

Robusna lokalizacija retro-reflektivnih markera pomoću stereo-vizijskog sustava

Petrinjak, Silvio

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:405242>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Silvio Petrinjak

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Marko Švaco

Doc. dr. sc. Filip Šuligoj

Student:

Silvio Petrinjak

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima doc. dr. sc. Marku Švaci i doc. dr. sc. Filipu Šuligoju na strpljenju i pomoći pri izradi završnog rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji na beskrajnoj podršci tijekom studiranja.

Silvio Petrinjak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Silvio Petrinjak** JMBAG: **0195036112**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Robusna lokalizacija retro-reflektivnih markera pomoću stereo-vizijskog sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Robust localization of retro-reflective markers using a stereo-vision system**

Opis zadatka:

Kako bi se postigla robusna i precizna lokalizacija sfernih markera u fizičkom prostoru, može se koristiti stereo-vizijski sustav u kombinaciji s nizom posebno razvijenih algoritama strojnog vida (postojeće rješenje u Laboratoriju za medicinsku robotiku). Specijalno razvijeni vizijski sustav koristi retro-reflektirajuće sfere koje kada su osvijetljene emitiraju svjetlo natrag na kamere dok pozadina ostaje tamna što omogućava preciznu lokalizaciju. U sklopu završnog zadatka potrebno je:

- Preuzeti postojeće softversko rješenje (C++ i OpenCV knjižnica računalnog vida) te razviti korisničko sučelje koje omogućava brzu izmjenu parametara prilikom testiranja sustava,
- implementirati i testirati alternativne algoritme za procesuiranje slike, uklanjanje šuma i segmentaciju,
- mjeriti brzinu procesuirana, te evaluirati i diskutirati primjenjivost različitih rješenja,
- provesti intrinzičnu kalibraciju kamera i testirati utjecaj na robusnost lokalizacije (oblika) kao i uklanjanje lažno pozitivnih rezultata.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datum obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Marko Švaco

Dr. sc. Filip Šuligoj

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKA PODLOGA.....	3
2.1. Stereo-vizijski sustavi	4
2.2. Algoritmi za obradu slike.....	5
2.3. Kalibracija kamere	7
3. METODOLOGIJA	10
3.1. Laboratorijski postav.....	11
3.2. Postupak testiranja	13
3.3. Razvijeni algoritam	14
4. REZULTATI I DISKUSIJA.....	21
4.1. Validacija rezultata	26
4.2. Brzina izvođenja programa	28
4.3. Budući rad.....	28
5. ZAKLJUČAK.....	30
LITERATURA.....	31

POPIS SLIKA

Slika 1.	Fiducijalni markeri na glavi pacijenta [1]	3
Slika 2.	Epipolarna geometrija [2].....	4
Slika 3.	Vrste šuma na slici [4].....	5
Slika 4.	Veličina kernela kod Gaussovog filtera [5].....	6
Slika 5.	Morfološko otvaranje [6].....	6
Slika 6.	Intrinzični i ekstrinzični parametri [8].....	8
Slika 7.	Primjeri radijalne distorzije [9]	9
Slika 8.	Prikaz tangencijalne distorzije [7]	9
Slika 9.	Prikaz postava za testiranje razvijenog programa	10
Slika 10.	Starija generacija robota RONNA [11]	11
Slika 11.	Snimanje pacijentice s ugrađenim vijcima, bez šišanja kose [13]	12
Slika 12.	Plastična replika ljudske lubanje korištena kao fantom	12
Slika 13.	Ispitani položaji kamere u odnosu na traženi marker	13
Slika 14.	Dijagram toka algoritma za detekciju markera	14
Slika 15.	Usporedba neispravljene i ispravljene distorzije kamere	15
Slika 16.	Korisničko sučelje korišteno pri testiranju spremljenih slika	16
Slika 17.	Dijagram toka algoritma za kalibraciju kamere	19
Slika 18.	Iscrtavanje kalibracijskih točaka na uzorku.	19
Slika 19.	"Mustache" distorzija [14].....	20
Slika 20.	Uspješna lokalizacija pomoću optimalnih parametara na fantomu bez kose	22
Slika 21.	Uspješna lokalizacija pomoću optimalnih parametara na fantomu s kosom.....	23
Slika 22.	Usporedba 1, originalnog (lijevo) i unaprijeđenog (desno) algoritma u laboratorijskom okruženju.....	24
Slika 23.	Usporedba 2, originalnog (lijevo) i unaprijeđenog (desno) algoritma u simulacijskom okruženju.....	25
Slika 24.	Usporedba 3, originalnog (lijevo) i unaprijeđenog (desno) algoritma u laboratorijskom okruženju.....	25
Slika 25.	Problematičan rub na spoju polovica sfere.....	27

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba algoritama prema preciznosti i odzivu 27

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
f_x, f_y	px	Komponente žarišne duljine
c_x, c_y	px	Komponente optičkog središta
F	mm	Žarišna duljina
x_{dist}, y_{dist}	px	Iskrivljena točka
x, y	px	Točka ispravljene distorzije
w, h	px	Širina i visina pravokutnika
k_1, k_2, k_3		Koeficijenti radijalne distorzije
p_1, p_2		Koeficijenti tangencijalne distorzije
tp		Pravi pozitivni rezultat
fp		Lažni pozitivni rezultat
fn		Lažni negativni rezultat

SAŽETAK

Medicinska robotika revolucionirala je medicinsku praksu, pružajući preciznost i stabilnost u kirurškim zahvatima te smanjujući rizik od ljudskih pogrešaka. Buduće tehnološke inovacije te grane zahtijevaju sve veće iskorake u smjeru točnosti i pouzdanosti svakog dijela procedure kako bi se minimizirale nepravilnosti i pacijentima pružila najbolja moguća usluga. U sklopu ovog rada temeljito je testiran i optimiziran algoritam za robusnu lokalizaciju retro-reflektivnih markera pomoću stereo-vizijskog sustava korištenog tijekom pripreme za robotsku neuronavigaciju. Marker se koristi za predoperativnu registraciju pacijenta u fizičkom prostoru.

Kako bi se pokrili svi traženi scenariji, složen je laboratorijski postav u Laboratoriju za medicinsku robotiku Regionalnog centra izvrsnosti za robotske tehnologije gdje je kamera odvojena od robota te postavljena pred plastični fantom koji služi kao replika ljudske glave, antropomorfno izgleda i slične refleksije svjetlosti kao ljudska koža. Aplikacija je sistematično testirana snimanjem svih pozicija u kojima se može zateći iz udaljenosti prema kuglicama na kojoj se i do sada koristila.

Kalibracijom korištenih kamera postignuta je provjerena ispravnost prikazane slike na temelju koje se napredniji algoritam prilagodljive segmentacije traženih struktura na slici pokazao kao konkretan iskorak prema efikasnijem pronalasku pozicija traženih markera. Aplikacija je razvijena programskim jezikom C++ uz pomoć OpenCV knjižnice računalnog vida.

Ključne riječi: medicinska robotika, računalni vid, C++, OpenCV, RONNA

SUMMARY

Medical robotics have revolutionized medical practice, providing precision and stability in surgical procedures and reducing the risk of human error. Future technological innovations of this branch require ever-greater strides in the direction of accuracy and reliability of every part of the procedure in order to minimize irregularities and provide the best possible service to patients. As part of this work, an algorithm for robust localization of retro-reflective markers using a stereo-vision system used during the preparation for robotic neuronavigation was thoroughly tested and optimized. Markers are used for preoperative registration of the patient in physical space.

In order to cover all required scenarios, a laboratory setup was set up in the Medical Robotics Laboratory of the Regional Center of Excellence for Robotic Technologies, where the camera is separated from the robot and placed in front of a plastic phantom that serves as a replica of a human head, with an anthropomorphic appearance and similar light reflection to human skin. The application underwent systematic testing, examining its functionality across all possible positions in relation to the spheres, consistent with previous usage.

By calibrating the used camera, the correctness of the displayed image was verified, based on which the more advanced algorithm of adaptive segmentation of the required structures in the image proved to be an obvious step towards more efficient localization of the positions of required markers. The application was developed in the C++ programming language with the help of the OpenCV computer vision library.

Key words: medical robotics, computer vision, C++, OpenCV, RONNA

1. UVOD

Uvođenje visokih tehnologija u medicinu danas postaje ključan faktor kvalitetne dijagnostike i unaprjeđenja tretiranja raznih medicinskih stanja. Jedna od glavnih novih tehnologija korištenih u medicini je automatizacija procesa pri kirurškim zahvatima pomoću robota i ostalih visokotehnoloških uređaja. Takvi sustavi su sve češće prisutni u modernim bolnicama, omogućujući kirurzima precizniju kontrolu i veću točnost tijekom operacija. Robotima potpomognuti kirurški instrumenti omogućuju minimalno invazivne zahvate s manjim oštećenjem okolnih tkiva, bržim oporavkom pacijenata i manjim rizikom od komplikacija. Robotika u medicini predstavlja obećavajuće područje koje će nastaviti napredovati i dalje usavršavati cjelokupan način brige o pacijentima.

Područje unutar medicine na koje su tehnološki napreci ostavili dubok utjecaj zasigurno je stereotaktička neurokirurgija, koja se koristi za precizno usmjeravanje kirurških zahvata na mozgu i drugim vitalnim strukturama unutar lubanje. Razvoj rješenja koja omogućuju preciznu i točnu manipulaciju unutar tijela pacijenta, minimizirajući rizik i poboljšavajući ishode kirurških zahvata, tema je brojnih znanstvenih radova i jedna od glavnih problematika medicinske robotike. Ovaj rad istražuje izazove razvoja robusnog algoritma za lokalizaciju retro-reflektivnih markera korištenih za registraciju pacijenta prilikom neurokirurškog zahvata.

Stereotaktička neurokirurgija specijalizirana je grana kirurgije kojom se preciznom navigacijom vrši ciljano liječenje unutar mozga ili drugih dijelova živčanog sustava. Tehnika se koristi za dijagnosticiranje, liječenje i istraživanje različitih neuroloških stanja, poput tumora, epilepsije, tremora i drugih poremećaja. Stereotaksija se postiže korištenjem posebnih uređaja kojima se može precizno odrediti položaj ciljanog područja u mozgu u odnosu na vanjske referentne točke. Te se referentne točke obično označavaju na površini glave pacijenta i koriste se za stvaranje koordinatnog sustava. Razvijena metoda čijim se daljnjim poboljšanjem bavim u ovom radu koristi stereotaktičku navigaciju bez uobičajenog okvira, pomoću reflektirajućih sfera za određivanje referentnih točaka i stvaranje koordinatnog sustava. Stereotaktička neurokirurgija predstavlja izvanrednu metodu koja omogućava minimalno invazivno i izuzetno precizno liječenje neuroloških bolesnika, poboljšavajući tako ishode i kvalitetu života pacijenata.

Stereo-vizijski sustavi popularno su rješenje za preciznu lokalizaciju u različitim primjenama, pa tako i medicinskim. Takvi se sustavi koriste dvjema kamerama kojima stvaraju trodimenzionalne slike okoline i objekata u okolini. U kontekstu stereotaktičke neurokirurgije, stereo-vizijski sustav pruža mogućnost brze i pouzdane lokalizacije retro-reflektivnih markera na pacijentu, što značajno poboljšava točnost, a samim time i sigurnost kirurškog zahvata.

Računalni vid područje je koje razvija tehnike u namjeri da omogući računalima i strojevima osjet vida, odnosno razumijevanje okoline pomoću digitalnih slika i videozapisa, na način sličan onome kod ljudi urođen i potpuno uobičajen. U kontekstu ovog rada, računalni vid igra ključnu ulogu u podržavanju metoda kojima vizijskim sustavima stvaramo mogućnosti za, u najmanju ruku, pružanje vrijednih informacija i podrške kirurzima tijekom zahvata, a naposljetku i automatizaciju nekih od procesa kada razina sigurnosti i pouzdanosti tehnologije dosegne taj stadij.

Cilj ovog i daljnjih istraživanja je unaprijediti točnost, brzinu i pouzdanost robotskog sustava za neuronavigaciju kako bi se osiguralo da kirurški timovi u suradnji s robotom mogu donositi informirane odluke tijekom operacije i minimizirati rizik za pacijenta. Proučavat će se različiti algoritmi i kombinacije parametara za poboljšavanje obrade slike dobivene kamerama i izvlačenje podataka potrebnih za daljnje postupke tijekom rada robota, te pokušati savladati slučajeve za koje je poznato da narušavaju učinkovitost razvijenih metoda.

