)$ и позиције $x(t)$ дата је са

$$f = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx, \quad (2.3)$$



Слика 2.1: Приказ система са масом, опругом и пригушницом.

где су параметри m , b и k константне система. Уколико се примени Лапласова трансформација, добија се

$$F(s) = (ms^2 + bs + k)X(s), \quad (2.4)$$

при чему су $F(s)$ и $X(s)$ Лапласове трансформације силе и позиције, респективно.

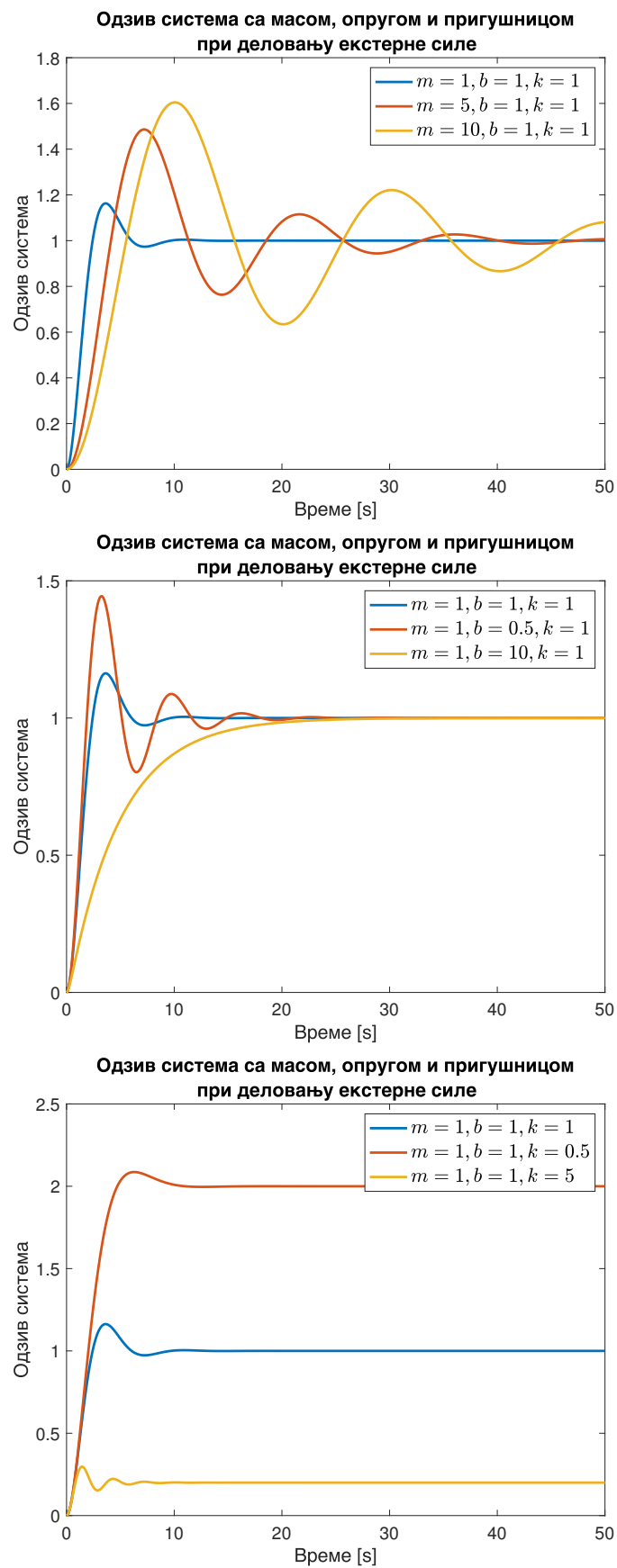
Оператор, $Z(s) = (ms^2 + bs + k)$ се назива механичком импедансом система маса-крутост-пригушење. Реципрочни оператор импедансе назива се адмитанса $A(s)$, која представља попустљивост пошто мапира силу у померај

$$X(s) = A(s)F(s). \quad (2.5)$$

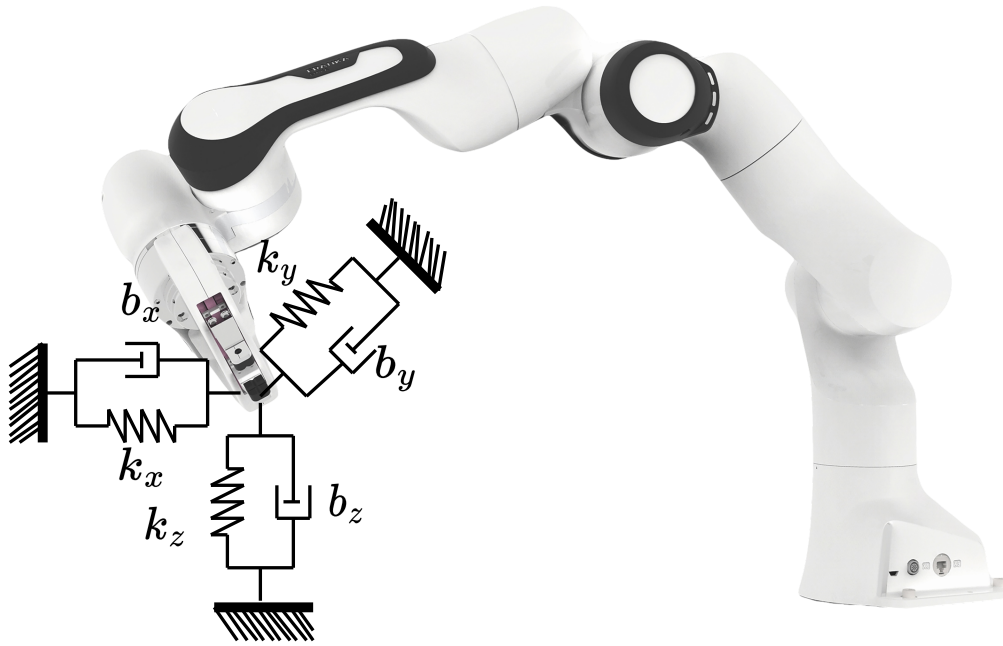
Поменути приступ се може генерализовати за било који нелинеарни динамички систем када је потребно одредити релацију између сила, помераја, првог и другог извода помераја и интерних стања система.

На Слици 2.2 приказан је одзив система са масом, опругом и пригушењем на деловање екстерне силе $f = 1 \text{ N}$ у тренутку $t = 0 \text{ s}$. Први график приказује утицај промене масе система на одзив услед деловања екстерне силе, други график приказује утицај промене пригушења и трећи график приказује утицај промене крутости система на одзив.

Уколико се систему са масом, опругом и пригушницом промене параметри m и b , померај система у устаљеном стању ће зависити искључиво од примењене екстерне силе. Уколико се промени параметар k , односно крутост система, утиче се и на померај система у устаљеном стању. Према томе, уколико је потребно остварити одговарајуће особине система приликом интеракције са објектима и околином, битно је поставити параметар k на одговарајућу вредност. Роботски манипулатори за разлику од представљеног система са масом, опругом и пригушницом могу имати више степени слободе. Сходно томе, њихове особине интеракције са објектима или окружењем описујемо у односу на завршни уређај у Декартовом координатном систему, где се померај система у односу на примењену екстерну силу посматра кроз три translације и три ротације (Слика 2.3), односно са шест система са опругом и пригушницом (маса система је одређена масом робота). На Слици 2.3 је приказан роботски манипулатор чија је интеракција са околином описана помоћу три система са опругом и пригушницом дуж трансляторних оса Декартовог координатног система (аналогно се описују особине дуж оса ротације).



Слика 2.2: Анализа одзива система са масом, опругом и пригушницом приликом промене параметара система.



Слика 2.3: *Franka Emika Panda* - робот са одговарајућим транслаторним системима са опругом и пригушницом за описивање интеракције са околином.

Како је већ приказано да је параметар крутости најбитнији за обликовање интеракције робота са околином, на даље у овој дисертацији ће бити стављен акценат на управљање и естимацију крутости завршног уређаја робота. Обликовање крутости завршног уређаја може бити постигнуто на више различитих начина, а у зависности од система који се контролише.

Како би се представили различити начини остваривања крутости завршног уређаја, односно обезбедила сигурна интеракција са објектима и околином, биће представљени концепти активне и пасивне крутости на нивоу зглоба робота, али и на нивоу завршног уређаја. При чему ће се одговарајуће методологије управљања крутости на нивоу зглоба робота касније користити за обликовање крутости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему у Поглављима 4 и 5.

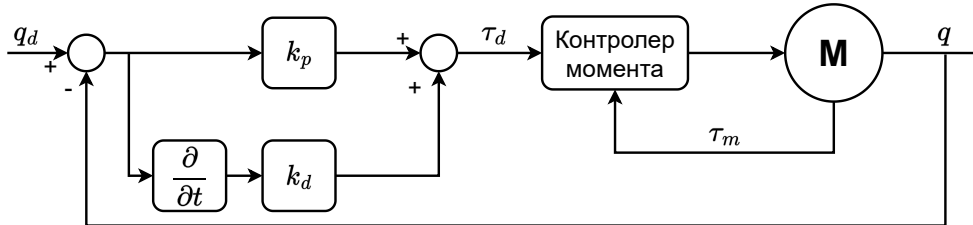
2.1.1 Крутост на нивоу зглоба робота

Најједноставнији начин постизања безбедне интеракције робота са окружењем је активна (софтверска) контрола крутости на самом зглобу робота. Управљање моментом τ_d зглоба робота дефинише жељено кретање/понашање. Уколико управљачки момент дефинишемо у форми ПД контролера

$$\tau_d = k_p(q_d - q) + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}), \quad (2.6)$$

где q_d и \dot{q}_d представљају жељену позицију и брзину зглоба робота, респективно, а q и \dot{q} представљају остварену позицију и брзину зглоба робота. Тада, параметар пропорционалног појачања k_p одговара жељеној крутости, а параметар диференцијалног појачања k_d одговара жељеном пригушењу [43, 44]. Предности оваквог начина имплементације безбедне интеракције робота огледа се у једноставном закону управљања али и у могућности промене особина робота променом параметара контролера k_p и k_d . Са друге стране, за реализацију крутости на овај начин неопходно је мерење и оствареног момента τ_m .

Такође, безбедна интеракција није остварена моментално, већ постоји одређено кашњење које је проузроковано контролним алгоритмом. На Слици 2.4 приказана је структура ПД контролера за реализацију активне крутости на нивоу зглоба робота. Структура је приказана у форми каскадног контролера при чему се сматра да је контрола момента зглоба имплементирана у контролеру робота. Поменути имплементација крутости на нивоу зглоба се користи код већине комерцијално доступних робота, и овакав начин остваривања крутости на нивоу зглоба робота је коришћен за остваривање безбедне интеракције робота са човеком у Поглављу 4.



Слика 2.4: ПД контролер за реализацију активне крутости на нивоу зглоба робота са интегрисаним контролером момента.

Други начин за остваривање попустљивости/крутости на нивоу зглоба робота јесте кроз уграђивање еластичног елемента у преносни систем између самог актуатора и сегмента робота [45]. Овакав дизајн роботских актуатора, поред тога што је решио неке од проблема који се јављају код софтверски генерисане крутости (не захтевају мерење оствареног момента, својим дизајном обезбеђују безбедну интеракцију), захтева комплексније управљачке алгоритме којим би се експлоатисали роботски системи направљени од оваквих актуатора. Такође, овакви актуатори уносе одређене предности у цео систем тако што могу да складиште енергију насталу приликом судара, а затим и да је искористе када је то потребно (већи максимални момент, брзина...) [46–48]. Пасивна крутост зглоба робота се може реализовати уградњом опруге константне крутости, и такве актуатори се називају актуатори са серијском еластичношћу (енг. *Serial Elastic Actuators, SEAs*) [49–51], или уградњом механизма који омогућава промену параметара еластичног елемента, и овакви актуатори се називају актуатори са променљивом крутошћу (енг. *Variable Stiffness Actuators, VSAs*) [45, 52–54].

Пасивна крутост се дефинише као негативни извод момента по углу (отклону при деловању екстерне силе)

$$k = -\frac{\partial \tau}{\partial q}, \quad (2.7)$$

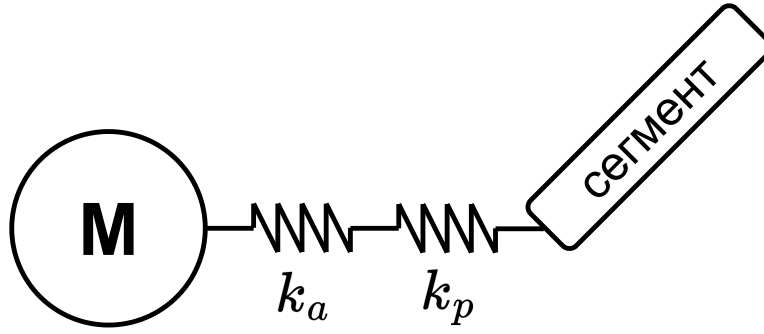
где k представља крутост зглоба, τ обртни момент а q позицију зглоба (односно отклон приликом деловања екстерне силе) [16, 55]. При чему је за *SEAs* ова вредност константна, а за *VSAs* није.

Како би се превазишли недостаци у виду времена потребног за реаговање на интеракцију које је присутно код претходне имплементације крутости на нивоу зглоба робота, *VSA* актуатори су примењени у Поглављу 5.

Концепт активне и пасивне крутости на нивоу зглоба робота могуће је комбиновати, и на тај начин проширити могућности при остваривању безбедне интеракције и опсег оствариве крутости. Ефективно се овај концепт може представити постојањем две опруге (активна и пасивна опруга) између актуатора и сегмента робота (Слика 2.5). При чему је резултујућа крутост дата као

$$\frac{1}{k_r} = \frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_p}, \quad (2.8)$$

где је са k_a означена активна крутост а са k_p пасивна крутост.



Слика 2.5: Илустрација активне и пасивне крутости на нивоу зглоба робота.

2.1.2 Крутост на нивоу завршног уређаја робота

Крутост завршног уређаја робота се може постићи како применом активно (софтверски) модулисане крутости тако и применом пасивне крутости, али и комбинацијом активне и пасивне крутости. Крутост завршног уређаја се изражава у Декартовом координатном систему, при чему референтна тачка може бити постављена у базу робота, или на самом завршном уређају робота или алату (енг. *End Effector, EE*).

Код активне контроле крутости, завршни уређај робота се посматра као механичка импеданса [9, 56, 57]. Како се особине завршног уређаја у Декартовом координатном систему у општем случају могу описати са три транслаторне и три ротационе механичке импедансе (Слика 2.3), тада се једнакост 2.3 може записати у матричном облику као

$$\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\Delta\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\Delta\mathbf{X}, \quad (2.9)$$

где \mathbf{F}_{ext} представља екстерну силу/момент која делује на завршни уређај робота, димензије $[6 \times 1]$ (три силе и три момента), $\Delta\ddot{\mathbf{X}}$, $\Delta\dot{\mathbf{X}}$ и $\Delta\mathbf{X}$ представљају разлику између жељеног и оствареног кретања завршног уређаја робота (убрзање, брзина и позиција), димензије $[6 \times 1]$ (три транслације и три ротације), а \mathbf{M} , \mathbf{B} и \mathbf{K} параметре који описују особине робота приликом интеракције са околином, дијагоналне матрице димензије $[6 \times 6]$ (елементи на главној дијагонали одговарају свакој оси транслације и ротације).

Пасивна крутост завршног уређаја се обезбеђује интеграцијом флексибилних елемената у погонски систем. Како робот може бити реализован од више погонских система чинећи кинематички ланац робота, једнакост 2.7 можемо представити у матричном облику

$$\mathbf{K}_j = -\frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \mathbf{q}}, \quad (2.10)$$

при чему је \mathbf{K}_j матрица крутости зглобова робота, димензије $[n \times n]$ где је n број зглобова робота, $\boldsymbol{\tau}$ представља вектор момената који се остварују на зглобовима, а \mathbf{q} вектор позиција зглобова робота. Деловање екстерне силе на завршни уређај робота се може повезати са моментима у зглобовима користећи Јакобијан матрицу робота, $\mathbf{J}(\mathbf{q})$, у општем случају димензије $[6 \times n]$, на следећи начин

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{F}_{ext}. \quad (2.11)$$

Такође веза између вектора екстерне силе \mathbf{F}_{ext} је пропорционална померају завр-

шног уређаја из равнотежног положаја $\Delta \mathbf{X}$ при деловању екстерне силе са коефицијентом \mathbf{K}_C , који представља матрицу крутости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему, дата је са

$$\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{K}_C \Delta \mathbf{X}. \quad (2.12)$$

Када се једнакости 2.12 и 2.11 уврсте у 2.10 добија се да је

$$\mathbf{K}_j = -\frac{\partial(\mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{K}_C \Delta \mathbf{X})}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{K}_C \mathbf{J}(\mathbf{q}) - \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{q})^T}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{K}_C \Delta \mathbf{X}, \quad (2.13)$$

при томе, уколико се може сматрати да је отклон $\Delta \mathbf{X} \approx 0$, тада је

$$\mathbf{K}_j = \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{K}_C \mathbf{J}(\mathbf{q}), \quad (2.14)$$

односно

$$\mathbf{K}_C = (\mathbf{J}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_j^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{q})^T)^{-1}. \quad (2.15)$$

Из једначине 2.15 може се закључити да крутост завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему зависи од појединих крутости зглобова робота (кроз матрицу \mathbf{K}_j), али и положаја тренутне кинематичке конфигурације робота (кроз матрицу $\mathbf{J}(\mathbf{q})$). У случају робота погоњеног актуаторима променљиве крутости и кинематички редундантног робота, подешавање крутости завршног уређаја робота се може извршити комбиновањем или појединачном експлоатацијом два приступа (променом крутости на нивоу зглоба робота и/или променом конфигурације робота), при чему је ова особина искоришћена у Поглављима 4 и 5 уз одговарајуће технике оптимизације за ефикасно обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему.

2.2 Приступ и изазови у процени интеракције робота са окружењем

Роботи који асистирају људима приликом извођења различитих задатака, што у сервисним што у индустријским поставкама, се све чешће имплементирају у реалним сценаријима. Како би се обезбедило да роботи и људи деле исти радни простор и физички интерагују међусобно, неопходно је водити рачуна о брзој и поузданој реакцији на могућу интеракцију робота са окружењем/људима, као и о стратегијама управљања које ће обезбедити безбедно понашање робота. Главна мотивација је спречавање и/или ограничење повреда људи или оштећења околине приликом физичког контакта са роботом.

Особине које роботи треба да поседују у апликацијама интеракције са околином и/или људима су:

- способност да извршавају задатке у динамичким окружењима, не-структурираним окружењима и окружењима која су делимично непозната;
- могућност дељења радног простора са човеком;
- превенција нежељене интеракције;
- способност да на безбедан и робустан начин реагују приликом неизбежних или намерних физичких контаката са окружењем;
- реактивно генеришу кретање базирано на информацијама са сензорских система.

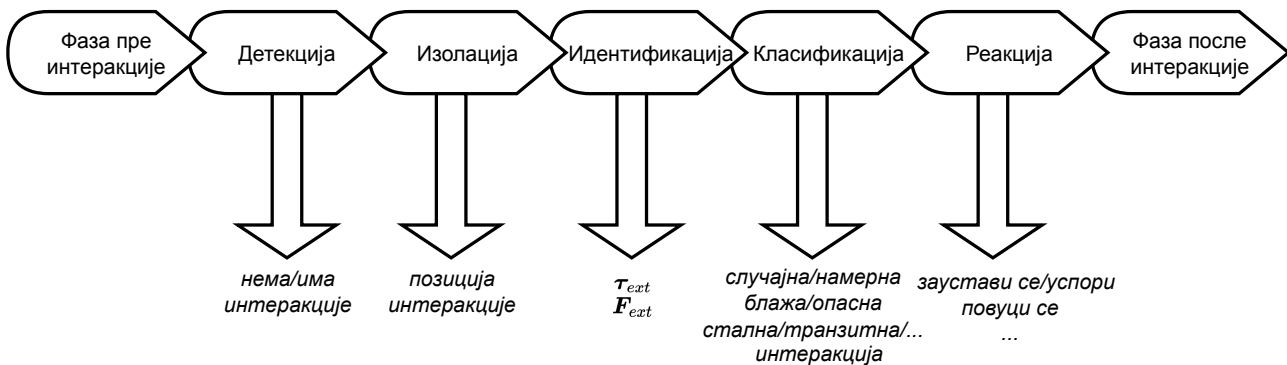
Остваривање ових особина код робота је циљ који треба постићи зарад безбедне физичке интеракције човека и робота (енг. *physical Human-Robot Interaction, pHRI*) [58, 59].

Примарно, нежељене контакте робота са окружењем треба спречити коришћењем екстерних сензора за мониторинг радног простора. Помоћу оваквих система се може одредити близина робота и човека и у складу са тим се развијају стратегије за управљање роботом у човековој близини. Ипак, релативно кретање између робота и човека може бити веома брзо и тешко га је предвидети, те коришћење екстероцептивних сензора можда није довољно да спречи нежељене контакте, односно сударе. Са друге стране, у задацима који захтевају директну или индиректну интеракцију између робота и човека неопходно је извршити класификацију контакта на жељене или нежељене контакте. Да би се одредила природа интеракције између робота и окружења, неопходно је познавати локацију на којој се контакт десио, као и интензитет контакта како би робот могао да одреагује на адекватан начин. Да би се на правилан начин одредила природа интеракције између робота и окружења у [24] уводе се алгоритам за обраду догађаја у присуству интеракције (енг. *collision event pipeline*).

Предложени алгоритам се састоји из седам различитих фаза које за циљ имају да обухвате све фазе интеракције (Слика 2.6), и то:

1. фаза пре наступања саме интеракције;
2. детекција интеракције;
3. изолација места интеракције;
4. идентификација интеракције;

5. класификације интеракције;
6. реакција на интеракцију;
7. фаза после интеракције.



Слика 2.6: Седам фаза алгоритма за обраду догађаја у присуству интеракције.

2.2.1 Фаза пре интеракције

Код фазе пре интеракције постоје два примарна циља: избегавање нежељеног судара и антиципативно кретање робота како би се минимизовали ефекти интеракције. Номинално планирање кретања се изводи тако да се оствари кретање које неће изазвати нежељену интеракцију, при чему је неопходно познавање барем локалне карактеристике окружења [60]. Такође, у фази планирања трајекторије узима се у обзир и динамика кретања човека, као и простор у коме постоји вероватноћа да ће се човек наћи [61, 62]. У већини случајева, овакви алгоритми захтевају коришћење обичних или дубинских камера које су распоређене у окружењу у којем робот и човек раде [63–65].

Развијена су различита комерцијална решења помоћу којих је могуће вршити адекватно планирање кретања робота у динамичком окружењу. Једно од комерцијално доступних решења јесте *ABB SafeMove* који омогућава планирање интеракције робота и човека тако што врши надзор радног простора и зауставља робота уколико човек уђе у радни простор робота (претходно, индустријски роботи су морали да прекину извршавање програма што је изискивало поновно покретање целе роботске ћелије што изискује некада пуно времена) [66]. Напреднија решења користе *Lidar* сензоре и одговарајуће рачунаре за обраду података како би вршили надзор радног простора и управљали роботима у складу са тим [67]. Такође, постоје решења која су базирана на ултра-звучним сензорима којима се детектује улазак људи у радни простор робота [68]. Поред тога, све више се развијају решења која експлоатишу радаре за осматрање радног простора, поготово у условима где могу да постоје визуелне препреке које могу ометати правилну детекцију људи [69]. Док се најчешће користе системи који експлоатишу 2D или 3D камере [70].

2.2.2 Детекција интеракције

Код фазе детекције интеракције се доноси бинарна одлука о томе да ли је или није дошло до интеракције робота са окружењем. У овој фази је потребно детектовати да ли је дошло до интеракција на било ком месту у структури робота што је пре могуће.

Највећи изазов код ове фазе јесте подесити одговарајуће прагове за доношење одлуке о томе да ли је дошло до интеракције, како би се избегле ситуације у којима се детектује да је до интеракције дошло у погрешном тренутку али и даље треба задржати високу сензитивност. Један од најинтуитивнијих начина јесте мерење струје на погонима робота и посматрање наглих промена које могу бити изазване интеракцијом робота са околином [71, 72]. Други приступ се заснива на упоређивању командованих момената када не постоји интеракције робота са окружењем и тренутним моментима које робот остварује како би се увидела разлика између њих и донела одлука да ли је дошло до интеракције или не [73–75]. Код робота новије генерације постоје уграђени сензори момента на сваком зглобу, те се они користе за процену интеракције са окружењем [76]. Такође, могуће је извршити детекцију интеракције коришћењем тактилних сензора којима се робот обложи (енг. *sensitive skin*) како би се одредила и тачна локација интеракције [77–79].

2.2.3 Изолација места интеракције

Познавање тачног места (нпр. који линк манипулатора) које је остварило интеракцију је веома битан аспект како би се испланирала реакција робота на адекватан начин. Решавањем овог проблема добија се информација о линку i_c који учествује у интеракцији као и тачном месту интеракције \mathbf{x}_c . Генерално решење овог проблема је и даље непознато и углавном се уводи претпоставка да ће се интеракција десити само на једном месту у датом тренутку. Уколико се претпостави да се интеракција десила на линку i_c код робота са отвореном кинематичком структуром, тада вектор $\boldsymbol{\mu}$, димензије $[n \times 1]$, има облик

$$\boldsymbol{\mu} = [\mu_1 \ \dots \ \mu_{i_c} \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T, \quad (2.16)$$

где μ_i представља процењену резидуалну вредност момента i -тог зглоба [26]. Односно, кретање последњих $n - i_c$ линка не трпи никакве последице интеракције. Тада се линк на коме се десила интеракција може одредити као

$$i_c = \max\{i \in \{1 \dots n\} : \mu_i \neq 0\}. \quad (2.17)$$

Такође, уколико је претпостављено да се интеракција десила на линку i_c онда је последњих $n - i_c$ колона контактнoг Јакобијана $\mathbf{J}_c(\mathbf{q})$ (Јакобијан матрица од места \mathbf{x}_c на коме се десила интеракција до базе робота) једнако нули. Односно, код вектора $\boldsymbol{\tau}_{ext}$ који представља вредности момената услед деловања екстерне силе

$$\boldsymbol{\tau}_{ext} = \mathbf{J}_c^T \mathbf{F}_{ext} \quad (2.18)$$

ће последњих $n - i_c$ колона бити једнако нули. При чему је у општем случају матрица \mathbf{J}_c непозната. Како сила интеракције може деловати на било ком месту на линку, потребно је одредити тачну позицију деловања \mathbf{x}_c . Ако се уведе да је вектор \mathbf{r}_i вектор од базе робота до i -тог линка а вектор $\mathbf{r}_{i,c}$ вектор растојања од линка i до места где се десила интеракција, тада је

$$\mathbf{x}_c = \mathbf{r}_i + \mathbf{r}_{i,c}. \quad (2.19)$$

Односно, сила \mathbf{F}_i која делује на центар i -тог зглоба се може представити на следећи начин

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{J}_{c,i}^T \mathbf{F}_{ext}, \quad (2.20)$$

при чему је $\mathbf{J}_{c,i}$ Јакобијан матрица од места контакта \mathbf{x}_c до центра зглоба на коме је детектована интеракција. Такође, непозната Јакобијан матрица $\mathbf{J}_c(\mathbf{q})$ тада има облик

$$\mathbf{J}_c(\mathbf{q}) = \mathbf{J}_{c,i}\mathbf{J}_i(\mathbf{q}), \quad (2.21)$$

где је $\mathbf{J}_i(\mathbf{q})$ Јакобијан матрица која описује везу између унутрашњих координата робота и линеарних и угаоних брзина координатног система i -тог зглоба. Када се из 2.17 одреди линк на коме се десио контакт, онда се према 2.21 могу естимирати силе које делује на зглоб у контакту у Декартовом координатном систему као

$$\hat{\mathbf{F}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ \mathbf{m}_i \end{bmatrix} = (\mathbf{J}_i^T(\mathbf{q}))\# \boldsymbol{\mu}, \quad (2.22)$$

где је са \mathbf{f}_i означен вектор сила у Декартовом координатном систему, а са \mathbf{m}_i вектор момената, а оператор $\#$ псеудоинверзију.

Даље, ако се претпостави да у тренутку интеракције не постоји деловање екстерног момента, што је најчешћи случај интеракције, тада се може написати да је

$$\mathbf{F}_{ext} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{ext} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Израчунавање непознатог вектора $\mathbf{r}_{i,c}$ се може извести користећи израз

$$\hat{\mathbf{f}}_i \times \mathbf{r}_{i,c} = \hat{\mathbf{m}}_i. \quad (2.24)$$

Одакле се може одредити место контакта познавајући геометрију самог линка.

2.2.4 Идентификација интеракције

Следећи битан аспект интеракције јесте одређивање интензитета екстерних сила и момената који делују на робота у Декартовом координатном систему \mathbf{F}_{ext} на месту интеракције, али и интензитета момената у зглобовима робота $\boldsymbol{\tau}_{ext}$ током целог трајања контакта. Основне методе за детекцију, изолацију и идентификацију су приказане у [26, 80]. Основна идеја код ових приступа је да се интеракција односно судар код робота посматра као нежељено понашање које утиче на погонски систем робота и да се на основу разлике између очекиваних и мерених величина естимира интензитет контактних сила и момената.

На основу једначина динамике роботског система, могуће је одредити екстерне моменте који делују на зглобове робота као

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_{ext} = \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}_m, \quad (2.25)$$

где је \mathbf{H} инерцијална матрица система, \mathbf{C} матрица Кориолисових и брзинских ефеката, \mathbf{G} гравитациона матрица и $\boldsymbol{\tau}_m$ вектор управљачких момената. У практичној реализацији, не може се увек добити процена екстерних момената због тога што се захтева коришћење сензора момента на зглобовима робота. У случају да сензор момента није доступан, користе се методе за естимацију момента засноване на инверзној динамици [28], опсерверу брзина зглоба [81] и опсерверу момента [26, 80].

Естимацију екстерне силе/момента током интеракције у Декартовом координатном

систему могуће је одредити када је позната $\mathbf{J}_c(\mathbf{q})$ матрица користећи

$$\hat{\mathbf{F}}_{ext} = (\mathbf{J}_c^T(\mathbf{q}))^\# \boldsymbol{\mu}. \quad (2.26)$$

Постоје три главна начина помоћу којих је могуће одредити матрицу $\mathbf{J}_c(\mathbf{q})$:

- У задацима у којима се не очекује интеракција робота са околином сем на завршном уређају, матрица $\mathbf{J}_c(\mathbf{q})$ постаје $\mathbf{J}_{TCP}(\mathbf{q})$. При чему се матрица $\mathbf{J}_{TCP}(\mathbf{q})$ може израчунати познавајући Денавит-Хартенберг (енгл. *Denavit-Hartenber*, *DH*) параметре.
- Уколико се претпостави да важи 2.23, тада се матрица $\mathbf{J}_c(\mathbf{q})$ може одредити коришћењем поступка из секције 2.2.3.
- Коришћењем тактилних сензора за одређивање места локације контакта а самим тим и матрице $\mathbf{J}_c(\mathbf{q})$.

2.2.5 Класификација интеракције

Користећи информације добијене у претходним корацима, могуће је извршити интерпретацију природе интеракције и класификовати је на жељену или нежељену, блажу или опасну [82], сталну или транзијентну, или репетитивну. Стална интеракција подразумева интеракцију која траје током целокупног рада робот (савладавање гравитације, ношење специфичног завршног уређаја ...). Транзијентна интеракција подразумева интеракцију која се дешава са времена на време током неког специфичног дела задатка (судар са окружењем, намерна интеракција са човеком или интеракција настала током склапања неког објекта роботом). На крају репетитивна интеракција подразумева појављивање сила интеракције репетитивно током трајања задатка (вибрације, пулсирање крвних судова код апликације у медицини и друго).

2.2.6 Реакција на интеракцију

Реакција робота на интеракцију треба да буде заснована на информацијама из претходних корака. Због брзе природе и непоузданости самог проблема детектовања, изолације, идентификације и класификације интеракције, методе за реакцију робота требају бити имплементирани на најнижем контролном нивоу. Најједноставнији реактивни алгоритам јесте да се робот заустави приликом детекције нежељене интеракције, али овакав приступ може довести до повећања вероватноће повреде као и до ограничавања или блокирања човека у његовом раду [83, 84]. Методе које обезбеђују ефикаснију реакцију робота приликом интеракције приказане су у [28, 85, 86]. Иако данашња технологија омогућава велику брзину извршавања поменутих алгоритама, због потребног времена обраде информација о интеракцији, један део трајања интеракције се одвија под пуним интензитетом (без одговарајуће реакције). Са друге стране коришћењем актуатора који имају уграђен еластични елемент (*SEA* или *VSA*) омогућава се одговарајућа реакција на интеракцију у тренутку када се она догоди. Односно, сами еластични елементи у оваквим актуаторима дају способност роботима да енергију интеракције складиште у њима, чиме се остварује безбеднија интеракција робота са окружењем [87, 88].

2.2.7 Фаза после интеракције

У фази након интеракције робот треба да буде у стању да аутономно донесе одлуку да ли треба наставити извршавање задатка или одустати од његовог извршавања и на који начин [86]. На пример, уколико је интеракција класификована као намерна, робот може да препозна да је то био знак да треба да започне физичку колаборацију са човеком на одређеном задатку. Иако су алгоритми за доношење одлука у оваквим ситуацијама и даље отворен проблем, један од могућих приступа јесте коришћење машинског учења [82]. Код комерцијално доступних колаборативних робота, након реакције робота на ненамерну интеракцију (заустављање или повлачење робота од контакта) робот чека да добије сигнал од човека да настави са радом. Углавном је то намерна интеракција између робота и човека (човек повлачењем робота дуж унапред дефинисане осе даје знак роботу да настави са радом).

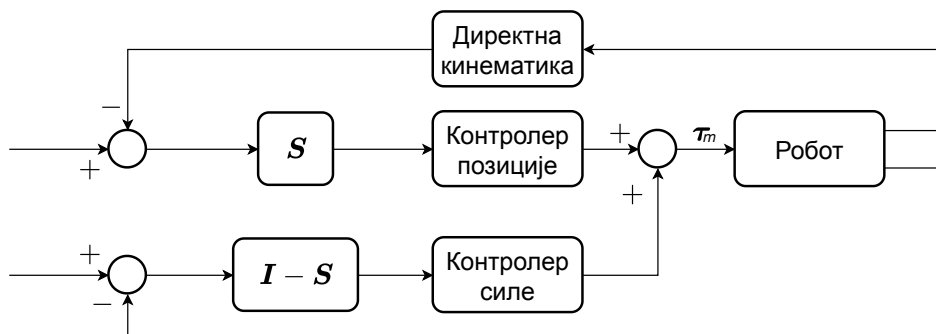
2.3 Приступи управљању интеракцијом

Како је већ напоменуто, у многим како индустријским тако и сервисним апликацијама, јавља се потреба да робот интерагује са својом околином. Како би се овакви задаци успешно решили неходно је управљати кретањем али и силама интеракције робота. Иницијално, за решавање оваквих проблема имплементирано је управљање силом (енг. *force control*) [89–93]. Такође, када је потребно управљати само неком од компоненти силе интеракције дефинише се хибридни контролер силе/позиције (енгл. *hybrid position/force controller*) [94–96]. Код управљања силом, у општем случају, неопходно је обезбедити информацију о генерисаној сили завршног уређаја у контакту са околином. Углавном се користи сензор силе и момента који се монтира на прирубницу робота [97] којим се може извршити екстракција информације о генерисаној сили на завршном уређају. Други начини за естимацију сила и момената интеракције јесте коришћење сензора момента монтираних на сваком зглобу робота [98, 99]. Са друге стране, могуће је извршити одређено подешавање особина завршног уређаја робота у интеракцији описивањем везе између екстерне силе која делује на завршни уређај и реакције позиције завршног уређаја услед те силе. Два најчешћа приступа код обликовања особина завршног уређаја су импедансно и адмитансно управљање (енг. *impedance and admittance control*).

