

Razvoj robotiziranog postrojenja za biorazgradnju otpada

Stigleitner, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:546227>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 69

**RAZVOJ ROBOTIZIRANOG POSTROJENJA ZA
BIORAZGRADNJU OTPADA**

Martin Stigleitner

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 69

**RAZVOJ ROBOTIZIRANOG POSTROJENJA ZA
BIORAZGRADNJU OTPADA**

Martin Stigleitner

Zagreb, lipanj 2024.

Zagreb, 4. ožujka 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 69

Pristupnik: **Martin Stigleitner (0112072561)**
Studij: Informacijska i komunikacijska tehnologija
Profil: Automatika i robotika
Mentor: izv. prof. dr. sc. Matko Orsag

Zadatak: **Razvoj robotiziranog postrojenja za biorazgradnju otpada**

Opis zadatka:

Ličinke crne vojničke muhe na jedinstveni način ugljik pretvaraju u proteine. Time mogu vrlo učinkovito pomoći u dugoročnom rješavanju problema prehrane i održivog gospodarenja biorazgradivim otpadom. Cilj ovog zadatka je osmisliti automatizirani sustav za održavanje životnog ciklusa crne vojničke muhe potpomognut robotskim manipulatorom. Potrebno je razraditi efikasno rješenje za kalibraciju takvog sustava pri puštanju u pogon. Potrebno je izraditi intuitivno sučelje za programiranje potpomognuto demonstracijom. Konačni cilj zadatka je razviti laboratorijsko okruženje za provjeru funkcionalnosti sustava.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 69

Razvoj robotiziranog postrojenja za biorazgradnju otpada

Martin Stigleitner

Zagreb, rujan 2024.

Zagreb, 4. ožujka 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 69

Pristupnik: **Martin Stigleitner (0112072561)**
Studij: Informacijska i komunikacijska tehnologija
Profil: Automatika i robotika
Mentor: izv. prof. dr. sc. Matko Orsag

Zadatak: **Razvoj robotiziranog postrojenja za biorazgradnju otpada**

Opis zadatka:

Ličinke crne vojničke muhe na jedinstveni način ugljik pretvaraju u proteine. Time mogu vrlo učinkovito pomoći u dugoročnom rješavanju problema prehrane i održivog gospodarenja biorazgradivim otpadom. Cilj ovog zadatka je osmisлити automatizirani sustav za održavanje životnog ciklusa crne vojničke muhe potpomognut robotskim manipulatorom. Potrebno je razraditi efikasno rješenje za kalibraciju takvog sustava pri puštanju u pogon. Potrebno je izraditi intuitivno sučelje za programiranje potpomognuto demonstracijom. Konačni cilj zadatka je razviti laboratorijsko okruženje za provjeru funkcionalnosti sustava.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Matku Orsagu na pomoći i vođenju kroz ovaj rad. Također se zahvaljujem dr. sc. Bruni Mariću i Filipu Zoriću univ. mag. ing. el. techn. inf. na savjetima i podršci tijekom istraživanja. Uz to bih posebno zahvalio djevojci Evi koja me držala na životu sve ove godine studiranja i motivirala me da ne odustanem.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
1.1. Crna vojnička muha kao održivo rješenje za biootpad	1
1.2. Motivacija za korištenje crne vojničke muhe u razgradnji biootpada .	2
1.3. Motivacija za automatizaciju i robotizaciju životnog ciklusa crnih vojničkih muha	3
2. Robotska manipulacija	5
2.1. Pregled senzorne i robotske tehnologije u uzgoju crnih vojničkih muha	5
2.1.1. Senzori	5
2.1.2. Percepcija	6
2.1.3. Aktuacija	6
2.2. Implementacija robotske manipulacije u sustavu uzgoja crnih vojničkih muha	7
2.3. Direktna i inverzna kinematika	9
2.3.1. Direktna kinematika	9
2.3.2. Inverzna kinematika	11
3. Kalipen	12
3.1. Opis sustava	12
3.2. Kalibracija kalipena	14
3.3. Kalibracija baze	14
3.4. Algoritam za označavanje prepreka	18
3.4.1. Usporedba s metodom određivanja orijentacije pomoću svojstvenih vektora	23
3.4.2. Generiranje objekta na temelju nepotpunog skupa podataka .	24
4. Korišteni alati i konektori	26
4.1. Povećavanje raspona hvatanja Franka hvataljke	26