2. TEORIJSKA PODLOGA

Glavni zadatak obrađivan u ovom radu razvoj je algoritma za robusnu lokalizaciju retro-reflektivnih markera korištenih prilikom lokalizacije i registracije pacijenta za potrebe stereotaktičke neurokirurgije bez okvira. Proces lokalizacije definiran je kao dobivanje koordinata glave pacijenta u prostoru slike i fizičkom prostoru. Registracija općenito označava prostorno preslikavanje između dva skupa podataka. Problem krute registracije vrlo je zahtjevan jer predstavlja transformaciju pri kojoj je ključno očuvanje stvarnih udaljenosti između dviju točaka, uključujući translaciju i rotaciju [1]. Referentne točke za takvu transformaciju u neurokirurgiji, fiducijalni markeri, retro-reflektivni su markeri koje pokušavamo pouzdano lokalizirati korištenjem metoda razvijenih u ovom radu. S obzirom da su markeri montirani na vijke za kosti prikazane na [Slika 1], takva se registracija pacijenta smatra krutom registracijom. Dakako, podudaranje pozicija u prostoru i na slici temeljni je zadatak ovakvog sustava uzevši u obzir da svaka transformacija pozicije objekta unosi određene greške koje povećavaju ukupnu pogrešku sustava. Zbog toga je izuzetno bitno u početnoj fazi, pri lokalizaciji samih markera na glavi pacijenta, biti maksimalno točan kako bi se smanjio utjecaj tog koraka na ukupnu izvedbu sustava.



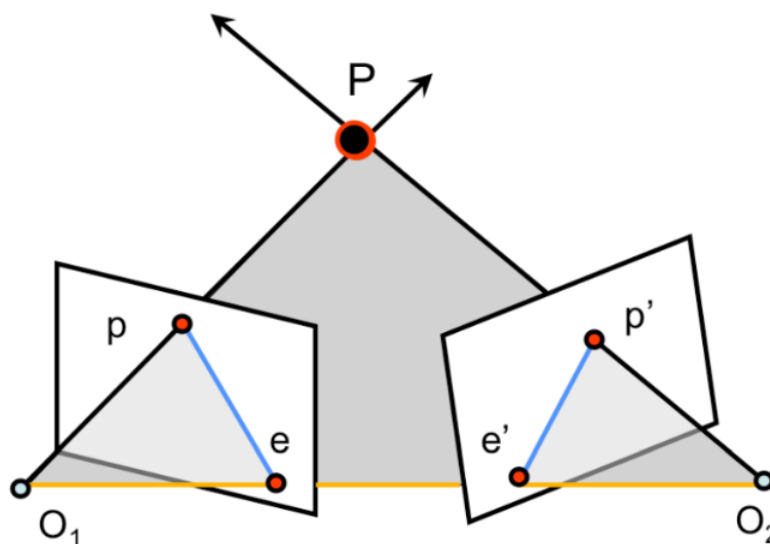
Slika 1. Fiducijalni markeri na glavi pacijenta [1]

2.1. Stereo-vizijski sustavi

Polje stereo-vizije kao ključna grana strojnog vida bavi se rekonstrukcijom trodimenzionalnog prostora iz dvodimenzionalnih slika. Često se koristi u sustavima robotske navigacije kao sredstvo za procjenu prave udaljenosti objekata prema kameri. Omogućuje računalima da dobiju dubinsku informaciju o okolini na temelju razlike u perspektivi između dviju ili više kamera ili između različitih dijelova iste slike.

Korištenju stereo-vizijskog sustava prethodi uklanjanje distorzije zbog leća kamere, o čemu više u poglavlju 2.3, te rektifikacija, tj. određivanje kutova i udaljenosti između kamera, kako bi mogli postići usklađivanje slika i paralelnost njihovih epipolarnih linija. Taj postupak pojednostavljuje problem korespondencije i olakšava pronalaženje odgovarajućih točaka između slika.

Epipolarna geometrija je temeljni koncept u stereo-viziji koji pomaže u razumijevanju odnosa između dviju kamera koje gledaju istu scenu. Osnovni postav epipolarne geometrije prikazan je na [Slika 2]. Svaka točka u trodimenzionalnom prostoru mapira se na epipolarnu liniju na drugoj slici. Epipolarna linija je plava linija koja na drugoj slici koja prolazi kroz epipol, točku u kojoj se optičke osi dviju kamera sijeku. Siva regija je epipolarna ravnina, a narančasta linija označava osnovnu liniju. [2]



Slika 2. Epipolarna geometrija [2]

Idući korak je pronalaženje korespondencije i određivanje razmaka između podudarajućih značajki na slikama. Posljedično možemo dobiti mapu dispariteta kojom označavamo pomak po horizontalnoj osi pri gledanju istih značajki u dvije različite kamere. Posljednji korak je

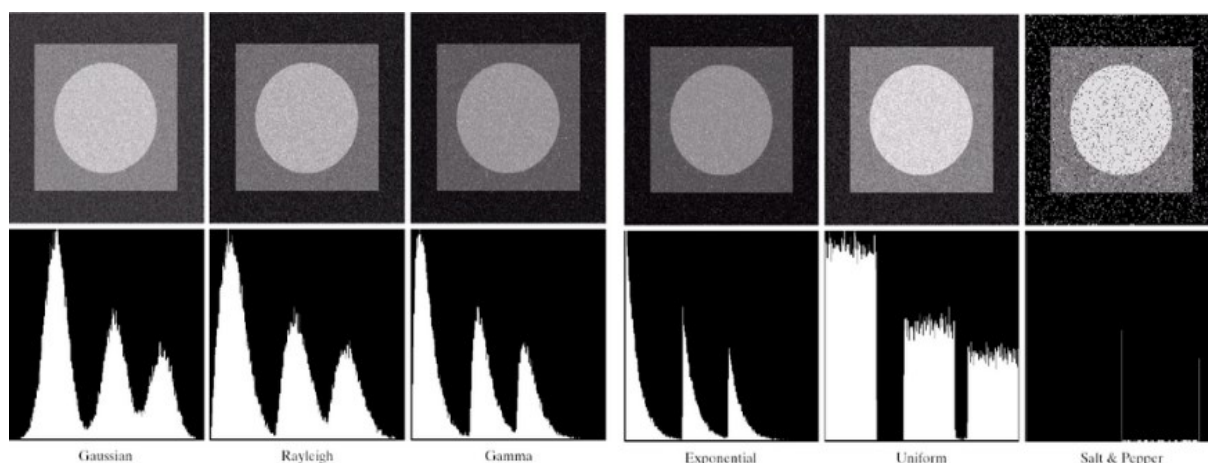
triangulacija i izračunavanje prostornih koordinata relativnih u odnosu na kamere, uzimajući u obzir poznatu geometriju kamere [3].

2.2. Algoritmi za obradu slike

Računalni vid je grana računalne znanosti koja se bavi razvojem tehnika za analizu, obradu i izvlačenje informacija iz digitalnih slika i videozapisa. Ima široku primjenu u brojnim tehničkim područjima, uključujući medicinu i robotiku. OpenCV (Open Source Computer Vision Library) otvorena je knjižnica softverskih alata i ugrađenih algoritama za brojne primjene u računalnom vidu.

U ovom radu korišteni algoritmi služe uklanjanju šuma sa slike, binarizaciji slike, pronalaženju traženih oblika itd. Za sve operacije korišten je programski jezik C++ u kombinaciji s ugrađenim algoritmima spomenute knjižnice računalnog vida OpenCV.

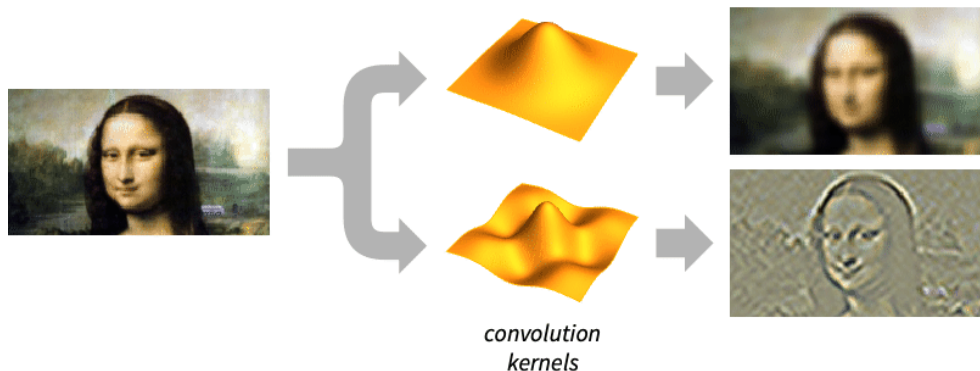
Jedna od smetnji na koje nailazimo prilikom analize slike je šum/buka. Šum na slici predstavlja nepoželjne i nasumične varijacije u vrijednostima piksela koji su uzrokovani različitim faktorima, poput električnog šuma i utjecaja okoliša te svjetlosnog šuma tijekom akvizicije slike, ali i smetnjama u kanalu za vrijeme prijenosa slike [4]. Šum može značajno ometati analizu i obradu slike jer može izobličiti ili zamagliti strukturu objekata na slici te otežati prepoznavanje oblika i detalja. Postoje razne varijante šuma prikazane na [Slika 3], a način na koji uklanjamo šum sa slike u proučavanom zadatku je uporabom Gaussovog filtra.



Slika 3. Vrste šuma na slici [4]

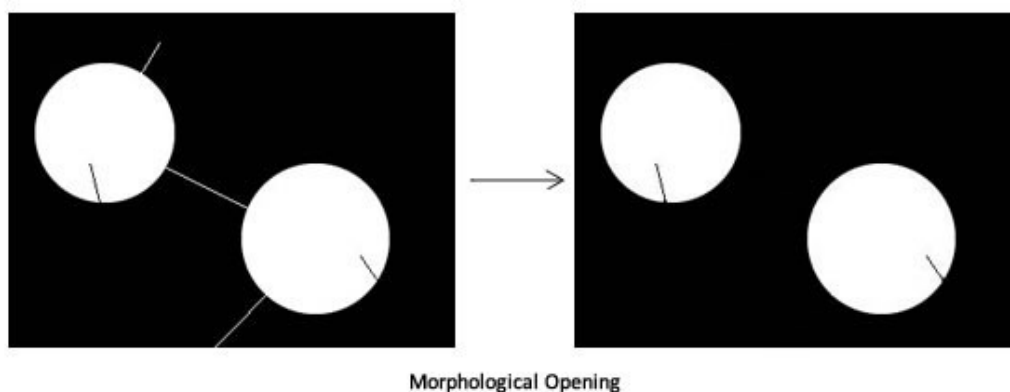
Gaussov filter je vrsta linearnog filtra koji se često koristi za uklanjanje šuma i zaglađivanje slike. Filtrira sliku tako da svaki piksel zamijeni težinskom srednjom vrijednošću njega i njegovih susjeda, gdje su težinski koeficijenti definirani Gausovim rasporedom. Ovaj raspored

ima oblik zvonolike krivulje, gdje pikseli bliži središtu imaju veći utjecaj na rezultirajući piksel od onih udaljenijih [5]. U OpenCV funkciji *GaussianBlur()* pozitivnu neparnu veličinu kernela ili Gaussove jezgre koja će odrediti jačinu zaglađivanja slike. Što je kernel veći, jače će biti zaglađivanje, kako je prikazano na [Slika 4].



Slika 4. Veličina kernela kod Gaussovog filtera [5]

Iduće što koristimo u obradi slike morfološka je operacija otvaranja za uklanjanje ostatka šuma nakon primjene Gaussovog filtera te radi razdvajanja odblijesaka od glave i kose koji se spajaju s traženim retro-reflektivnim markerima i destabiliziraju efikasnost algoritma. Otvaranje se sastoji od dvije operacije, redom kojim su navedeni: erozije i dilatacije. Erozija, sužava i uklanja male objekte iz slike te popunjava male prostore unutar objekata. Nakon toga slijedi dilatacija, koja širi preostale objekte i spaja bliske objekte koji su bili razdvojeni erozijom. Ilustracija je prikazana na [Slika 5]. Veličina kernela koju postavljamo u OpenCV funkciji određuje koliko će se područje oko svakog piksela uzeti u obzir tijekom erozije i dilatacije. Analiza veličine kernela slijedi u 3.3, a oblik koji se pokazao kao najrobusniji je oblik elipse.