Генерално, код дефинисања управљања силом, потребно је дефинисати жељено кретање робота, али и силу којом робот треба да делује својим завршним уређајем на околину. Према томе, простор у коме се планира задатак се може поделити на два потпростора, потпростор у коме се дефинише кретање робота (енг. *position control subspace*) и потпростор у коме се дефинише сила којом робот делује (енгл.: *force control subspace*) [100]. Типична имплементација оваквог управљања предложена у [100] заснива се прво на контроли кретања и силе у простору у коме се врши задатак (енг. *task space*), па се затим такво управљање трансформише на управљање на нивоу зглоба у две независне, паралелне, контролне петље (Слика 2.7) као

$$\tau_m = \mathbf{K}_p \mathbf{J}_{TCP}^{-1} \mathbf{S} (\mathbf{X}_d - \mathbf{X}) + \mathbf{K}_v \mathbf{J}_{TCP}^{-1} \mathbf{S} (\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}_f \mathbf{J}_{TCP}^T (\mathbf{I} - \mathbf{S}) (\mathbf{F}_d - \mathbf{F}), \quad (2.27)$$

где је \mathbf{X}_d жељена позиција завршног уређаја, \mathbf{F}_d жељена сила коју треба остварити на завршном уређају, \mathbf{S} дијагонална $[6 \times 6]$ матрица којом се може фаворизовати правац кретања и силе завршног уређаја где сваки елемент на дијагонали одговара одређеној оси translације и ротације, \mathbf{I} дијагонална јединична матрица димензије $[6 \times 6]$; \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_v и \mathbf{K}_f су матрице појачања позиције, брзине и силе, респективно, дијагоналне матрице димензија $[6 \times 6]$ где сваки елемент на дијагонали одговара појачању поједине осе translације и ротације.



Слика 2.7: Блок шема за управљање силом код робота у координатном систему задатка.

Други метод који се најчешће користи код управљања интеракцијом јесте импедансно управљање које за циљ има да дефинише однос између сила интеракције и грешке која се тада ствара у позиционирању завршног уређаја робота. Сам принцип овог управљања је постављен у [56], где се завршни уређај робота понаша као механичка импеданса са масом, опругом и пригушницом. Импедансно управљање је општи случај за алгоритме управљања крутошћу и попустљивошћу [101, 102], које омогућава испитивање хардверско/софтверских особина робота приликом интеракције са окружењем. Тада се закон управљања дефинише као

$$\mathbf{F} = \mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\Delta\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\Delta\mathbf{X}, \quad (2.28)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G} - \mathbf{J}^T \mathbf{F}, \quad (2.29)$$

где су \mathbf{M} , \mathbf{B} , \mathbf{K} позитивно дефинитне матрице инерције, пригушења и крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему димензија $[6 \times 6]$, респективно.

Када не постоји могућност управљања роботом на нижем нивоу, односно управљање моментима на моторима, користи се адмитансно управљање [103–105]. Адмитансно управљање врши пресликавање контактних или екстерних сила \mathbf{F}_{ext} у жељене брзине $\dot{\mathbf{q}}_c$. Имплементација адмитансног управљања може бити извршена на нивоу зглобова робота или на нивоу завршног уређаја робота. Ако важи да је $\boldsymbol{\tau}_c = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}_{ext}$, где је $\boldsymbol{\tau}_c$ вектор момената у зглобовима који потичу од деловања екстерне силе, онда се адмитансно управљање може реализовати на следећи начин

$$\dot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{C}_q \boldsymbol{\tau}_c, \quad (2.30)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{C}_q \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \mathbf{F}_{ext}, \quad (2.31)$$

где \mathbf{C}_q означава матрицу попустљивости (инверзна величина крутости) сваког зглоба робота. Такође, адмитансни контролер је могуће посматрати и у координатном систему завршног уређаја, где се онда закон управљања може написати као

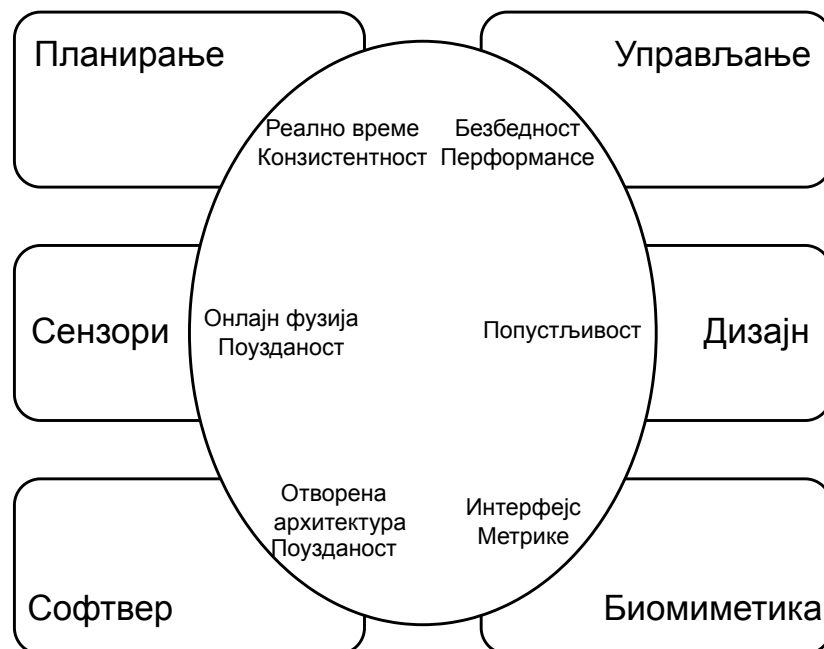
$$\dot{\mathbf{X}}_c = \mathbf{C}_X \mathbf{F}_{ext}, \quad (2.32)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{C}_X \mathbf{F}_{ext}, \quad (2.33)$$

где \mathbf{C}_X означава матрицу попустљивости завршног уређаја робота. При чему су добијене брзине у унутрашњим $\dot{\mathbf{q}}_c$ и спољашњим $\dot{\mathbf{X}}_c$ координатама заправо допринос управљању када постоји интеракција са окружењем.

2.4 Безбедна интеракција и класификација радних места робота и човека

У овој дисертацији под интеракцијом робота и човека сматраће се њихова физичка интеракција (енг. *Physical Human-Robot Interaction, pHRI*). Физичка интеракција између робота и човека је засебно поље у роботизи фокусирано на проучавању, дизајнирању и имплементацији робота који ће имати могућност интеракције са човеком на физичком нивоу. Ова интеракција се може десити у различитим контекстима, као што су колаборативна производња [106–113], медицинске и асистивне примене [114–118], па чак и у индустрији забаве [119–121]. Како би се успешно реализовала физичка интеракција између човека и робота, потребно је укључити у разматрање више аспеката као што су планирање кретања робота, управљање роботом, избор сензорских система, дизајн како робота тако и радног простора итд. (Слика 2.8).



Слика 2.8: Мапа роботике и питања која требају бити решена за ефикасну колаборацију између робота и човека.

Примарни циљ у интеракцији између робота и човека јесте безбедност. Како би се обезбедила тражена безбедност мора се водити рачуна о безбедности самих машина, избегавању колизија, детекцији интеракције, као и развити алгоритми за избегавање препрека. Ови системи обично користе сензоре и алгоритме како би се детектовало присуство човека у близини робота и како би се понашање робота прилагодило и спречиле евентуалне незгоде [122].

На почетку пројектовања роботских ћелија у којима ће роботи и људи радити у кооперацији или колаборацији, потребно је урадити идентификацију потенцијалних опасних ситуација (енг. *Risk Assessment*). Ова анализа у обзир узима различите факторе као што су брзина робота, силе које се могу развити приликом интеракције и сам дизајн радног места [123, 124]. Након анализе потенцијалних опасних места/догађаја

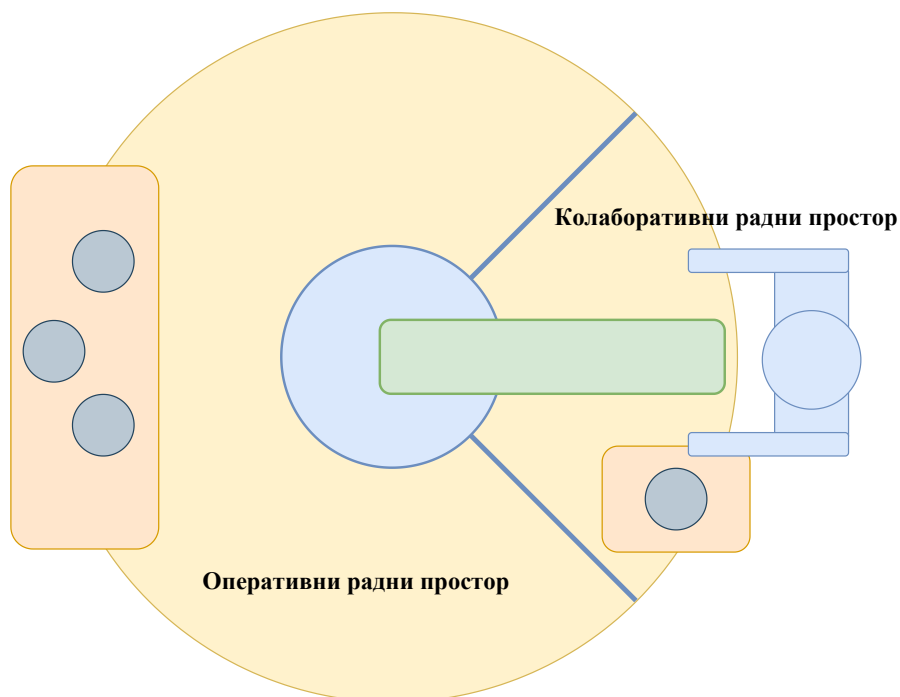
при интеракцији робота и човека, потребно је различитим сензорима и алгоритмима обезбедити детектовање и избегавање нежељених судара. Сходно томе, роботи су опремљени различитим сензорима као што су камере, ласерски сензор или сензори силе и момента. Док одговарајући алгоритми у зависности од информација са сензора могу да детектују препреку или човека и да у складу са тим промене своје понашање [122].

Такође, битан фактор у обезбеђивању безбедности између робота и човека јесте ограничавање управљања роботом (лимитирање сила интеракције и управљачких момента) [125–127].

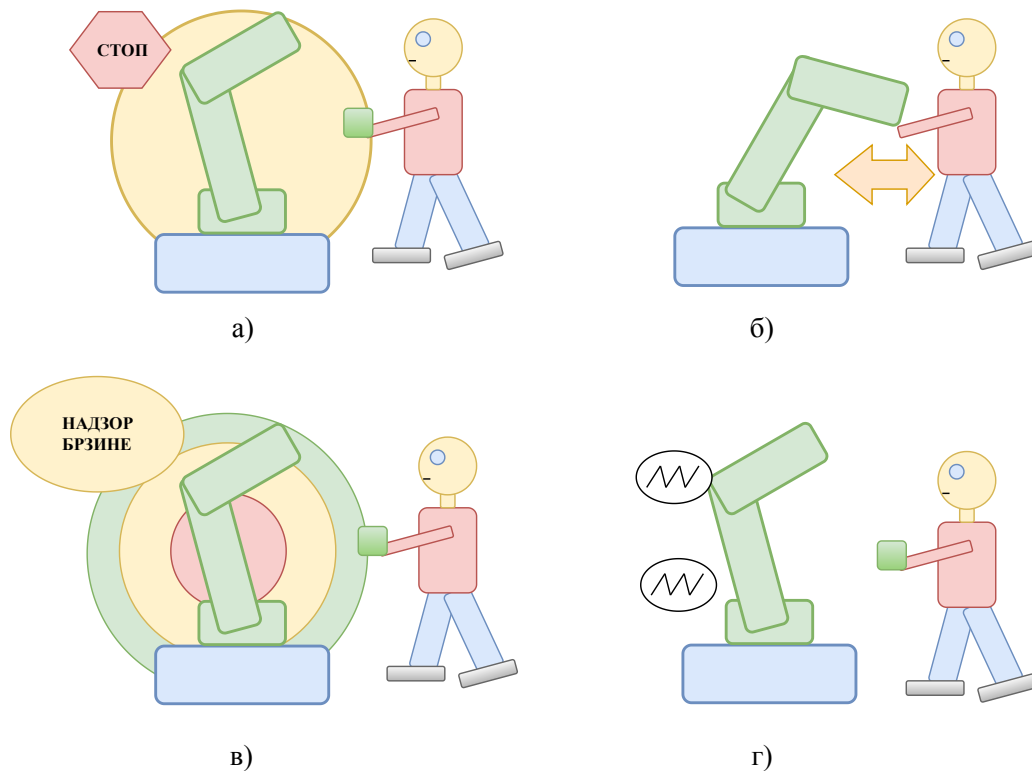
Свакако поред физичких ризика које је потребно ограничити и спречити, постоје и психолошки ризици који се морају узети у обзир, а који могу настати услед заједничког рада човека и робота. Неки од психолошких аспеката су когнитивни напор, емоционални стрес, социо-економски ризици и други ризици који могу утицати на човека.

Сама дефиниција колаборативних робота који могу да учествују у заједничком раду са човеком се значајно разликује од традиционалних робота и других машина (дефинисана у стандарду ISO/TS 15066:2016) [128], која је веома значајна при процени безбедносних импликација у индустријским поставкама. Непознавање одговарајуће терминологије може довести до погрешне интерпретације безбедносних стандарда при пројектовању ћелија за интеракцију човека и робота [129].

Према поменутом стандарду дефинише се такође и колаборативни радни простор на следећи начин: Колаборативни радни простор је подскуп оперативног радног простора где роботски систем (укључујући и обрадак) и човек извршавају задатке конкурентно током трајања процеса (Слика 2.9). Код оваквих конкурентних операција према стандарду а коришћењем колаборативних робота, радник може бити у непосредној близини робота у колаборативном окружењу у коме може доћи до физичког контакта док се роботу дозвољава да буде у регуларном радном режиму.



Слика 2.9: Репрезентација оперативног и колаборативног радног простора.



Слика 2.10: Техничке карактеристике колаборативних робота: а) безбедно заустављање; б) ручно вођење робота; в) надзор брзине и растојања робота и човека; г) лимитирање снаге и силе робота.

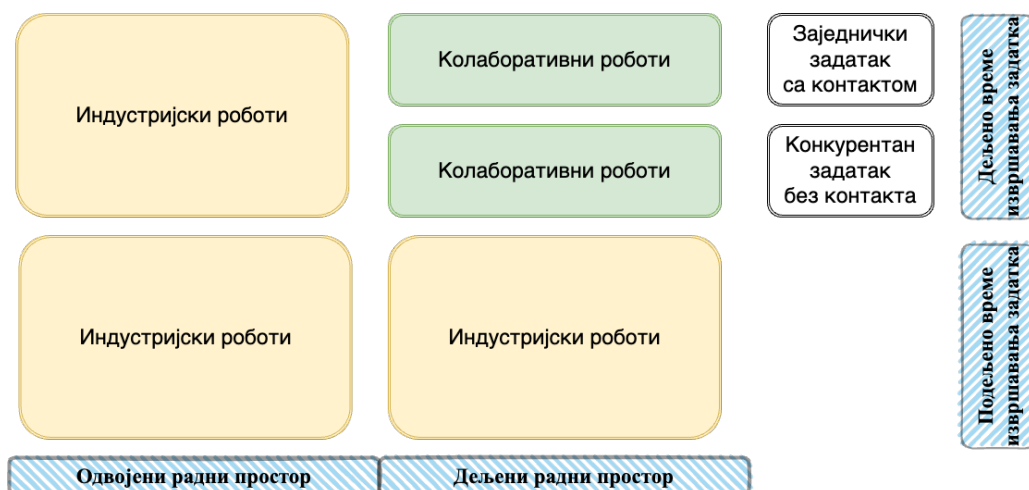
Како би робот могао да ради у непосредној близини човека неопходно је да поседује следеће техничке карактеристике: а) безбедно заустављање; б) ручно вођење робота; в) надзор брзине и растојања робота и човека; г) лимитирање снаге и силе робота [130]. На Слици 2.10 су представљене графичке репрезентације поменутих функционалности.

Са друге стране да би се робот и апликација сматрала колаборативним треба да важи следеће: 1) робот дели радни простор са човеком; 2) човек и робот врше задатке истовремено при чему задатак може захтевати физички контакт између њих; 3) робот поседује претходно наведене четири техничке карактеристике.

У складу са тим направљена је подела робота на индустријске роботе и колаборативне у зависности од начина извршавања задатка робота и човека. Главни критеријуми су да ли робот и човек деле радни простор током извршавања задатка или не, и ако га деле, да ли задатак који обављају раде истовремено или уз одсуство/присуство међусобног контакта. Подела је представљена на Слици 2.11.

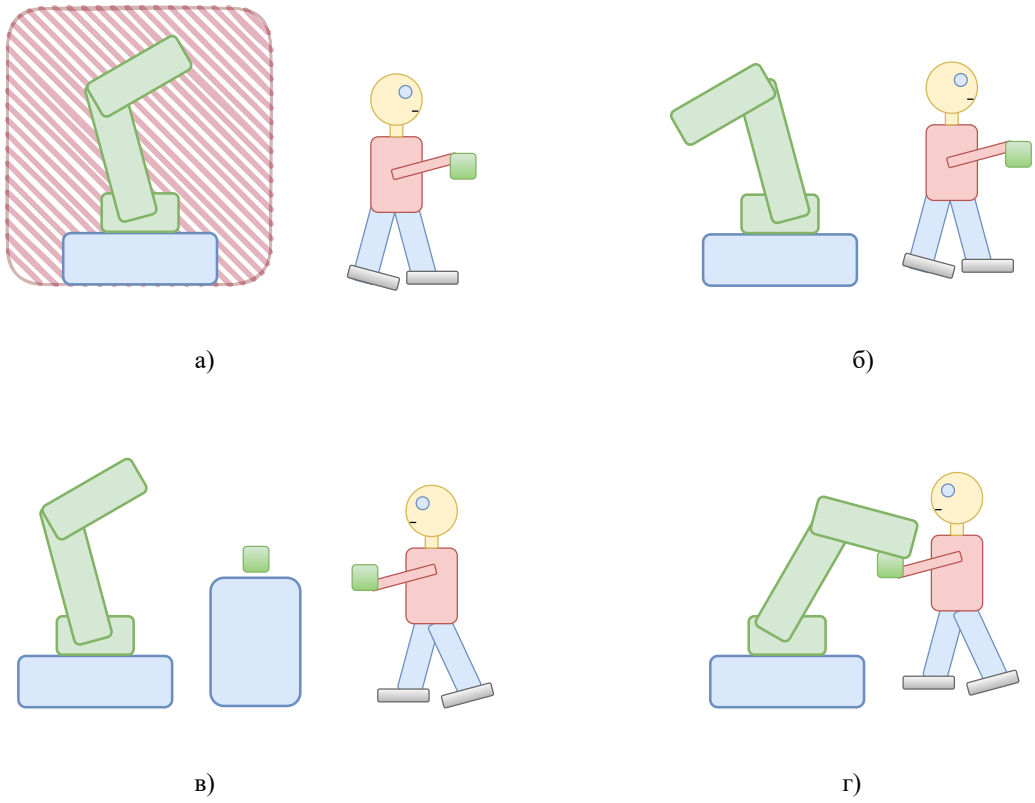
Такође, услед различитих типова задатака дефинишу се и различити нивои сарадње робота и човека. Односно, у задацима где не постоји физичке интеракције између робота и човека, дефинишу се два типа интеракције. Први тип је потпуна сепарација робота и човека, где је робот одвојен кавезом и робот нема могућност да дође у физички контакт са човеком, притом се робот у оваквој поставци може кретати максималном брзином. Други тип интеракције јесте заједничка коегзистенција робота и човека у заједничком простору, где се у оваквој поставци и даље не дели задатак између робота и човека. Такође, у оваквој поставци робот мора да има омогућено безбедно заустављање у случају да човек уђе у радни простор робота, при чему се робот мора кретати смањеном брзином иако човек није у непосредној близини робота. Следећи ниво интеракције између робота и човека подразумева кооперацију између робота и човека. У оваквим поставкама човек

и робот деле заједнички простор и имају повезане задатке, али се они не дешавају истовремено. Роботи у кооперацији са човеком морају поседовати карактеристике тако да врше надзор брзине и растојања човека, али и да лимитирају снагу и силу током извршавања задатака. Код кооперације физичка интеракција робота и човека је могућа, али не и обавезна, највиши степен заједничке интеракције подразумева колаборацију између човека и робота. Код колаборације важе сви претходно дефинисани услови при интеракцији, али се и уводе додатне безбедносне карактеристике као што је ручно вођење робота у задацима. Овај тип интеракције подразумева да робот и човек раде заједно на истом задатку делећи радни простор и време извршавања задатка. Као у кооперацији, и у колаборацији робот мора имати смањене брзине кретања. На Слици 2.12 су презентовани различити типови интеракције између робота и човека.



Слика 2.11: Подела работа према типовима извршавања задатака.

Тематика дисертације понудиће нека решења кооперације човека и робота, поштујући све безбедносне протоколе али и водећи рачуна о менталним импликацијама које могу настати коришћењем роботизованих система. У том циљу представљена је неурорергономска радна станица чији је задатак да повећа продуктивност производње као и ергономију и задовољство радника (Поглавље 3). Са друге стране, дисертација ће пружити увид у новоразвијене алгоритме који треба да унапреде физичку колаборацију између човека и робота, представљањем алгоритама за ефикасно и безбедно управљање попустљивим роботима било са емулираном или реалном крутошћу (Поглавља 4 и 5).



Слика 2.12: Типови интеракције човека и робота: а) потпуна сепарација; б) коегзистенција; в) кооперација; г) колаборација.

Поглавље 3

Сарадња робота и човека - задатак склапања потпомогнут колаборативним роботом

У оквиру овог поглавља представљена је неуроергономска радна станица за склапање потпомогнуто колаборативним роботом. Овакав радни задатак спада у радне задатке кооперације између робота и човека, где робот и човек деле заједнички радни простор али не врше заједно исти задатак. Представљена је архитектура за имплементацију радних места у којима робот и човек врше кооперацију, узимајући у обзир не само перформансе задатка који је потребно извршити, већ и факторе као што су ергономија радног места и физички и психички аспекти човека током сарадње са роботом. Такође, у оквиру архитектуре представљен је и функционални дизајн радне станице кроз модуле који врше процену физичких и психичких стања радника, и модула за пружање физичке, психичке и стратешке подршке радницима у задацима сарадње са роботом. Приказана је конкретна имплементација поменутих модула за потребе ручног склапања потпомогнутог колаборативним роботом кроз модуле за естимацију гестикулације шаке радника, процене менталног замора радника, имплементације адаптивног интерфејса и модула за опслуживање радног места коришћењем колаборативног робота. Предложена радна станица са свим модулима тестирана је у реалном фабричком окружењу, где су у самом тестирању учествовали радници који су дужи низ година ангажовани на пословима ручног склапања.

3.1 Увод

Са развојем и комерцијалном доступношћу нових технологија које гарантују безбедну физичку интеракцију са човеком, као што су колаборативни роботи, отварају се велике могућности за развој и интеграцију радних места код којих ће човек бити централна фигура, као и његова безбедност, здравље и задовољство [131, 132] (Индустрија 5.0). Индустија 5.0 допуњава постојећу Индустију 4.0 тако што ставља истраживања и развој нових технологија у службу одрживе индустрије и индустрије која у центар поставља човека и његову добробит. Инкорпорација нових технологија са циљем повећања опште добробити радника повећава не само задовољство, здравље и безбедност радника већ утиче и посредно на повећање перформанси производних процеса, узимајући у обзир ресурсе планете (енергетски аспекти и климатске промене) [133]. Како би се овакви

системи у потпуности интегрисали у радна окружења неопходно је обезбедити правилно детектовање и естимацију човекових намера као и менталног стања да би се обезбедила ефикасна и безбедна колаборација робота и људи у индустријским окружењима [134–136].

Са друге стране, неуроергономија као растућа интердисциплинарна област, која изучава функционисање људског мозга и његове релације са свакодневним понашањем у реалном окружењу [137,138], свој развој заснива на технологијама као што су носиве неуротехнологије, обрада сигнала и алгоритмима машинског учења. Као основни алат неуроергономија користи електроенцефалографију (енг. *electroencephalography*, *EEG*) која се користи за мерење и класификацију сигнала људског мозга при интеракцији [139].

У контексту развоја Индустрије 5.0, као индустрије која се фокусира на човека и његове потребе, неуроергономска истраживања имају за циљ да идентификују ментална стања радника и естимирају ментално оптерећење [140,141]. Анализом различитих *EEG* фреквенцијских опсега (тета, алфа, бета), могуће је издвојити одговарајуће индикаторе који описују неуролошке процесе код човека који су проузроковани перформансама извршавања одговарајућег радног задатка [142]. Такође, користећи *EEG* мерења могуће је извршити естимацију нивоа пажње кроз анализу аутоматских раних когнитивних процеса на спољне стимулансе и потенцијала зависних од догађаја [141].

Развој неуроергономије је уско повезан са развојем мозак-рачунар интерфејса (енг. *Brain-Computer Interface*, *BCI*), који омогућавају мониторинг можданих активности и превођење тих активности у одговарајуће команде које се прослеђују осталим системима у реалном времену. Користећи мозак-рачунар интерфејсе и *EEG* могуће је на аутоматизован и правремен начин извршити екстракцију менталног напора, нивоа пажње, перципираних грешака, и емоција како би се омогућила боља интеракција између људи и интелигентних система. Поготово када се ради о колаборативној роботици, информације о когнитивним и афективним стањима човека могу допринети у интеракцији између робота и човека која је адаптирана кориснику [143].

Задаци склапања имају веома битну улогу у индустрији. Процес склапања утиче на квалитет крајњег производа као и његову поузданост, утиче на ефикасност и продуктивност целог производног процеса, али и пружа могућност за отварање нових радних места [144]. У контексту процеса склапања, Индустрија 5.0 има за задатак да искористи напредне технологије аутоматизације и колаборативне роботе, за реализацију репетитивних или опасних задатака, док раднике преусмерава ка процесима одлучивања или задацима који захтевају поседовање посебних вештина и способности. Овакав приступ у дизајну радних места поред повећања ефикасности и продуктивности промовише позитивно радно окружење за раднике [145].

Приликом развијања стратегије за аутоматизацију процеса склапања неопходно је узети у обзир следеће кључне факторе: опслуживање великог броја различитих производа, постојање великог броја варијација једног производа, као и могућност адаптације система на различите типове производа који се склапају у малим серијама. Због тога се препоручује да један такав систем комбинује ручно склапање али и флексибилно аутоматизовано склапање [146]. Процес ручног склапања је процес оријентисан ка човеку, где је потребно да радник склопи што више јединица производа у току радног дана. Немогућност да се аутоматизује сваки процес склапања и даље изискује да се барем неки делови процеса склапања одвијају мануелно. Рад на оваквим процесима може довести до одређених мишићно-скелетних обољења, пада мотивације и фокуса, док се ментални напор повећава услед монотоних и репетитивних операција. У циљу постизања већег задовољства и бољих перформанси, концепти Индустрије 5.0 се ослањају на когнитивне

способности људи и физичке способности робота [147–151].

Кроз промену која настаје због усвајања нових концепата које доноси Индустрија 5.0 са фокусом на човека, посебно треба обратити пажњу на изазове које треба решити, а који се могу одразити на добробит човека [145]. Сходно томе у овој дисертацији предлаже се пет главних компоненти које ће олакшати неуроергономски дизајн радних места фокусираних на човека. Предложене компоненте имају за циљ да побољшају задовољство радника али и да поспеше продуктивност производног процеса. У оквиру Индустрије 5.0 перформансе целокупног процеса се не могу посматрати само као време које је потребно за извршавање задатка или број успешно склопљених уређаја, већ треба да укључе и факторе као што су задовољство радника, време потребно за увођење нових радника у процес производње (чак и оних који до тада нису имали искуства са производним процесом), али и смањење менталног напора током извршавања задатка.

У циљу решавања свих нових изазова које концепти Индустрије 5.0 доносе, од велике важности је извршити одговарајућу процену физичких али и психичких стања радника кроз развој одговарајућих модула способних да пруже смислени увид у човеков ментални напор и акције током процеса производње. Последишно, пружање одговарајуће подршке (физичке, нефизичке и стратешке) је још један битан аспект у промоцији концепата Индустрије 5.0.

3.2 Дизајн невроергономске радне станице за потпомогнуто склапање

Архитектура невроергономске радне станице има за циљ да оптимизује задовољство радника, продуктивност и безбедност у реалном радном окружењу. Кључне компоненте које сачињавају једну такву радну станицу су:

- Сензорски модули за робусну процену психичких и физичких стања радника;
- Човек-машина интерфејси (енг. *Human-Machine Interface, HMI*) дизајнирани тако да приоритизују неинвазивност и да на минималан начин утичу на уобичајену рутину радника;
- Актуаторске јединице, обухватајући физичке (роботе) али и визуелне и аудио сигнале, које олакшавају интеракцију и ангажман радника, чиме се повећава ефикасност и ергономија.

Осим тога, интеграција свих модула кроз Индустијски *IoT* систем мора бити правило урађена како би служила као основ за даље планирање и интеграцију нових паметних невроергономских модула. Користећи бенефите овакве архитектуре могуће је направити значајан напредак у пољу невроергономије, што ће за последицу имати повећање задовољства и перформанси радника.

У оквиру ове дисертације предложен је један дизајн невроергономске радне станице за процес склапања потпомогнут колаборативним роботом, који је проистекао из ангажмана на пројекту *Smart Human Oriented Platform for Connected Factories, SHOP4CF*¹. Невроергономска радна станица сачињена је од пет модула:

- Модул за процену физичког стања радника (надзор и предикција кретања и ергономије радника) коришћењем сензора кретања (нпр. камере, инерцијални сензори, системи базирани на инфрацрвеном зрачењу);
- Модул за процену психичког (менталног) стања радника коришћењем система базираних на мозак-рачунар интерфејсима и системима за праћење покрета очију;
- Модул за физичку подршку раднику (заштита од мишићно-скелетних обољења и повећање физичких перформанси – снага и/или прецизност) користећи колаборативне роботе или егзоскелет;
- Модул за пружање нефизичке подршке (аудио-визуелна подршка) путем нових адаптивних корисничких интерфејса, проширене или виртуелне реалности;
- Модул за пружање стратешке подршке заснован на експертском искуству и анализи података добијених кроз безбедну и поуздану *IoT* инфраструктуру од свих осталих модула.

Све компоненте невроергономске радне станице користе *FIWARE* као посредника у комуникацији и размени информација [152]. *FIWARE* представља технологију отвореног кода која се користи за креирање паметних дигиталних решења, дигиталних двојника и других решења која захтевају коришћење, размену и чување информација у различитим

¹Smart Human Oriented Platform for Connected Factories: <https://shop4cf.eu/>

областима дигиталних технологија. Употребом паметних модела података и *FIWARE*-а, омогућена је интеграција различитих система са различитим комуникационим протоколима. Такође, коришћењем додатних модула из *FIWARE* портфолија, могуће је интегрисати различита софтверско/хардверска решења (базе података, роботски системи, *IoT* уређаји, сензори). *FIWARE* користи Орион контекст брокер (*OCB*) за примање, слање и обраду свих података.

Циљ предложеног система је да омогући ручно склапање потпомогнуто колаборативним роботом, што представља широко распрострањен индустријски задатак.

Како би се обезбедило сигурно извршавање задатка склапања, дизајн једне овакве ћелије мора да узме у обзир оптималну позицију радника, колаборативног робота, али и *HMI* система и сензора за естимацију виталних параметара код човека. Дизајн мора да минимизује не-ергономске позиције радника током извршавања радног задатка и на тај начин максимално смањи ризик од повреда и нежељених инцидената. Поменута неуроергономска радна станица за склапање потпомогнуто колаборативним роботом, дизајнирана је тако да радник обавља задатак склапања у такозваној златној зони [153,154], чиме је потреба за истезањем и увијањем радника минимизована. Колаборативни робот је постављен тако да минимално окупира лични простор радника, док су адаптивни кориснички интерфејс и сензор за препознавање гестикулације шаке постављени на ергономске позиције.

Задатак који је разматран у оквиру ове дисертације је типичан задатак склапања. Уређаји који се склапају су погодни за ручно склапање због њиховог дизајна, који није погодан за аутоматизовану монтажу услед присуства великог броја флексибилних елемената (каблова) које је потребно међусобно повезати. На Слици 3.1 су приказани објекти које је било потребно склопити.



Слика 3.1: Склопљени уређаји. Фискална каса, лево, и *GSM* уређај, десно.

3.2.1 Опис мануелног задатка склапања

Код ручног склапања сви потребни делови чувају се у кутијама испред радника. Радник мора да изабере тачне компоненте које је потребно монтирати, у тачном редоследу, користећи одговарајуће алате (одвијач, лепак, лемилница, итд.) и примени одговарајуће операције како би обавио задатак склапања. Раднику се обично додели одређени тип уређаја који треба да састави током једног или више радних дана. Свака притужба на производ и повезани економски и репутациони губици компаније директно су везани за грешке које могу настати у процесу склапања, чиме се ставља додатан притисак на раднике на линији за склапање. Са друге стране, овај тип задатака је монотон и репетитиван, што доводи до губитка фокуса радника и недовољне посвећености да се правилно изврши задатак. Међутим, додељивање различитих монтажних задатака једном раднику може довести до другог скупа изазова, који су повезани за недостатак радне рутине при извршавању задатака склапања, тежине у памћењу тачног поступка склапања, потребних делова и редоследа операција, итд. Процес ручног склапања приказан је на Слици 3.2.



Слика 3.2: Процес ручног склапања.

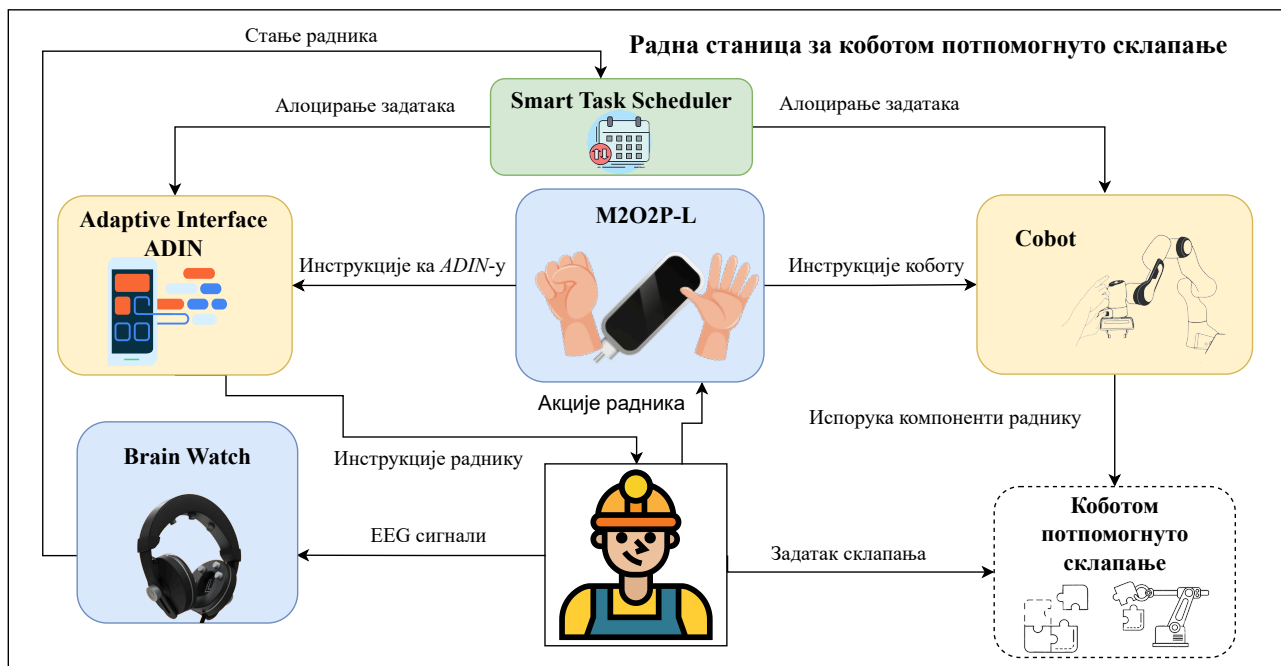
3.2.2 Опис задатка склапања потпомогнутог колаборативним роботом

Процес монтаже потпомогнут колаборативним роботом почиње када се раднику додели тип производа који треба саставити према распореду прослеђеног од стране *Smart Task Scheduler*. Током процеса склапања, радник може пратити упутства за склапање која су му доступна кроз адаптивни кориснички интерфејс. Упутства укључују детаљан опис неопходних делова и алата за употребу, као и јасне кораке које је потребно предузети. Ова упутства за склапање приказују се кроз модул за адаптивни интерфејс (*ADIN*). Овај модул омогућава креирање нових сетова упутства, укључујући текстуална објашњења и илустрације, и лако се може ажурирати од стране овлашћених корисника како би се омогућило будуће додавање нових упутстава за склапање производа.