4.2. Spajanje dviju kutija pomoću konektora	27
5. Eksperiment	31
5.1. Opis algoritma za izvršavanje eksperimenta	31
5.1.1. Diagram izvršavanja zadatka	31
5.1.2. Opis algoritma	32
5.2. Izvođenje eksperimenta	32
5.2.1. Ispitivanje u simulaciji	32
5.2.2. Poboljšanje stabilnosti i pouzdanosti Kalipena	34
5.2.3. Preciznost Kalipena	36
6. Zaključak	39
Literatura	40

1. Uvod

1.1. Crna vojnička muha kao održivo rješenje za biootpad

Vrsta *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), poznatija kao crna vojnička muha, iako autohtona u Americi, u novije vrijeme rasprostranjena je po cijelom svijetu primarno oko ekvatora [1], [2], [3]. Pošto ne može preživjeti u hladnijim uvjetima i dalje ne nastanjuje sjeverne dijelove Europe [4]. Stoga u sjevernijim krajevima za uspješno razmnožavanje i uzgajanje potrebno je rekreirati tropske vremenske uvjete.

Životni ciklus crne vojničke muhe može se podijeliti u pet stadija: jajašca, larve, predkukuljični stadij, kukuljica i odrasli stadij [5], [6], prikazani na *Slici 1.1*.



Slika 1.1: Životni ciklus crne vojničke muhe

Ličinke crne vojničke muhe (engl. Black Soldier Fly Larvae, skraćeno BSFL) nezasićeno jedu organski otpad, poput kućanskog biootpada, životinjskog izmeta, trulog voća i povrća [5], [7], [8]. Od svih muha crne vojničke muhe mogu se hraniti na naj-

različitijim supstratima i s najvećom efikasnošću ih razgrađivati [9]. Njihov omjer pretvorbe supstrata u korisne tvari, poput proteina, masti i hitina, veći je nego kod cvrčaka i crva brašnara. U usporedbi s njima, kod crnih vojničkih muha vjerojatnost preživljavanja te udio dušika i fosfora ne variraju na različitim supstratima [10]. Ličinke crne vojničke muhe su dulje u ličinačkom stadiju u usporedbi s ostalim vrstama muha, kod kojih taj stadij traje manje od pet dana. To im omogućuje da konzumiraju veću količinu hrane i narastu veće [3].

U zadnjem ličinačkom stadiju ličinke napuštaju biootpad u potrazi za sušim medijem u kojem se mogu zakukuljiti prije nego li se preobrazu u odrasli stadij [11]. Ono što ne pojedju i njihov izmet bogat dušikom može se koristiti kao gnojivo [12], [13].

Odrasli ne konzumiraju ništa osim vode, a preživljavaju na masnoćama prikupljenim u larvalnom stadiju života. Ne napadaju, grizu ili bodu, ne prenose niti šire bolesti [3], [14]. Ženke preferiraju polagati jajašca pored bio otpada [15], iz tog razloga ne prenose patogene koji se potencijalno nalaze u biootpadu [16]

1.2. Motivacija za korištenje crne vojničke muhe u razgradnji biootpada

International Feed Industry Federation (IFIF) procjenjuje da će do 2050 na zemlji živjeti više od 10 milijardi ljudi [17]. Radi rasta životnih standarda procjenjuje se da će se globalno unos životinjskih proizvoda udvostručiti, dok će unos svinjetine narasti za 105%, a unos peradi 173% [18], [19].

Kako bi omogućili nastavak ovakvog načina života potrebno je pronaći alternativni izvor hrane za životinje koje konzumiramo. Jedna potencijalna alternativa mogla bi biti korištenje insekata, ponajviše kao izvor proteina [20]. Insekti su održivi izvor proteina i masnoća jer konzumiraju nusproizvode industrije hrane, kućanske i restoranske otpatke, ne zahtijevaju veliku površinu, ni puno vode za uzgajanje te stoga imaju i niži ugljični otisak [21].