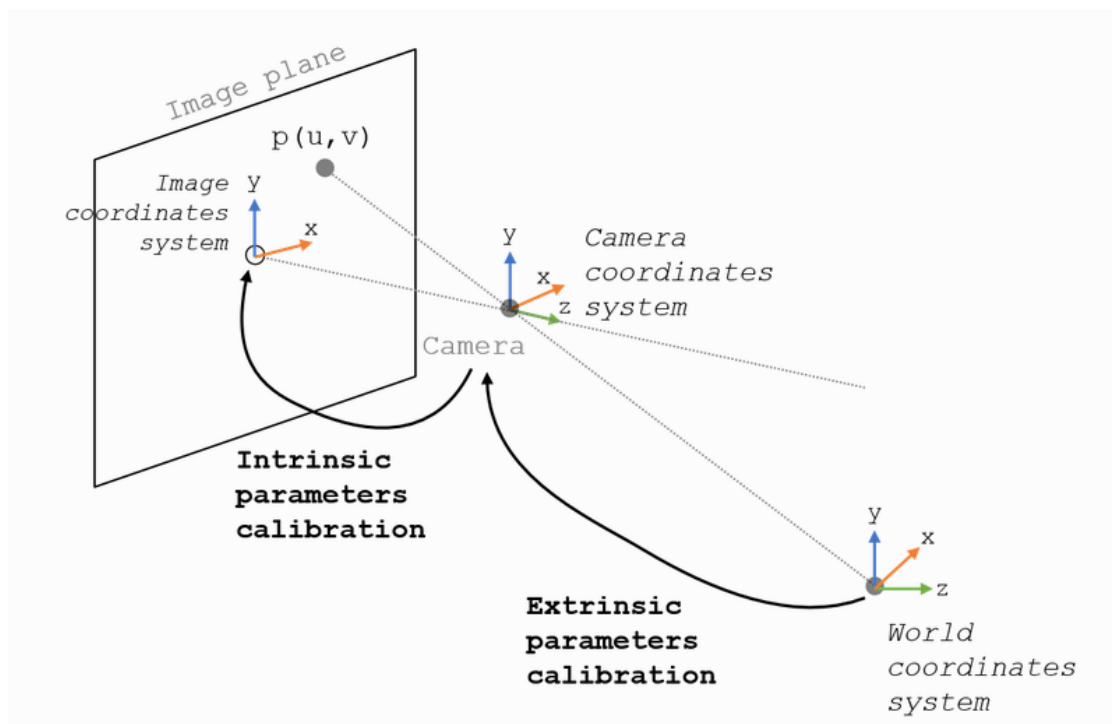
Slika 5. Morfološko otvaranje [6]

Thresholding ili binarizacija slike postavljanjem praga postupak u obradi slika koji se koristi za segmentaciju slike na područja crne i bijele boje na temelju vrijednosti svakog piksela i odabranog praga. Dva pristupa takvog binariziranja korištena u ovom radu su binarni (jednostavni) *threshold* i adaptivni (prilagodljivi) *threshold*. Treći poznati pristup, Otsu-ov, izbačen je nedugo nakon početka testiranja jer se pokazao neefikasan u danom scenariju. Kod binarnog načina, postavlja se globalni prag za cijelu sliku. Svaki piksel na slici uspoređuje se s tim pragom, a rezultat može biti jedna od dvije vrijednosti: crna (0) ili bijela (1). Na taj način se slika segmentira na dva jasno definirana područja. Njegove su prednosti su da je jednostavan i vrlo brz u primjeni, te dobro funkcionira kada je pozadina konstantnog osvjetljenja, a često nepogodan kada postoje varijacije u osvjetljenju. Uz to, često je odabir praga koji će funkcionirati robusno problematičan. S druge strane, adaptivni pristup je napredniji, a prilagođava se lokalnim varijacijama svjetline u slici. Umjesto jednog globalnog praga, adaptivni *threshold* koristi različite pragove za različite dijelove slike, ovisno o osvjetljenju u tim područjima. Ovakva se metoda bolje nosi s varijacijama osvjetljenja što u našem slučaju zna biti odbljesak s glave, kose i slično. Veliki problem adaptivne metode je puno sporije djelovanje jer zahtijeva dodatne izračune za svako područje na slici. Parametri adaptivnog *thresholda* objašnjeni su u 3.3.

Pomoću OpenCV-a dalje su korišteni algoritam za pronalaženje kontura, pojednostavljenje pronađene krivulje i traženje najmanjeg obuhvatnog kruga, te iscrtavanje oblika koji pomažu u analizi slika i testiranju napravljenih izmjena u algoritmu.

2.3. Kalibracija kamere

Kalibracija kamere se odnosi na estimaciju parametara leće i senzora slike kamere, te relacije između svijeta u stvarnom koordinatnom sustavu i piksela na slikama kamere. Parametri kamere uključuju intrinzične parametre, ekstrinzične parametre i koeficijente distorzije. Za estimaciju parametara kamere moramo imati 3D točke svijeta i njihove odgovarajuće 2D točke na slici. [Slika 6] pokazuje da ekstrinzični parametri predstavljaju lokaciju kamere u 3D sceni, a intrinzični parametri predstavljaju optičko središte i žarišnu duljinu kamere [7].



Slika 6. Intrinzični i ekstrinzični parametri [8]

Intrinzična matrica kamere definirana je kao: $\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, gdje su: (f_x, f_y) – žarišna

duljina, u pikselima; (c_x, c_y) – optičko središte, u pikselima. Za f_x i f_y vrijedi:

$$f_x = \frac{F}{p_x} \quad (1)$$

$$f_y = \frac{F}{p_y} \quad (2)$$

gdje su: F – žarišna duljina u milimetrima; (p_x, p_y) – veličina piksela u milimetrima.

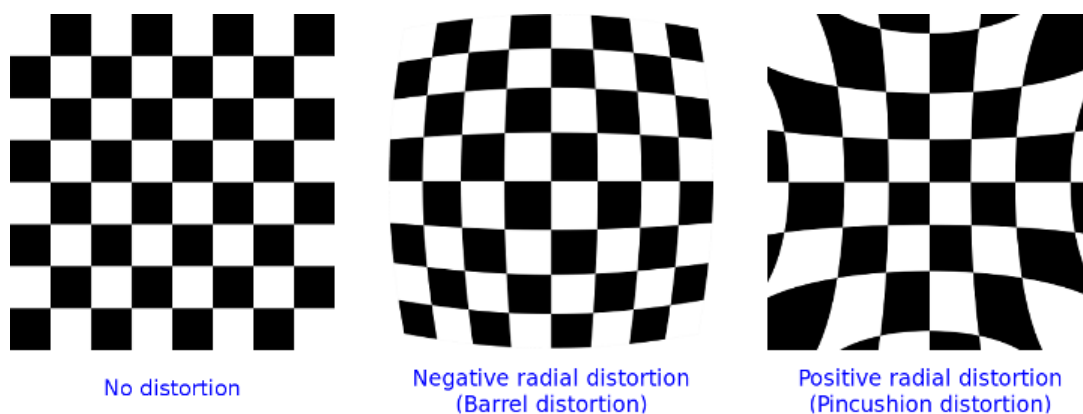
Matrica intrinzičnih parametara ne ovisi o snimanoj sceni, nego kada je jednom estimirana može se koristiti dok god je žarišna duljina fiksna [9].

Realne leće obično imaju neki tip distorzije, radijalnu, tangencijalnu, ili obje.

Radijalna distorzija nastaje kada se zrake svjetla savijaju više u blizini rubova leće nego u optičkom središtu, a pokazana je na [Slika 7]. Koeficijenti radijalne distorzije k_1, k_2 i k_3 prikazuju ovaj tip distorzije u točki x_{dist} i y_{dist} :

$$x_{dist} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (3)$$

$$y_{dist} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (4)$$



Slika 7. Primjeri radijalne distorzije [9]

Tangencijalna distorzija prikazana na [Slika 8] pojavljuje se kada leća s kojom snimamo nije savršeno paralelna s ravninom slike. Opisuju je koeficijenti p_1 i p_2 :

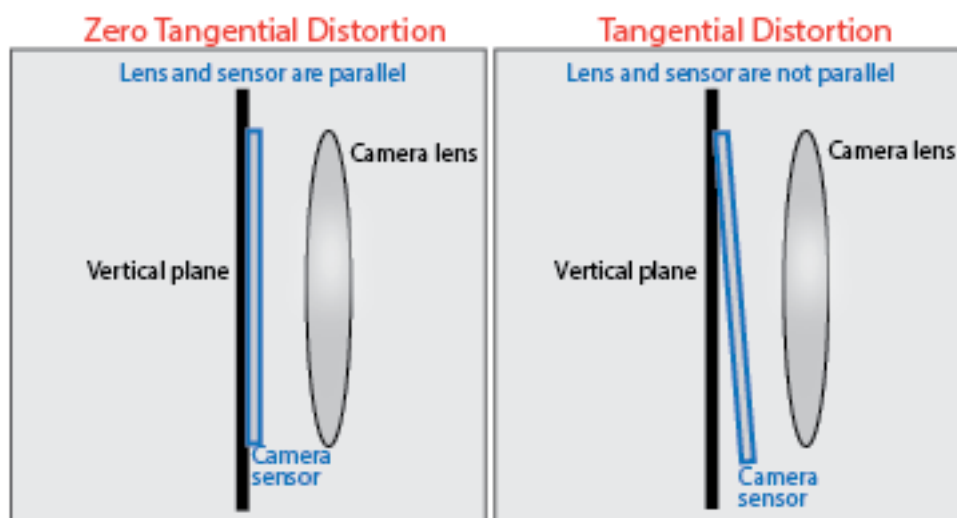
$$x_{dist} = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (5)$$

$$y_{dist} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (6)$$

gdje je:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (7)$$

gdje su x i y pikseli ispravljene distorzije [7].



Slika 8. Prikaz tangencijalne distorzije [7]

3. METODOLOGIJA

Razvijeni algoritam testiran je u Laboratoriju za medicinsku robotiku u Regionalnom centru izvrsnosti za robotske tehnologije pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Program je razvijen unutar već postojeće aplikacije na kamerama robota RONNA razvijenog na Fakultetu strojarstva i brodogradnje s partnerima Kliničkom Bolnicom Dubrava i Hrvatskim institutom za istraživanje mozga. Prikaz laboratorijskog postava za testiranje razvijenog programa vidi se na [Slika 9].



Slika 9. Prikaz postava za testiranje razvijenog programa

RONNA – Robotic NeuroNAvigation je projekt koji se bavi istraživanjem i konstruiranjem inovativnog i konkurentnog robotskog sustava za primjenu u neurokirurgiji. Glavna ideja projekta je poboljšanje tradicionalnog neurokirurškog stereotaktičkog postupka pomoću robotskog sustava RONNA. Robotski sustav RONNA prikazan na [Slika 10] sposoban je izvoditi precizne operacije bušenja kosti te na taj način poboljšati sigurnost pacijenta i smanjiti potencijalnu traumu koju mogu uzrokovati tradicionalni ručni postupci bušenja lubanje. Sustav također ima napredne mehanizme upravljanja koji omogućuju intuitivnu i prirodnu interakciju između medicinskog osoblja i samog robota. Inteligentni navigacijski sustav koji omogućava predoperativno planiranje navođen je od strane kirurga dok robot može

izvoditi invazivne operacije kao što su osjetljivo bušenje kostiju i umetanje sonde za biopsiju [10].



Slika 10. Starija generacija robota RONNA [11]

3.1. Laboratorijski postav

Prema zaključcima iz [12], pri laboratorijskom testiranju sustava korišten je plastični fantom kao replika ljudske glave, s ubušnim vijcima za kost na kojima su montirane retro-reflektivne sfere. Glavne prednosti takvog tipa fantoma su njegov antropomorfni oblik i odsjaj koji imitira odsjaj kože ljudske glave pri usmjerenom osvjetljenju. Također je korištena perika od umjetnih vlakana svijetlog odsjaja kako bi se imitirala refleksija ljudske kose, uzevši u obzir iskustva kirurga navedena u [13], koja svjedoče uobičajenom postavljanju vijaka i snimanju pacijenata bez šišanja kose, prikazanom na [Slika 11]. Prikaz korištenog fantoma u obje izvedbe vidljiv je na [Slika 12].



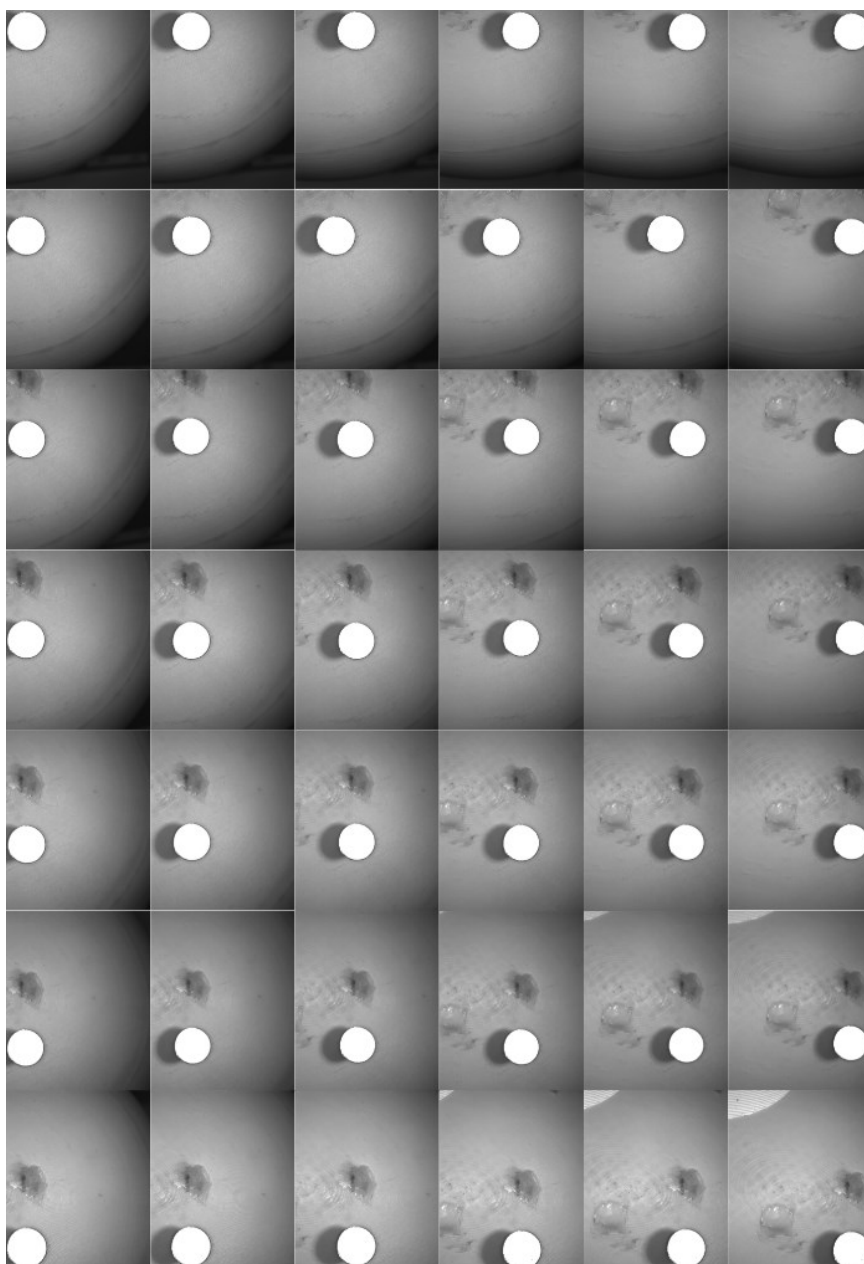
Slika 11. Snimanje pacijentice s ugrađenim vijcima, bez šišanja kose [13]