На почетку сваког корака процеса склапања *Franka Emika Panda* робот преузима неопходне делове за тај корак склапања из складишта и додаје их раднику на погодан положај. У случају потребе, складишта се могу допунити новим компонентама и током самог процеса склапања без нарушавања динамике процеса. Пошто радник преузме делове које је робот донео, сигнализира гестикалацијом шаке да су делови преузети, потом робот почиње са преузимањем компоненти неопходних за следећи корак процеса

склапања. Систем за препознавање гестикулације шаке заснован је на коришћењу *Leap Motion* сензора, односно *M2O2P-L*² модула. Информације овог модула користе се за синхронизацију *ADIN*³ модула као и за синхронизацију динамике којом робот додаје раднику неопходне делове за процес склапања.

Током склапања, бежични *EEG* сензори мере електричну активност мозга. Ове информације се користе од стране *BrainWatch*⁴ модула за израчунавање параметара ангажовања и менталног оптерећења радника. Информације из *BrainWatch* модула се користе за доношење одлука о оптималној алокацији радних задатака раднику у процесу склапања. Архитектура предложене неуроергономске радне станице са својим софтверско-хардверским модулима приказан је на Слици 3.3.



Слика 3.3: Архитектура неуроергономске радне станице са протоком информација између компоненти.

3.2.3 Психичка процена стања радника – *BrainWatch* модул

BrainWatch модул се користи за естимацију менталног оптерећења корисника у реалном времену, током рада на задацима склапања. Овај модул користи информације са комерцијално доступног *EEG* уређаја кроз специјално развијен софтвер који израчунава параметре оптерећења. За потребе снимања електричне активности мозга коришћен је *EEG* уређај (*Smartphones*⁵) у комбинацији са преносивим бежичним системом за аквизицију *EEG* сигнала (*Smarting MOBI*⁵).

Главни индикатори когнитивног оптерећења естимирани помоћу *BrainWatch* модула у овој дисертацији су тета-алфа однос (енгл. *theta to alpha ratio*, *TAR*), тета-бета однос

²*Multi-Modal Offline and Online Programming Solutions* – *Leap Motion* модул доступан на *RAMP* платформи: <https://ramp.eu/#/component/f642a89a-08b4-458d-be98-33f0fa613a92>

³Адаптивни интерфејс модул доступан на *RAMP* платформи: <https://ramp.eu/#/component/6491a34c-221e-4c0a-84f1-a71ab09294d9>

⁴*BrainWatch* модул доступан на *RAMP* платформи: <https://ramp.eu/#/component/2bc9443a-fa9d-4ab9-a822-65681754b8c7>

⁵ *mBrainTrain* <https://mbraintrain.com/>

(енгл. *theta to beta ratio*, *TBR*) и индекс ангажовања (енгл. *engagement index*, *EI*), који се рачунају на следећи начин

$$TAR = \frac{P\theta}{P\alpha}, \quad (3.1)$$

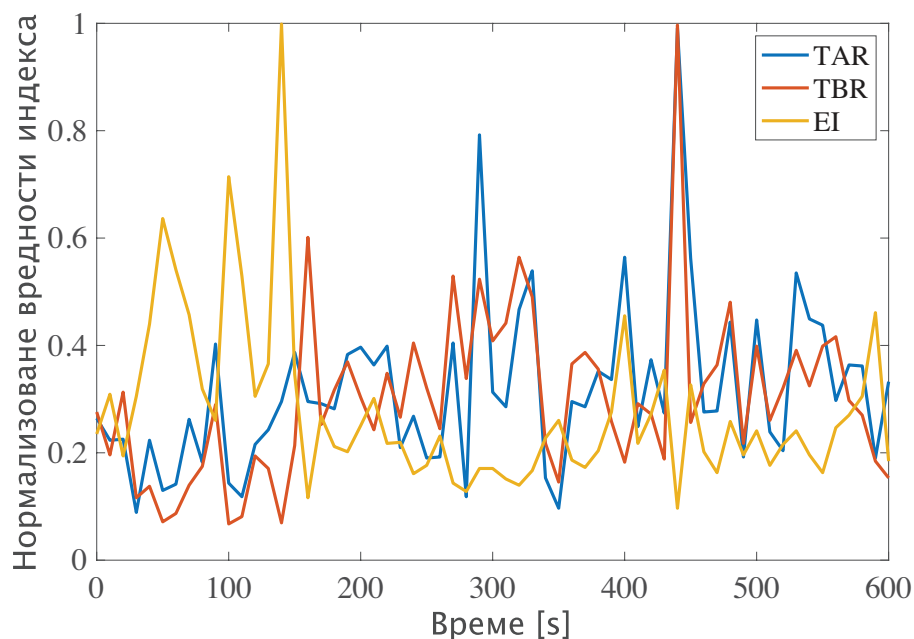
$$TBR = \frac{P\theta}{P\beta}, \quad (3.2)$$

$$EI = \frac{P\beta}{P\alpha + P\theta}, \quad (3.3)$$

где су са $P\theta$, $P\alpha$ и $P\beta$ означене спектралне снаге сигнала из тета, алфа и бета фреквенцијских опсега, респективно.

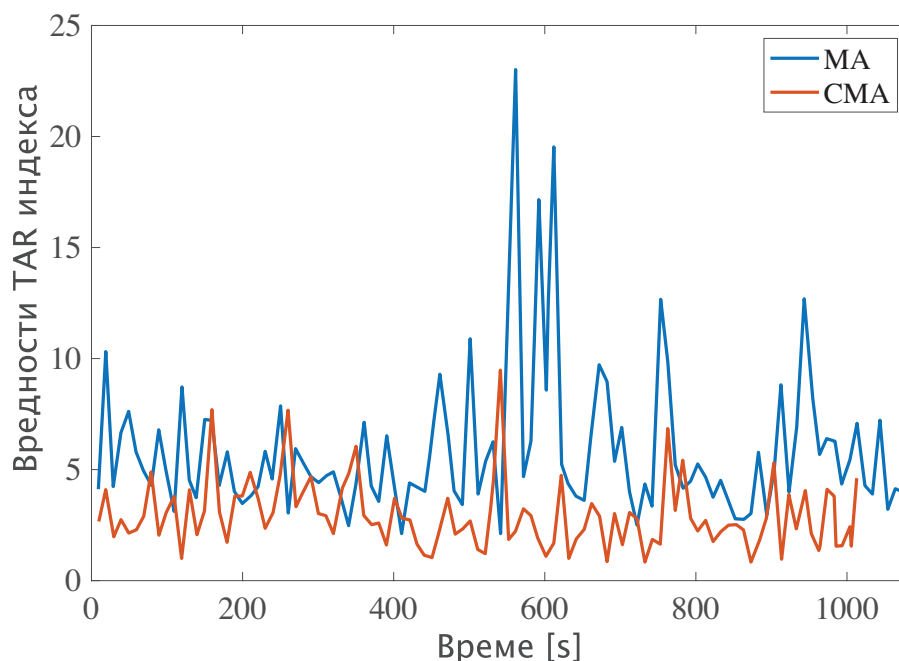
Повећање менталног оптерећења доводи до смањења снаге алфа таласа и повећања снаге тета таласа, чиме се *TAR* индекс повезује са оптерећењем и менталним напором. Повећање будности и ангажовања на извршавању задатка резултује повећањем снаге бета таласа и смањењем снаге тета таласа, одакле се *TBR* индекс повезује са радном меморијом, пажњом и опрезношћу. *EI* одражава ментални напор, будност, пажњу, опрезност и ангажовање на извршавању задатка [155].

BrainWatch модул врши израчунавање параметара три когнитивна индекса на сваким 10 секунди. Излазни подаци *BrainWatch* модула намењени су за подршку при одлучивању у реалокацији задатака између радника, са циљем смањења менталног оптерећења и повећања општег задовољства радника у процесу склапања. Пример сигнала (*TAR*, *TBR* и *EI* индекса) током трајања задатка склапања приказан је на Слици 3.4 лево. У циљу боље визуелне репрезентације сигнали су нормализовани.



Слика 3.4: *EEG* индикатори добијени кроз *BrainWatch* модул. Пример сва три индикатора током извршавања задатка склапања: *TAR* - плава; *TBR* - црвена; *EI* - наранџаста. Десно - Упоредни приказ *TAR* индекса у *МА* (плава) и *СМА* (црвена) сценарију.

Слика 3.4 десно, приказује излаз *BrainWatch* модула, *TAR* индекс, у два различита сценарија (*МА* - мануелно склапање, *СМА* - мануелно склапање потпомогнуто колаборативним роботом). Са слике се могу видети предности коришћења неуроергономске радне станице (мање вредности *TAR* индекса и краће време потребно за склапање уређаја код *СМА* сценарија).



Слика 3.5: EEG индикатори добијени кроз *BrainWatch* модул. Упоредни приказ *TAR* индекса у *MA* (плава) и *SMA* (црвена) сценарију.

3.2.4 Физичка процена стања радника – *M2O2P-L* модул

M2O2P-L модул се заснива на архитектури постојећег *M2O2P* [156] модула из портфолија *Smart Human Oriented Platform for Connected Factories (SHOP4CF)* пројекта. Коришћењем *Leap Motion* сензора, ова компонента може препознати присуство људске шаке у свом видном пољу и детектовати гестикулацију шаке оператера на неинвазиван начин.

Потребно је креирати одговарајући скуп података различитих гестикулација шаке како би се омогућила правилна детекција. Иако постоје јавно доступни скупови података различитих гестикулација шаке, нови скуп података је морао бити формиран због неадекватности постојећих скупова. У већини доступних скупова података, шака оператера се налази на фиксном растојању од сензора, што није случај у реалним индустријским сценаријима, где се од оператера не може очекивати да позиционира шаку увек на истој удаљености од сензора. Скуп података креиран за ово истраживање састоји се од четири класе гестикулација шаке, са 5000 слика сваке класе. Модул користи *VGG16* дубоку конволуциону неуралну мрежу како би се класификовале гестикулације шаке у четири различите класе. Анализирани класе су отворена шака, песница, вертикална шака и симбол *L* (Слика 3.6).

Систем показује добре перформансе на тестним подацима од 99,3%, где је препознавање вертикалне шаке 100%, симбола *L* 98,4%, отворене шаке и песнице 99,4% [157]. Матрица конфузије за коришћени модел је дата на Слици 3.7. Такође, *M2O2P-L* модул се може користити у апликацијама у реалном времену јер цео процес детекције руке и препознавања гестикулације траје не више од 0.33 секунде.



Слика 3.6: Типичне гестикулације шаке које се могу класификовати користећи *M2O2P-L* модул.

Класификација гестикулација шаке коришћењем VGG16 модела					
Предикција \ Реална класа	Песница	Отворена шака	L симбол	Вертикална шака	Сума
Песница	497 24.85%	0 0.00%	3 0.15%	0 0.00%	500 99.40% 0.60%
Отворена шака	0 0.00%	497 24.85%	3 0.15%	0 0.00%	500 99.40% 0.60%
L симбол	2 0.10%	4 0.20%	492 24.60%	2 0.10%	500 98.40% 1.60%
Вертикална шака	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	500 25.00%	500 100.00% 0.00%
Сума	499 99.60% 0.40%	501 99.20% 0.80%	498 98.80% 1.20%	502 99.60% 0.40%	1986 / 2000 99.30% 0.70%

Слика 3.7: Матрица конфузије VGG16 модела за класификацију гестикулација шаке.

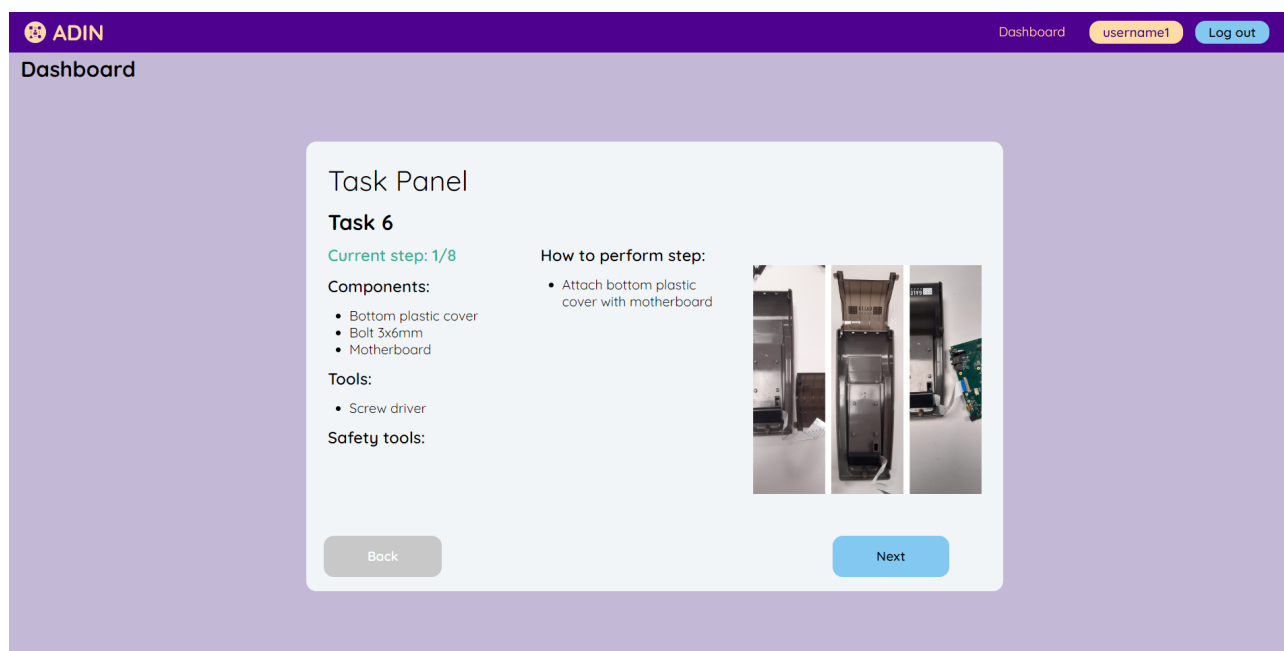
Могуће је додати нове или променити употребу постојећих гестикулација шаке спрам потреба различитих производних процеса. У тренутном сценарију, гестикулација

отворене шаке се користи како би се систем обавестио да је радник завршио тренутни корак склапања, гестикулација песнице се користи за повратак на претходну страницу корисничког упутства унутар адаптивног графичког интерфејса, док се друге две гестикулације не користе.

3.2.5 Нефизичка подршка раднику – *ADIN* модул

ADIN модул је адаптивни графички интерфејс, који приказује информације које добије кроз *FIWARE* од *SQL* базе података. Сам графички модул је доступан кроз *SHOP4CF* портфолио. У оквиру овог истраживања припремљена је база података дизајнирана за чување података о задацима склапања на погодан начин. Такође, омогућена је комуникација осталих система са системом адаптивног интерфејса, у циљу правременог информисања радника о тренутном кораку склапања. База података чува све информације о сваком задатку склапања. Путем *FIWARE* инфраструктуре, на основу детектоване гестикулације шаке од стране *M2O2P-L* модула, *ADIN* модул мења информације које треба приказати на екрану.

Компонента правремено пружа информације о тренутном кораку склапања на илустративни начин, омогућавајући радницима да обављају задатак монтаже са мање одговорности због потпуно вођеног поступка. Са друге стране, модул пружа веома корисне информације почетницима у процесу учења, посебно смањујући изазове при прерасподели радника са монтаже једног уређаја на монтажу другог уређаја.

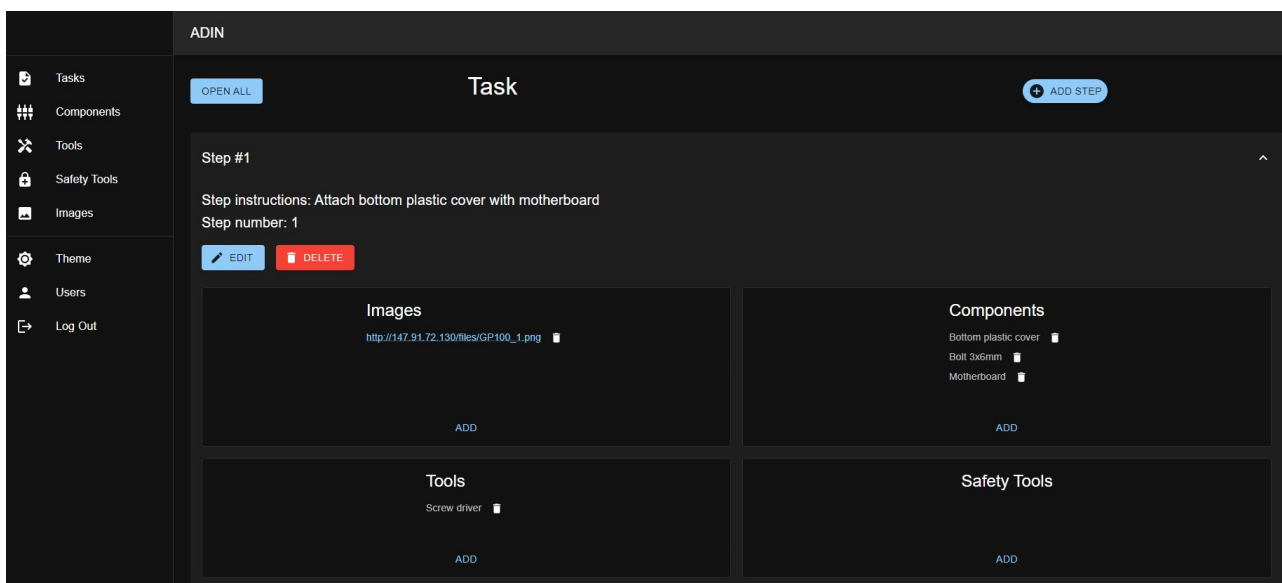


Слика 3.8: *ADIN* контролни панел са упутствима за склапање.

Слика 3.8 приказује *ADIN* панел са упутствима где су приказане све информације о тренутном кораку монтаже (укључујући компоненте и потребне алате, битне коментаре и илустрације).

Како би се омогућило чување података о свим задацима креирана је апликација са *SQL* базом података, која је уједно и апликација за генерисање нових задатака и њихових упутстава. Корисници се могу пријавити на апликацију и приступити информацијама према њиховим додељеним правима приступа. Помоћу ове апликације, корисници могу

дефинисати нове компоненте, алате и безбедносне мере, као и креирати нове задатке и под-задатке. Такође, коришћењем ове апликације, корисници могу изменити већ генерисане секвенце задатака. Слика 3.9 приказује неке функционалности апликације за креирање/измену информација о задацима склапања.



Слика 3.9: Апликација за управљање *SQL* базом података за измену/унос задатака склапања.

3.2.6 Стратешка подршка раднику – *Smart task scheduler* модул

Smart Task Scheduler врши мониторинг перформанси са различитих радних станица (производни параметри и индекси менталног напора) и алоцира ресурсе радним станицама и радницима. Ресурси могу бити планирани ручно (од стране менаџера производње) или аутоматски (од стране интелигентне софтверске апликације), а на основу потреба у производњи. *Smart Task Scheduler* омогућава управљање производњом како би распоредио задатке између радних станица и радника, као и реконфигурацију радне станице за новододељени задатак. Овај модул може бити додатно искоришћен за аутоматско реалоцирање радника и задатака између њих на најоптималнији начин како би се повећала производња и задовољство радника, креирањем одговарајућих правила за реалокацију на основу перформанси радника, нивоа напора и потреба производње.

3.2.7 Физичка подршка раднику – *Cobot* модул

Cobot модул је развијен са циљем да контролише *Franka Emika Panda* робота на синхронизован начин, ради испуњавања захтева корисника и испоруке свих неопходних делова за правовремено извршавање склапања.

Колаборативни робот је обучен да изврши преузимање појединих компоненти из одговарајућих складишних кутија за све задатке склапања за које је радна станица конфигурирана. Сви покрети колаборативног робота морају бити програмирани на начин да омогуће потпуну ергономију радника. Такође, у циљу бољег и лакшег прихватања робота у радном окружењу, робот мора имати предвидиве покрете, како би се код радника смањила могућност за доживљавањем страха, шока или изненађења [158]. Због тога, *Cobot* модул коришћен у предложеном систему врши минималну опструкцију радног

простора радника. Такође, динамика покрета колаборативног робота и извршење задатака директно су повезани са динамиком којом човек извршава задатак склапања, јер ће робот интераговати са корисником само онда када *M2O2P-L* модул препозна одговарајућу гестикулацију шаке.

3.3 Експериментална поставка и протокол

Предложена неуроергономска радна станица, код које је човек централна фигура око које се врши аутоматизација за задатке склапања, тестирана је у реалном окружењу у фабрици фискалних каса и *GPS* модула *Galeb Electronics*. Експерименте на неуроергономској радној станици су изводили запослени у компаније чији се свакодневни посао састоји из ручне монтаже различитих електронских уређаја. Радници су седели на столицама за радним столом на којем су вршили задатак склапања. Екран рачунара приказивао је графичко корисничко упутство кроз *ADIN* модул, који је био позициониран на левом делу радног стола. Модул *M2O2P-L* за естимацију гестикулација шаке био је смештен са леве стране радника, такође. Колаборативни робот и полица са деловима за склапање постављени су близу стола, насупрот радника.

Експериментална поставка приказана је на Слици 3.10. *EEG* слушалице биле су постављене на главу радника. Радницима је објашњена сврха и поступак експеримента. Задатак је био саставити два фискална уређаја који се састоје од различитих корака који се поклапају са одговарајућим упутствима *ADIN* модула. Два задатка третирана су одвојено, са пето-минутном паузом између њих. Коришћени алати неопходни за извршавање задатка били су одвијач (у пет корака) и лемилица (један корак). За остале кораке нису били потребни алати. Радње које је радник требало да изведе укључивале су причвршћивање различитих делова вијцима, ручно позиционирање електронских компоненти на унапред одређена места, лемљење итд.

Радници су добили упутства да изврше сваки ручни монтажни задатак у два експериментална сценарија:

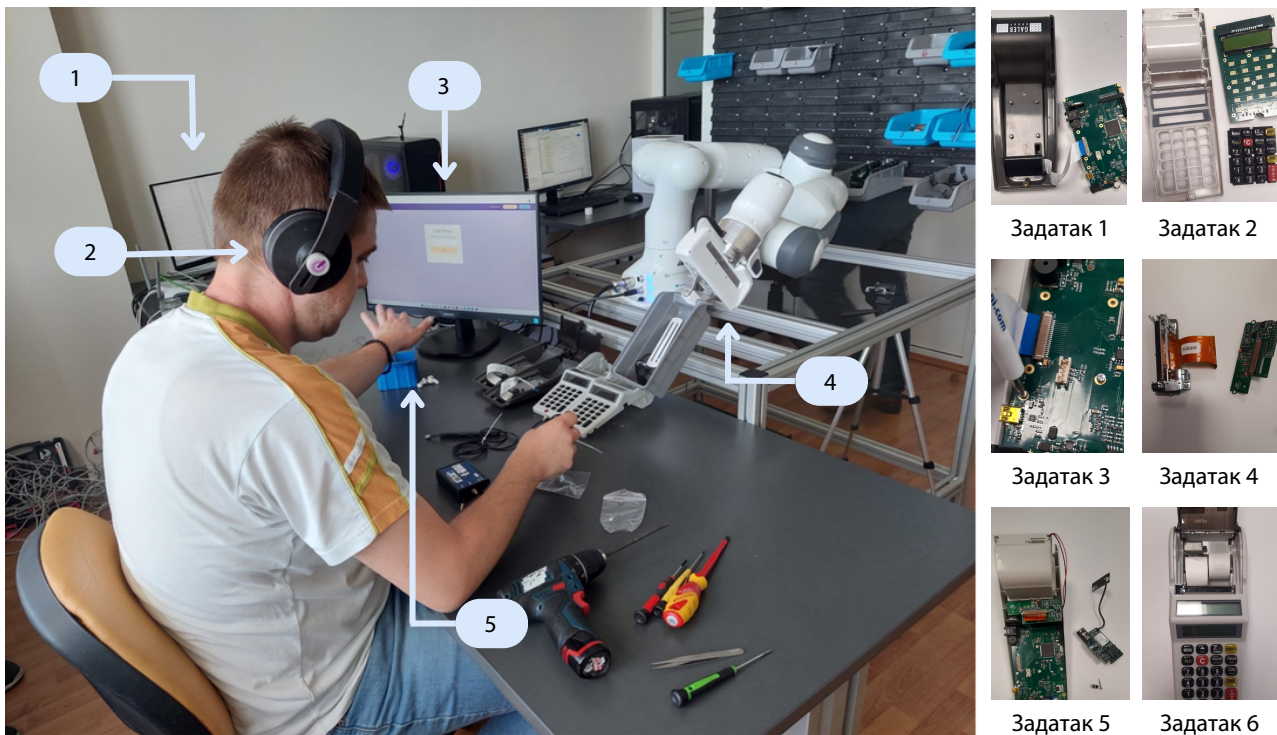
- Стандардна ручна монтажа (енгл. *manual assembly, MA*);
- Ручна монтажа потпомогнута колаборативним роботом (енгл. *cobot supported manual assembly, CMA*).

У првом сценарију, радник није имао интеракцију са било којим делом система осим са *BrainWatch* модулом, који је бележио мождане таласе. У другом сценарију, радник је извршавао ручну монтажу потпомогнут колаборативним системом, користећи *ADIN*, *M2O2P-L* и *BrainWatch* модуле.

Редослед задатака и редослед сценарија унутар истог монтажног задатка били су случајни за све раднике.

У *MA* сценарију, сви алати и делови потребни за извршење задатка били су сортирани и постављени на радни сто испред радника, заједно са писаним упутствима за склапање. *MA* задатак извођен је тако да потпуно реплицира дневну рутину радника на задацима ручне монтаже.

У *CMA* сценарију, задатак је почео са првом страницом упутства приказаном на екрану путем *ADIN* интерфејса, док је робот преузео неопходне делове из складишта за први корак и додао их раднику на погодну позицију испред њега у пластичном контејнеру. Након читања упутства и преузимања неопходних делова из пластичног контејнера који држи робот, радник има могућност да пређе на следећи корак правећи гестикулацију отворене шаке изнад *Leap Motion* сензора, односно *M2O2P-L* модула. На тај начин, радник може да изводи први корак задатка, док робот припрема неопходне делове за наредни корак задатка склапања. У *CMA* сценарију, *TAR*, *TBR* и *EI* индикатори се израчунавају на сваких 10 секунди, док се сви сирови *EEG* подаци чувају ради даље анализе. Време потребно за завршетак ручне монтаже у сваком сценарију



Слика 3.10: Експериментална поставка линије за склапање потпомогнуто колаборативним роботом на примеру једног задатка склапања. 1 – *Brain Watch* модул за интерпретацију показатеља активности мозга, 2 – *Smartphones* коришћене за прикупљање *EEG* сигнала за *Brain Watch* модул, 3 – *ADIN* модул коришћен за приказ упутстава, 4 – Колаборативни робот који предаје неопходне компоненте раднику, 5 – *Leap Motion* сензор који служи за прослеђивање информација *M2O2P-L* модулу како би на основу одговарајућих гестикулација шаке управљао остатком система. Задатак 1 - Монтажа матичне плоче на пластични поклопац. Задатак 2 - Склапање предњег поклопаца фискалног уређаја. Задатак 3 - Причвршћивање матичне плоче. Задатак 4 - Склапање термалног штампача. Задатак 5 - Повезивање *GSM* модул са матичном плочом. Задатак 6 - Склапање горњег и доњег дела фискалног уређаја.

фиксирано је од стране радника, односно последица је динамике којом радник извршава задатак.

Подаци прикупљени са сензора (*EEG* и *Leap Motion*) су аутоматски прослеђивани, обрађивани и складиштени путем предложеног комуникационог модула *Fiware*.

По завршетку задатка, извршена је субјективна оцена путем *NASA* упитника за процену индекса радног оптерећења (*NASA-TLX*) [159] како би се оценило перцепирано оптерећење. *NASA-TLX* користи шест подскала, које се крећу од 1 до 21, како би се оценило укупно ментално оптерећење. Прва подскала у упитнику била је „ментални напор”, односно количина менталне и перцептивне активности потребне за извршење задатка (нпр. размишљање, одлучивање, рачунање, памћење, гледање, тражење итд.). Друга подскала била је „физички напор”, или количина потребне физичке активности. Трећа подскала била је „временски напор”, или количина притиска времена осећаног због темпа којим се задаци или делови задатка дешавају. Четврта подскала била је „укупни перформанс”, или субјективна оцена успеха у извођењу задатка. Пета подскала је била „напор”, или количина менталног и физичког рада потребног за постигнути ниво перформанси. Шеста подскала била је „ниво фрустрације”, тј. количина иритације, стреса или неразумевања које се осећало током задатка.

3.4 Анализа и обрада података

Да би се добили резултати потребни за анализу *EEG* индекса, сачувани сирови *EEG* подаци су обрађени на следећи начин. *EEG* сигнал канала *Cz* коришћен је за анализу. *EEG* сигнал је прво филтриран у опсегу од 1–45 Hz користећи Батервортов филтер четвртог реда. Сигнал је сегментисан у интервале од 5 s, а интервали који садрже високе амплитуде дрифтова веће од $\pm 100 \mu\text{V}$ искључени су из даље анализе. Преостали сигнали су филтрирани у тета (4–7 Hz), алфа (8–13 Hz) и бета (14–45 Hz) опсезима користећи Батервортов филтер четвртог реда, затим су квадрирани и усредњени чиме је добијена снага сигнала у сваком временском оквиру. Потом је израчуната медијана снаге сигнала за сваки опсег, задатак и сценарио, и израчунати су индекси *TAR*, *TBR* и *EI*.

Циљ анализе података је валидација сваке компоненте нове неуроергономске радне станице у реалном фабричком окружењу и поређење мера перформанси сваке компоненте између два експериментална сценарија (*CMA* и *MA*).

Мере перформанси радника и оптерећења анализирани и упоређене између оба сценарија укључивале су следеће информације:

- резултате *NASA-TLX* теста: вредности у опсегу од 1-21 за свих 6 подскала упитника;
- *EEG* индикаторе: *TAR*, *TBR* и *EI*;
- тачност класификације *M2O2P-L* модула;
- број грешака током извршења задатка; и
- трајање извршавања задатка.

Сваки радник је одрадио два задатка у два експериментална сценарија, па је усвојено 8 (мерења) \times 2 (сценарија) за упоредну анализу користећи *Wilcoxon signed-rank* тест са прагом значајности од 0.05.

Резултати су приказани као медијана {*Q1–Q3*}, где су *Q1* и *Q3* први и трећи квартали.

Анализа корелације је спроведена између три *EEG* индекса и вредности *NASA-TLX* теста за сваку скалу. Циљ анализе је утврдити *EEG* индексе осетљиве на промене у одређеним аспектима радног оптерећења мерених помоћу *NASA-TLX*. Коефицијент корелације (*r*) и вредност значајности (*p*) добијени су између сваког од *EEG* индикатора и вредности *NASA-TLX* за сваку од шест скала. Праг значајности за *p*-вредност је 0.05. Сваки тест корелације укључивао је 16 вредности *EEG* индикатора (8 задатака \times 2 сценарија) и 16 *NASA* оцена за једну скалу.

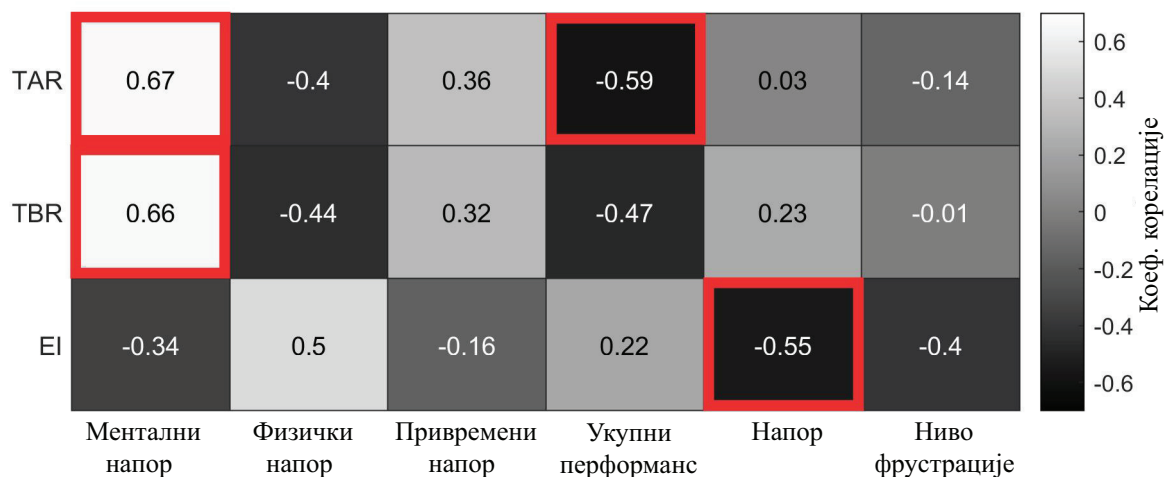
3.5 Резултати

У експерименту је учествовало четири деснорука мушка радника, старости од 29 до 45 година. Сви радници су имали вишегодишње искуство на пословима који захтевају ручну монтажу фискалних уређаја. Ниједан од учесника није имао претходно искуство рада са индустријским и/или колаборативним роботима или било којим другим делом система.

Статистичка анализа *NASA-TLX* резултата између *СМА* и *МА* сценарија открила је значајан пад у оценама „менталног напора” за *СМА* сценарио и значајан раст у оценама перформанси за *СМА* сценарио ($p = 0.016$).

Статистичко поређење *EEG* индикатора између сценарија (*СМА* и *МА*) открило је статистички значајну разлику ($p = 0.08$) за *TAR* индикатор, где су медијане за *TAR* вредности (медијана $\{Q1, Q3\}$) за *СМА* и *МА* биле 2 $\{1.3, 3.2\}$ и 3 $\{1.5, 4.9\}$, респективно.

Резултати анализе корелације између *EEG* индикатора и *NASA-TLX* оцена приказани су на Слици 3.11.



Слика 3.11: Коefицијенти корелације између три *EEG* индекса (*TAR*, *TBR*, и *EI*) и вредности шест *NASA-TLX* скала (ментални напор, физички напор, привремени односно временски напор, укупне перформансе, напор, и ниво фрустрације). Значајне вредности корелације означене су црвеном бојом.

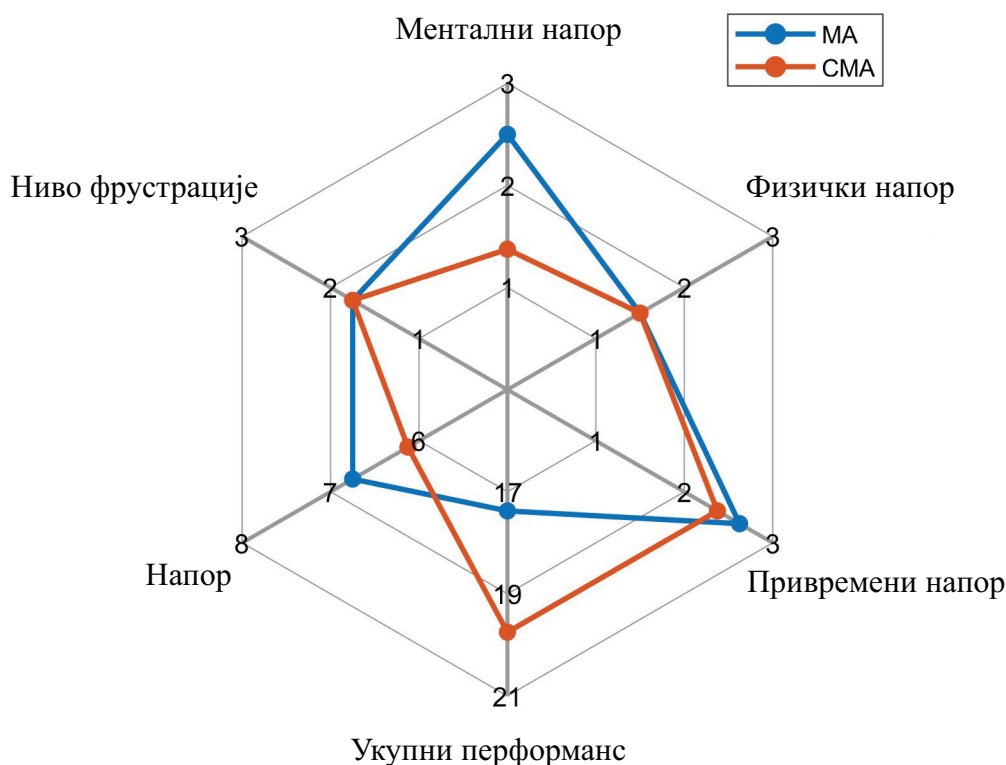
Анализа корелације открила је значајну позитивну корелацију између *TAR* индикатора и резултата „менталног напора” ($r = 0.67$, $p = 0.004$), значајну позитивну корелацију између *TBR* индикатора и резултата „менталног напора” ($r = 0.66$, $p = 0.005$), значајну негативну корелацију између *TAR* индикатора и резултата „укупног перформанса” ($r = -0.59$, $p = 0.016$), и значајну негативну корелацију између *EI* индикатора и резултата „напора” ($r = -0.54$, $p = 0.029$).