Crna vojnička muha postaje sve prepoznatljiviji izvor u održivoj poljoprivredi, prvenstveno zahvaljujući visokoj nutritivnoj vrijednosti njenih ličinki. Ličinke crne vojničke muhe su bogat izvor amino kiselina (40%), masnoća (28%), vitamina, minerala, kalcija i fosfora [22], [23]. Također ne sadrže patogene [24] i proizvode antimikrobne peptide [25].

Općenito, sojino i riblje brašno tradicionalno se koristi kao glavni izvori proteina u stočarstvu zbog visokog sadržaja proteina [26]. Međutim, zbog stalnog globalnog

rasta cijena ovih sirovina [27], stočarski sektor se nalazi pod velikim pritiskom. Protein dobiven iz ličinki crne vojničke muhe nudi obećavajuću alternativu, osobito u industriji stočne hrane [28], [29], [30]. Uzgoj ličinaka crne vojničke muhe zahtjeva manje prostora u usporedbi s drugim izvorima hrane, a dodatna prednost je mogućnost vertikalnog uzgoja, što omogućava skalabilnost i značajno povećanje proizvodnje uz ograničenu površinu [31]. S obzirom na to da se mogu uzgajati na organskom otpadu, ovaj izvor proteina je značajno ekonomičniji u usporedbi sa sojinim i ribljim brašnom.

Uključivanje ličinki crnih vojničkih muha u prehrani ribe u akvakulturi ima pozitivan učinak na njihov rast i razvoj [32], dok kokoši bolje razgrađuju hranu u koju su dodane ličinke crne vojničke muhe [33].

1.3. Motivacija za automatizaciju i robotizaciju životnog ciklusa crnih vojničkih muha

Zbog višeg stupnja automatizacije, velika postrojenja zahtijevaju manje radne snage da obrade jednaku količinu biootpada u usporedbi s manjim postrojenjima [34]. Caruso i ostali [35] su procijenili da su za malo postrojenje u Indoneziji troškovi radne snage 30% ukupnih troškova održavanja, dok su Diener i ostali [36] procijenili za to isto postrojenje da su troškovi radne snage 65% od ukupnih troškova.

Za većinu manjih postrojenja troškovi radne snage nisu optimalni, a proizvodni kapacitet se može povećati nekoliko puta bez da se poveća potreba za radnom snagom u dijelovima proizvodnog procesa poput postrojenja za uzgoj [31].

Kod računanja ekonomičnosti postrojenja treba uključiti i troškove energije koji su veći sjevernijim zemljama, pošto crnim vojničkim muhama više odgovara tropska klima i više temperature. Iako je potrošnja veća u sjevernijim zemljama, to bi se moglo nadoknaditi time da je potražnja za hranom baziranom na larvama veća u sjevernijim zemljama, jer je tamo locirana većina industrije hrane životinjskog podrijetla [34].

Alvarez [37] je zaključio da postoji potencijal za unaprjeđenje postrojenja u sjevernim zemljama, poboljšanjem energetske efikasnosti i obradom veće količine biootpada na određenoj površini.

Troškovi radne snage su značajni, ali se mogu smanjiti povećanjem razine automatizacije. U većim i više automatiziranim i robotiziranim postrojenjima čovjek se isključuje djelomično ili u potpunosti iz proizvodnog procesa. Neki uzgajivači crnih vojničkih muha prepoznali su da se dijelovi njihovog proizvodnog procesa mogu automatizirati pomoću robotskih manipulatora [38], [39], koji premještaju kašete s pleta na

pokretne trake. Tako isti broj radnika može obaviti više posla u istom razdoblju, što rezultira smanjenjem troškova radne snage i nižim proizvodnim troškovima, omogućujući veću konkurentnost na tržištu. Cijena radne snage u velikim postrojenjima bila bi znatno manja u odnosu na 30 do 65% koliko je procijenjeno za manja postrojenja.