Slika 12. Plastična replika ljudske lubanje korištena kao fantom

3.2. Postupak testiranja

Za potrebe testiranja razvijeni algoritam testiran je na uzorku od 42 pozicije raspodijeljene po cijeloj površini slike snimljene iz zadane pozicije, bitne za ispravan kasniji proračun trodimenzionalnih koordinata traženih sfernih kuglica. Snimljene pozicije raspodijeljene su u 7 redova i 6 stupaca, snimljene u 2 slučaja, sa i bez perike, kao što je prikazano na [Slika 13], te s obje kamere i kroz 5 različitih ekspozicija kamere relevantnih za određivanje točnih koordinata kuglica.

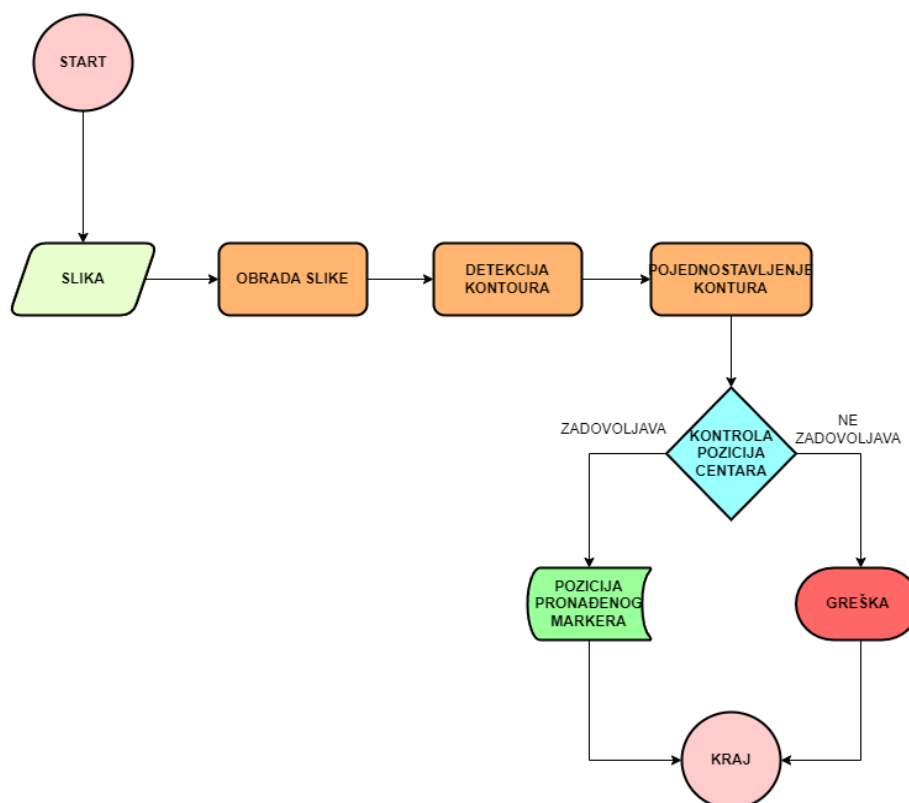


Slika 13. Ispitani položaji kamere u odnosu na traženi marker

3.3. Razvijeni algoritam

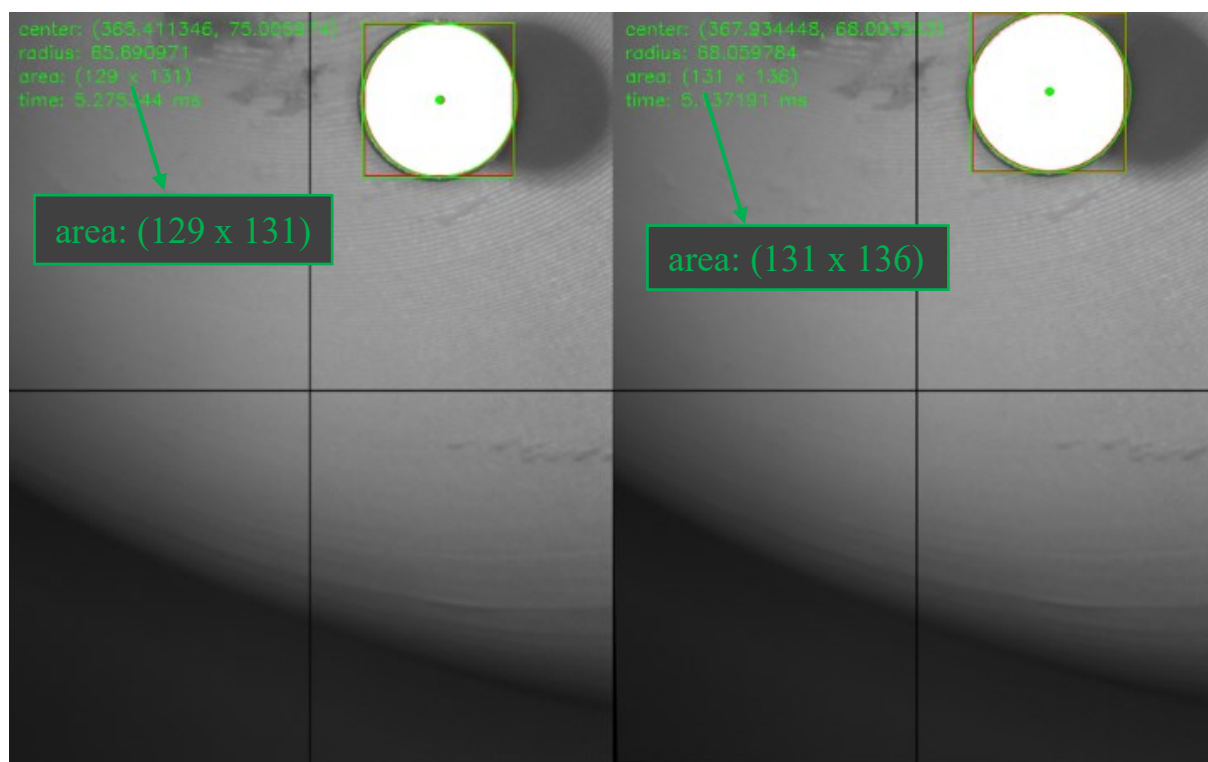
Unutar softverskog rješenja specijalno razvijenog stereo-vizijskog sustava kamera korištenih na robotu razvijeno je korisničko sučelje koje omogućava brzu i intuitivnu izmjenu parametara obrade slike kako bi se sustav mogao učinkovito testirati u laboratorijskom okruženju. Testiran je alternativni algoritam za obradu slike koji koristi prilagodljivu verziju namještanja praga za segmentaciju stvaranjem binarne slike na temelju manje, lokalne regije oko određenog piksela, u usporedbi sa starim algoritmom koji je koristio globalno postavljanje praga na temelju iskustvene opće vrijednosti. Nakon opsežnog testiranja i ispitivanja primjerene kombinacije ekspozicije, parametara i pozicija traženih markera, dobivene su vrijednosti koje rade robusno za sve uvjete u kojima je predviđeno koristiti razvijeni sustav. Također je mjerena brzina procesuiranja prilikom korištenja poboljšanog algoritma kako bi se utvrdila isplativost korištenja alternativnog rješenja. Provedbom kalibracije kamera efikasnost sustava je dodano zagarantirana.

Na [Slika 14] prikazan je dijagram toka algoritma razvijenog u programskom jeziku C++ uz pomoć OpenCV knjižnice računalnog vida, zaslužnog za pronalaženje pozicija traženih markera iz dobivenih slika snimljenih korištenom kamerom robota.



Slika 14. Dijagram toka algoritma za detekciju markera

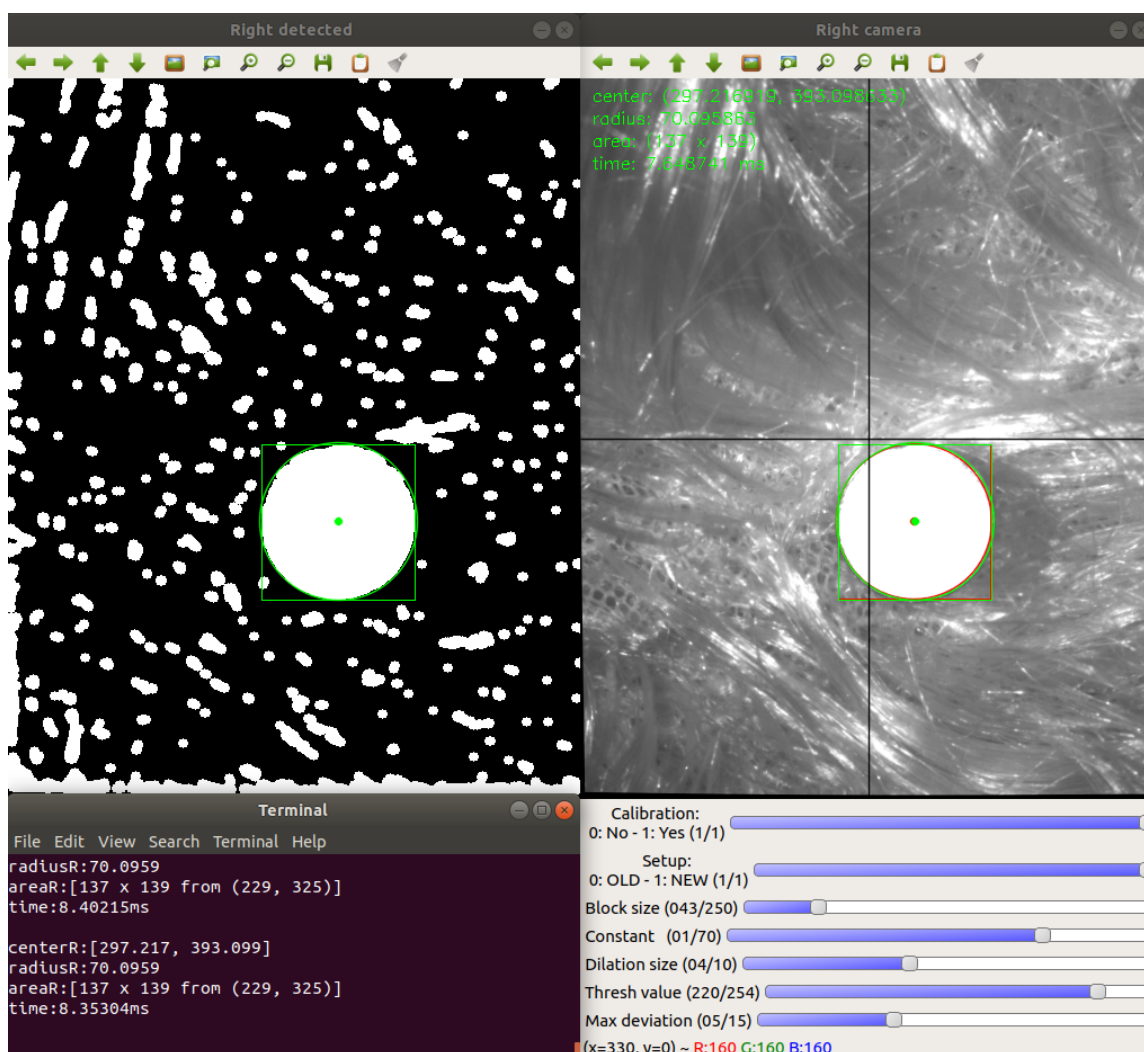
Nakon prvog koraka koji je hvatanje slike s kamere, započinjemo obradu slike ispravljanjem distorzije pomoću intrinzičnih parametara kamere spremljenih pomoću algoritma za kalibraciju kamere prikazanog dijagramom toka na [Slika 17]. Kao posljedica uklanjanja distorzije koju leća kamere unosi na prikaz slika iz kojih vršimo analizu, slika se mijenja, prikazane kružnice čije pozicije tražimo mahom postaju pravilnijeg oblika te više liče kružnici, a ne elipsi. S obzirom na kompleksnost distorzije postoje i slučajevi u kojima kalibracija kamere ne daje naoko pravilnije, savršeno okrugle oblike nakon ispravljanja distorzije, kao kod primjera prikazanog na [Slika 15] (površina omeđujućeg pravokutnika na prvoj slici je 129×131 , a na drugoj 131×136), već se objekti mogu činiti izduženima, no izračunavši prosjek devijacije prema lijevom dijelu nejednadžbe (8), jasno je da je korištenje kalibracije kamere i ispravljanja distorzije korisno u ovom slučaju. Na testiranih 168 pozicije pod ekspozicijom od 4 ms, prosjek devijacije bez kalibracije iznosi 1.93, a nakon kalibracije i ispravljanja distorzije 1.68, uz vrijeme izvođenja povećano za otprilike 3 milisekunde (testirano u simulacijskom okruženju) koristeći OpenCV *remap()* funkciju, a otprilike 4 milisekunde koristeći *undistort()*.