Није било значајних разлика у трајању задатка склапања између сценарија. Међутим, ниједна грешка није била направљена у *СМА* сценарију, док је у *МА* сценарију начињено пет грешки, што је изискивало исправљање и/или враћање на претходни корак у процесу склапања.

Резултати о перформансама *M2O2P-L* модула показали су тачност од 100%. Кокретно, све гестикације отворене шаке који сигнализирају прелазак на следећи корак, тачно су детектовани у одговарајућем тренутку. Пошто је број грешака приликом извођења задатка склапања у *СМА* сценарију био 0, није било потребе за коришћењем

гестикалације затворене песнице током експеримента.

Просечне оцене *NASA-TLX* теста у *МА* и *СМА* сценаријима приказане су на Слици 3.12.



Слика 3.12: Просечне оцене *NASA-TLX* теста за свих 6 скала (ментални напор, физички напор, привремени или временски напор, укупни перформанс, напор, и ниво фрустрације).

Циљ овог истраживања је архитектура, развој методолошких концепата и техничка реализација неуроергономске радне станице у којој робот потпомаже човеку да изврши одређени задатак (задатак ручног склапања). Приказани резултати су показали да се постиже већа ефикасност у процесу ручног склапања, уз смањење менталног оптерећења приликом реализације задатка. Експериментална евалуација радног окружења у реалним условима демонстрирала је свеопшту функционалност радне станице али и сваке компоненте појединачно.

Анализа резултата *NASA-TLX* теста показала је да су радници доживљавали исте задатке склапања као мање ментално захтевне у сценаријима где је извршавање задатка било потпомогнуто колаборативним роботом. Другим речима, извршавање задатка је захтевало мање менталне и перцептивне активности у сценаријима сарадње са роботом (*СМА*). Овај резултат се подудара са анализом *EEG* индикатора оптерећења, који су показали значајно ниже вредности индекса *TAR* у сценаријима који укључују рад са колаборативним роботом (*СМА*). Такође, субјективна оцена перформанси испитаника била је значајно виша када су користили новопредложену неуроергономску радну станицу (тј. субјективна процена успеха у извршењу задатка била је већа у *СМА* сценарију).

Осим тога, индекс *TAR* као *EEG* индекс оптерећења услед рада на задатку и менталног напора, показао је значајну корелисаност са вредностима скале „ментални напор” у *NASA-TLX* скали. Такође, индекс *TAR* је открио значајну негативну корелацију са оценама „укупне перформансе” у *NASA-TLX* скали.

Примећена је значајна позитивна корелација између индекса *TBR* и оцена „менталног напор” у *NASA-TLX* скали. *TBR* је повезан са радном меморијом и пажњом. Индекс тета/бета (*TBR*) се повезује са различитим аспектима когнитивне контроле и мотивисаног доношења одлука [160]. Повећане снаге тета и смањене снаге бета сигнала примећене су током одсутности радника приликом извођења задатка, у односу на тренутке када је пажња усмерена на реализацију задатка [161]. Добијени резултати потврдили су везу између *TBR* индекса (као индекса смањене контролне пажње) и самопроцењеног менталног напора.

Такође, идентификована је значајна негативна корелација између самопроцењеног нивоа напора и индекса ангажовања (*EI*). Смањење индекса ангажовања током задатака проузрокује повећање напора током извођења задатка.

Презентовани резултати показују способност *BrainWatch* модула за израчунавање индекса радног оптерећења током извршавања задатка, користећи најновије *EEG* слушалице са бежичним преносом података, које омогућавају лак и брз начин постављања. Улога овог модула у целокупној архитектури радне станице је да процени фокус и ментално оптерећење радника, али и да дејствује на основу те информације. Циљ је повећати перформансе производње уз смањење незадовољства радника, односно направити оптималну прераспodelу радника по задацима.

Информације *BrainWatch* модула (тренутни индекс радног оптерећења радника) преносе се путем *OCB*-а до *Smart Task Scheduler* модула, који на основу вредности индекса одлучује да ли предложити раднику да затражити паузу или му додељује други монтажни задатак (тј. са вишим/нижим захтевима).

Трајање задатака склапања се није значајно разликовало између сценарија (*CMA vs. MA*). У сценарију *CMA* нису идентификоване грешке у процесу склапања док у сценарију *MA* идентификован 5 погрешно склопљених уређаја, што потврђује да је реализовани систем допринео смањењу броја неисправних производа.

M2O2P-L модул се показао веома робусним током тестова. Тачност класификације отворене шаке свих испитаника била је 100%. Све гестикулације отворене шаке су тачно и правовремено детектоване. Пошто радници нису правили грешке у сценарију *CMA*, није било потребе за командом поновног извршавања истог корака склапања (тј. гестикулација затворене шаке није никада била показана током трајања експеримента). У перспективи, неинвазивни и природни интерфејси између човека и робота могу помоћи оператерима да побољшају перформансе манипулације кроз физички вођено управљање (од задатака монтаже потпомогнуто роботом па све до различитих апликација теле-операције). Препознавање гестикулације шаке је природан, неинвазиван и једноставан начин интеракције између човека и робота [162, 163].

Због константне промене захтева тржишта, текући производни процеси захтевају висок степен флексибилности. *HMI* (човек-машина интерфејси) треба да покрију целокупан опсег потенцијалних акција и упутстава како би се задовољили захтеви производње. Овакви трендови захтевају велики когнитивни напор код радника који може смањити ефикасност и задовољство. У том циљу развијали су се концепти адаптивних корисничких интерфејса који би надоместили и ублажили когнитивне напоре радника. Због тога је у оквиру предложене радне станице развијен *ADIN* модул који има способност да се прилагоди различитим задацима и динамици извршавања задатака.

Са друге стране, као што је већ приказано, трајање самог процеса склапања се није значајно разликовало између два посматрана сценарија. У *CMA* сценарију, дужина трајања задатка је зависила распореда потребних делова које колаборативни робот треба да донесе раднику, док са друге стране расподела делова у магацину у засебне кутије

омогућава неометано допуњавање кутија новим деловима без ометања радникове рутине током процеса монтаже. Такође, у спроведеној студији изводљивости учествовали су радници који су већ дужи низ година ангажовани на пословима ручног склапања фискалних уређаја. Али, ниједан од радника није имао претходних искустава ни са једним делом система (*ADIN*, *M2O2P-L*, *BrainWatch*, или *Cobot* модулом). Међутим, током *CMA* сценарија, није идентификовано да су радници направили грешке приликом процеса монтаже, док са друге стране у *MA* сценарију, је идентификовано пет грешака. Такође, у *CMA* сценарију извршавање задатка захтевало је мање менталног и перцептивног напора, при чему је детектовано смањење *TAR* (индекс радног напора) вредности у сценаријима која су укључивала сарадњу са колаборативним роботом. Само-процењени перформанс радника је био далеко већи када су користили неуроергономску радну станицу, док је само-процењени ментални напор био значајно мањи. Поред свега наведеног, претпоставка је да би време између два сценарија потребно за извршавање задатка склапања било далеко другачије код радника који немају искуства у ручном склапању. Такође, очекује се да ће се разлика између времена потребног за извршавање задатка повећати током дужег времена (током трајања једне смене), односно да би се повећао број успешно склопљених уређаја у *CMA* сценарију. Имајући у виду све поменуте бенефите, предложена неуроергономска ћелија и њена архитектура заправо доводе до свеобухватног повећања перформанси и продуктивности процеса Индустрије 5.0.

Главни циљ предложеног система јесте да омогући планирање производње и дистрибуцију задатака засновано на психо-физичким стањима радника, при томе повећавајући квалитет и продуктивност уз тренутно доступне ресурсе. Подједнако важно, предложено решење отвара потпуно нове могућности за оптимизацију мануелне производње, док симултано поспешује свеопшту добробит радника. Да би се постигли ови циљеви, предложена неуроергономска радна станица се заснива на праћењу мождане активности коришћењем *EEG* паметних слушалица за естимацију ангажовања и менталног напора код човека. При томе, ова информација се може искористити за додељивање задатака радницима на начин који ће оптимизовати перформансе, односно повећати и продуктивност али и задовољство радника.

Доприноси неуроергономске радне станице се такође рефлектују кроз могућности једноставне адаптације саме радне станице за различите сценарије склапања, али и проширења поставке на друге индустрије окренуте ка човеку имплементацијом нових техничких решења према предложеној архитектури (психолошка и физичка процена стања радника, нефизичка, психичка и стратешка подршка радницима).

Иако су презентоване студије случаја биле мотивисане специфичним потребама компаније, доменстрација судије изводљивости предложене неуроергономске радне станице је урађена у окружењима где колаборација човека и робота има потенцијал да постане уобичајена. Свакако, постоји могућност за унапређење применљивости радне станице на широк дијапазон апликација за склапање. Интеграцијом неуроергономског машина-човек интерфејса са роботским платформама (колаборативним), коришћење сваке представљене компоненте и целокупног концептуалног оквира омогућава једноставну колаборацију и код комплексних задатака монтаже, користећи предности и људи и машина. Коришћењем посебно развијеног софтвера за креирање задатака, менаџмент производње има могућност да дефинише инструкције за произвољне задатке склапања, који ће се касније презентовати радницима у виду адаптивних упутстава кроз *ADIN* модул као нефизичке подршке радницима. *Cobot* модул, као модул физичке подршке коришћен за опслуживање радника, може се са лакоћом репрограмирати и прилагодити већој секвенци склапања, проширивањем кутија у које би се сместили предмети који

се склапају. На крају, оба модула за процену стања радника могу бити примењена на било који задатак без обзира на његову комплексност, пружајући увид у човекове психо-физичке параметре и омогућавајући посредно правовремене реакције од стране модула за пружање подршке човеку.

Поглавље 4

Обликовање крутости завршног уређаја колаборативног робота – геометријски приступ

Да би се повећао број задатака код којих је могуће применити неуроергономску радну станицу представљену у претходном поглављу (Поглавље 3) неопходно је унапредити аспекте управљања механичком импедансом робота како би се омогућило већи степен безбедности и ефикасности у задацима физичке интеракције. Сходно томе, у оквиру овог поглавља биће разматрано унапређење управљања колаборативним роботом као асистивног система неуроергономске радне станице кроз алгоритме обликовања крутости (механичке импедансе) завршног уређаја у Декартовом координатном систему коришћењем геометријског приступа. Предложени геометријски приступ се ослања на обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему применом техника оптимизације погодне за нелинеарне системе кроз представљање матрице крутости елипсоидом крутости завршног уређаја. У циљу добијања модела за оптимизацију развијена је математичка репрезентација кинематике робота и представљен је елипсоид крутости а на основу тога креирана је критеријумска функција. Оптимизациони алгоритам базиран на секвенцијалном квадратном програмирању користи дефинисану критеријумску функцију како би управљао елипсоидом крутости завршног уређаја (усмерењем елипсоида и односом оса елипсоиде крутости) а самим тим и обезбедио одговарајуће особине робота приликом интеракције. У оквиру поглавља извршена је евалуација оптимизационог алгоритма у симулационом окружењу али и у два експериментална сценарија: провлачење шрафа кроз алуминијумски профил и сечење траке.

4.1 Увод

У циљу повећања сарадње између робота и човека, роботски системи су усавршени и са софтверске и хардверске стране. Употребом алгоритама за управљање механичком импедансом, односно крутошћу робота на нивоу завршног уређаја, омогућена је безбедна интеракција робота са околином и сарадња са човеком, као и рад робота у неструктурираном окружењу. Безбедна интеракција између робота и човека подразумева робусност приликом извршавања задатка као и испољавање особина попустљивости [8], при чему се најчешће особине попустљивости (крутости) представљају на нивоу завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему. Крутост завршног уређаја у Декартовом

координатном систему се може представити нумерички или графички. Нумерички представљена крутост се изражава помоћу матрице крутости (у општем случају димензија матрице је 6×6), док се за графичку репрезентацију користи елипсоид крутости.

Постоје три главна приступа за остваривање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему код робота:

- А) софтверски базирана (активна) крутост - приступ применљив на широком дијапазону робота у различитим изведбама са и без додатног сензора силе и момента (F/T) на завршном уређају [9, 10];
- Б) софтверски базирана (активна) крутост - приступ применљив на роботима са сензорима момента у сваком зглобу [11];
- В) хардверски базирана (последња механичког пројектовања) крутост - приступ применљив на роботе који по свом механичком дизајну омогућавају особине крутости, обично користећи нове приступе за актуацију код робота [12].

Приступ А) омогућава обликовање крутости на нивоу завршног уређаја, док приступи Б) и В) омогућавају обликовање крутости на нивоу завршног уређаја кроз управљање крутости на нивоу зглоба робота. Међутим, сваки од три приступа може додатно искористити претрагу нултог простора код кинематички редувантних задатака и на тај начин омогућити додатни степен слободe при обликовању матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, поштујући ограничења као што су геометрија и конфигурација робота, степен редувансе задатака или оствариви опсег крутости на нивоу зглоба робота [13, 14].

Приступ А) и Б) као активни приступи код обликовања крутости завршног уређаја (енг. *active compliance*) имају недостатак што због самог начина генерисања особина крутости имају не нулти одзив (судар мора да се догоди како би се могло реаговати), док је чак код приступа А) реакција на контакте ограничена само на сударе завршног уређаја. Са друге стране, приступ В) користи пасивну крутост (енг. *passive compliance*) добијену услед коришћења еластичног елемента између актуатора и сегмента робота чиме се повећава безбедност приликом судара [45, 164]. Приступ В) експлоатише особине пројектовања *SEA* и *VSA*. Обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему коришћењем кинематичке редувансе (претрагом нултог простора) може се применити на активну и пасивну крутост [11, 15, 16].

Као што је анализирано у [16], за *3D* задатак, потребно је најмање 14 зглобова са променљивим крутостима како би се контролисала позиција завршног уређаја у Декартовом координатном систему (6 степени слободe (*DoF*)) и пуна матрица крутости у Декартовом координатном систему (21 *DoF*). Очигледно је да конфигурација са 14 зглобова није стандардна конфигурација робота. Сходно томе, потребно је извршити одговарајуће оптимизације и приоритизацију [20, 55]. Кроз развој методологија за обликовање крутости, предложена је двостепена контрола/оптимизација крутости и позиције завршног уређаја (брза и спора) код кинематички редувантних робота погоњених са *VSA* у [16]. Брза оптимизација се одвија у простору зглобова који имају променљиве крутости, док се спора (нелинеарна) оптимизација одвија на нивоу претраге нултог простора кинематике робота.

У раду [55], аутори предлажу активни контролер импедансе уз модулацију крутости у зглобовима са пасивном крутошћу како би омогућили формирање потпуне матрице крутости у Декартовом координатном систему. Активни контролер импедансе доминантно се користи за формирање недијагоналних елемената матрице крутости. Међу-

тим, предложени приступ и даље покушава да формира потпуну матрицу крутости у Декартовом координатном систему, што је изазован задатак с обзиром на то да је потребно контролисати 21 параметар независно. Ипак, аутори у раду [165] истичу да је контрола дијагоналних елемената матрице крутости довољна у већини задатака. За роботе погођене *VSA*, могуће је проширити проблем инверзне кинематике променљивом крутошћу у сваком зглобу и добити проширену инверзну кинематику [166].

Такође, задатак обликовања крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се може поделити на крутост зависну од конфигурације (енг. *Configuration-dependent Stiffness, CDS*) и крутост зависну од амплитуде крутости на нивоу зглобова, и назива се општа крутост (енг. *Common Mode Stiffness, CMS*) [15]. *CDS* произилази из редувантне конфигурације робота и користи се за оријентацију елипсоида крутости, док *CMS* утиче на величину елипсоида. *CMS* представља додатни степен слободе који се може укључити у инверзну кинематику да би се добили бољи резултати приликом обликовања матрице/елипсоида крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему.

Са друге стране, матрица крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему (2.15) зависи од позиције робота преко Јакобијан матрице, као и од крутости на нивоу зглоба, чинећи везу између крутости на нивоу завршног уређаја, позиције зглобова робота и крутости зглобова, нелинеарном функцијом. Због овога, проналажење аналитичког решења које ће задовољити жељену позицију и крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему за типичног робота са 6-7 степени слободе није тривијалан задатак, поготово уколико је неопходно контролисати потпуну матрицу крутости. Зато су технике оптимизације које користе претрагу нултог простора неопходне за проналажење решења која минимизују разлике између жељених особина робота и могуће остваривих особина [20, 167]. У раду [14], смо демонстрирали ефикасност *SLSQP* приступа на *4-DoF SEA* планарном роботу, где се оптимизација извршавала у циљу контроле дијагоналних елемената матрице крутости.

Конзервативно, задавање параметара који дефинишу понашање робота у задацима интеракције од стране корисника, заснива се на избору контролних параметара који ће обезбедити компромис између дозвољених грешака у позиционирању и прихватљивих сила интеракције [168]. Избор одговарајућих параметара није тривијалан задатак за регуларне кориснике роботских система, јер произилази из сложености самог задатка који робот треба да изведе као и из сложености саме методе за контролу крутости [169–171]. Како би се превазишло неинтуитивно и комплексно формирање параметара за контролу попустљивости/крутости, током година развијане су методе адаптивног и итеративног учења како би се превазишли проблеми планирања импедансе [172, 173]. Такође, у раду [174] се предложило и алгоритам за обликовање крутости на основу задатка који је неопходно извршити.

Сви поменути приступи налазе своје место у различитим практичним применама. У раду [175] се предлаже коришћење алгоритама за обликовање крутости за колаборативну обраду ивица металних објеката и њихово полирање у присуству човека. Такође, у раду [176] за повећање ефикасности код задатака бушења, предложено је коришћење претраге нултог простора, док истраживачи у раду [109] представљају процес колаборативне монтаже код кога се обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему заснива како на активној тако и на пасивној крутости.

У релевантној литератури, обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се већином фокусира на алгоритме који користе кинематичку редувантност и/или зглобне крутости за прилагођавање потпуне матрице крутости [177–

179]. Међутим, тачно нумеричко формирање крутости је немогуће у већини практичних задатака због изазова повезаних са естимацијом крутости, знањем о остваривом опсегу крутости (због ограниченог опсега крутости у зглобовима и зависности крутости од позиције у којој се робот налази) и формирања квантитативних показатеља приликом остваривања жељене крутости. Додатно, планирање крутости кроз обликовање потпуне матрице крутости у Декартовом координатном систему је посебно захтевно у задацима који зависе од трајекторије којом се робот креће.

Кроз ову тезу биће представљена оптимизациона метода за обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему дуж оса предефинисаних самим задатком и трајекторијом завршног уређаја робота. Прилагођавањем дизајна критеријумске функције у оптимизационом алгоритму, алгоритам може обликовати геометријску репрезентацију крутости постављањем односа између веће и мање осе елипсоида крутости, што олакшава задатак управљања крутости приликом извршавања специфичних задатака у којима робот има физичку интеракцију са околином (склапање, убацивање, провлачење, сечење, бушење, итд.). Жељено понашање робота се директно енкодује из трајекторије коју робот треба да изврши и из природе самог задатка, што аутоматски резултује прилагођавању параметара матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Стога представљени приступ омогућава корисницима да боље разумеју и командују крутошћу робота без обзира на корисничко знање о опсезима крутости и међусобним зависностима тачних вредности матрице крутости у Декартовом координатном систему.

У поређењу са другим генералним приступима у обликовању и контролисању крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, предложена методологија у овој тези за геометријско обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему (енг. *Geometrical End Effector Cartesian Stiffness Shaping, GCSS*) пружа следеће предности:

- додатни сензори силе/момента нису неопходни;
- приступ се базира на кинематичкој реконфигурацији робота и пасивној крутости, па самим тим не утиче на стабилност система која је гарантована контролерима на нижем нивоу;
- естимација крутости није потребна за успешну реализацију контактних задатака;
- методологија је применљива на било који роботски систем јер се ослања на основне технике оптимизације; и
- експертско знање није неопходно како би се обликовала крутост завршног уређаја јер се сви потребни параметри аутоматски израчунавају из задате трајекторије.

Додатно, представљени алгоритам допринеће широј употреби колаборативних робота, омогућавајући им да ефикасније извршавају задатке у сценаријима када постоје одређена неслагања између очекиваног и реалног окружења, такође и услед недовољно доброг позиционирања делова које треба обрадити, или када на њих делује поремећај током извршавања задатка.

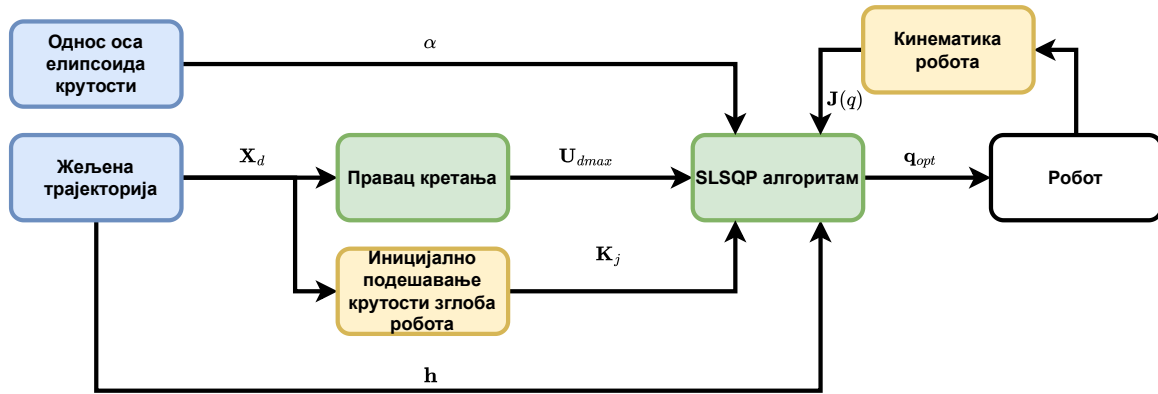
4.2 Моделовање и обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему

Перформансе и успешност извршавања контактнoг задатка углавном зависе од: примењене силе на површину која се обрађује/манипулише (монтажа, полирање, брушење), избегавања превисоких контактних сила (убацавање) и било каквог одступања у правцу кретања завршног уређаја (сечење, бушење). За такве задатке, посебно је важно да је вектор контактних сила поравнан са једном од оса битних за извршење задатка (правац сечења, бушења, итд.). Генерално, да би се успешно извршили произвољни контактни задаци, робот треба имати могућност да у потпуности обликује своју крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Међутим, како је раније представљено, обликовање потпуне матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему није применљиво у већини случајева јер захтева контролисање укупно 21 параметра [16].

Ипак, обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се може постићи до неког степена користећи расположиве управљачке улазе. Међусобна независност различитих услова који обликују матрицу крутости може се геометријски представити у $3D$ простору као елипсоид крутости, чиме се обезбеђује интуитивна репрезентација кориснику. На пример, задатак сечења захтева примену силе на површину за сечење дуж правца сечења, док се не постављају ограничења или специфични захтеви за кретање завршног уређаја робота у правцу нормалном на правац сечења. Стога, брзина и квалитет извршења задатка зависе од крутости коју робот (и алат) могу произвести у правцу сечења, паралелно с површином која се сече. Елипсоид крутости (правац главне осе елипсоида) се не мења значајно уколико се мења крутост на нивоу зглоба робота, стога кинематичка редундантност треба бити искоришћена како би се главна оса елипсоида крутости усмерила дуж правца сечења (паралелно на правац кретања у поменутом случају сечења). Насупрот томе, за задатке који захтевају прецизно праћење трајекторије без обзира на могуће поремећаје (на пример, превлачење прстена дуж жице [180]), највећа крутост завршног уређаја је потребна да буде у равни нормалној на правац кретања како би се ограничило одступање од задате трајекторије и спречило додиривање прстена и жице. У овом примеру, елипсоид крутости треба да буде обликована тако да њена најдужа оса буде нормална у односу на трајекторију током кретања.

Да би се успешно извршио највећи број контактних задатака роботом, потребно је извршити планирање одговарајуће трајекторије и обликовати крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему како би се жељени задатак интеракције успешно извршио или изборио са неочекиваним поремећајима. Коришћењем методологије представљене у овој дисертацији, чак и необучени радници могу успешно задати роботу оптималне позиције/крутости зглобова како би извршили сложени задаци уз задовољавање специфичних захтева за извршавање контактних задатака. Слика 4.1 приказује ток $GCSS$ алгоритма од тренутка креирања трајекторије за специфичне задатке ка оптималним позицијама зглобова, чиме ће се осигурати правилно извршавање задатка поштујући кинематичка ограничења робота, и ограничења постављена опсезима крутости у зглобовима робота (\mathbf{h}). Корисник треба да дефинише жељену трајекторију завршног уређаја (\mathbf{X}_d) и однос оса елипсоида крутости завршног уређаја (α), чиме се утиче на облик и смер елипсоида крутости (плави блокови). Како би се одредила оптимална конфигурација робота (позиције зглобова током извршавања задатка, \mathbf{q}_{opt}) потребно је прво одредити вектор правца кретања из жељене трајекторије, \mathbf{U}_{dmax} (зелени блокови). Као ограничење приликом оптимизације се такође користи задата жељена трајекторија

како би се осигурало да завршни уређај прати трајекторију током целог трајања задатка. У зависности од самог задатка, врши се иницијално подешавање крутости зглобова робота (\mathbf{K}_j) чиме се иницијално елипсоида крутости завршног уређаја усмерава дуж правца кретања (или нормално на правац кретања у зависности од задатка), док су саме крутости на нивоу зглобова робота константне током процеса оптимизације (трајања кретања). На крају, оптимизациони *SLSQP* алгоритам израчунава оптимално кретање зглобова робота (конфигурација робота, \mathbf{q}_{opt}), крутости у зглобовима робота и жељену оријентацију главне осе елипсоида крутости (зелени блок), при чему се тренутно остварена крутост на завршном уређају робота израчунава користећи иницијално подешене крутости на нивоу зглоба робота \mathbf{K}_j и Јакобијан матрицу робота $\mathbf{J}(\mathbf{q})$.



Слика 4.1: Блок дијаграм *GCSS* алгоритма. Плава: Параметри које подешава корисник (жељена трајекторија \mathbf{X}_d , однос оса елипсоида крутости завршног уређаја α). Зелена: Израчунавање правца кретања \mathbf{U}_{dmax} на основу ког се одређује усмереност елипсоида крутости за одређивање оптималне (*SLSQP* алгоритам) конфигурације робота \mathbf{q}_{opt} за жељени задатак. Жута: Параметри оптимизационог алгоритма (иницијално подешене крутости на нивоу зглоба робота \mathbf{K}_j , Јакобијан матрица робота $\mathbf{J}(\mathbf{q})$).

4.2.1 Моделовање крутости – геометријски приступ

GCSS алгоритам користи претрагу нултог простора како би нашао оптималну конфигурацију робота у одређеној позицији завршног уређаја у Декартовом координатном систему у циљу остваривања оптималне оријентације главне осе елипсоида крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Предложени *GCSS* приступ посматра позицију завршног уређаја робота и дозвољени опсег кретања зглобова робота као ограничења која морају бити задовољена, док се крутост на нивоу зглобова робота прослеђује оптимизационом алгоритму као параметар који је константан током времена како би извршио потребне корекције у конфигурацији робота и остварио жељене особине. Због тога је веома значајно описати релације које важе између позиција/крутости на нивоу зглоба робота и крутости у Декартовом координатном систему, као и описати геометријску репрезентацију крутости у Декартовом координатном систему.

Ако је

$$\mathbf{K}_j = \begin{bmatrix} k_{j1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_{j2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_{jn} \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

дијагонална матрица крутости на нивоу зглобова робота, димензије $[n \times n]$, где је са

k_{ji} представљена крутост i -тог зглоба, и ако је \mathbf{J}_{TCP} Јакобијан матрица од базе до завршног уређаја робота, димензије $[6 \times n]$, тада се матрица крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему може израчунати коришћењем једначине (2.15).

Користећи декомпозицију сопствених вредности (енг. *eigenvalue-decomposition*), матрица крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се може рашчлани и представити у форми

$$\mathbf{K}_C = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^{-1}, \quad (4.2)$$

где је \mathbf{U} матрица сопствених вектора, а $\mathbf{\Lambda}$ матрица сопствених вредности. Матрица $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \dots, \mathbf{U}_n]$ је састављена од сопствених вектора $\mathbf{U}_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}]^T$ за $i = 1 \dots n$, и матрица $\mathbf{\Lambda}$ је дијагонална матрица састављена од сопствених вредности

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Матрица крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се може представити геометријски као елипсоид, при чему колоне матрице \mathbf{U} представљају јединичне векторе оса елипсоида, док дијагонални елементи матрице $\mathbf{\Lambda}$ представљају амплитуде оса елипсоида. Оријентација елипсоида крутости одређена је оријентацијом главне осе елипсоида. Након израчунавања декомпозиције сопствених вредности, параметри елипсоида се добијају као

$$\lambda_{max} = \max_{i \in [1, n]}(\lambda_i), \quad (4.4)$$

$$\lambda_{min} = \min_{i \in [1, n]}(\lambda_i), \quad (4.5)$$

где је λ_{max} амплитуда најдуже (главне) осе елипсоида, а λ_{min} амплитуда најкраће осе елипсоида. Правац елипсоида крутости одређен је вектором \mathbf{U}_{max} , вектором из матрице \mathbf{U} који одговара λ_{max} (главној оси елипсоида).

4.2.2 Обликовање крутости – секвенцијално квадратно програмирање

Обликовању крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему код робота са попустљивим зглобовима (реалним или софтверски емулираним) се обично приступа кроз реконфигурацију робота у нултом простору, поготово код редувантних задатака [10, 11, 20], или кроз модулисање крутости на нивоу зглоба код робота погоњених са *VSA* [55]. Једна од метода за одређивање оптималне конфигурације робота и крутости на нивоу зглоба робота, јесте нелинеарна оптимизација која користи секвенцијално квадратно програмирање (енг. *Sequential Least Square Programming, SLSQP*) [14]. SLSQP алгоритам је веома добар избор за решавање оваквих типова проблема јер је ефикасан код високо-димензионих нелинеарних проблема [181, 182]. Сходно томе, веома добро се показао у задацима оптимизације трајекторије и конфигурације робота [17, 18].

Поменути оптимизациони проблем се може формулисати на следећи начин

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{q}), \text{ over } \mathbf{q} \in \mathbb{R}^n, \\ \text{subject to } h(\mathbf{q}) = 0, \\ g(\mathbf{q}) \leq 0, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где је критеријумска функција коју треба минимизовати представљена са $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, а функције $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ и $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^z$ представљају ограничења типа једнакости и неједнакости, респективно. Вредност $f(\mathbf{q})$ представља број променљивих у вектору \mathbf{q} (позиције зглобова робота) за које је оптимизација покренута, и m и z су бројеви ограничења типа једнакости и неједнакости које оптимизација треба да задовољи, респективно.

Конкретно *SLSQP* алгоритам трансформише нелинеарну критеријумску функцију $f(\mathbf{q})$ у квадратну функцију за сваку итерацију $\mathbf{q}[k]$, затим покушава да реши проблем користећи приступ квадратног програмирања (енгл. *Quadratic Programming, QP*). Алгоритам користи излаз и k -те итерације $\mathbf{q}[k]$ као почетни услов наредне итерације оптимизације $\mathbf{q}[k + 1]$. Поменути кораци се понављају све док $\mathbf{q}[k]$ не изконвергира у локални минимум $f(\mathbf{q}^*)$ оптимизационог проблема (4.6) задовољавајући сва ограничења, где $*$ представља тачку у којој се налази локални минимум.

Критеријумска функција f је осмишљена тако да минимизује разлику θ између оријентације главне осе жељене елипсоиде крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему и тренутне елипсоиде крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. С' обзиром да су вектори \mathbf{U}_{cmax} и \mathbf{U}_{dmax} јединични вектори, угао између њих се може одградити као

$$\theta = \arcsin(|\mathbf{U}_{cmax} \times \mathbf{U}_{dmax}|), \quad (4.7)$$

што проистиче из геометријске репрезентације векторског производа, где \mathbf{U}_{cmax} представља правац главне осе тренутне елипсоиде крутости, а \mathbf{U}_{dmax} представља правац главне осе жељене елипсоиде крутости.

У зависности од специфичности самог задатка, оријентација главне осе елипсоида крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се може поставити дуж трајекторије, или пак нормално на њу. У случају када је оријентација главне осе елипсоиде крутости постављена дуж правца кретања, критеријумска функција f је дефинисана на следећи начин

$$f = \frac{|\theta|}{\beta}, \quad (4.8)$$

или када је оријентација главне осе елипсоида крутости постављена нормално на трајекторију

$$f = \frac{\frac{\pi}{2} - |\theta|}{\beta}, \quad (4.9)$$

при чему је θ угао између тренутне и жељене оријентације елипсоида крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему а β скалирајући фактор који обезбеђује одговарајући однос између оса елипсоида крутости.

Фактор скалирања β је дефинисан на следећи начин

$$\beta = \min \left(\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}, \alpha \right), \quad (4.10)$$

где је α максимални однос између оса елипсоида крутости који треба бити задовољен. Фактор скалирања β је инкорпориран директно у критеријумску функцију f , па самим тим, последично, резултати оптимизације ће садржати комбиновани ефекат усмеравања елипсоида крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему у жељеном правцу и скалирања оса елипсоида.

Ограничење типа једнакости, коришћено у овом проблему, представља разлику између жељене и тренутне позиције завршног уређаја, која треба бити једнака нули, чиме се обезбеђује праћење референтне трајекторије и може се записати као

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}) = \mathbf{X}(\mathbf{q}) - \mathbf{X}_d = 0, \quad (4.11)$$

где $\mathbf{X}(\mathbf{q})$ представља тренутне координате завршног уређаја у Декартовом координатном систему у зависности од оптимизационе променљиве \mathbf{q} , а \mathbf{X}_d представља референтну трајекторију завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Додатно, дефинисане су одговарајуће границе кретања зглобова робота како би се обезбедило да резултати оптимизације остану у оквиру могућег кретања робота дефинисаног геометријом робота.

Коришћењем претходно описаног приступа *SLSQP* оптимизације, могуће је оријентисати елипсоид крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему и извршити скалирање оса елипсоида како би се обезбедиле одговарајуће особине робота у контактним задацима.

4.2.3 Иницијално подешавање крутости на нивоу зглоба робота

Као што је представљено у (Једначина 2.15), крутост завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему зависи од крутости сваког зглоба робота и од конфигурације робота кроз Јакобијан матрицу. Оптимизациони проблем је постављен тако да је излаз алгоритма позиције зглобова робота, а посредно се кроз позиције зглобова робота утиче и на Јакобијан матрицу која даље директно утиче на крутост завршног уређаја. Међутим, да би се у управљало крутошћу завршног уређаја, потребно је подесити одговарајуће крутости на нивоу зглобова робота.

Са друге стране, код комерцијално доступних робота (*Franka Emika Panda*) крутост на нивоу зглобова робота се емулира кроз управљање на ниском нивоу, као што је приказано у једначини (2.6). Коришћењем оваквог закона управљања за емулирање крутости на нивоу зглоба робота мењањем параметра k_p мења се крутост зглоба. Мана оваквог приступа се огледа у немогућности нагле промене параметра k_p (нагла промена може довести до нестабилности система управљања) а самим тим се онемогућава и промена крутости на нивоу зглоба робота. Да систем не би ушао у нестабилно стање, крутости на нивоу зглобова робота подешавају се иницијално пре почетка извршавања задатка како би се елипсоид крутости иницијално усмерио што је боље могуће у одговарајућем правцу, и даље током извршавања задатка остао непромењен.