2. Robotska manipulacija

2.1. Pregled senzorne i robotske tehnologije u uzgoju crnih vojničkih muha

S obzirom na ograničenu dostupnu literaturu i objavljene radove vezane uz industriju crnih vojničkih muha, teško je precizno odrediti trenutačno stanje robotike u tom području. U nastavku su navedeni ključni senzorski elementi koje bi suvremeno postrojenje za uzgoj crnih vojničkih muha trebalo imati za optimalan rad, kao i nekoliko primjera percepcije i akcije koji su dostupni na internetu.

2.1.1. Senzori

Crna vojnička muha je tropska vrsta [40] kojoj trebaju specifični životni uvjeti u odraslom i ličinačkom stadiju razvoja, kako bi se mogle uspješno razmnožavati i rasti [41], [42], [43].

Temperatura Estimirano je da je maksimalna temperatura pri kojoj će se larve optimalnom brzinom razvijati između 37.2 ± 0.3 i 44.0 ± 2.3 °C, minimalna je između 11.7 ± 0.9 i 12.3 ± 1.4 °C. Stopa rasta populacije najpovoljnija je na 30 °C s većom intrinzičnom stopom prirodnog prirasta i kraćim vremenom udvostručavanja. Ovi rezultati su ključni za optimizaciju uzgoja crnih vojničkih muha na velikoj skali pod različitim okolišnim uvjetima, a modeli omogućuju predviđanje ponašanja populacije unutar računalne simulacije [41].

Temperatura ima veliki utjecaj na dugovječnost crnih vojničkih muha u odraslom stadiju. Ženkama je prosječno vrijeme prije polaganja jajašaca značajno variralo s obzirom na različite temperature, najdulje je bilo pri temperaturi od 20 °C (16 dana), a najkraće pri 35 °C (5 dana). Plodnost je bila najveća pri od 30 °C (kada su ženke imale između 475 i 516 jajašaca) [41]. Zbog ovih razloga, ključno je imati senzor topline u povratnoj vezi sustava za grijanje i hlađenje.

Vlaga Bekker i suradnici [44] su utvrdili da različiti udio vode u supstratu (45 do 75%) ima utjecaj na razvoj ličnaka crne vojničke muhe te su utvrdili da iako nema utjecaja na larve, ima utjecaja na mikrobiotske procese unutar supstrata, a čime posljedično ima utjecaj na razvoj larvi. Larve su narasle veće kada je udio vode bio 65% i 75% nego kada je bio 45% i 55%, dok je najveća specifična stopa rasta bila pri udjelu vode od 45%, a najmanja pri udjelu od 75%.

Vlaga zraka ima utjecaj nakon što larve napuste supstrat u kojem se uzgajaju. Larve koje su bile u relativnoj vlazi od 25% duže su ostajale u stadiju nakon napuštanja supstrata, nego pri 40% ili 70% vlage. Isto vrijedi i za stadij u kojem su zakukuljeni. Kako bi proces uzgoja bio brži, poželjno je da ovi stadiji traju kraće. U odraslom stadiju muhe duže preživljavaju pri većoj vlazi, što je pogodno jer se mogu dulje razmnožavati, a time i povećati broj plodnih jajašaca [42].

Za osiguranje optimalnog rasta i razvoja ličinki u ličinačkom stadiju, potrebno je pratiti vlagu supstrata pomoću kapacitivnog senzora vlage tla. U ostalim stadijima važno je pratiti vlagu zraka te, po potrebi, regulirati razinu vlage u zraku ovlaživanjem ili odvlaživanjem u postrojenju.

2.1.2. Percepcija

Kako bi smanjili operativni trošak i povećali produktivnost u *Entocycle*-u [38] su razvili sustav za prebrojavanje ličnaka *Entosight® Neo* pomoću računalnog vida i vibracijskih pokretnih traka. Ovaj sustav automatski prebrojava ličinke, što isključuje čovjeka iz procesa te smanjuje grešku i ubrzava process prebrojavanja. Na taj način se postiže niži omjer pretvorbe hrane u ličinačku masu (FCR), smanjene smrtnosti ličnaka i veće mase insekata, što rezultira nižim troškovima i većom produktivnosti. Osim toga, poznavanje točnog broja larvi u svakoj kašeti omogućava precizno doziranje hrane, vode i zraka, što osigurava konzistentnu proizvodnju. Sustav je brz i precizan, omogućuje prebrojavanje 3000 novorođenih larvi u sekundi s točnošću od 95%.