Slika 15. Usporedba neispravljene i ispravljene distorzije kamere

Daljnja obrada ispravljene slike uključuje zaglađivanje slike Gausovim filterom veličine kernela 3×3 za uklanjanje nepoželjnog šuma sa slike. Nakon zaglađivanja ugrađenim adaptivnim pragom stvaramo binarnu sliku te morfološkom operacijom otvaranja pomoću

strukturnog elementa u obliku elipse, za koju smo zaključili da najbolje djeluje u uklanjanju malih nepravilnosti na kakve nailazimo u našoj primjeni, pripremamo sliku za detekciju istaknutih kontura. Za svaku pronađenu konturu, provjerava se odgovara li obliku kojeg tražimo, tj. kružnici, te je li granični pravokutnik unutar određenih zadanih granica i pravilnog oblika. Na taj se način matematički eliminiraju lažno pozitivni rezultati. Kada pronađemo oblik koji je najbliži centru slike, a odgovara postavljenim uvjetima, oko njegove se pojednostavljene konture iscrtavaju oblici koje tada prikazujemo na ekranu radi povratne informacije o rezultatima testa. Pronađene vrijednosti centara, radijusa i površine vezane uz pronađene zadovoljavajuće konture, osim ispisa na ekranu za analizu, u pravoj primjeni tijekom operacije spremamo i šaljemo na daljnju obradu podataka u sustavu. Na [Slika 16] prikazano je razvijeno korisničko sučelje korišteno pri analizi slika spremljenih s glavnih kamera te pri podešavanju parametara kako bi se dobila optimalna kombinacija za robusnu lokalizaciju markera. Slijedi objašnjenje utjecaja parametara na dobivenu sliku.



Slika 16. Korisničko sučelje korišteno pri testiranju spremljenih slika

- *Block size, Constant*: Kada mijenjamo veličinu bloka i konstantu C kod adaptivnog binariziranja slike direktno utječemo na izračunavanje pragova za svaki piksel u slici. Ti parametri imaju značajan utjecaj na segmentiranje objekata od njihove pozadine. S obzirom da se veličina bloka odnosi na područje oko piksela koje se uzima u obzir pri računanju lokalnog praga, povećavanje te vrijednosti rezultira zaglađivanjem manje podložnim šumu i ostalim smetnjama na slici. Doduše, taj je parametar jedna od veličina koje drastično usporavaju brzinu procesuiranja kada se uzme velika vrijednost parametra. S druge strane, manja vrijednost veličine bloka može učiniti binarizaciju osjetljivom na lokalne varijacije u intenzitetima piksela, što znači da bi naša aplikacija mogla biti jače podložna šumu. Zato je pokušano pronaći kompromis kako bi obradili sliku što bolje možemo uz što manje gubitke u brzini izvođenja, kao također kritičnom segmentu zahtjeva za ovu aplikaciju. Konstanta C omogućuje fino podešavanje metode adaptivnog binariziranja. U ovoj primjeni korištena je niska pozitivna vrijednost konstante, pozitivna radi često neujednačenog osvjetljenja, kako bi pikseli koji pripadaju dominantnom objektu bili pojačani i ostali na slici, a niska vrijednost jer tražimo svijetli objekt, dok povećavanjem konstante pomiče prag prema tamnijoj strani [9]. U našoj je primjeni najčešće korištena vrijednost konstante 1 jer je utvrđeno da pri vrijednostima 2 i više često daje lažno pozitivne rezultate.
- *Dilation size*: Parametar veličine strukturnog elementa pri morfološkoj obradi slike ima značajan utjecaj na rezultat operacije, budući da direktno utječe na to koliko su bijele regije proširene [9]. Mala veličina strukturnog elementa koristi se za uklanjanje finih detalja i malih šumova iz binarne slike sa svrhom da se na taj način očuvaju glavne strukture. Veći element proširuje bijele strukture agresivnije, te će i bijeli pikseli koji su udaljeni jedni od drugih također doprinijeti dilataciji. U našoj aplikaciji koristi se za popunjavanje praznina uzrokovanih oštećenim kuglicama i sličnim smetnjama, te pri nižim ekspozicijama hvatanjem rubova koji su ostali nedovoljno osvjetljeni. Veličina strukturnog elementa također je parametar koji unosi usporenje u izvedbi algoritma tako da je uzeta najveća vrijednost koja neće previše usporiti program u izvođenju.
- *Thresh value*: Parametar vrijednosti *thresholda* odnosi se na običnu, binarnu metodu pronalaženja praga za binarizaciju slike koju koristimo za usporedbu s poboljšanim algoritmom kako bi izbacili rijetko pojavljujuće lažno pozitivne rezultate, koji su uspjeli proći sve ranije načine „obrane“ od istih. Vrijednost se postavlja ovisno o odabranoj ekspoziciji kamere, a trebala bi biti dovoljno visoka kako bi izbacila lažno pozitivne rezultate uzrokovane madežima i sličnim promjenama na koži glave, koje obično ne reflektiraju

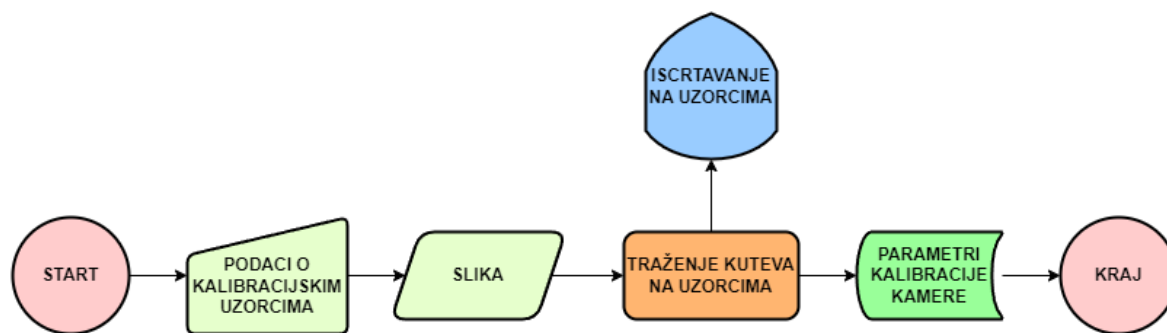
svjetlost kao kuglice, ali su sličnog oblika pa znaju destabilizirati rad algoritma. Na testnim slikama metoda u kojoj se provodi binarni *threshold* oblike iscertava crvenom bojom, a ona glavna, poboljšana metoda adaptivnog binariziranja slike, zelenom.

- *Max deviation*: Naposljetku, parametar maksimalne devijacije *maxDev* odnosi se na dio algoritma u kojem se izbacuju oblici koji značajnije odstupaju od traženog pravilnog pravokutnika koji omeđuje pronađene konture. Računa se prema formuli (8), gdje su w širina, a h visina pravokutnika.

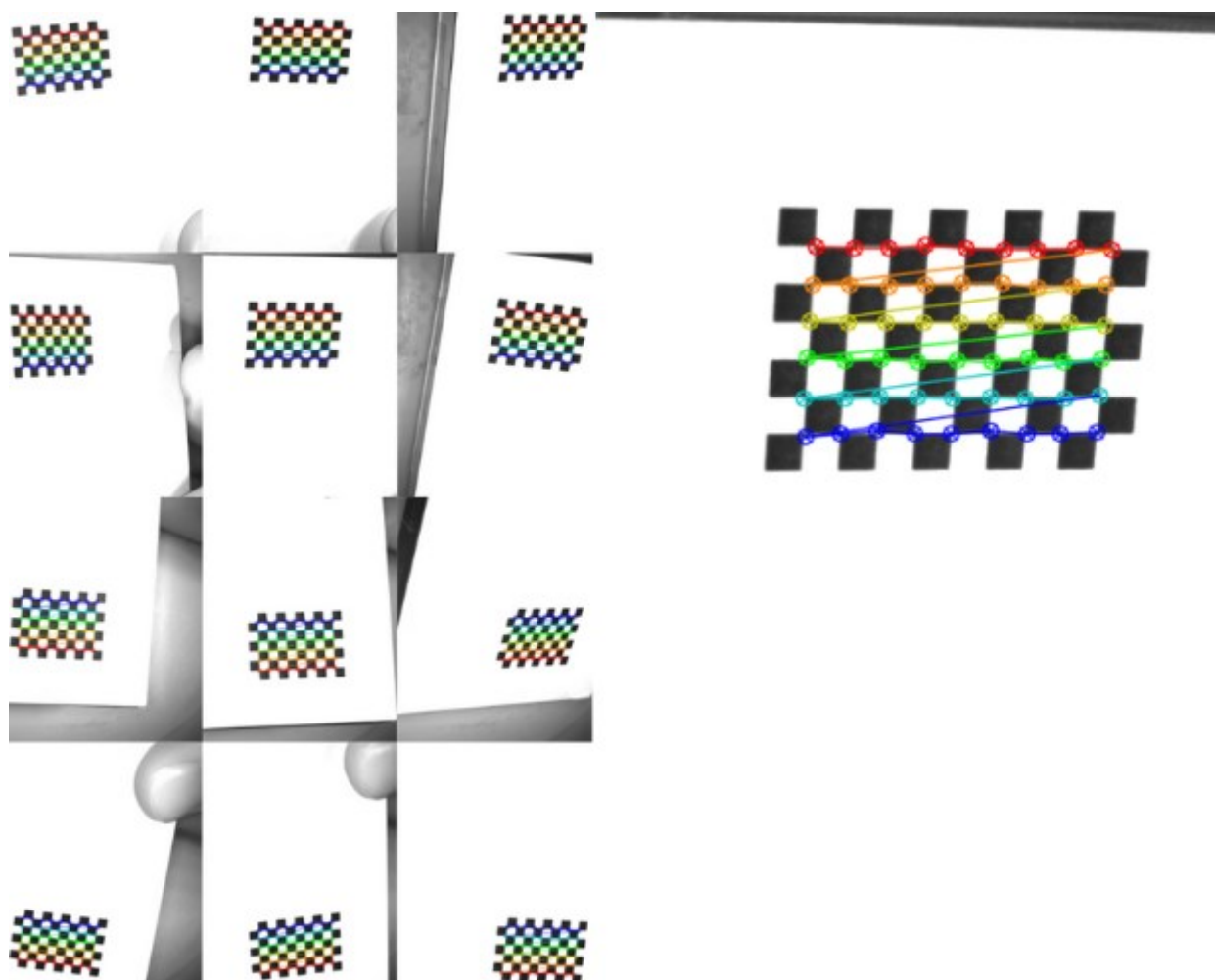
$$\frac{|w - h|}{\max(w, h)} \cdot 100 < \text{maxDev} \quad (8)$$

Spomenuta kalibracija kamere uključuje snimanje niza slika istog fizičkog objekta u različitim položajima i kutovima. Te se slike tada koriste za softverski izračun parametara kamere koji opisuju njenu distorziju. Slike koje se koriste kao uzorci za kalibraciju kamera najčešće su slike šahovnica jer one pružaju uzorak koji ima lako prepoznatljive i dobro definirane granice te oštre i prepoznatljive rubove na spojevima kvadrata. Bitno je spomenuti da je unatoč korištenju uzoraka vrlo malih dimenzija (korištena šahovnica je dimenzija 20 mm * 14 mm s kvadratićima duljine 2 mm) kalibracija na obje kamere uspješno izvedena te je dala potpune informacije o modelu kamere i distorziji na slikama snimljenim tim kamerama.

Algoritam za kalibraciju kamere pomoću ugrađene OpenCV funkcije otkriva rubove kvadrata na šahovnici, pretvara ih u točke i koristi za kalibraciju. Nakon detekcije kutova na slici, definiraju se stvarne trodimenzionalne točke u prostoru. Koristeći funkciju za kalibraciju kamere izračunavaju se intrinzični i ekstrinzični parametri kamere. Intrinzični parametri opisuju kako kamera izobličuje sliku i kako ju treba ispraviti, te se spremaju u datoteku koju kasnije koristi glavni program detekcije markera za ispravljanje distorzije na slici. Primjer iscertanih rubova na šahovnici dobiven prilikom kalibracije lijeve kamere dodijeljenog stereo-vizijskog sustava prikazan je na [Slika 18]. Na lijevoj slici prikazane su sve snimljene pozicije, a na desnoj samo jedna, uvećana.