Иницијална претрага је спроведена како би се нашле одговарајуће вредности за крутости у зглобовима за задатак који робот треба да изврши. Три тачке на трајекторији завршног уређаја су одабране: почетна, средишња и последња. Оптимизациони алгоритам (4.6) је спроведен при томе да је оптимизациони проблем преформулисан тако да су оптимизационе променљиве крутости на нивоу зглоба робота. Критеријумска функција коришћена за проналажење иницијалних вредности крутости на нивоу зглоба

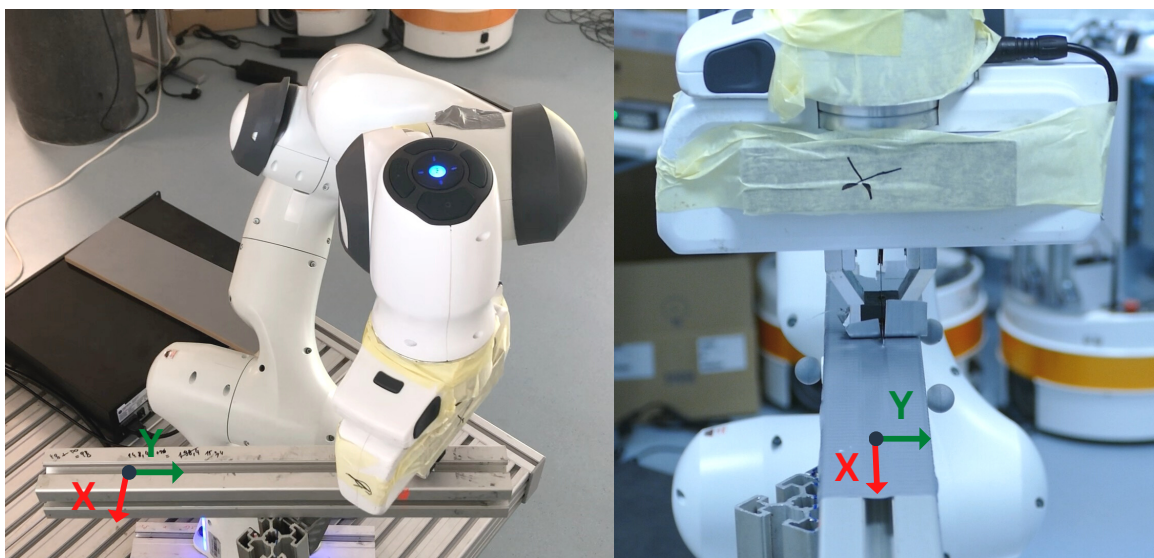
дефинисана је на следећи начин

$$f_{ijs} = [f(first) + f(middle) + f(last)], \quad (4.12)$$

где f представља критеријумску функцију дефинисану у (4.8) или (4.9), у зависности од дефинисаног задатка. Описаним поступком је извршено иницијално подешавање елипсоиде крутости завршног уређаја, тако што је извршено подешавање крутости на нивоу зглоба робота за конкретан задатак.

4.3 Експериментална евалуација

За експерименталну евалуацију предложеног *GCSS* алгоритма коришћен је *Franka Emika Panda* робот [183] са 7 степени слободе који има могућност да софтверски емулира пасивну крутост зглобова. Робот је извршавао кретање *offline* као резултат оптимизационог алгоритма из претходног под-поглавља. За израчунавање оптимизације коришћен је *MATLAB R2021a fmincon* алат, са *active-set* солвером код кога су толеранције на ограничења и вредност критеријумске функције постављена на $1e^{-5}$ и $1e^{-2}$, респективно. Време потребно да се изврши оптимизација дуж целе путање робота је 0.4 ± 0.1 s. У овом подпоглављу су разматрана два различита задатка. Први задатак који је разматран је провлачење шрафа кроз алуминијумски профил, као што је приказано на Слици 4.2, лево. Други задатак који је разматран јесте сечење траке Слика 4.2, десно. Разматрани задаци захтевају слично понашање робота као код задатака полирања, бушења, инсертовања, *peg-in-hole* и зашпрафљивања, у којима се захтева да крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему буде оријентисана дуж правца кретања или нормално на правац кретања робота. Иницијално својства *GCSS* алгоритма ће бити приказана у симулационом окружењу. Затим, резултати добијени оптимизациом ће бити примењени на реалног робота. За први задатак урађена су четири различита експеримента, док су за други задатак спроведена два различита експеримента. Без губљења општости проблема, оба задатка су разматрана као равански проблеми. Сходно томе, уместо елипсоида крутости разматрана је елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Видео демонстрација оба задатка је приказана кроз следећи видео <https://youtu.be/ApsIJwaJIbo>.



Слика 4.2: Провлачење шрафа кроз алуминијумски профил (лево) и задатак сечења траке (десно).

4.3.1 Евалуација у симулационом окружењу

На задатку провлачења шрафа кроз алуминијумски профил су приказана својства *GCSS* алгоритма у *MuJoCo* симулационом окружењу [184].

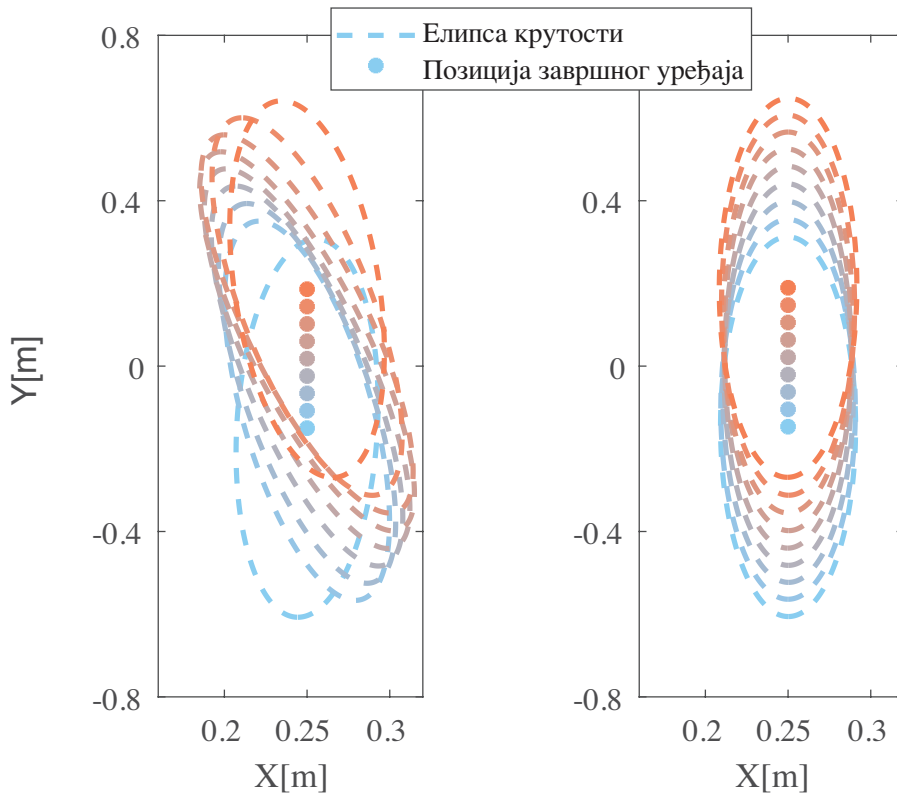
На почетку је коришћен контролер инверзне кинематике како би робот извршио задатак не узимајући у обзир крутости чиме је описано базично понашање робота (крут

робот). Специфични параметри везани за задатак (оријентације елипсе крутости) су енкодирани из саме трајекторије завршног уређаја робота, где правац кретања робота одговара оријентацији главне осе елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему.

Крутости на нивоу зглоба робота за овај задатак су израчунати на основу (4.12) из секције (4.2.3) и постављене да буду

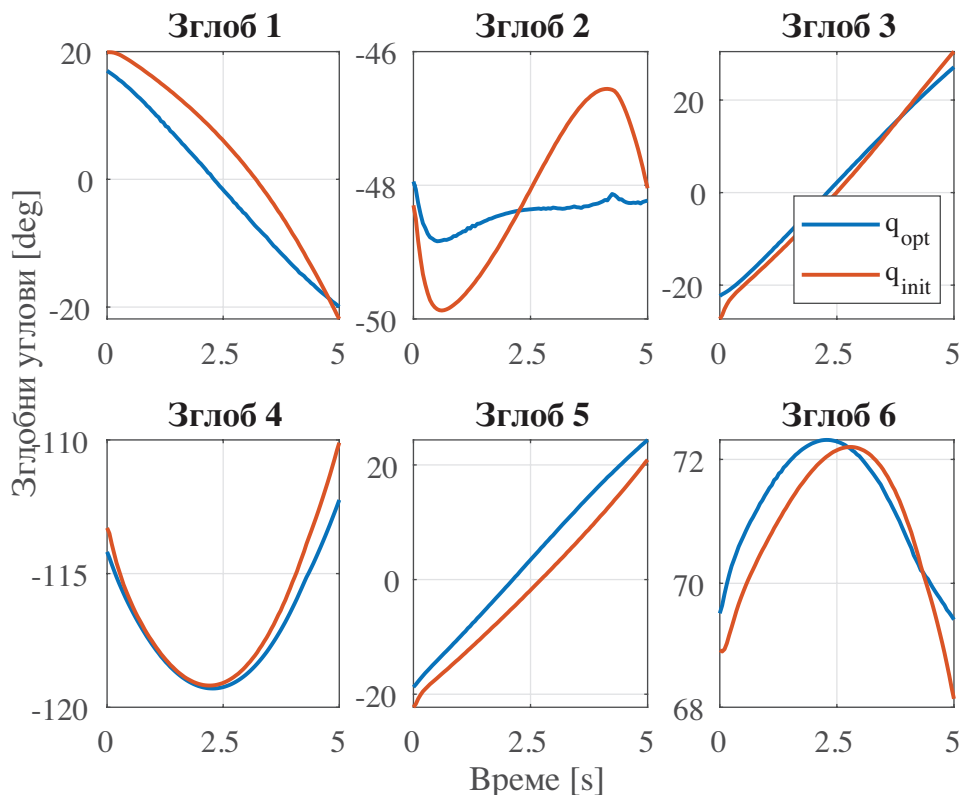
$$\mathbf{K}_j = \begin{bmatrix} 1200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1200 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 250 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix} \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}. \quad (4.13)$$

Уколико се узме у разматрање случај када је робот контролисан контролером инверзне кинематике, конфигурација робота која је тада добијена није оптимална за задатак уколико се дође до нежељене интеракције са околином. Односно, елипса крутости неће бити подешена тако да омогући роботу да изврши успешно задатак, као што је приказано на Слици 4.3 лево. Применом *GCSS* оптимизационог алгоритма добијене су оптималне конфигурације робота које задовољавају сва ограничења (командована трајекторија завршног уређаја и распон доступног опсега кретања робота), а које су оријентисале главну осу елипсе крутости завршног уређаја у жељеном правцу, како је приказано на Слици 4.3 десно.



Слика 4.3: Елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему оријентисана дуж правца кретања (од плаве ка црвеној тачки), неоптимални сценарио (лево), и оптимални сценарио (десно).

Трајекторије зглобова робота у неоптималном и оптималном сценарију су приказане на Слици 4.4, при чему вредности за 7-ми зглоб нису приказане јер не утиче на извршавање задатка (ротација око Z -осе). У оба сценарија, неоптималном и оптималном, робот креће са извршавањем задатка из исте конфигурације. Ефекти реконфигурације у нултом простору током праћења задате трајекторије приказани на Слици 4.4 потврђују могућност $GCSS$ алгоритма да усмери елипсу крутости EE у Декартовом координатном систему дуж правца кретања а да притом задовољи сва ограничења 4.3. Грешка оријентације елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему дуж целе трајекторије је мања од 0.1 степени.



Слика 4.4: Зглобне позиције добијене инверзним кинематичким контролером (црвена) и $GCSS$ алгоритмом (плава).

4.3.2 Задатак провлачења шрафа кроз алуминијумски профил

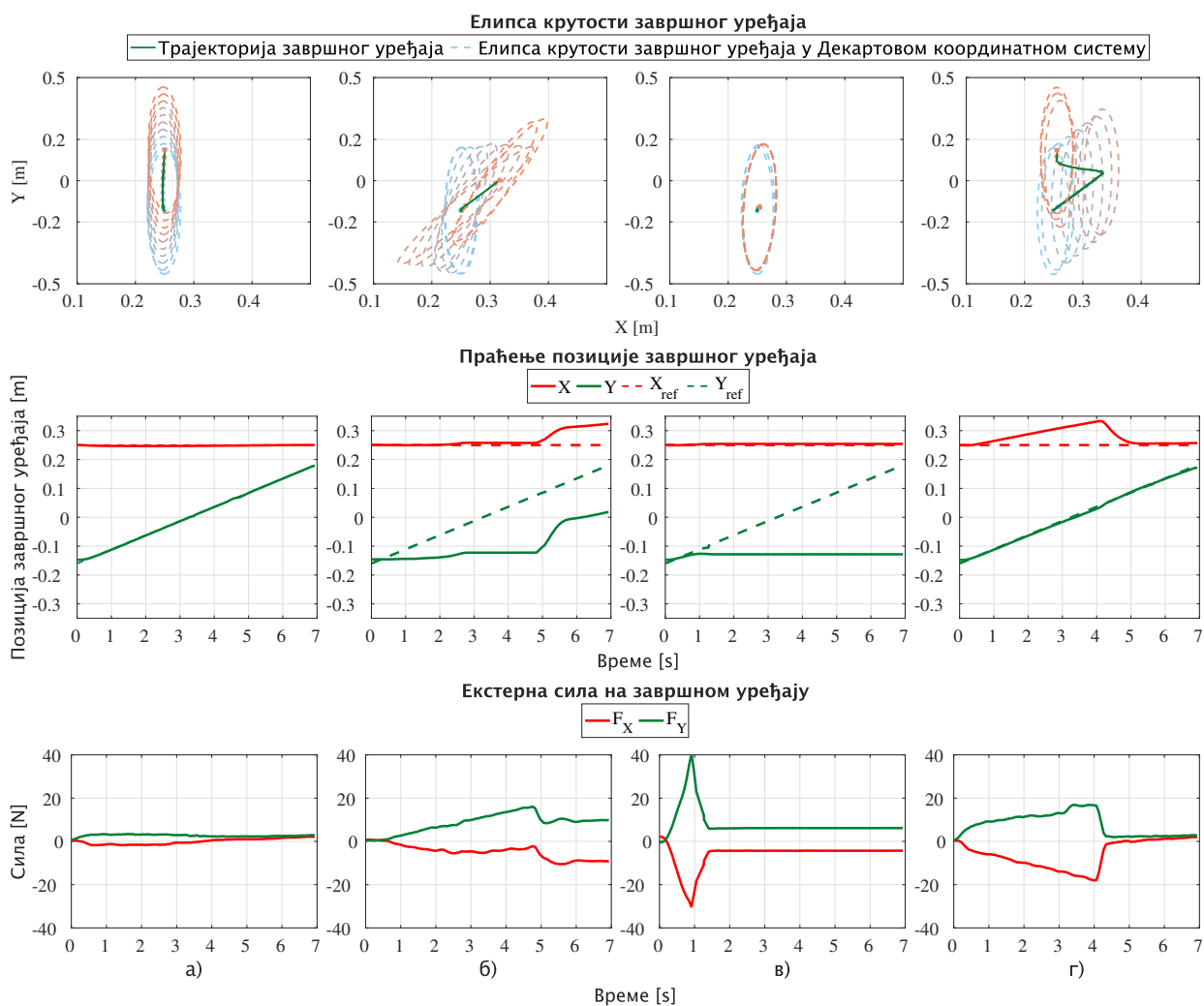
Како би задатак провлачења шрафа кроз алуминијумски профил био успешан, главна оса елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему треба да буде оријентисана дуж самог профила. Односно, главна оса елипсе крутости треба да буде оријентисана дуж правца кретања робота, омогућавајући на тај начин бочно кретање робота чиме би се у случају поремећаја смањила сила интеракције и трење.

Неколико студија је спроведено са циљем да се покажу предности алгоритама за обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему у односу на приступе у којима крутост може бити или само ниска или само висока (познатији као *naive-base* приступ) [185–187]. За задатак провлачења шрафа кроз алуминијумски профил извршена су четири различита експеримента која за циљ имају да прикажу разлике између $GCSS$ алгоритма и *naive-base* приступа.

У првом експерименту (Слика 4.5а), робот користи $GCSS$ алгоритам како би прову-

као шраф кроз алуминијумски профил, при чему није постојао поремећај у окружењу. У другом експерименту (Слика 4.5б), крутости свих зглобова су подешене да буду мале, чинећи робота попустљивим. У трећем експерименту (Слика 4.5в), крутост свих зглобова је подешена на високу вредност, чинећи робота крутим. У другом, трећем и четвртном експерименту, алуминијумски профил је заротиран око једног свог краја, чиме је ефективно додат поремећај приликом извршавања задатка. Предложени *GCSS* алгоритам је коришћен за контролisaње робота у четвртном експерименту (Слика 4.5г).

Може се приметити да је робот способан да успешно изврши задатак када нема присуства поремећаја (Слика 4.5а). Није забележена грешка у праћењу задате трајекторије завршног уређаја. Такође, *GCSS* алгоритам је успешно оријентисао елипсу крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему дуж трајекторије. Исто тако, може се видети да након $t = 4$ s робот извлачи шраф из алуминијумског профила и наставља кретање кроз слободан простор (силе интеракције су пале на нулу).



Слика 4.5: Експеримент провлачења шрафа кроз алуминијумски профил. а) *GCSS* алгоритам без поремећаја; б) Попустљив режим са поремећајем; в) Крут режим са поремећајем; и г) *GCSS* алгоритам са поремећајем.

Приликом експеримента који је изведен у попустљивом режиму (Слика 4.5б), робот није успео да изврши задатак. Оријентације елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему у овом режиму није оптимална за задатак. Последично, због мале крутости у Декартовом координатном систему шраф се заглавио због утицаја поремећаја и сила интеракције све до $t = 5$ s. У том тренутку, акумулирана енергија

робота тада постаје довољно велика да робот почне да помера шраф кроз алуминијумски профил. Свакако, због велике грешке која је настала услед заглављивања шрафа (услед мале крутости) робот не успева да изврши задатак.

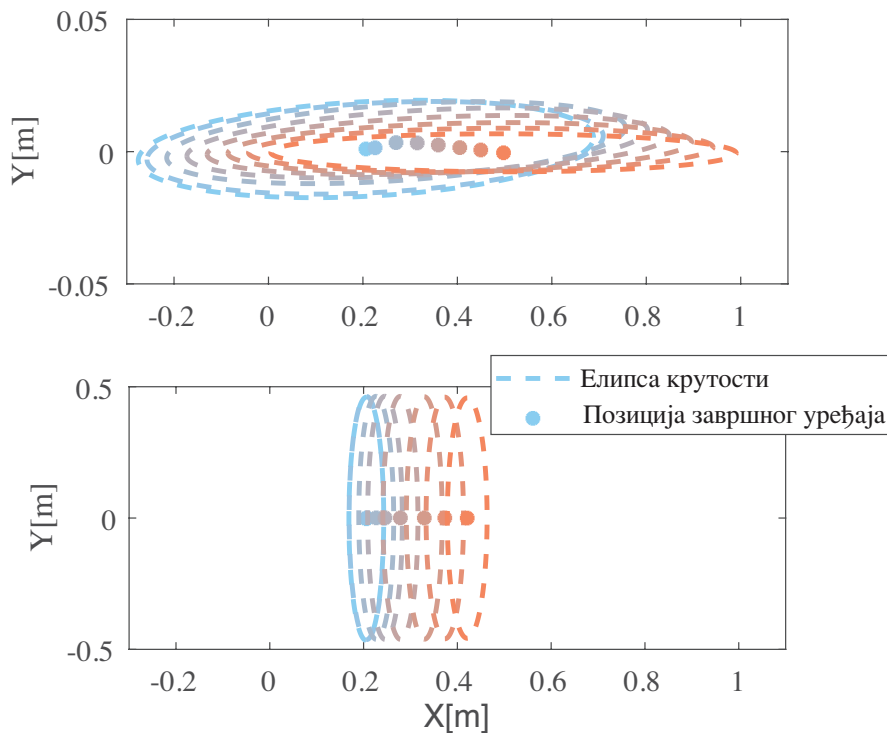
Такође, робот не успева успешно да изврши експеримент провлачења шрафа кроз алуминијумски профил ни у крутом режиму (Слика 4.5в). У тренутку $t = 1$ s екстерне силе које делују на завршни уређај робота постају значајно високе (услед високе крутости) и прелазе максимално дозвољену границу (подешену од стране произвођача робота), чиме је робот доведен у небезбедно стање и кретање робота се моментално зауставља.

У финалном експерименту (Слика 4.5г), иако постоји поремећај, робот користећи *GCSS* алгоритам успешно извршава задатак провлачења шрафа кроз алуминијумски профил. Оријентација главне осе елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему остаје непромењена и оптимална током целог кретања робота. Због тога се робот успешно прилагођава насталом поремећају (одступање у X правцу) и успешно прати задато кретање дуж Y правца. У тренутку $t = 4$ s (исто као и у експерименту без поремећаја), робот извлачи шраф из алуминијумског профила због чега контактне силе падају на нулу и грешка праћења дуж X правца се смањује.

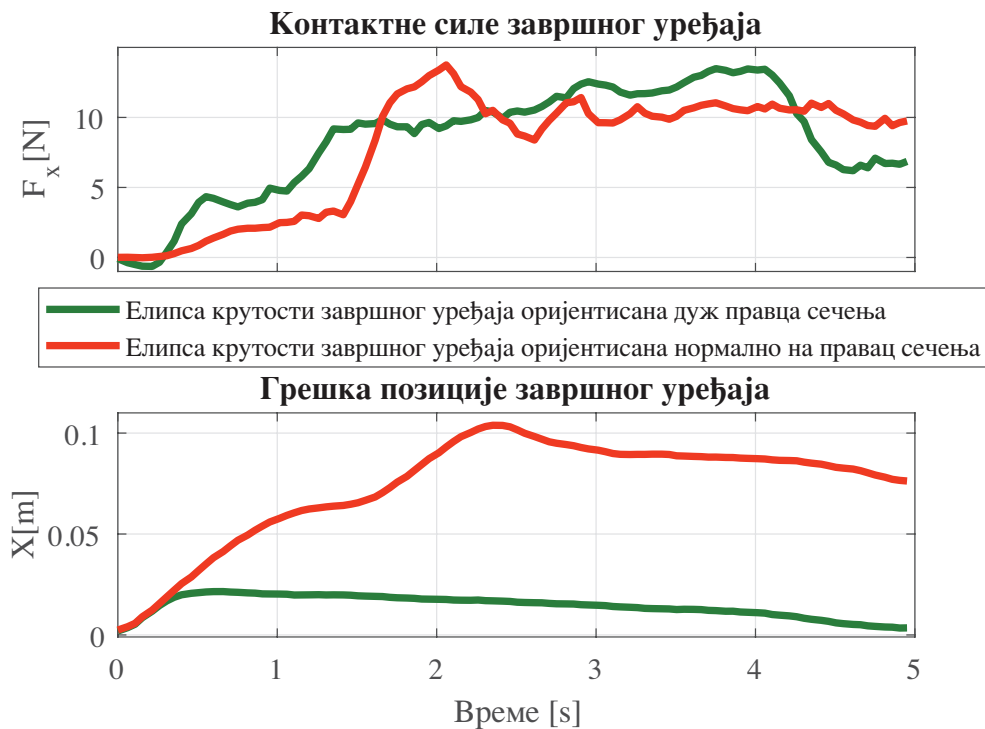
4.3.3 Задатак сечења

Код задатка сечења извршена су два експеримента, у првом је главна оса елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему постављена дуж правца сечења, док је у другом постављена да буде нормална на правац сечења. Оријентација елипсе крутости након примењеног *GCSS* алгоритма за оба експеримента приказана је на Сlici 4.6. Јасно се види да је *GCSS* алгоритам успешно оријентисао елипсу крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему у оба случаја.

У току извршавања задатка сечења, робот треба да примени апроксимативно силу од 10 N дуж правца сечења како би се остварила пенетрација кроз траку која се сече (Слика 4.7 горе). У првом експерименту (представљено зеленом бојом), робот брже остварује захтевану силу сечења од 10 N јер је елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему оријентисана тако да буде колинеарна са правцем сечења. Због тога, одступање од референтне трајекторије је минимално и задатак је извршен успешно (Слика 4.7 доле). У другом експерименту (представљен црвеном бојом), код кога је елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему усмерена нормално на правац сечења, потребна сила за успешну пенетрацију оштрице кроз траку се достиже значајно касније него код првог експеримента. Акумулирана грешка у праћењу позиције почиње да се смањује једном када је достигнута потребна сила сечења, али због тога што је елипса крутости оријентисана нормално на правац сечења, задата се не извршава успешно (Слика 4.7 доле).



Слика 4.6: Елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему за задатак сечења: оријентација главне осе елипсе крутости дуж правца сечења (горе); нормално на правац сечења (доле).



Слика 4.7: Силе на завршном уређају код задатка сечења. Командована оријентација елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему оријентисана дуж правца сечења (зелена). Командована оријентација елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему оријентисана нормално на правца сечења (црвена).

Поглавље 5

Обликовање крутости завршног уређаја робота погоњених актуаторима са променљивом крутошћу – приступ учења и оптимизације

Кроз претходно поглавље представљен је алгоритам за управљање крутошћу завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему у циљу омогућавања безбедне и ефикасне физичке интеракције робота са окружењем и човеком. Такође, у претходном поглављу остваривање крутости на нивоу зглоба робота омогућено је коришћењем одговарајућег закона управљања сваког зглоба робота, последично услед ограничења које уноси сам закон управљања није могуће произвољно мењати крутост на нивоу зглоба робота, односно ограничава се могући сет остваривих крутости на нивоу завршног уређаја робота. Превазилажење овог проблема али и потребног времена за реакцију на интеракцију код робота са емулираном крутошћу се може решити коришћењем робота погоњених актуаторима променљиве крутости код којих је крутост остварује коришћењем еластичног елемента у самој структури актуатора. Међутим, коришћење оваквих актуатора уводи нове изазове који се огледају у симултаном управљању позицијом и крутошћу, као и изазови у управљању настали услед употребе еластичног елемента. У оквиру ове дисертације предлажу се решења која ће омогућити контролу крутости завршног уређаја код најсавременијих роботским системима као што работи погоњени актуаторима променљиве крутости (попустљиви работи). Поред самог изазова у обликовању одговарајућег понашања робота током интеракције (обликовање матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему), неопходно је извршити одговарајуће моделовање актуатора променљиве крутости. Услед постајања еластичног елемента и више погонских мотора у једном актуатору за приступ моделовања одабрано је коришћење метода машинског учења. Такође, коришћењем инкременталних особина одговарајућих метода машинског учења могуће је вршити инкрементално обучавање модела актуатора променљиве крутости, што се показало корисном особином јер се промене модела могу десити услед промена параметара еластичног елемента услед експлоатације.

У оквиру дисертације разматра се једна изведба актуатора променљиве крутости - бидирекциони антагонистички актуатор, као најчешће доступна комерцијална истраживачка платформа.

5.1 Увод

Попустљиви роботи (енг. *Compliant robot*) представљају главни стуб промене у области роботике, окарактерисану интеграцијом флексибилних материјала/елемената који су дизајнирани да емулирају урођену флексибилност и прилагодљивост, особине присутне код природних организама. За разлику од крутих робота, па чак и оних код којих се попустљивост постиже коришћењем активне крутости, попустљиви роботи по дизајну имају јединствену способност да се подвргну одговарајућим деформацијама и реконфигурацијама, омогућавајући им да се прилагоде свом окружењу. Попустљива природа ових робота омогућава им одређени ниво спретности и свестраности, чинећи их погодним за задатке који захтевају интеракцију са деликатним објектима или за навигацију у комплексним и динамичним окружењима. У даљем развоју области, попустљиви роботи имају потенцијал да направе револуцију у различитим индустријама пружајући иновативна решења за проблеме који су се некада сматрали немогућим за традиционалне роботске системе.

Попустљиви роботи у највећем броју изведби поседују еластични елемент између актуатора и сегмента робота, чиме се омогућава систематичан дизајн и развој различитих варијанти попустљивих актуатора (енгл. *compliant actuator*) варирањем конфигурације између актуатора и еластичног елемента. Овакви актуатори су по својој структури способни да апсорбују и прилагоде се изненадним сударима [27–29]. Додатно, роботи који су погоњени флексибилним актуаторима могу да надмаше круте роботе у репетативним задацима [188], или у задацима код којих се захтева ослобађање велике енергије у једном тренутку као што су задаци бацања или закуцавања ексера [30, 31].

Два основна типа попустљивих актуатора који се најчешће налазе у употреби су актуатори са константном или променљивом крутошћу. Актуатори са константном крутошћу или серијски еластични актуатори (енг. *Serial Elastic Actuators, SEA*) имају један еластични елемент „на ред” повезан са мотором. Да би се прецизно контролисао овај тип актуатора, потребно је познавање карактеристике еластичног елемента. Тачна крутост на нивоу зглоба *SEA* се може добити или методом анализе коначних елемената или експериментално [189]. Једна од особина *SEA* јесте да показује карактеристике нископропусног филтра [190] али и побољшава тачност при контроли силе тако што проблем контроле силе трансформише у проблем контроле позиције [191]. Међутим, у неким задацима, константна крутост не води до жељеног понашања, што може довести до прецизног праћења задате путање. Супротно томе, актуатори са променљивом крутошћу имају механичку структуру која им омогућава промену крутости током процеса експлоатације. Ови типови актуатора су углавном састављени од два мотора спрегнута еластичним опругама - бидирекциона антагонистичка поставка [192]; независна поставка два мотора где се један користи за промену позиције а други за промену крутости [191]. Основне методе контроле *VSA* су обично засноване на моделу актуатора: линеаризација повратне спреге, декуплована стратегија управљања, каскадна контрола, адаптивно управљање, итд. [32–36]. Поменуто методе служе за управљање нелинеарних система или користе одговарајуће апроксимације. Генерисање исправног динамичког модела код попустљивих актуатора није тривијалан задатак. Карактеристике еластичних елемената, као извора попустљивости, често су несиметричне (немају исте карактеристике), али и геометрија самог актуатора се не може увек исправно моделовати. Поред тога, попустљиви елементи су често подложни одређеној деградацији током експлоатације, што додатно смањује тачност модела.

Моделовање функција преноса мотора или актуатора на основу карактеристика

које пружа произвођач може бити веома изазован задатак. Штавише, два мотора из исте серије са истим декларисаним карактеристикама не морају имати потпуно исте преносне функције. Додатно, *VSA* имају два мотора која заједно сачињавају једну функцију преноса са више улаза и излаза чинећи задатак моделовања значајно захтевнијим. Последице, модел актуатора се изводи из експериментално добијених сирових података. Почетни приступи учењу модела базирани су на анализи одскочног одзива актуатора. На основу тих информација, могу се применити *ARX*, *ARMAX*, или други алгоритми за учење функција преноса. Развој напреднијих алгоритама као што су неуралне мреже, примене техника машинског учења и итеративно учење пружају једноставније начине за учење модела актуатора [37–40].

У различитим истраживањима током година примењиване су различите технике учења како би се мапирала зависност између улаза и излаза система, подешавала динамика система или контролисали параметри система. У [193], *feedforward* контрола је дизајнирана у облику *PI* контролера, чији се коефицијенти ажурирају путем итеративног учења. Итеративна контрола учења коришћена је у [194] за *feedforward* контролу на децентрализован начин, где је *feedback* управљање имало параметре са малим појачањима. Генерализовано итеративно учење за праћење трајекторије *VSA* представљено је у [195]. Додатно, итеративно учење је примењено за балансирање *feedforward* и *feedback* елемената управљања у [196], приказујући боље резултате него конвенционално *feedback* управљање. Неки радови приказују стратегије адаптивног управљања базираног на неуралним мрежама, пројектованих за контролу *VSA* [197, 198]. Додатно, неуралне мреже могу бити примењене за предвиђање људског кретања, како би се остварило жељено кретање робота и контролисало кретање робота у физичкој интеракцији између људи и робота [199]. Учење подстицајем (енгл. *Reinforcement Learning, RL*) се користи за специфичне задатке или за управљање које није засновано на познавању модела. У [200], аутори представљају контролер променљиве импедансе реализован помоћу алгоритама за учење подстицајем. Додатно, алгоритама за учење закона управљања на бази модела за предиктивне контролере у затвореној спреси код попустљивих робота имплементиран је у [201], где је *feedforward* динамика представљена неуралном мрежом.

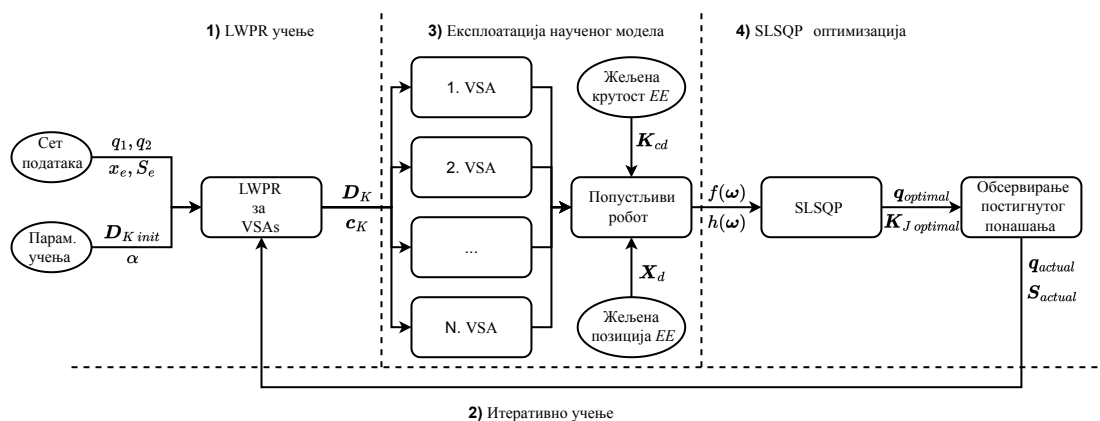
Генерално поменуто методе управљања важе за било коју конфигурацију *VSA*, док ће допринети у дисертацији бити приказани на примеру бидирекционог антагонистичког актуатора, једној од типичних конфигурација и конфигурација које су међу првима комерцијално постале доступне - *QB* актуатори. Овај тип актуатора има два погонска мотора чије су излазне осовине повезане еластичним елементима. Излазна позиција оваквог актуатора и крутост се могу контролисати променом позиције на погонским моторима. Ради ефикасне контроле система, потребно је одредити одговарајућу везу између улаза система (позиције мотора) и излаза система (позиција зглоба и крутост) која је због природе система нелинеарна. Сложеност модела зависи од карактеристика опруге. Математички модел се у највећем броју случајева представља тако да је симетричан (подразумева два идентична мотора и идентичне еластичне елементе). Како је практично јако тешко направити два идентична мотора и две идентичне опруге, различити алгоритми учења могу бити примењени за учење несиметричности модела. Конструисање тачних модела и контролисање попустљивих роботских система додатно отежава немоделована динамика и трење, као и нелинеарности самих еластичних елемената.

Кључна карактеристика нових попустљивих робота је напредна и безбеднија физичка интеракција с околином. Перформансе и могућности робота у физичкој интеракцији дефинисане су механичком импедансом завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Импеданса тј. крутост завршног уређаја описана је матрицом крутости

у Декартовом координатном систему - \mathbf{K}_c . Варијације компонената матрице крутости представљају компромис односно баланс између прецизности и безбедности попустљивих робота у одговарајућим правцима у простору. Како је у претходним поглављима дефинисано, матрица крутости у Декартовом координатном систему зависи од конфигурације робота (\mathbf{q}) и крутости сваког зглоба, које формирају дијагоналну матрицу крутости зглобова (\mathbf{K}_j). Стога је неопходно поседовати тачне и правовремене информације о положају и крутости попустљивих актуатора како би се омогућило планирање и контрола базирана на моделу попустљивих робота у физичкој интеракцији са околином.

У оквиру овог поглавља представљена су два доприноса. Први, алгоритам учења заснован на локално пондерисаној регресији (енг. *Locally Weighted Projection Regression, LWPR*) [41] који мапира карактеристике *VSA*, омогућавајући учење нелинеарних феномена у моделу који се често занемарују и не моделују, као што су трење или асиметрија погона. Додатно, инкременталне карактеристике *LWPR* алгоритма су искоришћене за праћење промена параметара модела насталих усред хабања где се мерења настала током периода експлоатације користе за проширење обучавајућег скупа података и модел инкрементално ажурира што омогућава прецизније симултано управљање позицијом и крутошћу *VSA* током периода експлоатације. Други допринос се огледа кроз проширење *SLSQP* [17, 18, 181, 182] оптимизације, где је она имплементирана како би обликовала матрицу крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему код попустљивих робота погоњених *VSA*. Поред тога, оптимизациони алгоритам врши реконфигурацију робота у нултом простору, али и одређује оптималне крутости на нивоу зглоба робота чиме се проширује опсег оствариве крутости у Декартовом координатном систему.