2.1.3. Aktuacija

Neki od uzgajivača crnih vojničkih muha uvidjeli da dijelovi njihovog proizvodnog procesa mogu biti automatizirani pomoću robotskih manipulatora [38], [39], koji premještaju kašete s pleta na pokretne trake. U *Protix*-u [45] manipulaciju kašeta automatizirali su pomoću pokretnih traka, viljuškara na šinama i pretovarivača kašeta.

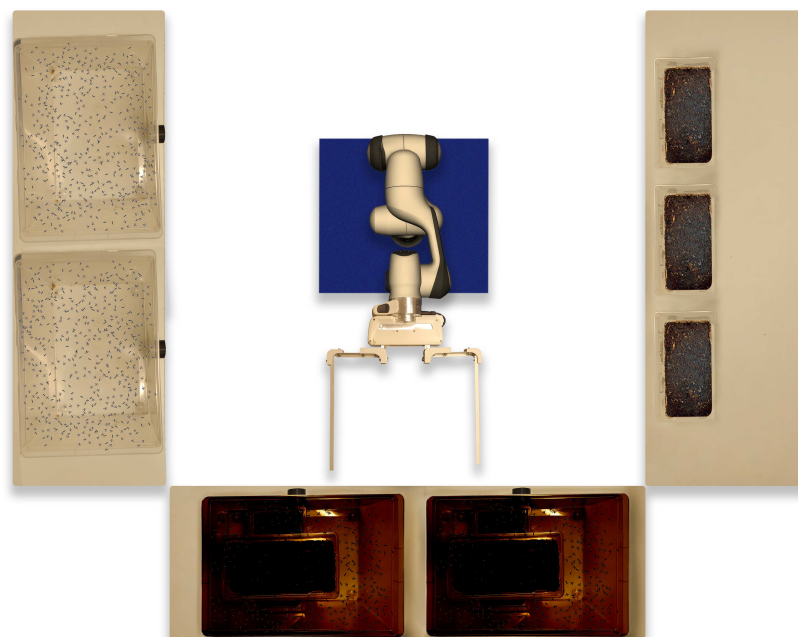
Entocycle [38] je prvi “potpuno” automatizirani sustav za razmnožavanje crnih vojničkih muha. Sustav se sastoji od metalnih kutija koje u kojima se razmnožavaju odrasle muhe. U definiranim vremenskim intervalima robot na šinama dozira definiranu količinu muha u kutije. Sustav sastoji od više kutija koje se u različitim periodima nadopunjavaju muhami, ovo osigurava konzistentnu proizvodnju jajašaca potrebnih za daljnju obradu biootpada.

Nakon što su larve narasle do svoje maksimalne veličine potrebno ih je nekako odvojiti od supstrata. Obično se koristi supstrat koji je usitnjen i manji od ličinaka, ovo olakšava separaciju ličinaka od supstrata, jer omogućava korištenje jednostavnih vibracijskih sita [38], rotirajućih sita [46] ili sustava vibrirajućih pokretnih traka u više faza [47].

2.2. Implementacija robotske manipulacije u sustavu uzgoja crnih vojničkih muha

Cilj ovog rada je uspostaviti bazu potpuno automatiziranog sustava za uzgoj crnih vojničkih muha. Primjer kako bi ovakav sustav mogao izgledati prikazan je na *Slici 2.1*. U središnjem dijelu slike nalazi se robot s hvataljkama za manipulaciju većih kutija. Desno su prikazane ličinke crne vojničke muhe koje razgrađuju biootpad. Robot koristi senzor vlage tla za provjeru vlage biootpada, a kamerom prati veličinu ličinki. Kada utvrdi da su ličinke dovoljno narasle, premješta ih u sljedeći stadij, u tamne komore prikazane dolje na slici.