Slika 17. Dijagram toka algoritma za kalibraciju kamere



Slika 18. Iscrtavanje kalibracijskih točaka na uzorku.

Distorzija slike u OpenCV knjižnici računalnog vida opisana je pomoću 5 parametara distorzije i spremljena unutar jednoredne matrice s 5 stupaca kako je navedeno u (9) [9].

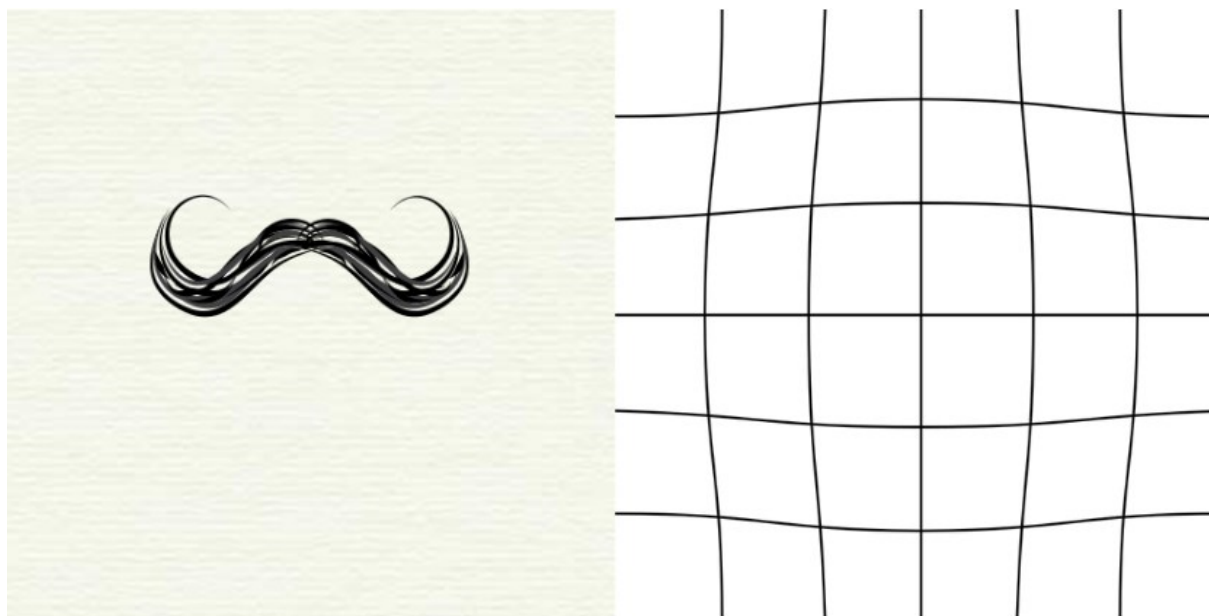
$$\text{distortion_coefficients} = (k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3) \quad (9)$$

Dobiveni koeficijenti distorzije zadanog stereo-vizijskog sustava robota RONNA, lijeve i desne kamere, izračunati su i spremljeni kako slijedi:

$$\text{distCoeffs_Left} = (-0,769 \ 64,721 \ 0,041 \ 0,006 \ -1113,804)$$

$$\text{distCoeffs_Right} = (-0,699 \ 59,554 \ 0,044 \ -0,019 \ -1236,818)$$

Iz dobivenih koeficijenata, uzevši u obzir da pozitivne vrijednosti koeficijenta k sugeriraju da se radi o „*pincushion*“, jastučastoj distorziji, a negativne da se radi o „*barrel*“, bačvastoj, zaključujemo da su slike snimljene zadanim kamerama izobličene tipom „*mustache*“ distorzije, složenom kombinacijom jastučastog i bačvastog izobličenja, prikazanom na [Slika 19] (podsjeća na duge uvijene brkove), kojeg karakteriziraju različiti efekti izobličenja u različitim dijelovima slike, što čini ispravljanje takvih slika izazovnim. Unatoč tome, rezultati koje smo dobili kalibracijom i ispravljanjem slika ukazuju da je ovakav postupak uvelike koristio zadanom primjeni.



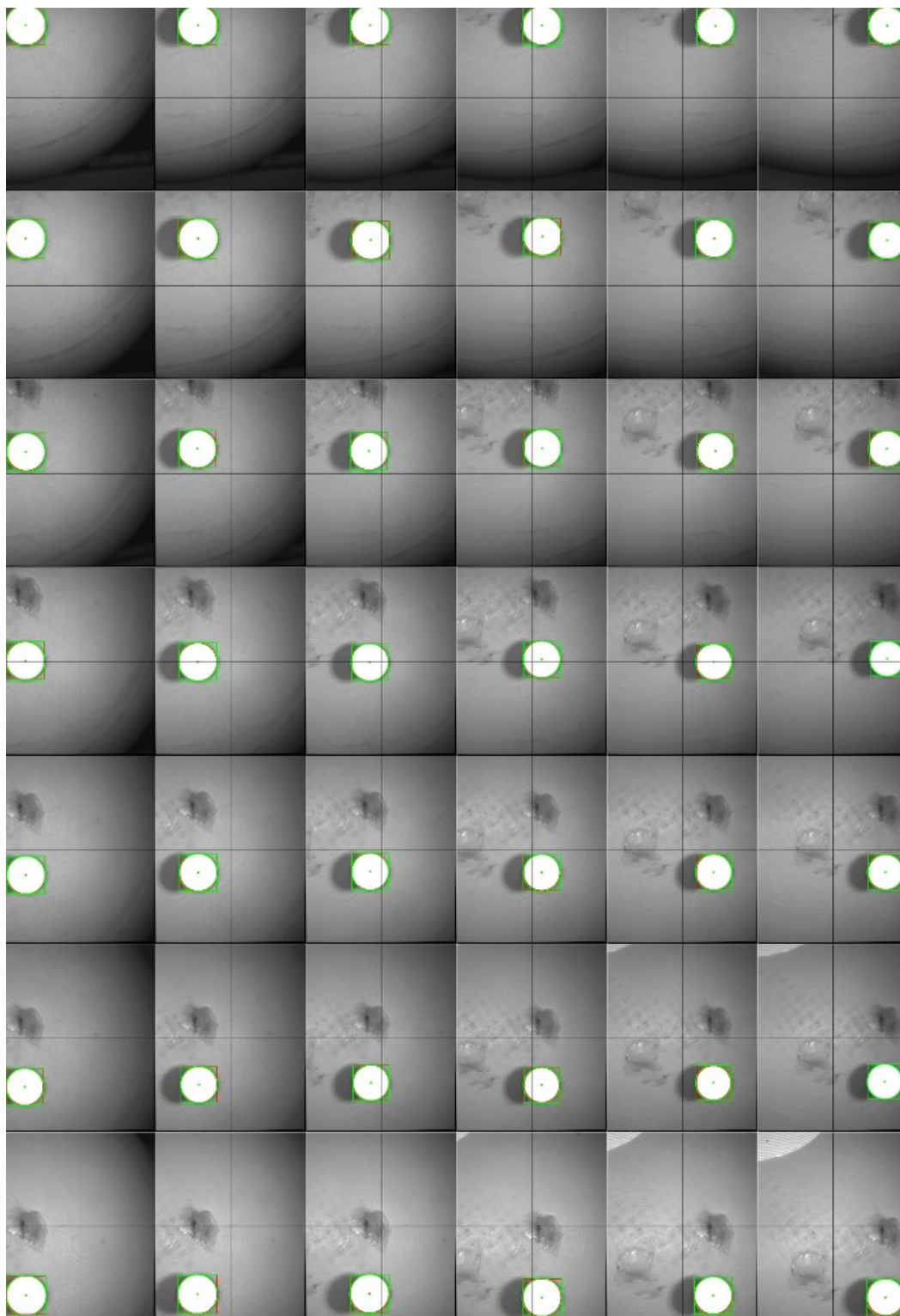
Slika 19. "Mustache" distorzija [14]

4. REZULTATI I DISKUSIJA

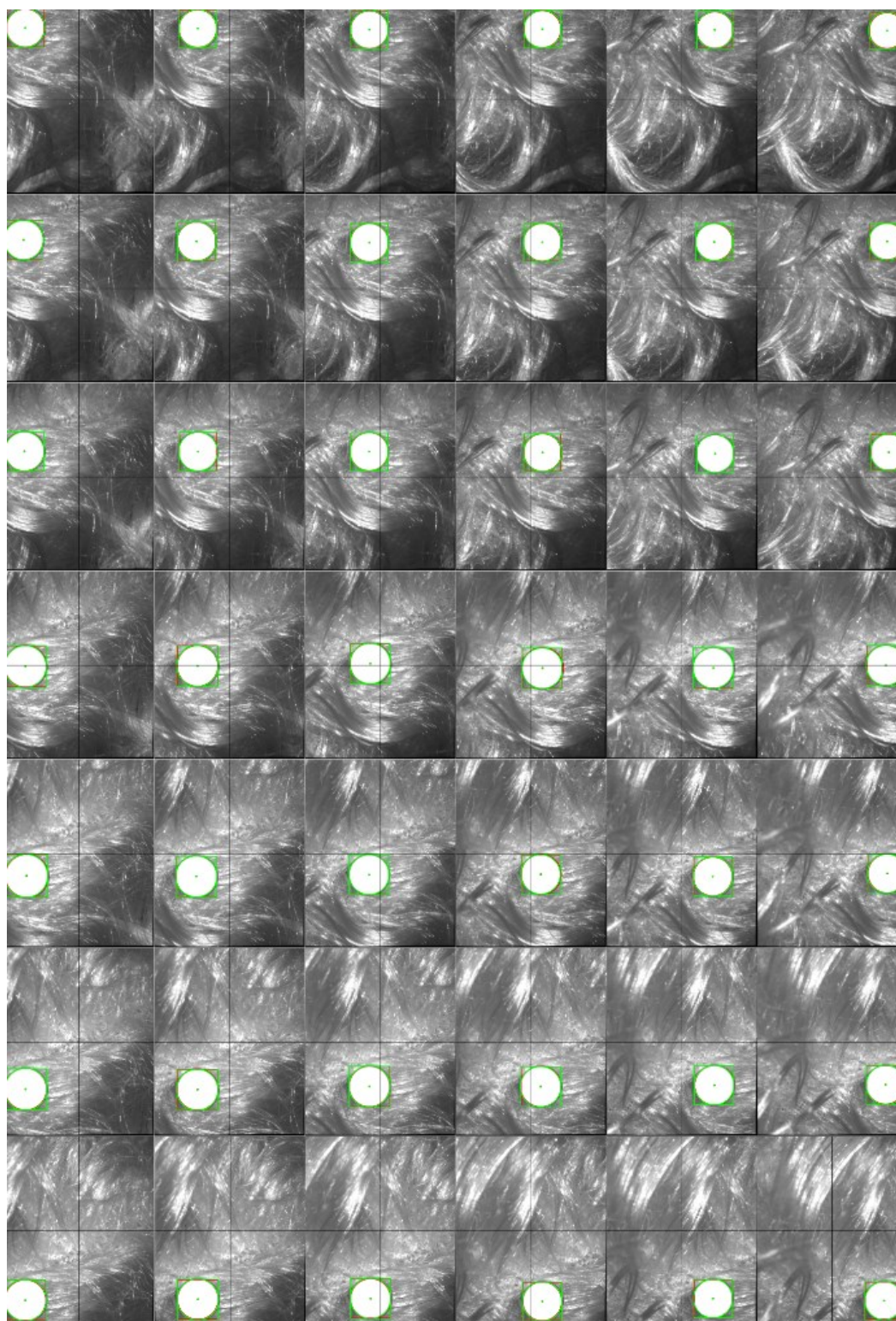
Podrobnim testiranjem sustava u raznim scenarijima, određene su ekspozicije koje će se koristiti u daljnjim istraživanjima i radu s kamerama, te za svaku od ključnih ekspozicija, kombinacija parametara kojima algoritam za lokalizaciju retro-reflektivnih markera u opisanoj primjeni postaje potpuno robusan i upotrebljiv s garantiranom pouzdanošću.