Да би се приказао пун потенцијал предложених доприноса, дефинисана је секвенца корака који имају за циљ да приближе њихову употребну вредност: (1) учење параметара модела *VSA* користећи *LWPR*; (2) континуирано инкрементално учење параметара; (3) експлоатација наученог модела роботског система (4 *DoF* планарни робот погоњен *VSA*); и (4) *SLSQP* алгоритам за ефикасно одређивање оптималне конфигурације робота и крутости на нивоу зглобова. Дијаграм тока предложене секвенце приказан је на Слици 5.1.



Слика 5.1: Секвенца корака предложене методологије. (1) Учење параметара модела *VSA* користећи *LWPR* (2) Континуирано инкрементално учење параметара модела. (3) Експлоатација наученог модела роботског система. (4) *SLSQP* оптимизација.

5.2 Учење модела актуатора са променљивом крутошћу

У овој дисертацији за потребе учења модела актуатора са променљивом крутошћу коришћена је локално пондерисана линеарна регресија (*LWPR*). Предложена техника учења омогућава учење модела у присуству несиметрије параметара модела актуатора услед присуства нелинеарности модела актуатора али и услед промена параметара актуатора насталих током периода експлоатације актуатора. *LWPR* метода је осмишљена тако да превазиђе проблеме услед недовољног броја података или када је у подацима присутан шум или постоји значајан број поновљених података у обучавајућем сету података. У раду [41] се детаљно описују све особине *LWPR* технике и дају компаративну анализу са другим актуелним алгоритмима, као што су Гаусовски процеси (енгл. *Gaussian Process*) и Метода Носећих Вектора (енг. *Support Vector Machine*). Такође, комплексност *LWPR* алгоритма линеарно расте са повећањем димензионалности проблема. Сходно томе, постигнута је стопа учења од 70Hz за високо-димензиони проблем (90 улаза и 30 излаза). У [42] предложена техника учења је искоришћена за мапирање улазно/излазне карактеристике *SEA*. Док је у раду [202] представљен алгоритам за учење инверзне динамике за манипулатор са 7 степени слободе на бази *LWPR* технике.

У овој дисертацији, *LWPR* алгоритам је искоришћен за учење улазно/излазне карактеристике *VSA*. Главна предност овог типа алгоритама је што омогућава фитовање више линеарних локалних модела, који су добра апроксимација за нелинеарне и комплексне моделе, као што су роботски системи погоњени *VSA*. Суштина *LWPR* алгоритма је одређивање региона валидности сваког локалног модела. При чему се тај регион може представити у форми Гаусовог кернела

$$\omega_k = \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{c}_k)^T \mathbf{D}_k (\mathbf{x} - \mathbf{c}_k)\right) \quad (5.1)$$

где је \mathbf{c}_k центар k -тог линеарног модела, и \mathbf{D}_k одговарајућа позитивно дефинитна матрица дистанце која одређује величину и облик региона валидности линеарног модела. Алгоритам мења матрицу дистанце \mathbf{D}_k ($\mathbf{D}_k = \mathbf{M}_k^T \mathbf{M}_k$) коришћењем градијентног спуста.

$$\mathbf{M}_k^{n+1} = \mathbf{M}_k^n - \alpha \frac{\partial f}{\partial \mathbf{M}_k}, \quad (5.2)$$

где је са f означена критеријумска функција за минимизацију грешке предикције линеарног модела. За сваки сет улазних података, локални линеарни модел рачуна предикцију \hat{y}_k . Свеобухватни излаз из обучавајућег алгоритма је пондерисана нормализована средња вредност свих K линеарних модела

$$\hat{y} = \sum_1^K \omega_k \hat{y}_k / \sum_1^K \omega_k. \quad (5.3)$$

Да би се успешно обучио *LWPR* модел, параметри учења требају бити подешени на одговарајући начин. Типичан приступ је да се матрица дистанце \mathbf{D}_k подеси тако да важи да је $\mathbf{D}_k = r\mathbf{I}$, при чему се варијабла r поставља тако да има малу вредност (нпр. $r = 0.05$). Након чега се модел постепено тренира повећавајући параметар r све док се не достигну задовољавајуће перформансе. Такође, параметар α , који представља фактор учења, може бити подешен ради унапређења перформанси.

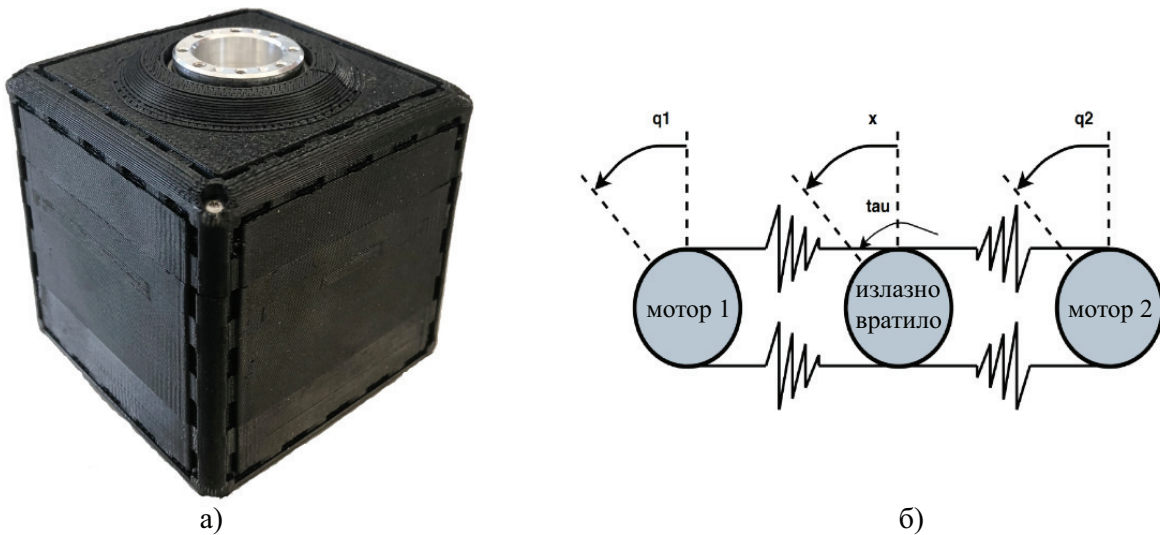
5.2.1 Учење модела бидирекционог антагонистичког актуатора

За демонстрацију алгорита учења употребљен је *QB Advance Pro* [203] бидирекциони антагонистички актуатор. На Слици 5.2 је приказан *QB* актуатор и његова функционална шема. Овај актуатор је једна изведба *VSA*, при чему је овај конкретан актуатор релативно јефтин и отворене архитектуре. Модел актуатора се може представити системом са два улаза (q_1 и q_2) и два излаза (x и k), где су q_1 и q_2 позиције погонских *DC* мотора, и x и k позиција излазног вратила и крутост зглоба, респективно. Статичка релација између позиција погонских мотора и излазне позиције и крутости је дата једначинама (5.4) и (5.5)

$$x_e = (q_1 + q_2)/2, \quad (5.4)$$

$$k_e = a \cdot b \cdot \cosh(a \cdot (x - q_1)) + a \cdot b \cdot \cosh(a \cdot (x - q_2)). \quad (5.5)$$

где је, \cosh функција косинус хиперболички, а $a = 6.8465$ и $b = 0.0223$ су параметри опруге добијени након примене одговарајуће идентификације.

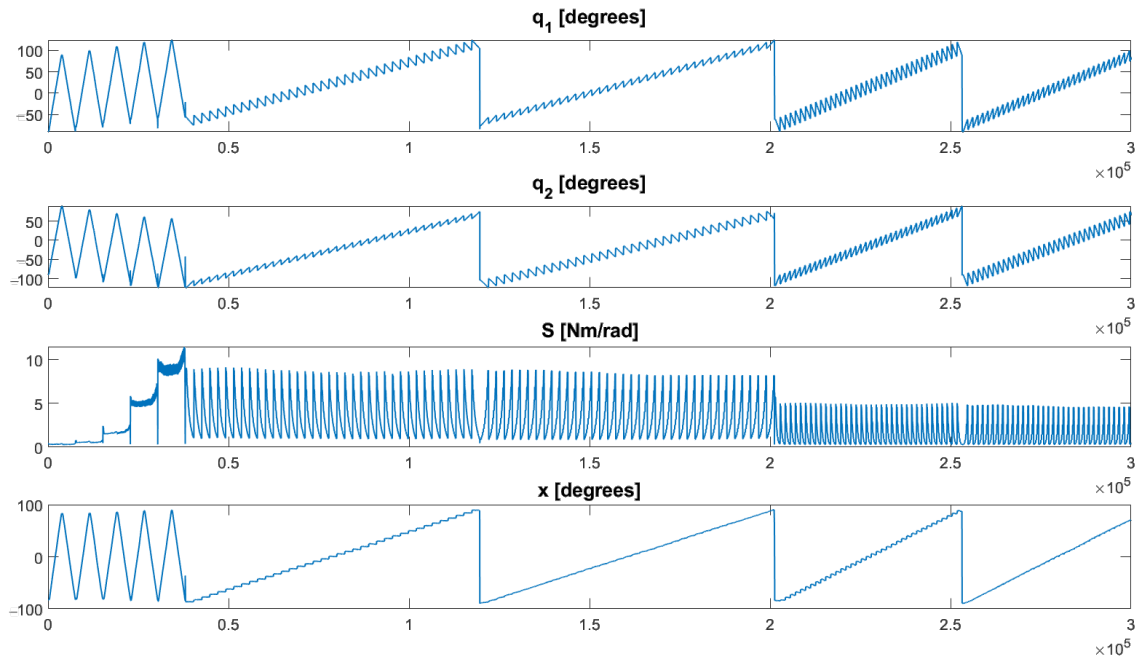


Слика 5.2: а) *QB* актуатор. б) Функционална шема *QB* актуатора – бидирекционог антагонистичког актуатора.

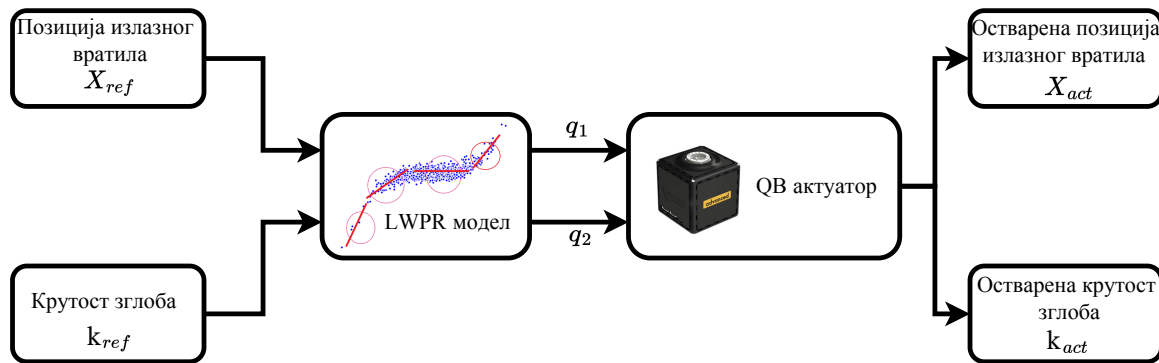
Потребно је направити одговарајући сет података за тренирање како би се мапирала статичка релација између улаза и излаза поменутог *VSA*. Прикупљање података је одрађено на реалном *QB* актуатору. Аутори су у [204] предложили пет различитих шаблона улазно/излазних сигнала. У првом шаблону, референтни сигнал улазних погонских мотора одржава константну међусобну разлику (0, 20, 40, 60, и 70°), одржавајући константну крутост у сваком подскупу шаблона, док се њихова позиција мења у распону од -90 до 90 за 5° . У наредних четири шаблона, позиција погонских мотора се повећава од -90 до 90° и њихова међусобна разлика у позицијама се мења од -60 до 60° . Сет податак за обучавање приказан је на Слици 5.3.

Након дизајнирања и прикупљања података за тренирање, одговарајући модел актуатора је научен и имплементирано је управљање актуатором са отвореном спрегом. Управљање у отвореној спрези је употребљено ради верне репрезентације научног модела актуатора. Дијаграм на Слици 5.4 представља примењену контролну шему.

Како би се демонстрирали бенефити модела заснованог на *LWPR* учењу, представљени су резултати управљања у отвореној спрези користећи стандардни статички модел (једначине (5.4) и (5.5)) и модел обучен *LWPR* алгоритмом (Слика 5.5).



Слика 5.3: Сет података за тренирање, осмишљен да покрије целокупан излазни простор актуатора (излазна позиција и крутост).

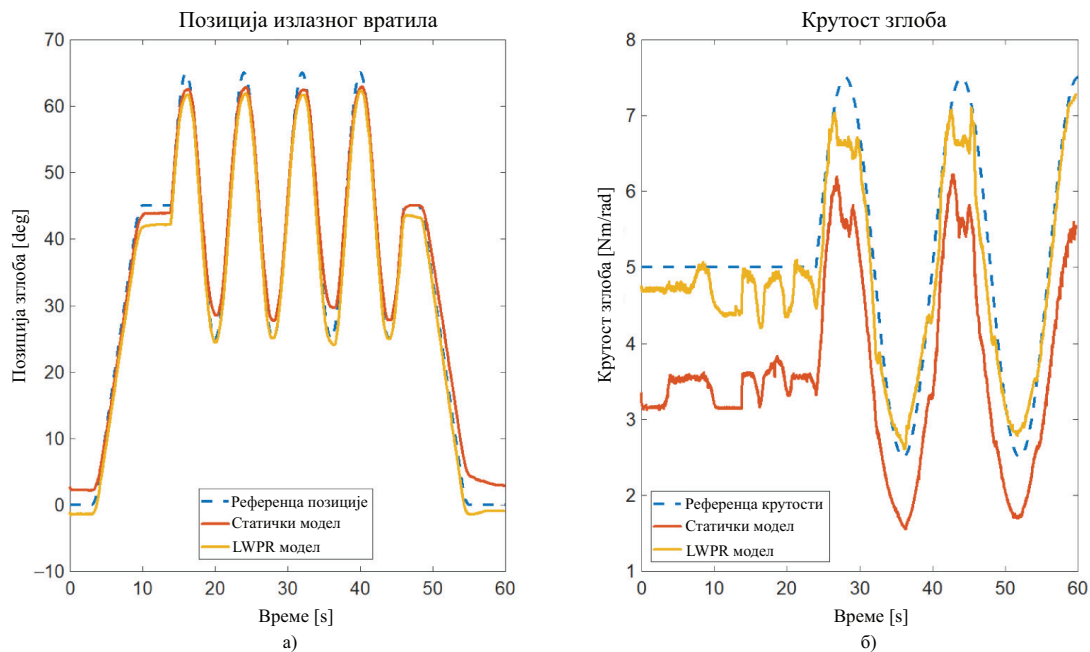


Слика 5.4: Управљање у отвореној спреси на бази *LWPR* модела, који мапира позиције погонских мотора у излазну позицију и крутост.

На Слици 5.5 се може приметити да је разлика у праћењу позиције између *LWPR* модела и статичког модела актуатора мала, док *LWPR* модел показује боље перформансе у праћењу крутости. Са друге стране, генерисање математичког модела захтева више напора и не може да обухвати несиметрије у актуатору, док коришћење *LWPR* методологије олакшава приступ моделовању.

5.2.2 Инкрементално обучавање за праћење промена модела бидирекционог антагонистичког актуатора

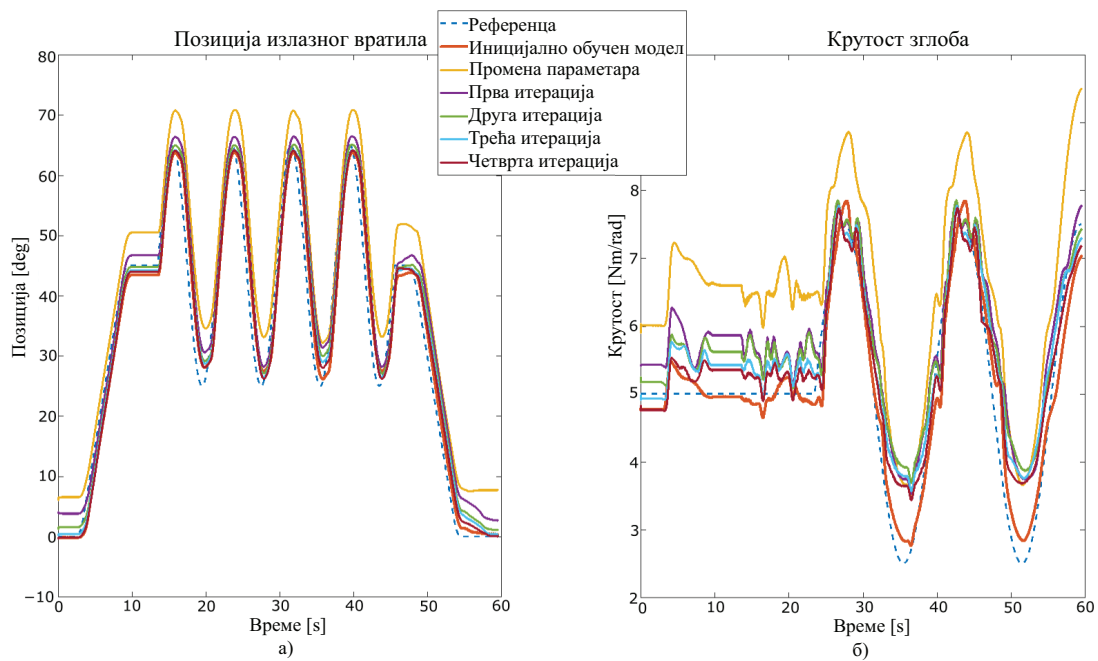
Како би се представиле особине инкременталног учења код *LWPR* алгоритма, изведена је серија експеримената у симулационом окружењу. Прво су прикупљени одговарајући тренинг подаци и научен је иницијални модел актуатора коришћењем *LWPR* алгоритма. Иницијални резултати добијени коришћењем наученог модела у отвореној спреси су приказани на Слици 5.6, светло црвеном бојом.



Слика 5.5: Остварена позиција а) и крутост б). Праћење референце коришћењем стандардног статичког модела (црвена) и *LWPR* модела (жута).

Промене у карактеристикама једне од опруга симулираног бидирекционог антагонистичког актуатора су уведене како би се симулирало нежељено понашање актуатора, односно симулирао замор материјала услед експлоатације. Очигледно је да са новим параметрима опруга, претходно научени модел није у могућности да успешно прати задату референцу позиције и крутости. Односно, модел за управљање у отвореној спреси користи иницијалне параметре опруга за експлоатацију модела актуатора (Слика 5.6, жута).

Приликом употребе класичних приступа моделовању актуатора, неопходно је поред познавања самог модела развити робусне контролере који могу да сузбију поремећај који настаје услед промене параметара на еластичним елементима код *VSA*, што углавном није лак задатак. Сходно томе, примена алгоритама итеративног, односно инкременталног учења може бити примењена. Коришћењем особина инкременталног учења модела код *LWPR* алгоритама сукцесивно је вршено додатно обучавање иницијално наученог модела актуатора. Иако су параметри еластичне опруге у актуатору драстично промењени (што је мало вероватно да ће се десити у реалним условима експлоатације актуатора, где деградација параметара еластичног елемента настаје полако током времена). Након само четири итерације коришћењем особина инкременталног учења код *LWPR* алгоритама, нови модел је успешно научен (постигнуте су задовољавајуће перформансе праћења референтне позиције и крутости) што се може видети на Слици 5.6, представљено тамно црвеном бојом. У случају да наступе још драстичнија одступања параметара актуатора (промена параметара еластичног елемента, замор материјала, повећање немоделованог трења, итд.), *LWPR* модел се може додатно обучити произвољан број пута док се не постигну задовољавајуће перформансе.



Слика 5.6: Остварена позиција а) и крутоћ б). Праћење референце након промењених параметара опруге (жута) и након четири итерације инкременталног учења (тамно црвена).

5.3 Обликовање елипсе крутости у Декартовом координатном систему робота погоњених актуатора променљиве крутости применом техника оптимизације

У овом поглављу биће представљен оптимизациони алгоритам заснован на алгоритму представљеном у подпоглављу 4.2. Роботски систем за који се врши планирање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се састоји $4DoF$ (Слика 5.7), при чему су сва четири актуатора са променљивом крутошћу и то у истој равни (XY) чиме се постиже редунданса степена 2 у односу на задатак који робот може извршити. Код редундантних робота, постоји бесконачан број конфигурација за једну те исту позицију завршног уређаја. Крутост завршног уређаја се може подешавати применом конфигурације робота (претрагом нултог простора) али и подешавањем крутости на нивоу зглоба робота, што је и директно следи из (2.15). У односу на оптимизацију из претходног поглавља (Поглавље 4) услед коришћења VSA омогућено је континуално мењање крутости зглоба робота, па је у овом поглављу разматрана оптимизација чији је задатак да пронађе оптималне позиције зглобова али и крутост како би се обезбедило одговарајуће понашање робота у интеракцији са окружењем и сарадњи са човеком. Како би се постигла жељена крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему, потребно је извршити минимизацију нелинеарне критеријумске функције. Оптимизациони проблем се може формулисати на идентичан начин као и у (4.6).

За потребе дефинисања критеријумске функције оптимизационог алгоритма, неопходно је поседовати одговарајући кинематички модел роботског система. На основу приказаног роботског система (Слика 5.7), директан модел кинематике се може дефинисати на следећи начин

$$x = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + l_4 \cos(q_1 + q_2 + q_3 + q_4), \quad (5.6)$$

$$y = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + l_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3 + q_4), \quad (5.7)$$

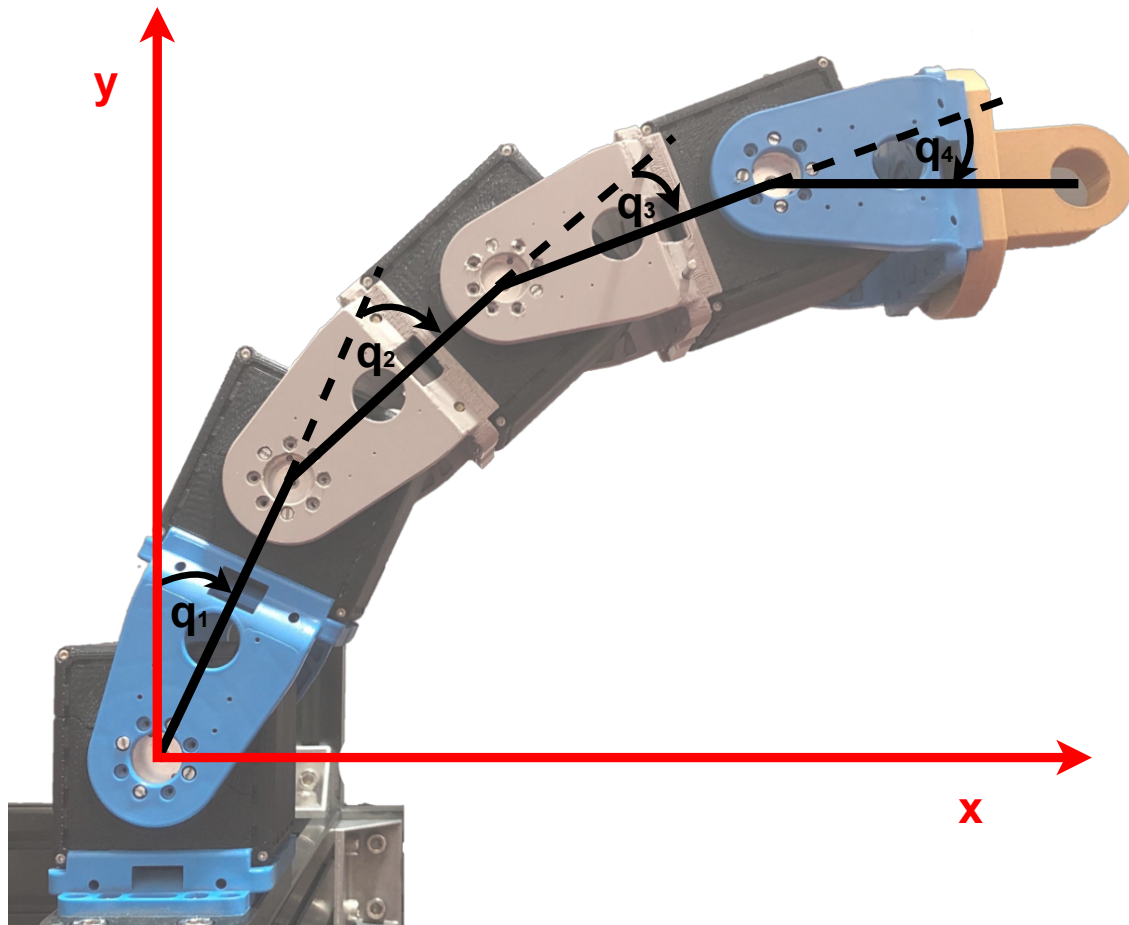
$$\theta = q_1 + q_2 + q_3 + q_4, \quad (5.8)$$

где су са q_1, q_2, q_3, q_4 означене позиције зглобова робота, а са l_1, l_2, l_3, l_4 дужине линкова робота. Крутост робота у Декартовом координатном систему је у директној релацији са конфигурацијом у којој се робот налази, односно у директној је релацији са Јакобијан матрицом \mathbf{J}_{TCP} .

У случају робота погоњених актуаторима променљиве крутости, крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему је такође зависна од самих крутости појединих зглобова робота који се могу описати дијагоналном матрицом $\mathbf{K}_j = \text{diag}(k_i)$, где је са k_i означена i -та крутост зглоба. Самим тим матрица крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему је дефинисана једначином (2.15) где је \mathbf{K}_c симетрична 2×2 матрица. У овом поглављу узета је у обзир оптимизација само k_{c11} и k_{c22} елемената матрице крутости, јер је могуће кретање само у XY равни, пошто они представљају крутост дуж X и Y оса у Декартовом координатном систему

$$\mathbf{K}_{co} = \begin{bmatrix} k_{c11} & 0 \\ 0 & k_{c22} \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

где је k_{c11} крутост дуж X осе, а k_{c22} крутост дуж Y осе.



Слика 5.7: Планарни робот са 4 степена слободe погођен актуаторима променљиве крутости.

Жељена крутост у Декартовом координатном систему, дуж главних оса се може представити дијагоналном матрицом 2×2

$$\mathbf{K}_{cd} = \begin{bmatrix} k_{cd_x} & 0 \\ 0 & k_{cd_y} \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

Као критеријумска функција за оптимизацију одабрана је отежњена Фробениусова норма (енг. *Frobenius*) између жељене матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему и тренутно остварене матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Минимизацијом дефинисане нормe $f(\mathbf{q}, \mathbf{K}_j)$ омогућава се праћење жељене матрице крутости у Декартовом координатном систему

$$f(\mathbf{q}, \mathbf{K}_j) = \sqrt{A(k_{cd_x} - k_{c11})^2 + B(k_{cd_y} - k_{c22})^2}. \quad (5.11)$$

Коефицијенти A и B су тежински фактори коришћени за фаворизацију једне осе у односу на другу.

Како би поред одговарајућег праћења жељене крутости завршног уређаја робот успешно пратио и задату позицију завршног уређаја, оптимизационом алгоритму додато је и ограничење типа једнакости. Заправо, оптимизациони алгоритам има за циљ да пронађе оптималне позиције зглобова робота q_{o1} , q_{o2} , q_{o3} , q_{o4} и крутости на нивоу зглоба робота $k_{j_{o1}}$, $k_{j_{o2}}$, $k_{j_{o3}}$, $k_{j_{o4}}$ користећи дефинисану норму (5.11) док је потребно да задовољи

ограничење типа једнакости дефинисано са

$$h(\mathbf{q})_1 = -x_d + l_1 \cos(q_{o1}) + l_2 \cos(q_{o1} + q_{o2}) + l_3 \cos(q_{o1} + q_{o2} + q_{o3}) + l_4 \cos(q_{o1} + q_{o2} + q_{o3} + q_{o4}), \quad (5.12)$$

$$h(\mathbf{q})_2 = -y_d + l_1 \sin(q_{o1}) + l_2 \sin(q_{o1} + q_{o2}) + l_3 \sin(q_{o1} + q_{o2} + q_{o3}) + l_4 \sin(q_{o1} + q_{o2} + q_{o3} + q_{o4}). \quad (5.13)$$

Да би се верификовала предложена техника оптимизације, извршени су експерименти у симулационом окружењу користећи робота са 4 *DoF* погоњеног актуаторима са променљивом крутошћу. За потребе симулације, дужине линкова робота су постављене на $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 0.1$ m. Прво, су извршене симулације у којима се оптимизује елемент матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему дуж једне осе, а затим дуж X и Y осе симултано. Параметри *QB Advance Pro* актуатора су коришћени да би се добили реалистични резултати. Активни угао ротације једног зглоба је $\pm 180^\circ$, а минимална и максимална крутост зглоба робота је 0.5 Nm/rad и 13 Nm/rad, респективно. На почетку сваке симулације иницијална крутост у зглобовима робота постављена на 5 Nm/rad. Време потребно за проналажење оптималне конфигурације робота и крутости на нивоу зглоба робота 0.004 ± 0.001 s.

Обликовање крутости дуж једне осе се користи када је битно остваривање особина крутости само дуж једне од оса док за другу осу није неопходно извршити било какво праћење особина крутости. Иако се на овај начин лимитирају особине робота, са друге стране оптимизациони алгоритам има мање захтевну критеријумску функцију коју треба да минимизује, па је успешност алгоритма већа. Код симултане оптимизације дуж обе осе оптимизациони алгоритам треба да изврши минимизацију критеријумске функције (проналажење оптималних позиција и крутости зглобова робота) водећи рачуна да оствари одговарајуће особине дуж обе осе. Оваква поставка због кинематичких ограничења и ограничења у остваривим опсезима крутости на нивоу зглоба робота може довести до лошијих перформанси него код оптимизације дуж једне осе (строго гледајући успешност оптимизационог процеса), али са друге стране се омогућава контрола особина робота дуж обе осе. На крају, као компромис предлаже се фаворизовање једне од оса, уколико је задатком то могуће, где алгоритам оптимизације фаворизује контролу параметара крутости дуж једне од оса при чему се друга оса не искључује из оптимизације као код оптимизације дуж једне осе.

5.3.1 Оптимизација дуж једне осе

За потребе оптимизације дуж једне осе, вредност коефицијената, A или B , у (5.11) је потребно подесити на 0. Уколико је коефицијент A једнак 0, онда се оптимизација врши дуж Y осе и обратно. Манипулатор је доведен у неку радну тачку у простору и постављена је жељена матрица крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, након чека се покреће алгоритам оптимизације. Резултати неколико симулационих експеримената оптимизације дуж једне осе представљени су у Табели 5.1.

Табела 5.1: Резултати оптимизација дуж Y осе.

Сим.	Жељ. Поз. x, y [m]	Ини. Конф. $q_{1,2,3,4}$ [Rad]	Рез. Крутост $k_{j_{1,2,3,4}}$ [Nm/Rad]	Рез. Конф. $q_{1,2,3,4}$ [Rad]	Рез. Поз. x, y [m]	$f(q, K_j)$	Крутост Оств. (Жељ.) [N/m]
1	0.0241	1.1472	7.1004	1.5707	0.0241	2.8055×10^{-5}	235
		1.1272	0.5348	-0.8605			
	0.3564	-0.2472	3.5427	0.9859	0.3564		(235)
2	0.0241	0.9472	6.7482	1.2941	0.0241	6.6554×10^{-6}	440
		0.8972	1.6680	-0.2958			
	0.3564	-0.2472	4.5738	0.5010	0.3564		(440)
3	0.1125	1.1472	2.0157	0.8516	0.1125	6.0982×10^{-5}	728.08
		1.1272	0.5133	0.0298			
	0.3198	0.0146	12.0378	1.3616	0.3198		(745)
4	0.1125	0.9472	5.9942	0.9342	0.1125	1.1922×10^{-5}	1350
		0.8972	2.7714	-0.2770			
	0.3198	0.0146	9.3229	1.5074	0.3198		(1350)
		-0.0783	3.1778	-0.8967			

У табели су приказани улазно/излазни параметри процес оптимизације. Колона Жељ. Поз. представља командовану позицију завршног уређаја робота, а Ини. Конф. представља иницијалну конфигурацију робота из које се покреће алгоритам оптимизације. Као резултат оптимизације добијене су резултујућа крутост и позиција сваког зглоба робота (Рез. Крутост и Рез. Конф.) а последично и позиција завршног уређаја робота (Рез. Поз.). Такође, за потребе евалуације успешности оптимизационог алгоритма приказана је вредност критеријумске функције након процеса оптимизације ($f(q, K_j)$), али и вредности остварене и жељене крутости завршног уређаја.

Резултати оптимизације задовољавају ограничења и успешно прате задату референтну вредност крутости дуж Y осе. Резултати добијени након четири симулациона експеримента су приказани у Табели 5.1. У случају оптимизације дуж једне осе показано је да је алгоритам способан да у различитим деловима радног простора успешно изврши израчунавање оптималних конфигурација и крутости на нивоу зглоба робота и тиме успешно постигне жељену крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему дуж жељене осе.

5.3.2 Оптимизација дуж више оса

Код оптимизације дуж више оса (у конкретном случају у XY равни) очекивано је да због проширивања подручја претраге оптимизациони алгоритам у одређеним случајевима одступа од жељене крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. У општем случају потребно је да алгоритам успешно изврши подешавање крутости дуж обе осе од интереса, али и да задовољи сва постављена ограничења, односно да одржи робота на жељеној позицији у простору. У предстојећим симулацијама, коефицијенти A и B су постављени на вредност 1, односно подједнаког је приоритета подешавање крутости дуж обе осе.

Иако оптимизациони алгоритам успешно задовољава сва ограничења и проналази локални минимум критеријумске функције, самим тим израчуна оптималну конфигурацију робота и крутости на нивоу зглобова робота, као што је приказано у Табели 5.2, могуће је да алгоритам не може да подеси крутости на жељене крутости завршног

уређаја у Декартовом координатном систему. Постоје два главна разлога која доводе до оваквог резултата: (1) у одређеној позицији у радном простору робота, робот физички није у могућности да постигне жељено понашање (услед кинематичких ограничења и опсега крутости на нивоу зглоба робота), или (2) оптимизациони алгоритам остане заглављен у неком од локалних минимума. Како би се заглављивање у локалном минимуму превазишло, могуће је покренути оптимизациони алгоритам више пута са различитим почетним условима како би се евентуално одредио глобални минимум.

Табела 5.2: Оптимизације дуж више оса.

Сим.	Жељ. Поз. x, y [m]	Ини. Конф. $q_{1,2,3,4}$ [Rad]	Рез. Крутост $k_{j1,2,3,4}$ [Nm/Rad]	Рез. Конф. $q_{1,2,3,4}$ [Rad]	Рез. Поз. x, y [m]	$f(q, K_j)$	Крутост Оств. (Жељ.) [N/m]
1	0.0241	1.1472	12.9489	0.9865	0.0241	1.6819×10^{-4}	60; 350
		1.1272	13	0.1284			
	0.3564	-0.2472	3.4717	0.7027	0.3564		(60; 350)
		0.7154	0.5000	0.2841			
2	0.0241	0.9472	12.6546	1.5690	0.0241	9.0114×10^{-4}	75; 2700
		0.8972	12.7370	0.3654			
	0.3564	-0.2472	8.5553	-1.2348	0.3564		(75; 2700)
		0.9054	5.0958	1.0421			
3	0.1125	1.1472	7.1619	1.4837	0.1125	1.4×10^{-3}	149.9; 499.9
		1.1272	5.9281	0.4001			
	0.3198	0.0146	8.3310	-0.7289	0.3198		(150; 500)
		-0.8554	5.5392	-0.8127			
4	0.2125	0.3224	12.4952	1.4081	0.2125	1.2870×10^{-4}	500; 200
		0.0336	3.5669	0.1878			
	0.2198	0.3768	8.0491	-1.5175	0.2198		(500; 200)
		1.3664	12.3320	0.0554			

У Табели 5.2 приказани су резултати четири симулациона експеримента код којих је било потребно извршити симултано управљање параметрима матрице крутости које одговарају осама x и y . Оптимизациони алгоритам је за сва четири изабрана експеримента дао добре резултате, односно успешно је извршио обликовање матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Такође, ограничења типа једнакости су задовољена, односно резултујућа конфигурација робота доводи завршни уређај робота у жељену позицију.