U tamnoj komori ličinke prolaze kroz metamorfozu u odrasle muhe. Budući da metamorfoza neće nastupiti kod svih u isto vrijeme, ličinke se drže u tamnoj komori do 20 dana kako bi se gotovo sve metamorfozirale. Tamne komore sprječavaju razmnožavanje tijekom tog razdoblja. Nakon 20 dana, robot povezuje tamnu komoru s komorom za razmnožavanje, prikazanom lijevo na slici. Unutar 30 minuta nakon spajanja, muhe izlaze iz tamne komore u komoru za razmnožavanje, gdje se odvija proces parenja. Ova komora nije zamračena kako bi propustila što više svjetla, što omogućuje muhami da pronađu partnera za razmnožavanje.



Slika 2.1: Primjer kako bi mogao izgledati sustav

Nakon što muhe napuste tamnu komoru, komora za razmnožavanje se odvaja i povezuje s komorom za polaganje jajašaca, koju robot, prikazan na *Slici 2.2* i nalazi se iznad kutije sa supstratom za privlačenje. Supstrat, najčešće biootpad, signalizira muhamama da će njihovi potomci, kad se izlegnu, imati što za jesti, kao što je prikazano na *Slici 2.2*. Nakon četiri dana, robot odvaja komoru za polaganje jajašaca od komore za razmnožavanje i prenosi je na prebrojavanje, koje se može obaviti ručno ili pomoću kamera [38]. Nakon izlijevanja, larve se počinju hraniti pripremljenim supstratom i ciklus može započeti isponova.



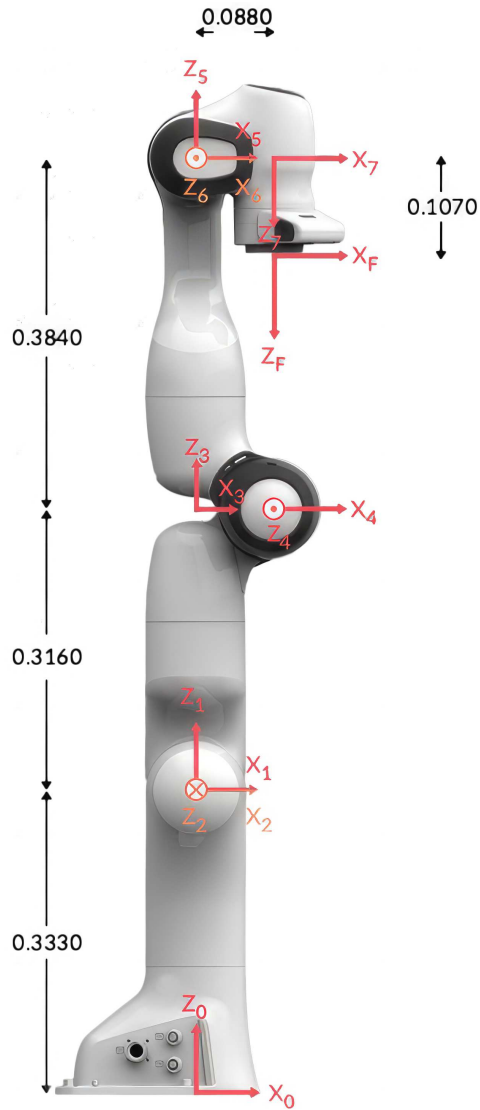
Slika 2.2: Spajanje komore za polaganje jajašaca (robot ju drži) i komore za razmnožavanje, ispod komore za polaganje jajašaca je kutija sa supstratom

2.3. Direktna i inverzna kinematika

Kako bi se moglo manipulirati komorama, prvo je potrebno omogućiti slanje vrha alata robota u određenu pozu. Kada se zada poza, tu informaciju potrebno je pretvoriti u zakrete zglobova. Direktna kinematika omogućuje upravljanje kretanjem vrha alata zadavanjem zakreta zglobova, dok inverzna kinematika omogućuje da se definiranjem željene poze vrha alata, dobiju potrebni zakreti zglobova kako bi vrha alata robota postigao tu pozu.