- Validacijom na temelju promatranja algoritma u radu zaključeno je da je ekspozicija kamere pri kojoj implementirani algoritam najbolje radi na zadanom sustavu ekspozicija od 4 milisekunde, pri kojoj uz parametre *Block size* = 43, *Constant* = 1, *Dilation size* = 4, *Threshold value* = 224 te uz *maxDev* = 5, dobivamo uspješnost lokalizacije od 100% pri 168 testnih uzoraka na obje kamere. [Slika 20] i [Slika 21] prikazuju uspješnu lokalizaciju foto-reflektivnih markera pri ekspoziciji od 4 ms uz namještene optimalne parametre, u svim postavljenim pozicijama kamere u odnosu na markere, na fantomu s kosom i bez.
- Razvijeni slijed programa uz sitne promjene u parametrima za odgovarajuću ekspoziciju rezultiraju također potpunom uspješnošću lokalizacije pri istom broju testova za ekspozicije od 3 i 5 ms, kao i za ekspoziciju 4 ms. Razlika je u prividnoj točnosti detekcije ruba i decimalnoj preciznosti kojom algoritam ispisuje pronađene vrijednosti, te najnižoj računatoj maksimalnoj devijaciji koju je moguće postići na kalibriranoj slici. Za te uvjete zaključuje se da je najispravnije koristiti ekspoziciju od 4 ms. Pri ekspoziciji od 3 ms, kombinacija parametara koja se pokazala dobitnom je: *Block size* = 45, *Constant* = 1, *Dilation size* = 4, *Threshold value* = 214 i *maxDev* = 5, a pri ekspoziciji 5 ms: *Block size* = 43, *Constant* = 1, *Dilation size* = 4, *Threshold value* = 238 te *maxDev* = 5.
- Za ispitanu ekspoziciju 2 ms brzo se može utvrditi da je, unatoč često zadovoljavajućoj niskoj maksimalnoj devijaciji, nedovoljno pouzdana zbog slabije mogućnosti detekcije rubova sfera, što rezultira manje točnim i preciznim vraćanjem pronađenih pozicija traženih markera.
- Ekspoziciju kamere od 6 ms prisiljeni smo koristiti, iako nailazi na probleme zbog jakog odsjaja od kose, kada se kamera nađe u poziciji da gleda na spoj između dvije polovice kuglice, donje koja je u direktnom dodiru s vijkom za kost i gornje koja obično služi emitiranju svjetla natrag na kamere. Tada je potrebno povisiti ekspoziciju kako bi refleksija s oba dijela kuglice bila dovoljno jaka da spoji dvije strukture od interesa na slici i na taj ih način odvoji od pozadine te prikaže objekt traženih karakteristika. Slučaj je površno obrađen

kasnije u ovom radu i treba ga detaljnije obraditi ako se utvrdi da kamera često dolazi u takav položaj u kojem će rub između dva dijela sfere stvarati probleme.

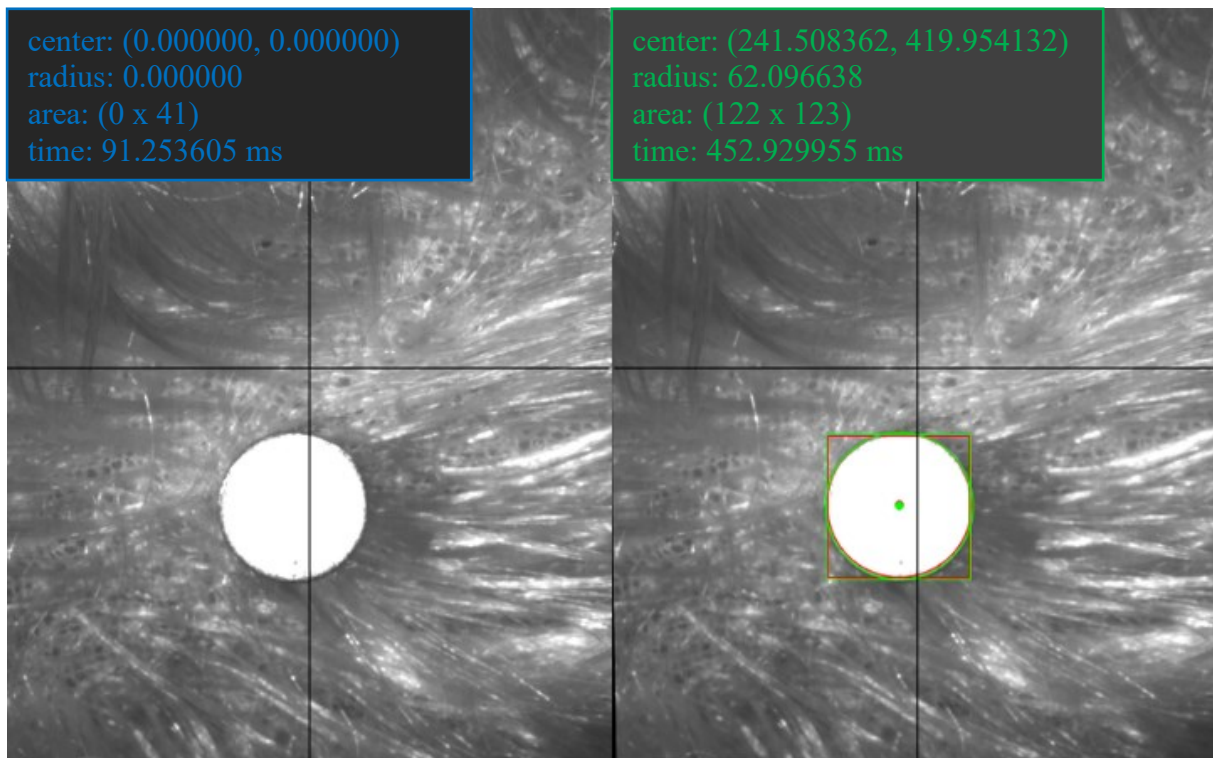


Slika 20. Uspješna lokalizacija pomoću optimalnih parametara na fantomu bez kose

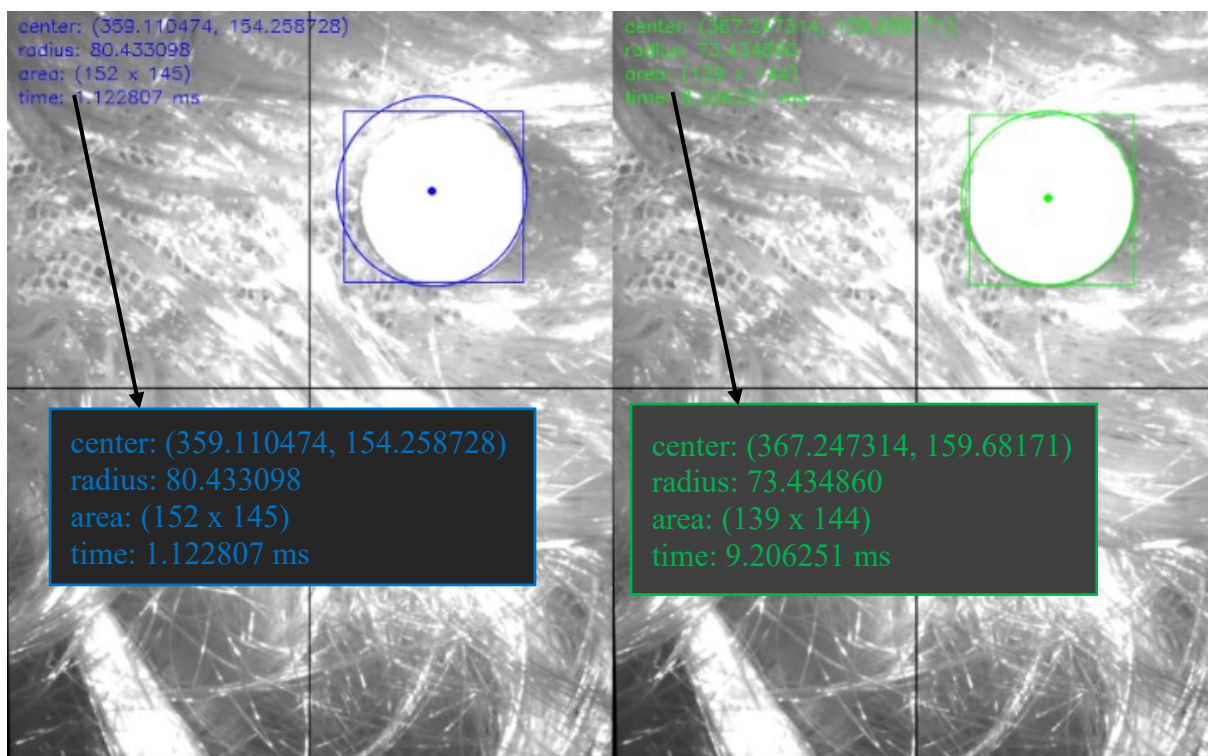


Slika 21. Uspješna lokalizacija pomoću optimalnih parametara na fantomu s kosom

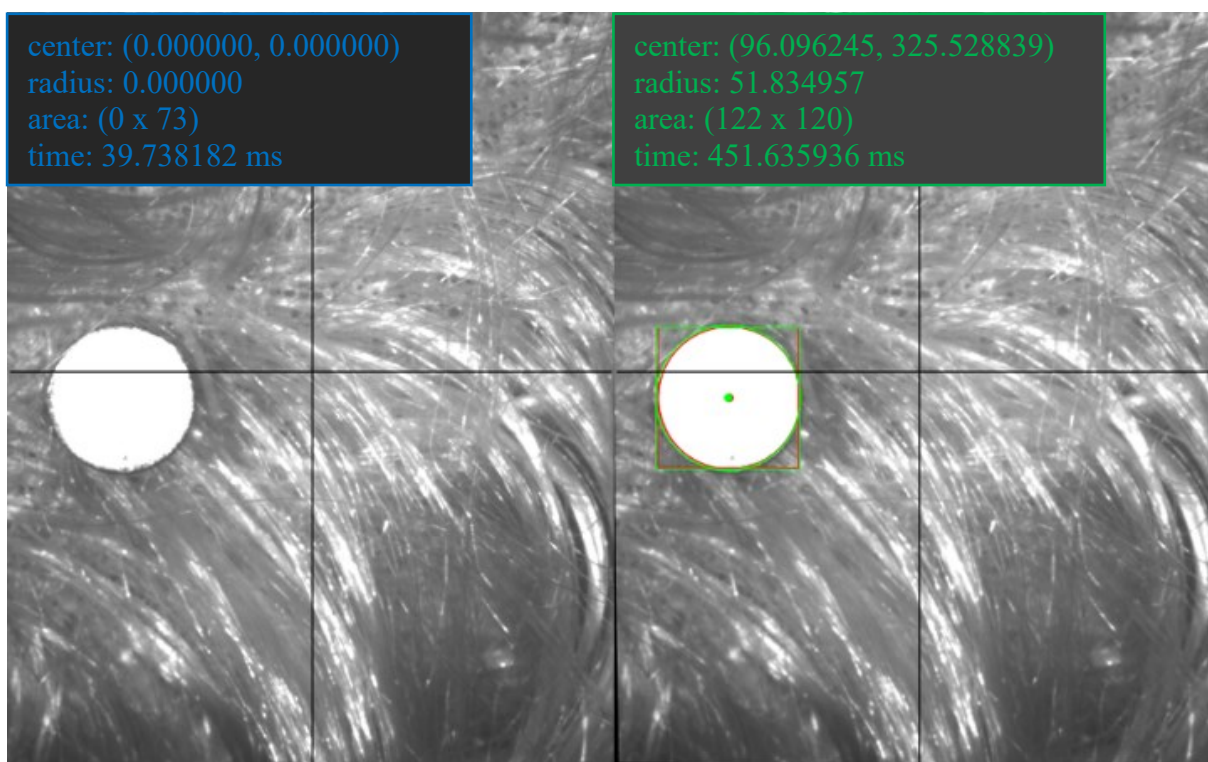
Usporedba starog i doradenog algoritma, s računatim vremenom procesuiranja na korištenim kamerama, može se ugrubo sagledati na [Slika 22], [Slika 23] (slikano u simulacijskom okruženju zbog čega je značajno kraće vrijeme izvođenja) i [Slika 24]. Vidljive su razlike u točnosti i preciznosti lokalizacije retro-reflektivnih markera, ali i obliku same slike nakon provedene kalibracije kamere. Također, važno je napomenuti vidljivo povećanje vremena potrebnog za procesuiranje koje igra značajnu ulogu u odluci za ili protiv korištenja razvijenog algoritma u budućnosti.