5.3.3 Фаворизовање једне од оса

У процесу оптимизације дуж више оса, уколико је захтевано да се изврши фаворизација оптимизације дуж једне од оса у односу на другу, коефицијенти A и B се могу подесити на одговарајући начин. Да би се извршила фаворизација дуж X осе, потребно је задовољити релацију да је $A > B$ и обратно. У овом случају, оптимизација се разликује од једноставне оптимизације дуж једне осе (при чему контрола параметара крутости дуж друге осе није разматрана), јер се у овом случају ипак постиже одређено праћење крутости дуж нефаворизоване осе такође. Табела 5.3 представља ефекте промене коефицијената A и B на праћење крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему.

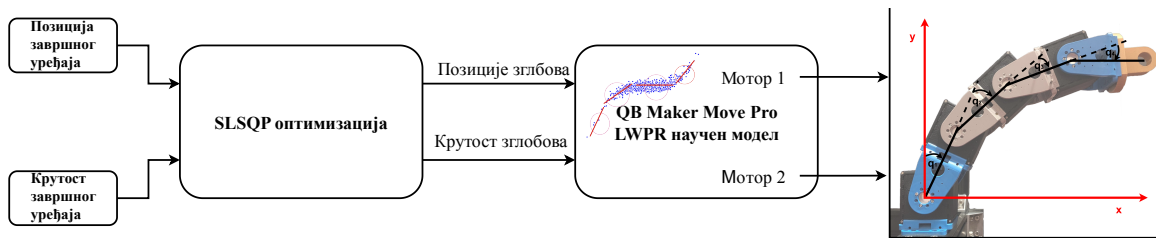
Табела 5.3: Фаворизација једне од оса.

Сим.	Жељ. Поз. x, y [m]	А и В	Рез. Крутост $k_{j_{1,2,3,4}}$ [Nm/Rad]	Рез. Конф. $q_{1,2,3,4}$ [Rad]	Рез. Поз. x, y [m]	$f(q, K_j)$	Крутост: Оств. (Жељ.) [N/m]
1	0.1172	1	13 0.5	1.5708 -0.4909	0.1172	89.86	243; 874
	0.3164	1	12.99 6.1066	-0.7612 1.5040	0.3164		(330; 850)
2	0.1172	1	13 7.6633	1.5708 -0.9172	0.1172	170	159; 847
	0.3164	16	13 5.4937	0.0357 1.2859	0.3164		(330; 850)
3	0.1172	16	12.9728 5.8234	1.5653 -0.2659	0.1172	72.35	330; 834
	0.3164	1	0.8217 12.9846	-1.0942 1.4461	0.3164		(330; 850)

Како би се извршила демонстрација ефекта фаворизације изабрана је тачка у радном простору робота али и жељена матрица крутости завршног уређаја код које није могуће наћи оптималне вредности позиција и крутости зглобова који ће обезбедити жељене особине (Табела 5.3, симулација 1). Са друге стране, када се коефицијенти и подесе на одговарајући начин испољавају се ефекти фаворизације одређене осе. Код симулације 2 у Табели 5.3 алгоритам фаворизује осу, односно резултујућа конфигурација и крутости зглобова робота остварују боље праћење крутости дуж осе. Слично томе (Табела 5.3, симулација 3), када се изврши фаворизација осе, оптимизациони алгоритам боље прати задату крутост дуж осе.

5.4 Експериментална евалуација

За потребе експерименталне валидације, коришћен је 4 DoF равански манипулатор погоњен QB актуаторима променљиве крутости (идентични актуатори коришћени у симулационим експериментима) на којем су демонстриране методологије учења модела актуатора (подпоглавље 5.2) и обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему код робота погоњених попустљивим актуаторима (подпоглавље 5.3). Креирана секвенца акција представљена на Слици 5.1, је искоришћена за креирање експеримента. Позиције зглобова (конфигурација робота) и крутости на нивоу зглоба робота добијене су коришћењем $SLSQP$ оптимизације, при чему су улазни подаци били жељена позиција завршног уређаја (као ограничење оптимизације) и жељена крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему (као критерију за минимизацију). Након чега се добијене референтне позиције и крутости на нивоу зглобова робота прослеђују научним $LWPR$ моделима сваког актуатора како би се извршила контрола одговарајућим погонским моторима и остварило жељено понашање сваког актуатора (позиција и крутост). Блок дијаграм контролног процеса приказан је на Слици 5.8.



Слика 5.8: Управљачки блок дијаграм: $SLSQP$ оптимизациони алгоритам израчунава оптималну конфигурацију робота и крутости у зглобовима, а научени $LWPR$ модели контролишу сваки од QB актуатора.

У претходним подпоглављима (5.2 и 5.3) детаљно су описане методологије и резултати сваког појединачног корака. Циљ овог поглавља јесте да изврши евалуацију рада претходне две методологије заједно. Сходно томе, у циљу естимације оствареног понашања робота, уведен је поремећај у систем који треба да испита да ли се остварена крутост завршног уређаја поклапа са жељеном крутошћу завршног уређаја у Декартовом координатном систему. За уношење поремећаја коришћен је *Panda* робот који је вршио померање завршног уређаја 4 DoF из стационарног стања. *Panda* робот је користећи сензор силе и момента мерио контактне силе које настају услед генерисаног контакта (поремећаја) када се завршни уређај изведе из стационарне позиције. Поменути експериментална поставка приказана је на Слици 5.9, слично као и поставка презентована у [205].



Слика 5.9: Експериментална поставка: 4 DoF планарни робота погођен QB актуаторима, *Franka Robotics Panda* робот, и *Axia80-M8* сензор силе и момента.

Насумичне пертурбације су примењене како би се извршило испитивање оствареног понашања 4 DoF планарног робота. Поремећај који је унет у систем је тако генерисан да не изведе систем далеко од равнотежне стационарне позиције завршног уређаја. На овај начин конфигурација робота није значајно промењена у односу на оптималну конфигурацију, односно помераји не утичу на крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему јер су промене Јакобијан матрице занемарљиво мале.

У општем случају, матрица крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему планарног робота је дата са

$$\mathbf{K}_C = \begin{bmatrix} k_{c11} & k_{c12} \\ k_{c21} & k_{c22} \end{bmatrix}, \quad (5.14)$$

где k_{c11} и k_{c22} представљају крутости дуж X и Y оса, респективно, док важи да је $k_{c12} = k_{c21}$ и ови елементи матрице представљају купловану крутост између две осе.

Унети поремећај односно контакт у оваквом систему доводи до генерисања силе између робота и објекта у контакту (*Panda* робот). Уколико је претпостављено да се систем понаша линеарно у непосредној близини равнотежне стационарне тачке, онда се силе генерисане на овај начин могу описати на следећи начин

$$\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{K}_C \times \Delta \mathbf{X}, \quad (5.15)$$

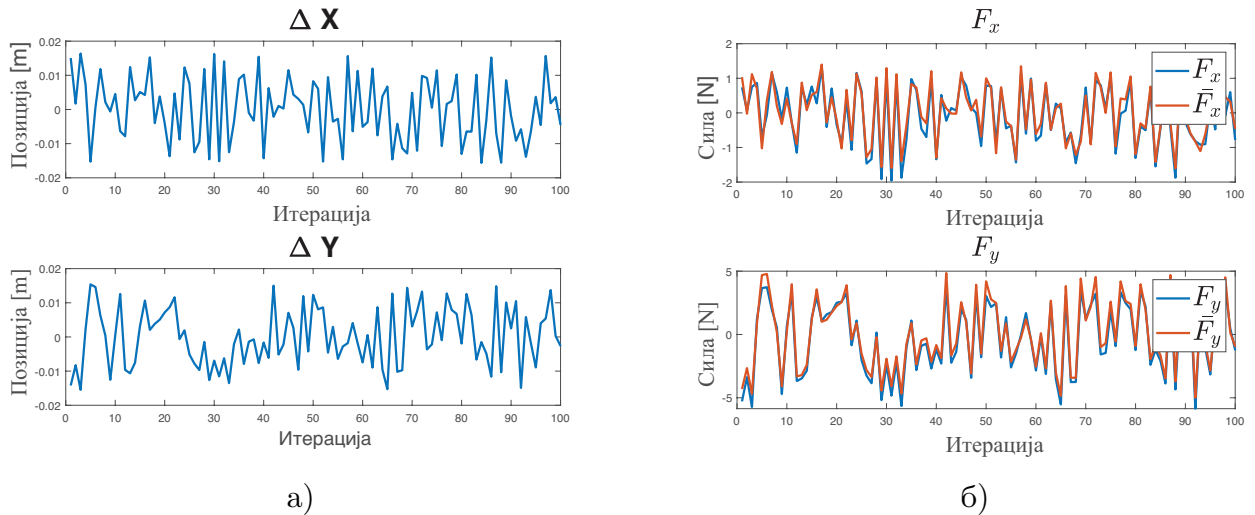
$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{c11} & k_{c12} \\ k_{c21} & k_{c22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} F_x &= k_{c11}\Delta x + k_{c12}\Delta y, \\ F_y &= k_{c21}\Delta x + k_{c22}\Delta y. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Овакав непотпун систем једначина потребно је решити како би се одредили параметри матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Познате променљиве су измерена контактна сила и промена положаја завршног уређаја у XU равни, док су непознате променљиве k_{c11} , k_{c12} , и k_{c22} . Уколико је извршено N насумично генерисаних поремећаја, претходне једнакости се могу написати на следећи начин

$$\begin{bmatrix} F_{x_1} \\ F_{x_2} \\ \vdots \\ F_{x_N} \\ F_{y_1} \\ F_{y_2} \\ \vdots \\ F_{y_N} \end{bmatrix}_{2N \times 1} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 & 0 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta x_N & \Delta y_N & 0 \\ 0 & \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ 0 & \Delta x_2 & \Delta y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \Delta x_N & \Delta y_N \end{bmatrix}_{2N \times 3} \times \begin{bmatrix} k_{c11} \\ k_{c12} \\ k_{c22} \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (5.18)$$

Користећи псеудоинверзију, матрица поремећаја се може инвертовати и додати са леве стране једнакости, омогућавајући на тај начин естимацију непознатих параметара матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Користећи ову методу (псеудоинверзију), параметри матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему се фитују методом минимизације средње квадратне грешке (енгл. *Mean Least Square Error*). На Слици 5.10 су приказане примењене пертурбације и генерисана сила настала услед њих. Примењене пертурбације су насумични покрети *Panda* робота у XU равни, где је максимални померај у сваком правцу 1.5 cm.



Слика 5.10: Мерења настала применом поремећаја. Вредности поремећаја позиције завршног уређаја робота а) Генерисана контактна сила: б) плава. Процењена контактна сила: б) црвена.

Параметри матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему су естимирани на основу претходних једнакости. Естимиране вредности након изведеног експеримента су

$$\bar{K}_c = \begin{bmatrix} 88.6916 & 21.4254 \\ 21.4254 & 326.0492 \end{bmatrix}, \quad (5.19)$$

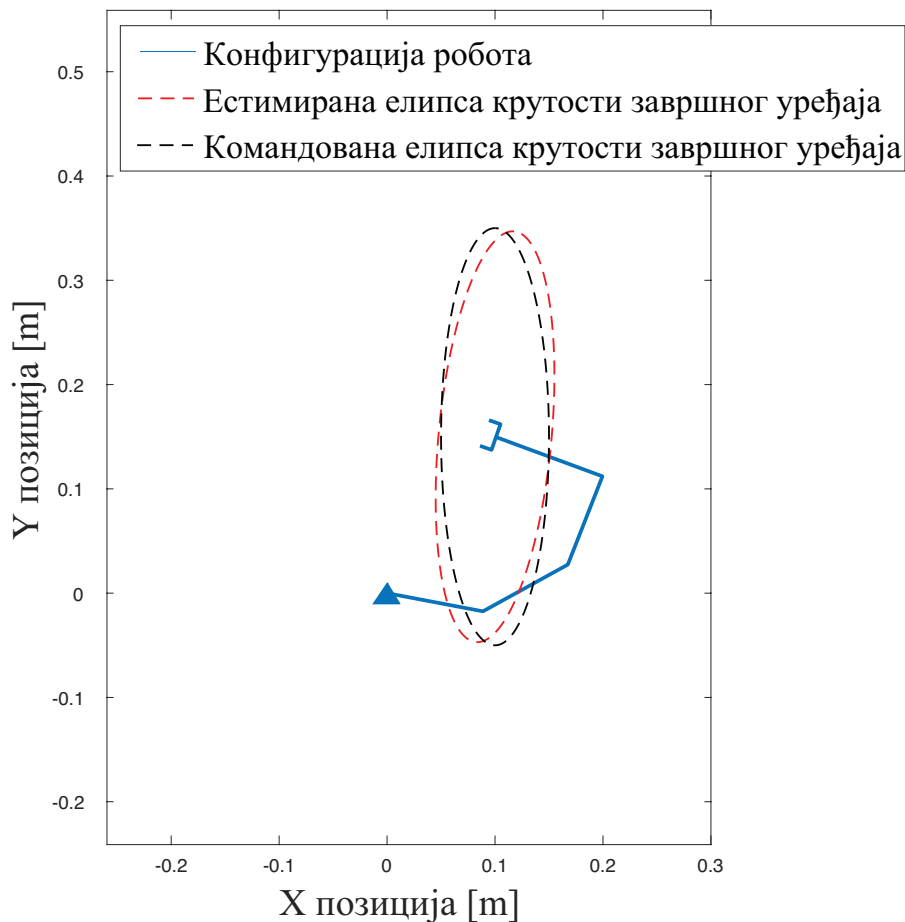
док је командована матрица крутости завршног уређаја

$$\mathbf{K}_c = \begin{bmatrix} 77.0128 & 0.0019 \\ 0.0019 & 308.1533 \end{bmatrix}. \quad (5.20)$$

Након естимације параметара матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, извршена је естимација генерисане силе коришћењем добијених параметара матрице крутости

$$\begin{aligned} \bar{F}_x &= \bar{k}_{c11} \Delta x + \bar{k}_{c12} \Delta y, \\ \bar{F}_y &= \bar{k}_{c21} \Delta x + \bar{k}_{c22} \Delta y. \end{aligned} \quad (5.21)$$

График б) на Слици 5.10 (црвено) приказује естимирану силу насталу током примене поремећаја. Може се видети да је еситимирана сила коришћењем параметара добијених псеудоинверзијом (минимизацијом средње квадратне грешке) дала добре резултате у естимацији.



Слика 5.11: Оптимална конфигурација робота са командованом елипсом крутости завршног уређаја (црна) и естимирана елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему (црвена).

Као што је било напоменуто у претходним поглављима, интерпретација саме матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему може бити изазовна, односно сами параметри матрице у неким случајевима и њихов међусобни однос не пружају интуитивну репрезентацију особина робота. Сходно томе за репрезентацију

естимиране и жељене матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему узето је да се посматра елипса крутости завршног уређаја добијена сингуларном декомпозицијом саме матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Слика 5.11 приказује конфигурацију 4 *DoF* *QB* робота, командовану елипсу крутости завршног уређаја (црна елипса), и естимирану елипсу крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему (црвена елипса).

Из естимиране матрице крутости завршног уређаја се може видети да су њене вредности приближне командованој матрици крутости завршног уређаја. Матрична презентација командоване и естимиране крутости не даје довољно описно однос између њих. Презентацијом матрице крутости кроз елипсу крутости, може се видети да је разлика у оријентацији између естимиране и командоване елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему само 2.8%.

Поглавље 6

Закључак

У оквиру ове докторске дисертације представљен је дизајн неуроергономске радне станице за процес ручне монтаже потпомогнуте колаборативним роботом, усмерене ка човеку, чији су ефекти тестирани на објективне и субјективне мере перформанси и оптерећења радника у реалном фабричком окружењу. Радна станица приказује главне елементе новог концепта Индустрије 5.0, укључујући модуле за менталну (*BrainWatch*) и физичку (*M2O2P-L*) процену стања радника, као и модуле за физичку (*Cobot*) и визуелну (*ADIN*) помоћ раднику. Компоненте система развијене су као део активности у оквиру пројекта *Smart Human Oriented Platform for Connected Factories (SHOP4CF)*. Све компоненте су развијене кроз концепт отвореног кода и јавно су доступне кроз *SHOP4CF* и (RAMP) портфолио. Неуроергономска радна станица је демонстрирана у реалном фабричком окружењу где је 5 искусних радника извршило тестирање сваке компоненте система. Приказана архитектура система омогућава велику флексибилност и прилагођење сваке компоненте индивидуалним захтевима различитих апликација док задовољава све стандарде дефинисане концептима Индустрије 5.0. Односно, сваки од конкретно развијених софтверско-хардверских решења може бити прилагођено по потреби другој апликацији, или може бити замењено модулом који користи другу технологију за процену стања радника или подршку раднику. На пример, могуће је имплементирати егзоскелете као уређаје за физичку подршку радницима који могу да повећају перформансе радника или да спрече мишићно-скелетна обољења. За нефизичку подршку могу се користити технологије засноване на проширеној или виртуелној реалности како би се пружиле додатне информације раднику о самом процесу. Односно, могуће је применити камере, тактилне сензоре или сензоре за праћење кретања очију како би се добио увид у физичке и психичке аспекте радника. Примарни доприноси предложене неуроергономске радне станице за роботом потпомогнуто склапање укључују смањење броја неисправних производа, повећање производње, повећање задовољства радника уз смањење напора током извршавања радног задатка.

У циљу даљег унапређења интеракције између робота и човека (прелазак из кооперативног ка колаборативном раду) представљена је метода обликовања крутости у Декартовом координатном систему који превазилази типичне изазове у контроли крутости у Декартовом координатном систему, као што су процена крутости, знање о могућем опсегу крутости, формулисање квантитативних индикатора у матрици крутости у Декартовом координатном систему и потреба за коришћење сензора за силу-/момент. Предложени приступ користи геометријску репрезентацију крутости у Декартовом координатном систему и користи методе оптимизације за обликовање крутости у Декартовом координатном систему дуж оса које су битне за предефинисане задатке

и командоване трајекторије робота. Предложена методологија, доприноси кориснички оријентисаном планирању и дефинисању крутости и дефинисању жељеног понашања робота у типичним задацима интеракције (монтажа, убацивање, сечење, бушење, итд). Алгоритам оптимизације представљен у дисертацији, за обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему користи *SLSQP* технику како би осигурао ефикасност при решавању нелинеарних проблема оптимизације. Стога је представљена методологија општа и применљива на различите роботске системе. Додатно, представљени алгоритам омогућава интуитивнији приступ извршавању роботских задатака са побољшаном ефикасношћу и поузданошћу у раду у неструктурираним окружењима или током деловања поремећаја при извршавању задатака. Својства алгоритма и главни бенефити предложеног приступа експериментално су демонстрирани на два репрезентативна контактна задатка - провлачење шрафа кроз алуминијумски профил и сечење. Предложена методологија може се применити на широк спектар задатака у којима перформансе зависе од механичке интеракције између робота и његовог окружења.

Ради омогућавања безбедне и ефикасне интеракције и код најновијих типова робота који користе актуаторе са променљивом крутошћу, у дисертацији се предлаже у потреба алгоритама машинског учења са особинама итеративног учења, као што је локално пондерисана пројекциона регресија (*LWPR*). Предложеним приступом извршено је моделовање актуатора променљиве крутости у бидирекционој антагонистичкој конфигурацији. Потом су искоришћене особине итеративног учења како би се извршила поправка наученог модела током процеса експлоатације. Потребне за додатним обучавањем модела актуатора променљиве крутости проистиче из могућности еластичног елемента да промени своје параметре услед експлоатације или хабања актуатора током времена. Коришћењем симулираног и реалног актуатора променљиве крутости (*QB Advanced Pro*) у дисертацији је извршена евалуација перформанси научених модела на бази *LWPR* алгоритма. Специфична реализација *SLSQP* оптимизација се и код робота погоњених актуаторима променљиве крутости показала као ефикасан алат за одређивање оптималне конфигурације робота и крутости на нивоу зглоба робота како би остварила задату крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Перформансе управљања робота погоњеног актуаторима променљиве крутости експериментално су верификоване на планарном роботу са четири степена слободе у присуству случајно генерисаних пертурбација, где је за изазивање пертурбација коришћен *Franka Emika Panda* колаборативни робот опремљен сензором силе и момента.

Докторска дисертација такође отвара и нове теме за унапређење интеракције између робота и човека.

Будући рад у оквиру Индустрије 5.0 и њених концепата побољшања безбедности и задовољства радника имаће за циљ да даље унапређује поменуте аспекте. Предложена архитектура неуроергономске радне станице омогућава даљи развој модула за процену стања радника или пружања подршке при извођењу колаборативних задатака. Један од аспеката будућег истраживања у оквиру ове теме јесте развијање и интеграција решења која користе проширену и/или виртуелну реалност како би се унапредила безбедност и повећала интуитивност приликом сарадње робота и човека. Са друге стране, употреба колаборативних робота омогућава прелазак са кооперативног рада између робота и човека на колаборативни рад, где нова генерација колаборативних робота погоњених актуаторима променљиве крутости може додатно да повећа безбедност и ефикасност интеракције. Сходно томе, будући рад ће експлоатисати овакве роботске системе у циљу креирања алгоритама за управљање интеракцијом између робота и човека.

Алгоритми представљени кроз ову дисертацију се базирају на техникама оптимизације погодних за нелинеарне системе, као што је *SLSQ* оптимизациони алгоритам, који

може да оптимално решење које има карактер локалног минимума. Са друге стране, предложени алгоритми разматрају коришћење пасивне крутости па је простор могуће остваривих крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему лимитиран. Како би се уочени недостаци предложених алгоритама превазишли, будуће истраживање ће бити усмерено ка употреби алгоритама глобалне оптимизације како би се превазишли евентуални проблеми заглављивања у локалном минимуму. Осим тога, у будућности ће фокус бити на експлоатацији алгоритама који комбинују активну и пасивну крутост чиме би се немогућност остваривања произвољне крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему (последича саме кинематике робота и опсега крутости на нивоу зглоба) превазишла. Нова истраживања проистекла из дисертације бавиће се такође и употребом Риманове геометрије за описивање модела робота па и крутости на нивоу завршног уређаја и геодетске удаљености као природне метрике између позитивно семи-дефинитних матрица, као што су матрице крутости.

Нова истраживања у области управљања роботима погоњених актуаторима променљиве крутости бавиће се омогућавањем *online* планирања крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, не само у једној дискретној тачки у простору, већ дуж неке трајекторије. Такође, коришћење алгоритама који учење заснивају на временским серијама омогући ће још бољи увид у динамичке параметре актуатора променљиве крутости. Истраживања требају да омогуће брзу и ефикасну естимацију параметара крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, али и процену сила интеракције робота и окружења, и еластичног момента на нивоу зглоба робота. У складу са тим, нови правац истраживања ће се фокусирати на алгоритмима за естимацију заснованим на комбинацији обсервера непознатог улаза и техникама учења.

Списак слика

Слика 2.1	Приказ система са масом, опругом и пригушником.	13
Слика 2.2	Анализа одзива система са масом, опругом и пригушником приликом промене параметара система.	14
Слика 2.3	<i>Franka Emika Panda</i> - робот са одговарајућим транслаторним системима са опругом и пригушником за описивање интеракције са околином.	15
Слика 2.4	ПД контролер за реализацију активне крутости на нивоу зглоба робота са интегрисаним контролером момента.	16
Слика 2.5	Илустрација активне и пасивне крутости на нивоу зглоба робота.	17
Слика 2.6	Седам фаза алгорита за обраду догађаја у присуству интеракције.	20
Слика 2.7	Блок шема за управљање силом код робота у координатном систему задатка.	25
Слика 2.8	Мапа роботике и питања која требају бити решена за ефикасну колаборацију између робота и човека.	27
Слика 2.9	Репрезентација оперативног и колаборативног радног простора.	28
Слика 2.10	Техничке карактеристике колаборативних робота: а) безбедносно заустављање; б) ручно вођење робота; в) надзор брзине и растојања робота и човека; г) лимитирање снаге и силе робота.	29
Слика 2.11	Подела робота према типовима извршавања задатака.	30
Слика 2.12	Типови интеракције човека и робота: а) потпуна сепарација; б) коегзистенција; в) кооперација; г) колаборација.	31
Слика 3.1	Склопљени уређаји. Фискална каса, лево, и <i>GSM</i> уређај, десно.	36
Слика 3.2	Процес ручног склапања.	37
Слика 3.3	Архитектура неуроергономске радне станице са протоком информација између компоненти.	38
Слика 3.4	<i>EEG</i> индикатори добијени кроз <i>BrainWatch</i> модул. Пример сва три индикатора током извршавања задатка склапања: <i>TAR</i> - плава; <i>TBR</i> - црвена; <i>EI</i> - наранџаста. Десно - Упоредни приказ <i>TAR</i> индекса у <i>MA</i> (плава) и <i>CMA</i> (црвена) сценарију.	39
Слика 3.5	<i>EEG</i> индикатори добијени кроз <i>BrainWatch</i> модул. Упоредни приказ <i>TAR</i> индекса у <i>MA</i> (плава) и <i>CMA</i> (црвена) сценарију.	40
Слика 3.6	Типичне гестикулације шаке које се могу класификовати користећи <i>M2O2P-L</i> модул.	41
Слика 3.7	Матрица конфузије <i>VGG16</i> модела за класификацију гестикулација шаке.	41
Слика 3.8	<i>ADIN</i> контролни панел са упутствима за склапање.	42
Слика 3.9	Апликација за управљање <i>SQL</i> базом података за измену/унос задатака склапања.	43

Слика 3.10	Експериментална поставка линије за склапање потпомогнуто колаборативним роботом на примеру једног задатка склапања. 1 – <i>BrainWatch</i> модул за интерпретацију показатеља активности мозга, 2 – <i>Smartphones</i> коришћене за прикупљање <i>EEG</i> сигнала за <i>BrainWatch</i> модул, 3 – <i>ADIN</i> модул коришћен за приказ упутстава, 4 – Колаборативни робот који предаје неопходне компоненте раднику, 5 – <i>Lepa Motion</i> сензор који служи за прослеђивање информација <i>M2O2P-L</i> модулу како би на основу одговарајућих гестикулација шаке управљао остатком система. Задатак 1 - Монтажа матичне плоче на пластични поклопац. Задатак 2 - Склапање предњег поклопаца фискалног уређаја. Задатак 3 - Причвршћивање матичне плоче. Задатак 4 - Склапање термалног штампача. Задатак 5 - Повезивање <i>GSM</i> модул са матичном плочом. Задатак 6 - Склапање горњег и доњег дела фискалног уређаја.	46
Слика 3.11	Коефицијенти корелације између три <i>EEG</i> индекса (<i>TAR</i> , <i>TBR</i> , и <i>EI</i>) и вредности шест <i>NASA-TLX</i> скала (ментални напор, физички напор, привремени односно временски напор, укупне перформансе, напор, и ниво фрустрације). Значајне вредности корелације означене су црвеном бојом.	48
Слика 3.12	Просечне оцене <i>NASA-TLX</i> теста за свих 6 скала (ментални напор, физички напор, привремени или временски напор, укупни перформанс, напор, и ниво фрустрације).	49
Слика 4.1	Блок дијаграм <i>GCSS</i> алгоритма. Плава: Параметри које подешава корисник (жељена трајекторија X_d , однос оса елипсоида крутости завршног уређаја α). Зелена: Израчунавање правца кретања U_{dmax} на основу ког се одређује усмереност елипсоида крутости за одређивање оптималне (<i>SLSQP</i> алгоритам) конфигурације робота q_{opt} за жељени задатак. Жута: Параметри оптимизационог алгоритма (иницијално подешене крутости на нивоу зглоба робота K_j , Јакобијан матрица робота $J(q)$).	58
Слика 4.2	Провлачење шрафа кроз алуминијумски профил (лево) и задатак сечења траке (десно).	63
Слика 4.3	Елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему оријентисана дуж правца кретања (од плаве ка црвеној тачки), неоптимални сценарио (лево), и оптимални сценарио (десно).	64
Слика 4.4	Зглобне позиције добијене инверзним кинематичким контролером (црвена) и <i>GCSS</i> алгоритмом (плава).	65
Слика 4.5	Експеримент провлачења шрафа кроз алуминијумски профил. а) <i>GCSS</i> алгоритам без поремећаја; б) Попустљив режим са поремећајем; в) Крут режим са поремећајем; и г) <i>GCSS</i> алгоритам са поремећајем.	66
Слика 4.6	Елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему за задатак сечења: оријентација главне осе елипсе крутости дуж правца сечења (горе); нормално на правац сечења (доле).	68
Слика 4.7	Силе на завршном уређају код задатка сечења. Командована оријентација елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему оријентисана дуж правца сечења (зелена). Командована оријентација елипсе крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему оријентисана нормално на правац сечења (црвена).	68

Слика 5.1	Секвенца корака предложене методологије. (1) Учење параметара модела <i>VSA</i> користећи <i>LWPR</i> (2) Континуирано инкрементално учење параметара модела. (3) Експлоатација наученог модела роботског система. (4) <i>SLSQP</i> оптимизација.	72
Слика 5.2	а) <i>QB</i> актуатор. б) Функционална шема <i>QB</i> актуатора – бидирекционог антагонистичког актуатора.	74
Слика 5.3	Сет података за тренирање, осмишљен да покрије целокупан излазни простор актуатора (излазна позиција и крутост).	75
Слика 5.4	Управљање у отвореној спреси на бази <i>LWPR</i> модела, који мапира позиције погонских мотора у излазну позицију и крутост.	75
Слика 5.5	Остварена позиција а) и крутост б). Праћење референце коришћењем стандардног статичког модела (црвена) и <i>LWPR</i> модела (жута).	76
Слика 5.6	Остварена позиција а) и крутост б). Праћење референце након променених параметара опруге (жута) и након четири итерације инкременталног учења (тамно црвена).	77
Слика 5.7	Планарни робот са 4 степена слободе погоњен актуаторима променљиве крутости.	79
Слика 5.8	Управљачки блок дијаграм: <i>SLSQP</i> оптимизациони алгоритам израчунава оптималну конфигурацију робота и крутости у зглобовима, а научени <i>LWPR</i> модели контролишу сваки од <i>QB</i> актуатора.	84
Слика 5.9	Експериментална поставка: 4 <i>DoF</i> планарни робота погоњен <i>QB</i> актуаторима, <i>Franka Robotics Panda</i> робот, и <i>Axia80-M8</i> сензор силе и момента.	85
Слика 5.10	Мерења настала применом поремећаја. Вредности поремећаја позиције завршног уређаја робота а) Генерисана контактна сила: б) плава. Процењена контактна сила: б) црвена.	86
Слика 5.11	Оптимална конфигурација робота са командованом елипсом крутости завршног уређаја (црна) и естимирана елипса крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему (црвена).	87

Списак табела

Табела 5.1	Резултати оптимизација дуж Y осе.	81
Табела 5.2	Оптимизације дуж више оса.	82
Табела 5.3	Фаворизација једне од оса.	83

Литература

- [1] M. Ghobakhloo, “The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward industry 4.0,” *Journal of manufacturing technology management*, vol. 29, no. 6, pp. 910–936, 2018.
- [2] R. Goel and P. Gupta, “Robotics and industry 4.0,” *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development*, pp. 157–169, 2020.
- [3] A. Nayyar and A. Kumar, *A roadmap to industry 4.0: Smart production, sharp business and sustainable development*. Springer, 2020.
- [4] N. Ahmad, A. Shamsuddin, and N. Abu Seman, “Industry 4.0 implications on human capital: A review,” *Journal for Studies in Management and Planning*, vol. 4, no. 13, pp. 221–235, 2018.
- [5] S. Waschull, J. A. Bokhorst, and J. C. Wortmann, “Impact of technology on work: Technical functionalities that give rise to new job designs in industry 4.0,” in *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2017, Hamburg, Germany, September 3-7, 2017, Proceedings, Part I*. Springer, 2017, pp. 274–281.
- [6] Y. Lu, H. Zheng, S. Chand, W. Xia, Z. Liu, X. Xu, L. Wang, Z. Qin, and J. Bao, “Outlook on human-centric manufacturing towards industry 5.0,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 62, pp. 612–627, 2022.
- [7] F. Longo, A. Padovano, and S. Umbrello, “Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: A human-centric perspective for the design of the factory of the future,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12, p. 4182, 2020.
- [8] A. D. Santis, B. Siciliano, A. D. Luca, and A. Bicchi, “An atlas of physical human–robot interaction,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 3, pp. 253–270, 2008.
- [9] N. Hogan, “Impedance control: An approach to manipulation: Part ii—implementation,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, no. 1, pp. 8–16, 1985.
- [10] F. Ficuciello, A. Romano, L. Villani, and B. Siciliano, “Cartesian impedance control of redundant manipulators for human-robot co-manipulation,” pp. 2120–2125, 2014, 2014 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.
- [11] A. Ajoudani, N. G. Tsagarakis, and A. Bicchi, “On the role of robot configuration in cartesian stiffness control,” in *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE, 2015, pp. 1010–1016.

- [12] D. J. Braun, F. Petit, F. Huber, S. Haddadin, P. van der Smagt, A. Albu-Schäffer, and S. Vijayakumar, “Robots driven by compliant actuators: Optimal control under actuation constraints,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 5, pp. 1085–1101, 2013.
- [13] B. Lukić, K. Jovanović, N. Knežević, L. Žlajpah, and T. Petrič, “Maximizing the end-effector cartesian stiffness range for kinematic redundant robot with compliance,” pp. 208–217, 2020, advances in Service and Industrial Robotics.
- [14] N. Knezevic, B. Lukic, K. Jovanovic, L. Zlajpah, and T. Petric, “End-effector cartesian stiffness shaping - sequential least squares programming approach,” *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 1–14, 2021.
- [15] A. Ajoudani, M. Gabiccini, N. Tsagarakis, A. Albu-Schäffer, and A. Bicchi, “Teleimpedance: Exploring the role of common-mode and configuration-dependant stiffness,” in *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*. IEEE, 2012, pp. 363–369.
- [16] A. Albu-Schaffer, M. Fischer, G. Schreiber, F. Schoeppe, and G. Hirzinger, “Soft robotics: what cartesian stiffness can obtain with passively compliant, uncoupled joints?” in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)*, vol. 4. IEEE, 2004, pp. 3295–3301.
- [17] Y. Chen and Y. Ding, “Posture optimization in robotic flat-end milling based on sequential quadratic programming,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 145, no. 6, p. 061001, 2023.
- [18] N. S. Usevitch, Z. M. Hammond, and M. Schwager, “Locomotion of linear actuator robots through kinematic planning and nonlinear optimization,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 5, pp. 1404–1421, 2020.
- [19] F. Ficuciello, A. Romano, L. Villani, and B. Siciliano, “Cartesian impedance control of redundant manipulators for human-robot co-manipulation,” in *2014 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. IEEE, 2014, pp. 2120–2125.
- [20] B. Lukić, K. Jovanović, L. Žlajpah, and T. Petrič, “Online cartesian compliance shaping of redundant robots in assembly tasks,” *Machines*, vol. 11, no. 1, p. 35, 2022.
- [21] M. Lippi, G. Gillini, A. Marino, and F. Arrichiello, “A data-driven approach for contact detection, classification and reaction in physical human-robot collaboration,” in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2021, pp. 3597–3603.
- [22] M. Trumić, C. Della Santina, K. Jovanović, and A. Fagiolini, “Adaptive control of soft robots based on an enhanced 3d augmented rigid robot matching,” in *2021 American Control Conference (ACC)*. IEEE, 2021, pp. 4991–4996.
- [23] M. Trumić, K. Jovanović, and A. Fagiolini, “Decoupled nonlinear adaptive control of position and stiffness for pneumatic soft robots,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 40, no. 1, pp. 277–295, 2021.
- [24] S. Haddadin, A. De Luca, and A. Albu-Schäffer, “Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 6, pp. 1292–1312, 2017.