2.3.1. Direktna kinematika

Denavit-Hartenberg (DH) parametri koriste se u robotici za opis međusobne orijentacije osi zglobova i udaljenosti između njih, s krajnjim ciljem dobivanja transformacije vrha alata u koordinatnom sustavu baze robota. Za izračun transformacije koriste se četiri parametra: dva za translaciju (a i d) te dva za rotaciju (α i θ). DH parametri za Franka Research 3 robot dobiveni su prema Craigovoj konvenciji [48] i prikazani na *Slici 2.3*.



Joint	a (m)	d (m)	α (rad)	θ (rad)
Joint 1	0	0.333	0	θ_1
Joint 2	0	0	$-\frac{\pi}{2}$	θ_2
Joint 3	0	0.316	$\frac{\pi}{2}$	θ_3
Joint 4	0.0825	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_4
Joint 5	-0.0825	0.384	$-\frac{\pi}{2}$	θ_5
Joint 6	0	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_6
Joint 7	0.088	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_7
Flange	0	0.107	0	0

(a) Franka Research 3 kinematički parametri

(b) DH parametri robota za svaki zglob.

Slika 2.3: Kinematički parametri Franka Research 3 robota i pripadajući DH parametri za svaki zglob.

Uvrštavanjem parametara iz tablice 2.3b u Denavit–Hartenberg homogenu transformacijsku matricu 2.1, dobivaju se transformacije za svaki od zglobova.

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} \cos(q_i + \theta_i) & -\cos(\alpha_i) \sin(q_i + \theta_i) & \sin(\alpha_i) \sin(q_i + \theta_i) & a_i \cos(q_i + \theta_i) \\ \sin(q_i + \theta_i) & \cos(\alpha_i) \cos(q_i + \theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cos(q_i + \theta_i) & a_i \sin(q_i + \theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Množenjem dobivenih transformacijskih matrica, dobiva se transformacijska matrica od baze robota do vrha alata T_0^V , gdje V predstavlja koordinatni sustav vrha alata.

Uvrštavanjem zakreta zglobova q_i u ovu matricu, dobiva se pozicija vrha alata u koordinatnom sustavu baze robota.

2.3.2. Inverzna kinematika

Inverzna kinematika radi u suprotnom smjeru u odnosu na direktnu kinematiku: zadaje se poza vrha alata i traže se zakreti zglobova. Da bi se dobili odgovarajući zakreti zglobova, može se iskoristiti homogena transformacijska matrica T_0^V . Ova matrica može se razložiti na rotacijski i translacijski dio. Ako je poznata željena poza (rotacija i translacija), mogu se izvući jednadžbe iz homogene matrice transformacije i izjednačiti ih sa željenom rotacijom i translacijom.

Time se dobiva sustav jednadžbi s više nepoznanica, koji može imati više od jednog rješenja. To je zbog toga što robot može imati različite pozicije u slobodnom prostoru (engl. nullspace) s različitim zakretima zglobova. Kako bi se dobilo najpovoljnije rješenje, često se postavljaju dodatna ograničenja koja omogućavaju odabir optimalnog rješenja.

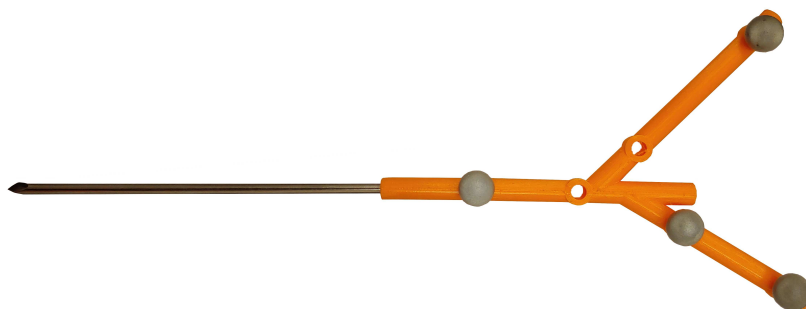
3. Kalipen

3.1. Opis sustava

Optidraw je način korištenja Kalipen olovke za virtualizaciju radnog prostora robota u ROS-u (engl. Robot Operating System) označavanjem prepreka u radnom okruženju robota. Sustav se sastoji od OptiTrack kamera, Kalipen olovke, optidraw ROS paketa i RViz simulatora.