Slika 22. Usporedba 1, originalnog (lijevo) i unaprijeđenog (desno) algoritma u laboratorijskom okruženju



Slika 23. Usporedba 2, originalnog (lijevo) i unaprijeđenog (desno) algoritma u simulacijskom okruženju



Slika 24. Usporedba 3, originalnog (lijevo) i unaprijeđenog (desno) algoritma u laboratorijskom okruženju

4.1. Validacija rezultata

Za validaciju dobivenih rezultata testirano je ranije navedenih 168 pozicija markera na slici na dvije vrste fantoma i dvije kamere kroz 4 relevantne ekspozicije kamera, uspoređujući postojeći, izvorni algoritam i u ovom radu raspravljen, modificirani. Točnost definiramo vizualnom inspekcijom uspješnosti detekcije ruba markera na slici i praćenjem pulsiranja pronađene pozicije u vremenu kada su i fantom i kamera statični, te računski decimalnom preciznosti kojom algoritam ispisuje pronađene vrijednosti i najnižom računatom maksimalnom devijacijom koju je moguće postići na kalibriranoj slici, kao što je ranije navedeno. Također, vrednuje se preciznost i odziv (*precision and recall* prema [15]):

$$\text{Preciznost} = \frac{tp}{tp + fp} \cdot 100 \quad (10)$$

$$\text{Odziv} = \frac{tp}{tp + fn} \cdot 100 \quad (11)$$

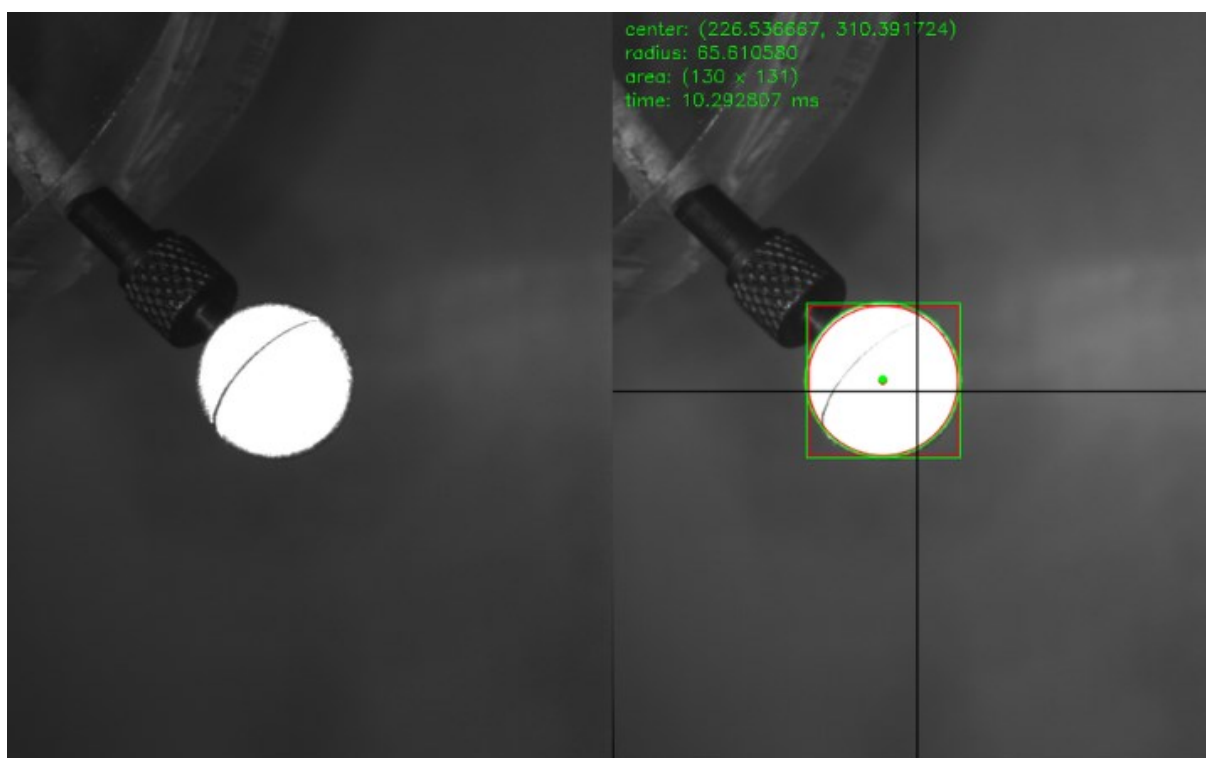
Gdje su: tp – pravi pozitivni rezultat, kada je algoritam ispravno identificirao prisutnost, fp – lažni pozitivni rezultat, kada je algoritam pogrešno identificirao prisutnost koja ne postoji i fn – lažni negativni rezultat kada algoritam nije identificirao stvarnu prisutnost tražene karakteristike. Preciznost nam ukazuje čini li model često lažno pozitivne prosudbe, u odnosu na točne, a odzivom vrednujemo odnos između stvarnih pozitivnih i lažno negativnih rezultata. Modeli čiji je odziv 100% pokazuju pouzdanost kada je u sustavima poput našeg ključno ne propustiti niti jedan stvarni rezultat. Ovom metodom validacije algoritma dokazujemo poboljšanje u odnosu na izvorni algoritam i u polju gdje je stari algoritam već bio relativno zadovoljavajući. Izbacivanjem lažno pozitivnih rezultata stvorenih odblijeskom kose i detektiranim artefaktima na koži glave dobili smo algoritam i parametre robusne na sve uvjete predviđenog scenarija korištenja. Uz vizualnu procjenu kojom je utvrđena znatno povećana točnost, valjana je tvrdnja da je aplikacija optimirana za pouzdanu i izrazito točnu lokalizaciju retro-reflektivnih markera zadanih zahtjeva.

Prikaz rezultata za prvobitni i dorađeni algoritam prema grupiranim ekspozicijama korištenim u različitim slučajevima prikazan je u [Tablica 1].

Tablica 1. Usporedba algoritama prema preciznosti i odzivu

Ekspozicije [ms]	3, 4 i 5		6	
	Preciznost	Odziv	Preciznost	Odziv
Unaprijeđeni algoritam	100,00%	100,00%	98,47%	77,71%
Originalni algoritam	100,00%	97,82%	95,76%	69,33%

Poboljšani algoritam na ekspozicijama od 3, 4 i 5 ms ima potpunu preciznost i odziv na odrađenim testovima, dok originalni algoritam takvu situaciju ima tek na ekspoziciji 5 ms, a u kombinaciji sa ekspozicijama 3 i 4 ms daje prave rezultate 325 od 336 puta, dok su ostalo lažno negativni rezultati. Kao što se vidi, oba algoritma imaju veći problem sa traženjem markera na ekspoziciji od 6 ms koju koristimo kada se kamera nađe na poziciji da gleda u rub spoja dvije polovice sfere, kao što je prikazano na [Slika 25]. Takav slučaj je često problematičan za iznesene parametre algoritma i da bi se savladao zahtijeva daljnje testiranje.



Slika 25. Problematican rub na spoju polovica sfere

4.2. Brzina izvođenja programa

Obrada jedne slike pri testiranju zadanim kamerama u laboratorijskom okruženju korištenjem izvornog algoritma traje otprilike 40 do 50 milisekundi, dok korištenjem dorađenog algoritma i u ovom radu odabranih parametara traje 400 do 500 milisekundi. U simulacijskom okruženju u kojem je algoritam testiran, obrada slike originalnim algoritmom traje od 0.3 do 1 ms, a dorađenim 5 do 10 ms. Povećanje vremena potrebnog za izvođenje zadatka približno 10 puta također je jedan od kriterija prema kojemu je bitno vrednovati izvedbu alternativne metode.

Uvođenjem novih metoda u algoritam nedvojbeno je došlo do značajnog smanjenja brzine procesuiranja, međutim, važno je naglasiti da je glavna svrha ove aplikacije postizanje izvanredne točnosti i preciznosti. U tom pogledu, razvijeni algoritam s podešenim parametrima pokazuje očitu dominaciju nad dosadašnjim principom izvođenja programa. Također, vrijeme koje se može uštediti na način da osoblje može računati da robot ovakvom metodom sigurno obavi točnu lokalizaciju, umjesto da se nakon propalog pokušaja automatske lokalizacije ona mora izvršiti manualno, vrijedno je gubitaka izmjerenih pri direktnom računanju usporenja procesuiranja. Prema tome, isplativost korištenja unaprijeđenog algoritma manifestira se u kvaliteti postignutih rezultata imajući na umu specifične zahtjeve postavljene za ovaj rad.

S obzirom da je prema [13] vrijeme za operativni zahvat pomoću robotskog sustava RONNA od trenutka kada je bolesnik ušao u operacijsku salu do završetka operativnog zahvata između 41 i 128 min, uzimajući u obzir da se prilikom pripreme za operativni zahvat najčešće koriste 4 ili 5 fiducijalnih markera [16], potrebno je odlučiti hoće li produženo vrijeme lokalizacije markera narušiti efikasnosti cijelog sustava ili red veličine vremena potrebnog za ovaj proces nije toliko velikog utjecaja u odnosu na korist koju donosi.

4.3. Budući rad

Evaluacija i validacija rješenja za lokalizaciju markera izuzetno je otežana bez referentnog skupa podataka koji bi služili kao „temeljna istina“. Stvaranje skupa sintetičkih podataka poput skupa testnih slika te sučelja kojim u kontroliranim uvjetima testiramo i direktno provjeravamo učinkovitost algoritma nudi se kao moguće rješenje. Utjecaji vanjskih čimbenika mogli bi se simulirati što je vjerodostojnije moguće, a analiza i poboljšavanje parametara tekli bi istim slijedom radnji kao u ovom radu, samo bi iza toga imali prave točne vrijednosti s kojima bi mogli usporediti naše metode.

Pri proučavanju ovog rada treba imati na umu da je ovo testiranje imalo nekih nepotrebnih koraka koji su nesumnjivo usporavali algoritam te da je brzina ovdje relativan parametar koji samo služi procjeni stvarne izvedbe sustava. Ako će se ova metoda koristiti za daljnji razvoj bit će potrebno „počistiti“ i optimizirati aplikaciju kako bi ona radila najvećom mogućom brzinom, uz ovdje dobivenu točnost.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog istraživanja bio je unaprijediti postojeće rješenje i postaviti temelj za daljnje istraživanje i razvoj sustava, s naglaskom na stvaranju smjernica za poboljšanje. Tijekom ovog istraživanja, algoritam je optimiziran za očekivanu upotrebu, postavljena je optimalna ekspozicija kamere, te su odabrani parametri koji osiguravaju nepogrešivu funkcionalnost u kombinaciji s odabranim algoritmima. Identificiranjem i uklanjanjem distorzije koju leće kamera unose na sliku dokazano je poboljšanje funkcionalnosti aplikacije i osigurana pravilnost pronađenih oblika, u ovom slučaju kružnice. Osim toga, uspješno su riješeni izazovi poput čestih lažno pozitivnih rezultata koje je prethodna verzija aplikacije generirala.

Kroz eksperimentiranje u različitim scenarijima, razvijen je algoritam koji, iako radi sporije, pruža izvanrednu točnost i pouzdanost u odnosu na originalni. Važno je napomenuti da je glavni cilj ove aplikacije postizanje izuzetne preciznosti i točnosti, a u tom kontekstu, razvijeni algoritam s prilagođenim parametrima nadmašuje prethodnu izvedbu. Stoga, isplativost primjene unaprijeđenog algoritma očituje se kroz visoku kvalitetu postignutih rezultata, što je u skladu s posebnim zahtjevima ovog istraživanja.

LITERATURA

- [1] Jerbić B, Švaco M, Chudy D, Šekoranja B, Šuligoj F i sur. RONNA G4—Robotic Neuronavigation: A Novel Robotic Navigation Device for Stereotactic Neurosurgery In: Handbook of Robotic and Image-Guided Surgery, Elsevier, 2020., p. 599-625.
- [2] Hata K, Savarese S. CS231A Course Notes 3: Epipolar Geometry: https://web.stanford.edu/class/cs231a/course_notes/03-epipolar-geometry.pdf
- [3] Šuligoj F, Jerbić B. Predavanja iz kolegija Vizijski sustavi, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023.
- [4] CoE4TN4 Image Processing: <https://www.ece.mcmaster.ca/~shirani/ip13/chapter5.pdf>, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [5] GaussianFilter: <https://reference.wolfram.com/language/ref/GaussianFilter.html>, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [6] Mathematical Morphology: <https://aishack.in/tutorials/mathematical-morphology-composite-operations/>, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [7] What Is Camera Calibration?: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html#bu0nj3f>, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [8] Intrinsic camera parameters calibration: https://mphy0026.readthedocs.io/en/latest/calibration/camera_calibration.html, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [9] OpenCV: <https://docs.opencv.org/4.x/index.html>, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [10] RONNA - Robotic NeuroNAVigation in neurosurgery project led by Bojan Jerbic in Croatia: <http://www.croatia.org/crown/articles/10994/1/RONNA---Robotic-NeuroNAVigation-in-neurosurgery-project-led-by-Bojan-Jerbic-in-Croatia.html>, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [11] Robotic innovation gives Croatian neurological surgeons a helping hand: https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/croatia/robotic-innovation-gives-croatian-neurological-surgeons-a-helping-hand, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [12] Švaco M, Stiperski I, Dlaka D, Šuligoj F, Jerbić B, Chudy D, Raguž M. Stereotactic Neuro-Navigation Phantom Designs: A Systematic Review. *Frontiers in Neurorobotics*, 2020.
- [13] Dlaka, D. Ispitivanje točnosti robotskoga sustava RONNA u stereotaktičkoj neurokirurgiji [disertacija], Zagreb: Medicinski fakultet; 2023.
- [14] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mustache_distortion.svg, Pristupljeno: rujan, 2023.
- [15] Powers, David M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Factor to ROC, Informedness, Markedness & Correlation, *Journal of Machine Learning Technologies*, 2011.
- [16] Dlaka D, Švaco M, Chudy D, Jerbić B, Šekoranja B, Šuligoj F, Vidaković J, Romić D, Raguž M. Frameless stereotactic brain biopsy: A prospective study on robot-assisted brain biopsies performed on 32 patients by using the RONNA G4 system, *Int J Med Robot*, 2021.
- [17] Davies, E.R. *Computer Vision: Principles, Algorithms, Applications, Learning*, Elsevier, 2018.