- [25] G. Pang, G. Yang, W. Heng, Z. Ye, X. Huang, H.-Y. Yang, and Z. Pang, “Coboskin: Soft robot skin with variable stiffness for safer human–robot collaboration,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 4, pp. 3303–3314, 2020.
- [26] A. De Luca, A. Albu-Schaffer, S. Haddadin, and G. Hirzinger, “Collision detection and safe reaction with the dlr-iii lightweight manipulator arm,” in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2006, pp. 1623–1630.
- [27] M. A. Peshkin, J. E. Colgate, W. Wannasuphprasit, C. A. Moore, R. B. Gillespie, and P. Akella, “Cobot architecture,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 377–390, Aug 2001.
- [28] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, A. De Luca, and G. Hirzinger, “Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction,” in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2008, pp. 3356–3363.
- [29] A. Bicchi, G. Tonietti, M. Bavaro, and M. Piccigallo, “Variable stiffness actuators for fast and safe motion control,” in *Robotics Research. The Eleventh International Symposium*, P. Dario and R. Chatila, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 527–536.
- [30] S. Haddadin, M. Weis, S. Wolf, and A. Albu-Schäffer, “Optimal control for maximizing link velocity of robotic variable stiffness joints,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 6863 – 6871, 2011, 18th IFAC World Congress. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016447087>
- [31] M. Garabini, A. Passaglia, F. Belo, P. Salaris, and A. Bicchi, “Optimality principles in variable stiffness control: The vsa hammer,” in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sep. 2011, pp. 3770–3775.
- [32] G. Buondonno and A. De Luca, “Efficient computation of inverse dynamics and feedback linearization for vsa-based robots,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 908–915, July 2016.
- [33] M. Trumić, K. Jovanović, and A. Fagiolini, “Decoupled nonlinear adaptive control of position and stiffness for pneumatic soft robots,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 0, no. 0, p. 0278364920903787, 0. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0278364920903787>
- [34] G. Palli, C. Melchiorri, and A. De Luca, “On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness,” in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2008, pp. 1753–1759.
- [35] V. Potkonjak, B. Svetozarevic, K. Jovanovic, and O. Holland, “The puller-follower control of compliant and noncompliant antagonistic tendon drives in robotic systems,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 5, p. 69, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/10690>
- [36] B. Lukić, K. Jovanović, and T. B. Šekara, “Cascade control of antagonistic vsa—an engineering control approach to a bioinspired robot actuator,” *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 13, p. 69, 2019. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnbot.2019.00069>

- [37] S. Weerasooriya and M. El-Sharkawi, “Identification and control of a dc motor using back-propagation neural networks,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, no. 4, pp. 663–669, 1991.
- [38] G. A. Ismeal, K. Kyslan, and V. Fedák, “Dc motor identification based on recurrent neural networks,” in *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*, 2014, pp. 701–705.
- [39] A. Rubaai and R. Kotaru, “Online identification and control of a dc motor using learning adaptation of neural networks,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 3, pp. 935–942, 2000.
- [40] M. Gautier, A. Jubien, and A. Janot, “New iterative learning identification and model based control of robots using only actual motor torque data,” in *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2013, pp. 1436–1441.
- [41] S. Vijayakumar, A. D’Souza, and S. Schaal, “Incremental online learning in high dimensions,” *Neural Computation*, vol. 17, no. 12, pp. 2602–2634, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1162/089976605774320557>
- [42] D. Mitrovic, S. Klanke, and S. Vijayakumar, “Learning impedance control of antagonistic systems based on stochastic optimization principles,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 5, pp. 556–573, 2011.
- [43] M. Iskandar, C. Ott, O. Eiberger, M. Keppler, A. Albu-Schäffer, and A. Dietrich, “Joint-level control of the dlr lightweight robot sara,” pp. 8903–8910, October 2020.
- [44] C. Ott, A. Albu-Schaffer, A. Kugi, and G. Hirzinger, “On the passivity-based impedance control of flexible joint robots,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 2, pp. 416–429, 2008.
- [45] R. Van Ham, T. G. Sugar, B. Vanderborght, K. W. Hollander, and D. Lefeber, “Compliant actuator designs,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 81–94, 2009.
- [46] D. Lakatos, F. Petit, and A. Albu-Schäffer, “Nonlinear oscillations for cyclic movements in human and robotic arms,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 4, pp. 865–879, 2014.
- [47] M. Garabini, A. Passaglia, F. Belo, P. Salaris, and A. Bicchi, “Optimality principles in variable stiffness control: The vsa hammer,” in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2011, pp. 3770–3775.
- [48] —, “Optimality principles in stiffness control: The vsa kick,” in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 3341–3346.
- [49] G. A. Pratt and M. M. Williamson, “Series elastic actuators,” in *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, vol. 1. IEEE, 1995, pp. 399–406.
- [50] D. W. Robinson, J. E. Pratt, D. J. Paluska, and G. A. Pratt, “Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot,” in *1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Cat. No. 99TH8399)*. IEEE, 1999, pp. 561–568.

- [51] C. Lee, S. Kwak, J. Kwak, and S. Oh, “Generalization of series elastic actuator configurations and dynamic behavior comparison,” in *Actuators*, vol. 6, no. 3. MDPI, 2017, p. 26.
- [52] B. Vanderborght, A. Albu-Schäffer, A. Bicchi, E. Burdet, D. G. Caldwell, R. Carloni, M. Catalano, O. Eiberger, W. Friedl, G. Ganesh *et al.*, “Variable impedance actuators: A review,” *Robotics and autonomous systems*, vol. 61, no. 12, pp. 1601–1614, 2013.
- [53] S. Wolf, G. Grioli, O. Eiberger, W. Friedl, M. Grebenstein, H. Höppner, E. Burdet, D. G. Caldwell, R. Carloni, M. G. Catalano *et al.*, “Variable stiffness actuators: Review on design and components,” *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 21, no. 5, pp. 2418–2430, 2015.
- [54] R. Schiavi, G. Grioli, S. Sen, and A. Bicchi, “Vsa-ii: A novel prototype of variable stiffness actuator for safe and performing robots interacting with humans,” in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2008, pp. 2171–2176.
- [55] F. Petit and A. Albu-Schäffer, “Cartesian impedance control for a variable stiffness robot arm,” in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2011, pp. 4180–4186.
- [56] N. Hogan, “Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I—Theory,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, no. 1, pp. 1–7, 03 1985.
- [57] —, “Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part III—Applications,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, no. 1, pp. 17–24, 03 1985. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.3140701>
- [58] E. Colgate, A. Bicchi, M. A. Peshkin, and J. E. Colgate, “Safety for physical human-robot interaction,” in *Springer handbook of robotics*. Springer, 2008, pp. 1335–1348.
- [59] A. De Santis, B. Siciliano, A. De Luca, and A. Bicchi, “An atlas of physical human–robot interaction,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 3, pp. 253–270, 2008.
- [60] J. Latombe, *Robot Motion Planning*. Springer New York, NY, 1991.
- [61] E. A. Sisbot and R. Alami, “A human-aware manipulation planner,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 5, pp. 1045–1057, 2012.
- [62] J. Mainprice and D. Berenson, “Human-robot collaborative manipulation planning using early prediction of human motion,” in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2013, pp. 299–306.
- [63] D. M. Ebert and D. D. Henrich, “Safe human-robot-cooperation: Image-based collision detection for industrial robots,” in *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 1826–1831.
- [64] S. Kuhn and D. Henrich, “Fast vision-based minimum distance determination between known and unknown objects,” in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2007, pp. 2186–2191.
- [65] F. Flacco, T. Kröger, A. De Luca, and O. Khatib, “A depth space approach to human-robot collision avoidance,” in *2012 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2012, pp. 338–345.

- [66] ABB, “Abb safemove,” <https://new.abb.com/products/robotics/controllers/safemove>, accessed: 27.04.2024.
- [67] Velodyne, “Velodyne lidar,” <https://velodynelidar.com/>, accessed: 27.04.2024.
- [68] SICK, “Ultrasonic sensors,” <https://www.sick.com/at/en/catalog/logistics/warehouse-automation/mobile-robots-and-industrial-trucks/collision-avoidance-using-ultrasonic-sensors/c/p613552>, accessed: 27.04.2024.
- [69] T. Instruments, “mmwave radar,” <https://www.ti.com/sensors/mmwave-radar/overview.html>, accessed: 27.04.2024.
- [70] SICK, “Sick safevisionary,” <https://www.sick.com/ag/en/catalog/logistics-automation/industrial-vehicles/collision-avoidance-for-agvs-and-amrs-with-safety-camera-sensor/c/p675984>, accessed: 27.04.2024.
- [71] K. Suita, Y. Yamada, N. Tsuchida, K. Imai, H. Ikeda, and N. Sugimoto, “A failure-to-safety” kyozon” system with simple contact detection and stop capabilities for safe human-autonomous robot coexistence,” in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3. IEEE, 1995, pp. 3089–3096.
- [72] Y. Yamada, Y. Hirasawa, S. Huang, Y. Umetani, and K. Suita, “Human-robot contact in the safeguarding space,” *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 2, no. 4, pp. 230–236, 1997.
- [73] S. Takakura, T. Murakami, and K. Ohnishi, “An approach to collision detection and recovery motion in industrial robot,” in *15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 1989, pp. 421–426.
- [74] Z. Gordić and K. Jovanović, “Collision detection on industrial robots in repetitive tasks using modified dynamic time warping,” *Robotica*, vol. 38, no. 10, p. 1717–1736, 2020.
- [75] —, “A framework for inclusion of unmodelled contact tasks dynamics in industrial robotics,” *Sensors*, vol. 22, no. 19, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/19/7650>
- [76] S. Haddadin, S. Parusel, L. Johannsmeier, S. Golz, S. Gabl, F. Walch, M. Sabaghian, C. Jähne, L. Hausperger, and S. Haddadin, “The franka emika robot: A reference platform for robotics research and education,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 29, no. 2, pp. 46–64, 2022.
- [77] G. De Maria, C. Natale, and S. Pirozzi, “Force/tactile sensor for robotic applications,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 175, pp. 60–72, 2012.
- [78] R. S. Dahiya, P. Mittendorfer, M. Valle, G. Cheng, and V. J. Lumelsky, “Directions toward effective utilization of tactile skin: A review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 11, pp. 4121–4138, 2013.
- [79] A. Cirillo, F. Ficuciello, C. Natale, S. Pirozzi, and L. Villani, “A conformable force/tactile skin for physical human–robot interaction,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 41–48, 2015.
- [80] A. De Luca and R. Mattone, “Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control,” in *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2005, pp. 999–1004.

- [81] S. Haddadin, *Towards safe robots: approaching Asimov's 1st law*. Springer, 2013, vol. 90.
- [82] S. Golz, C. Osendorfer, and S. Haddadin, "Using tactile sensation for learning contact knowledge: Discriminate collision from physical interaction," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2015, pp. 3788–3794.
- [83] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, and G. Hirzinger, "The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction-part i: Non-constrained blunt impacts," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2008, pp. 1331–1338.
- [84] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, M. Frommberger, and G. Hirzinger, "The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction - part ii: Constrained blunt impacts," 05 2008, pp. 1339–1345.
- [85] A. De Luca and L. Ferrajoli, "Exploiting robot redundancy in collision detection and reaction," in *2008 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. IEEE, 2008, pp. 3299–3305.
- [86] S. Parusel, S. Haddadin, and A. Albu-Schäffer, "Modular state-based behavior control for safe human-robot interaction: A lightweight control architecture for a lightweight robot," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2011, pp. 4298–4305.
- [87] A. Bicchi, G. Tonietti, M. Bavaro, and M. Piccigallo, "Variable stiffness actuators for fast and safe motion control," in *Robotics Research. The Eleventh International Symposium*, P. Dario and R. Chatila, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 527–536.
- [88] G. Tonietti, R. Schiavi, and A. Bicchi, "Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 526–531.
- [89] G. Zeng and A. Hemami, "An overview of robot force control," *Robotica*, vol. 15, no. 5, p. 473–482, 1997.
- [90] T. Yoshikawa, "Force control of robot manipulators," in *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, vol. 1, 2000, pp. 220–226 vol.1.
- [91] S. Eppinger and W. Seering, "On dynamic models of robot force control," in *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, 1986, pp. 29–34.
- [92] L. Villani and J. De Schutter, *Force Control*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 195–220. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_9
- [93] L. V. a. Bruno Siciliano, *Robot Force Control*, 1st ed., ser. The Springer International Series in Engineering and Computer Science №540. Springer, 1999.
- [94] A. De Luca and C. Manes, "Hybrid force-position control for robots in contact with dynamic environments," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 24, no. 9, pp. 177–182, 1991, 3rd IFAC Symposium on Robot Control 1991 (SYROCO'91), Vienna, Austria, 16-18 September 1991. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017510526>

- [95] T. Yoshikawa, “Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators—description of hand constraints and calculation of joint driving force,” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 386–392, 1987.
- [96] M. H. Raibert and J. J. Craig, “Hybrid Position/Force Control of Manipulators,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 103, no. 2, pp. 126–133, 06 1981. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.3139652>
- [97] J. Nevince and D. Whitney, “The force vector assembly concept,” in *Proc. 1st CISM-IFTToMM ROMANSY*, 1973.
- [98] J. Luh, W. Fisher, and R. Paul, “Joint torque control by a direct feedback for industrial robots,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 28, no. 2, pp. 153–161, 1983.
- [99] G. Hirzinger, N. Sporer, A. Albu-Schaffer, M. Hahnle, R. Krenn, A. Pascucci, and M. Schedl, “Dlr’s torque-controlled light weight robot iii—are we reaching the technological limits now?” in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 1710–1716.
- [100] M. Reibert, “Hybrid position/force control of manipulators,” *ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 103, pp. 2–12, 1981.
- [101] J. K. Salisbury, “Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates,” in *1980 19th IEEE conference on decision and control including the symposium on adaptive processes*. IEEE, 1980, pp. 95–100.
- [102] J. K. Salisbury and B. Roth, “Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands,” *Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design*, vol. 105, pp. 35–41, 1983. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:111164750>
- [103] A. Q. Keemink, H. van der Kooij, and A. H. Stienen, “Admittance control for physical human–robot interaction,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 37, no. 11, pp. 1421–1444, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0278364918768950>
- [104] L. Han, L. Zhao, Y. Huang, and W. Xu, “Variable admittance control for safe physical human–robot interaction considering intuitive human intention,” *Mechatronics*, vol. 97, p. 103098, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741582300154X>
- [105] E. Mariotti, E. Magrini, and A. D. Luca, “Admittance control for human-robot interaction using an industrial robot equipped with a f/t sensor,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 6130–6136.
- [106] A. Weiss, A.-K. Wortmeier, and B. Kubicek, “Cobots in industry 4.0: A roadmap for future practice studies on human–robot collaboration,” *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 51, no. 4, pp. 335–345, 2021.
- [107] A. Umbrico, A. Orlandini, A. Cesta, M. Faroni, M. Beschi, N. Pedrocchi, A. Scala, P. Tavormina, S. Koukas, A. Zalonis *et al.*, “Design of advanced human–robot collaborative cells for personalized human–robot collaborations,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, p. 6839, 2022.

- [108] G. Michalos, S. Makris, P. Tsarouchi, T. Guasch, D. Kontovrakis, and G. Chryssolouris, “Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces,” *Procedia CIRP*, vol. 37, pp. 248–253, 2015, cIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115008550>
- [109] A. Cherubini, R. Passama, A. Crosnier, A. Lasnier, and P. Fraisse, “Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 40, pp. 1–13, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584515301769>
- [110] A. Bilberg and A. A. Malik, “Digital twin driven human-robot collaborative assembly,” *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 499–502, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785061930037X>
- [111] U. Othman and E. Yang, “Human-robot collaborations in smart manufacturing environments: review and outlook,” *Sensors*, vol. 23, no. 12, p. 5663, 2023.
- [112] A. M. Abdelfetah Hentout, Mustapha Aouache and I. Akli, “Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008–2017,” *Advanced Robotics*, vol. 33, no. 15-16, pp. 764–799, 2019.
- [113] A. M. Zanchettin, N. M. Ceriani, P. Rocco, H. Ding, and B. Matthias, “Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: Metrics and control,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 882–893, 2016.
- [114] G. Chiriatti, G. Palmieri, and M. C. Palpacelli, “Collaborative robotics for rehabilitation: A multibody model for kinematic and dynamic analysis,” in *Advances in Italian Mechanism Science*, V. Niola and A. Gasparetto, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 431–438.
- [115] M. J. Johnson, R. C. Loureiro, and W. S. Harwin, “Collaborative tele-rehabilitation and robot-mediated therapy for stroke rehabilitation at home or clinic,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 1, no. 2, pp. 109–121, 2008.
- [116] Z. Bi, C. Luo, Z. Miao, B. Zhang, W. Zhang, and L. Wang, “Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 67, p. 102022, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584520302337>
- [117] G. Chiriatti, G. Palmieri, and M. C. Palpacelli, “A framework for the study of human-robot collaboration in rehabilitation practices,” in *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region*. Springer, 2020, pp. 190–198.
- [118] D. D’Auria and F. Persia, “A collaborative robotic cyber physical system for surgery applications,” in *2017 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI)*, 2017, pp. 79–83.
- [119] Y. Kuroki, T. Fukushima, K. Nagasaka, T. Moridaira, T. Doi, and J. Yamaguchi, “A small biped entertainment robot exploring human-robot interactive applications,” in *The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003.*, 2003, pp. 303–308.

- [120] C. Breazeal, “Regulation and entrainment in human–robot interaction,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 10-11, pp. 883–902, 2002.
- [121] M. E. Foster, R. Alami, O. Gestranus, O. Lemon, M. Niemelä, J.-M. Odobez, and A. K. Pandey, “The mummer project: Engaging human-robot interaction in real-world public spaces,” in *Social Robotics*, A. Agah, J.-J. Cabibihan, A. M. Howard, M. A. Salichs, and H. He, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 753–763.
- [122] O. Khatib, “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,” *The international journal of robotics research*, vol. 5, no. 1, pp. 90–98, 1986.
- [123] J. Fryman and B. Matthias, “Safety of industrial robots: From conventional to collaborative applications,” in *ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics*. VDE, 2012, pp. 1–5.
- [124] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, “Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing,” in *Robotics: Science and systems*, vol. 3. Citeseer, 2007, pp. 217–224.
- [125] A. Vick, D. Surdilovic, and J. Krüger, “Safe physical human-robot interaction with industrial dual-arm robots,” in *9th International Workshop on Robot Motion and Control*. IEEE, 2013, pp. 264–269.
- [126] N. Lauzier, M. Grenier, and C. Gosselin, “2 dof cartesian force limiting device for safe physical human-robot interaction,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2009, pp. 253–258.
- [127] P. Aivaliotis, S. Aivaliotis, C. Gkournelos, K. Kokkalis, G. Michalos, and S. Makris, “Power and force limiting on industrial robots for human-robot collaboration,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 59, pp. 346–360, 2019.
- [128] I. 15066:2016, “Robots and robotic devices — collaborative robots,” https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iso:proj:62996, 2016, accessed: 26.04.2024.
- [129] F. Vicentini, “Terminology in safety of collaborative robotics,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 63, p. 101921, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584519300614>
- [130] I. 10218-1:2011, “Robots and robotic devices — safety requirements for industrial robots — part 1: Robots,” https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iso:proj:51330, 2011, accessed: 26.04.2024.
- [131] W. He, Z. Li, and C. P. Chen, “A survey of human-centered intelligent robots: issues and challenges,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 4, pp. 602–609, 2017.
- [132] K. A. Demir, G. Döven, and B. Sezen, “Industry 5.0 and human-robot co-working,” *Procedia computer science*, vol. 158, pp. 688–695, 2019.
- [133] E. Commission, “Industry 5.0,” https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en, accessed: 28.04.2024.

- [134] A. Ajoudani, A. M. Zanchettin, S. Ivaldi, A. Albu-Schäffer, K. Kosuge, and O. Khatib, “Progress and prospects of the human–robot collaboration,” *Autonomous Robots*, vol. 42, pp. 957–975, 2018.
- [135] A. Hentout, M. Aouache, A. Maoudj, and I. Akli, “Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008–2017,” *Advanced Robotics*, vol. 33, no. 15-16, pp. 764–799, 2019.
- [136] S. Papanastasiou, N. Kousi, P. Karagiannis, C. Gkournelos, A. Papavasileiou, K. Dimoulas, K. Baris, S. Koukas, G. Michalos, and S. Makris, “Towards seamless human robot collaboration: integrating multimodal interaction,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 3881–3897, 2019.
- [137] F. Dehais and H. Ayaz, “Progress and direction in neuroergonomics,” in *Neuroergonomics*. Elsevier, 2019, pp. 3–7.
- [138] R. Parasuraman, “Neuroergonomics: Brain, cognition, and performance at work,” *Current directions in psychological science*, vol. 20, no. 3, pp. 181–186, 2011.
- [139] A. Gevins and M. E. Smith, “Electroencephalography (eeg) in neuroergonomics.” 2006.
- [140] F. Dehais, A. Lafont, R. Roy, and S. Fairclough, “A neuroergonomics approach to mental workload, engagement and human performance,” *Frontiers in neuroscience*, vol. 14, p. 268, 2020.
- [141] P. Mijović, V. Ković, M. De Vos, I. Mačuzić, P. Todorović, B. Jeremić, and I. Gligorić, “Towards continuous and real-time attention monitoring at work: reaction time versus brain response,” *Ergonomics*, vol. 60, no. 2, pp. 241–254, 2017.
- [142] G. Di Flumeri, G. Borghini, P. Aricò, N. Sciaraffa, P. Lanzi, S. Pozzi, V. Vignali, C. Lantieri, A. Bichicchi, A. Simone *et al.*, “Eeg-based mental workload neurometric to evaluate the impact of different traffic and road conditions in real driving settings,” *Frontiers in human neuroscience*, vol. 12, p. 509, 2018.
- [143] M. Alimardani and K. Hiraki, “Passive brain-computer interfaces for enhanced human-robot interaction,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7, p. 125, 2020.
- [144] D. Giglio, M. Paolucci, A. Roshani, and F. Tonelli, “Multi-manned assembly line balancing problem with skilled workers: a new mathematical formulation,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 1211–1216, 2017.
- [145] E. Coronado, T. Kiyokawa, G. A. G. Ricardez, I. G. Ramirez-Alpizar, G. Venture, and N. Yamanobe, “Evaluating quality in human-robot interaction: A systematic search and classification of performance and human-centered factors, measures and metrics towards an industry 5.0,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 63, pp. 392–410, 2022.
- [146] Å. Fasth-Berglund and J. Stahre, “Cognitive automation strategy for reconfigurable and sustainable assembly systems,” *Assembly automation*, 2013.
- [147] P. Tsarouchi, A.-S. Matthaiakis, S. Makris, and G. Chryssolouris, “On a human-robot collaboration in an assembly cell,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 6, pp. 580–589, 2017.

- [148] M. Faccio, R. Minto, G. Rosati, and M. Bottin, “The influence of the product characteristics on human-robot collaboration: a model for the performance of collaborative robotic assembly,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, pp. 2317–2331, 2020.
- [149] A. Toichoa Eyam, W. M. Mohammed, and J. L. Martinez Lastra, “Emotion-driven analysis and control of human-robot interactions in collaborative applications,” *Sensors*, vol. 21, no. 14, p. 4626, 2021.
- [150] M. Savković, C. Caiazzo, M. Djapan, A. M. Vukićević, M. Pušica, and I. Mačužić, “Development of modular and adaptive laboratory set-up for neuroergonomic and human-robot interaction research,” *Front. Neurorobotics*, 2022.
- [151] J. Krüger, T. Lien, and A. Verl, “Cooperation of human and machines in assembly lines,” *CIRP Annals*, vol. 58, no. 2, pp. 628–646, 2009. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609001760>
- [152] F. Cirillo, G. Solmaz, E. L. Berz, M. Bauer, B. Cheng, and E. Kovacs, “A standard-based open source iot platform: Fiware,” *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 12–18, 2019.
- [153] C. G. Petersen, C. Siu, and D. R. Heiser, “Improving order picking performance utilizing slotting and golden zone storage,” *International Journal of Operations & Production Management*, 2005.
- [154] L. Dammacco, R. Carli, M. Gattullo, V. Lazazzera, M. Fiorentino, and M. Dotoli, “Virtual golden zone for enhancing the ergonomics of complex production lines,” in *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing IV*, S. Gerbino, A. Lanzotti, M. Martorelli, R. Mirálbes Buil, C. Rizzi, and L. Roucoules, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 1436–1447.
- [155] R. Fernandez Rojas, E. Debie, J. Fidock, M. Barlow, K. Kasmarik, S. Anavatti, M. Garratt, and H. Abbass, “Electroencephalographic workload indicators during teleoperation of an unmanned aerial vehicle shepherding a swarm of unmanned ground vehicles in contested environments,” *Frontiers in neuroscience*, vol. 14, p. 40, 2020.
- [156] S. Rautiainen, M. Pantano, K. Traganos, S. Ahmadi, J. Saenz, W. M. Mohammed, and J. L. Martinez Lastra, “Multimodal interface for humanrobot collaboration,” *Machines*, vol. 10, no. 10, p. 957, 2022.
- [157] J. Rodić, D. Golubović, N. Knežević, and K. Jovanović, “Natural non-invasive human-machine interface based on hand gesture recognition,” in *Proceedings, IX International Conference IcETAN, Novi Pazar, 2022*.
- [158] A. M. Zanchettin, N. M. Ceriani, P. Rocco, H. Ding, and B. Matthias, “Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: Metrics and control,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 882–893, 2016.
- [159] S. G. Hart, “Nasa task load index (tlx),” 1986.
- [160] D. van Son, W. van der Does, G. P. Band, and P. Putman, “Eeg theta/beta ratio neurofeedback training in healthy females,” *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, vol. 45, pp. 195–210, 2020.

- [161] D. van Son, F. M. De Blasio, J. S. Fogarty, A. Angelidis, R. J. Barry, and P. Putman, “Frontal eeg theta/beta ratio during mind wandering episodes,” *Biological psychology*, vol. 140, pp. 19–27, 2019.
- [162] G. Du and P. Zhang, “Markerless human–robot interface for dual robot manipulators using kinect sensor,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 2, pp. 150–159, 2014.
- [163] G. Du, M. Chen, C. Liu, B. Zhang, and P. Zhang, “Online robot teaching with natural human–robot interaction,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 12, pp. 9571–9581, 2018.
- [164] G. Grioli, S. Wolf, M. Garabini, M. Catalano, E. Burdet, D. Caldwell, R. Carloni, W. Friedl, M. Grebenstein, M. Laffranchi, D. Lefeber, S. Stramigioli, N. Tsagarakis, M. van Damme, B. Vanderborght, A. Albu-Schaeffer, and A. Bicchi, “Variable stiffness actuators: The user’s point of view,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 34, no. 6, pp. 727–743, 2015.
- [165] M. Ang and G. Andeen, “Specifyng and achieving passive compliance based on manipulator structure,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 4, pp. 504–515, 1995.
- [166] J. J. Rice and J. M. Schimmels, “Passive compliance control of redundant serial manipulators,” *J. of Mechanisms and Robotics*, vol. 10, no. 4, 2018.
- [167] N. Lukic and P. B. Petrovic, “Complementary projector for null-space stiffness control or redundant assembly robot arm,” *Assembly Automation*, vol. 39, no. 4, pp. 696–714, 2019.
- [168] N. Hogan, “Impedance control of industrial robots,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 1, no. 1, pp. 97–113, 1984.
- [169] H. Neville, “Impedance control: An approach to manipulation: Part iii—applications,” *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, no. 1, pp. 17–24, 03 1985.
- [170] F. J. Abu-Dakka and M. Saveriano, “Variable impedance control and learning—a review,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7, 2020.
- [171] R. Martín-Martín, M. Lee, R. Gardner, S. Savarese, J. Bohg, and A. Garg, “Variable impedance control in end-effector space. an action space for reinforcement learning in contact rich tasks,” 2019, proceedings of the Int. Conf. of Intelligent Robots and Systems (IROS).
- [172] B.-H. Yang and H. Asada, “Progressive learning and its application to robot impedance learning,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 7, no. 4, pp. 941–952, 1996.
- [173] T. Yamawaki, H. Ishikawa, and M. Yashima, “Iterative learning of variable impedance control for human-robot cooperation,” pp. 839–844, 2016, 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- [174] J. Lachner, F. Allmendinger, S. Stramigioli, and N. Hogan, “Shaping impedances to comply with constrained task dynamics,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, no. 5, pp. 2750–2767, 2022.

- [175] S. Kana, S. Lakshminarayanan, D. M. Mohan, and D. Campolo, “Impedance controlled human–robot collaborative tooling for edge chamfering and polishing applications,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 72, p. 102199, 2021.
- [176] A. M. Zanchettin, P. Rocco, A. Robertsson, and R. Johansson, “Exploiting task redundancy in industrial manipulators during drilling operations,” pp. 128–133, 2011, 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.
- [177] O. Khatib, “A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation,” *IEEE J. on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 1, pp. 43–53, 1987.
- [178] Y. Nakamura, H. Hanafusa, and T. Yoshikawa, “Task-priority based redundancy control of robot manipulators,” *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 6, no. 2, pp. 3–15, 1987.
- [179] B. Siciliano and J.-J. Slotine, “A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems,” pp. 1211–1216, 1991, fifth Int. Conf. on Advanced Robotics ‘Robots in Unstructured Environments.
- [180] L. Žlajpah and T. Petrič, “Unified virtual guides framework for path tracking tasks,” *Robotica*, vol. 38, no. 10, p. 1807–1823, 2020.
- [181] D. Kraft, *A software package for sequential quadratic programming*, ser. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt Köln: Forschungsbericht. Wiss. Berichtswesen d. DFVLR, 1988.
- [182] P. T. Boggs and J. W. Tolle, “Sequential quadratic programming for large-scale nonlinear optimization,” *J. of Computational and Applied Mathematics*, vol. 124, no. 1, pp. 123–137, 2000.
- [183] C. Gaz, M. Cognetti, A. Oliva, P. Robuffo Giordano, and A. De Luca, “Dynamic identification of the franka emika panda robot with retrieval of feasible parameters using penalty-based optimization,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 4147–4154, 2019.
- [184] E. Todorov, T. Erez, and Y. Tassa, “Mujoco: A physics engine for model-based control,” pp. 5026–5033, 2012, 2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.
- [185] Y. Kato, P. Balatti, J. M. Gandarias, M. Leonori, T. Tsuji, and A. Ajoudani, “A self-tuning impedance-based interaction planner for robotic haptic exploration,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9461–9468, 2022.
- [186] L. Peternel, T. Petrič, and J. Babič, “Robotic assembly solution by human-in-the-loop teaching method based on real-time stiffness modulation,” *Autonomous Robots*, vol. 42, pp. 1–17, 2018.
- [187] M. J. Pollayil, F. Angelini, G. Xin, M. Mistry, S. Vijayakumar, A. Bicchi, and M. Garabini, “Choosing stiffness and damping for optimal impedance planning,” *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1–20, 2022.
- [188] L. C. Visser, S. Stramigioli, and A. Bicchi, “Embodying desired behavior in variable stiffness actuators,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 9733 – 9738, 2011, 18th IFAC World Congress. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701645175X>

- [189] S. Logozzo, M. Malvezzi, G. Achilli, and M. Valigi, “Characterization of finger joints with underactuated modular structure,” *Materials Research Proceedings*, vol. 26.
- [190] G. A. Pratt and M. M. Williamson, “Series elastic actuators,” in *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, vol. 1, Aug 1995, pp. 399–406 vol.1.
- [191] A. G. L. Junior, R. M. de Andrade, and A. B. Filho, *Series Elastic Actuator: Design, Analysis and Comparison*. Rijeka: IntechOpen, 2016, ch. 10. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/63573>
- [192] F. Petit, M. Chalon, W. Friedl, M. Grebenstein, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, “Bidirectional antagonistic variable stiffness actuation: Analysis, design implementation,” in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2010, pp. 4189–4196.
- [193] S. Ono, K. Masuya, K. Takagi, and K. Tahara, “Trajectory tracking of a one-dof manipulator using multiple fishing line actuators by iterative learning control,” in *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 2018, pp. 467–472.
- [194] F. Angelini, C. D. Santina, M. Garabini, M. Bianchi, G. M. Gasparri, G. Grioli, M. G. Catalano, and A. Bicchi, “Decentralized trajectory tracking control for soft robots interacting with the environment,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 924–935, 2018.
- [195] F. Angelini, R. Mengacci, C. D. Santina, M. G. Catalano, M. Garabini, A. Bicchi, and G. Grioli, “Time generalization of trajectories learned on articulated soft robots,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 3493–3500, 2020.
- [196] C. Della Santina, M. Bianchi, G. Grioli, F. Angelini, M. Catalano, M. Garabini, and A. Bicchi, “Controlling soft robots: Balancing feedback and feedforward elements,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 75–83, 2017.
- [197] Sunghoi Huh, G. Tonietti, and A. Bicchi, “Neural network based robust adaptive control for a variable stiffness actuator,” in *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2008, pp. 1028–1034.
- [198] Z. Guo, Y. Pan, T. Sun, Y. Zhang, and X. Xiao, “Adaptive Neural Network Control of Serial Variable Stiffness Actuators,” *Complexity*, vol. 2017, pp. 1–9, November 2017. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/a/hin/complex/5361246.html>
- [199] S. Cremer, S. K. Das, I. B. Wijayasinghe, D. O. Popa, and F. L. Lewis, “Model-free online neuroadaptive controller with intent estimation for physical human–robot interaction,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 1, pp. 240–253, 2020.
- [200] J. Buchli, F. Stulp, E. Theodorou, and S. Schaal, “Learning variable impedance control,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 7, pp. 820–833, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0278364911402527>
- [201] T. G. Thuruthel, E. Falotico, F. Renda, and C. Laschi, “Model-based reinforcement learning for closed-loop dynamic control of soft robotic manipulators,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 35, no. 1, pp. 124–134, 2019.
- [202] S. Schaal, C. G. Atkeson, and S. Vijayakumar, “Scalable techniques from nonparametric statistics for real time robot learning,” *Applied Intelligence*, vol. 17, pp. 49–60, 2002.

- [203] M. G. Catalano, G. Grioli, M. Garabini, F. Bonomo, M. Mancini, N. Tsagarakis, and A. Bicchi, “Vsa-cubebot: A modular variable stiffness platform for multiple degrees of freedom robots,” in *2011 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2011, pp. 5090–5095.
- [204] B. Z. Lukić, K. M. Jovanović, and G. S. Kvaščev, “Feedforward neural network for controlling qbmove maker pro variable stiffness actuator,” in *2016 13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, 2016, pp. 1–4.
- [205] B. Deutschmann, T. Liu, A. Dietrich, C. Ott, and D. Lee, “A method to identify the nonlinear stiffness characteristics of an elastic continuum mechanism,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 1450–1457, 2018.

Биографија аутора

Никола Кнежевић је рођен 11.01.1993. године у Краљеву. Завршио је Гимназију у Краљеву, специјализовано математички смер, са одличним успехом. Електротехнички факултет је уписао 2012. године где је дипломирао 2016. на Одсеку сигнали и системи са просечном оценом 8,93. Основне студије је завршио одбранивши дипломски рад под насловом „Надзор и управљање флексибилне роботске ћелије са два индустријска робота“. Мастер студије уписао 2016. године, а завршио 2018. године, са просечном оценом 9,67, уз завршни мастер рад под насловом „Аутономно репрограмирање робота демонстрирано на процесу палетизације“. Докторске студије на Електротехничком факултету је уписао 2018. године, где је положио све испите са просечном оценом 10. Ужа област научног истраживања му је роботика. Ангажован је као сарадник у настави на Одсеку сигнали и системи први пут у децембру 2016. године, а следеће године поново изабран у исто звање. У звање асистента је изабран у фебруару 2019. године. Фокус рада Николе Кнежевића на докторским студијама су колаборативни роботи, посебно истраживање у области управљања роботским системима са попустљивим зглобовима и изучавање техника машинског учења које се могу применити на роботске системе који се користе за интеракцију човека и робота, био-инспирираних робота и попустљивих актуатора.

Коаутор је наставног материјала за предмет Роботика и аутоматизација – Роботика: збирка решених задатака, у којој су приказани и решени задаци који прате поменути курс.

Такође као учесник на Erasmus+ пројекту „Иновативни приступ учењу у развоју софтверски пројектоване инструментације и њена примена у системима који раде у реалном времену“, радио је на припреми наставног материјала из области мобилне роботике. Учествује у организацији студентског такмичења ABB RoboChallenge, које се одржава последњих шест година у сарадњи са компанијом ABB Србија.

Никола Кнежевић је аутор 4 рада у часописима са SCI листе (M22), 2 рада у часописима ван SCI листе, 9 радова са међународних конференција (M33), 5 радова са домаћих конференција (M63) и 2 уџбеника.

Аутор је награђеног рада на конференцији IcETRAN 2019 као најбољи рад у сесији за роботiku и флексибилну аутоматизацију под називом „End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadrating Programing Approach“.

Никола Кнежевић је ангажован на неколико научних и међународних пројеката у области роботике на којима спроводи наведена истраживања у области роботике.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Никола Кнежевић

Број индекса 2018/5028

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 29.04.2024.

Н. Кнежевић

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Никола Кнежевић

Број индекса 2018/5028

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације

Ментор Коста Јовановић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 29.04.2024.

Н. Кнежевић

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 29.04.2024.

Н. Кнежевић

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.