OptiTrack OptiTrack je sustav praćenja pokreta pomoću infracrvenih kamera koje koriste triangulaciju za precizno određivanje položaja reflektivnih markera u prostoru. Triangulacija je metoda kojom se koristi nekoliko kamera za izračunavanje točne pozicije objekta. Svaka kamera snima sliku u kojoj su reflektivni markeri, ove slike se koriste za izračunavanje njihove trodimenzionalne pozicije. Što više kamera sustav koristi, to je preciznija procjena položaja markera. U ovom konkretnom slučaju, radi se o OptiTrack trio sustavu koji ima 3 kamere.

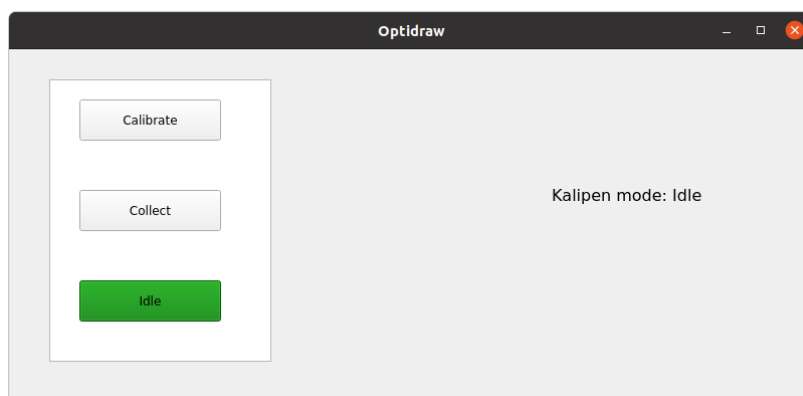
Kalipen olovka Kalipen olovka omogućuje označavanje radnog prostora robota. Na Kalipen su postavljena 4 reflektivna markera, koji omogućavaju kontinuiranu estimaciju poze predmeta od interesa. Kalipen olovka ima gumb, koji kada se pritisne šalje na Linux računalo preko Bluetootha informaciju da je gumb pritisnut. Ovaj gumb ima dvije funkcije, jedna je da mijenja način rada Kalipena, a druga je snimanje objekata u prostoru. Kada se gumb pritisne poze snimljene OptiTrack-om spremaju se u listu, kada se gumb otpusti poze se objavljuju na topic `/Kalipen/pose_transformed`. Radi jednostavnosti pri testiranju sustava korišten je Xbox Wireless Controller za pritisnjanje gumba i olovku na kojoj se nalaze OptiTrack markeri (*Slika 3.1*) za praćenje vrha olovke u radnom prostoru robota



Slika 3.1: Kalipen olovka

Optidraw Razvijeni optidraw paket sastoji se od grafičkog korisničkog sučelja (engl. Graphical User Interface, skraćeno GUI) za pokretanje kalibracije poze Kalipen-a i snimanje prepreka koje se prikazuju u RViz-u, uz to sadrži skripte za izračunavanje transformacija između world frame-a i baze robota.

GUI je izrađen pomoću PyQt paketa i implementiran unutar zasebnog ROS node-a, unutar GUI-a može se izabrati između 3 stanja Calibrate, Collect i Idle (*Slika 3.2*)



Slika 3.2: Optidraw grafičko sučelje

Nakon pokretanja `GuiNode.py`¹ skripte pokreće se i `ControllerNode.py`¹ koji upravlja logikom za prijelaz između stanja i funkcijama svakog od stanja.

Pri pokretanju `GuiNode`-a početno stanje je „Idle“, u ovom stanju se ne prikupljaju podaci o poziciji Kalipena. Da bi se mogle označavati prepreke u okolini robota, prvo je potrebno kalibrirati vrh Kalipena.

¹<https://github.com/larics/clickmark>

3.2. Kalibracija kalipena

OptiTrack sustav mjeri položaj i orijentaciju centroida OptiTrack markera na Kalipenu $\mathbf{T}_0^I$. Poza vrha Kalipena u koordinatnom sustavu svijeta dana je transformacijom $\mathbf{T}_0^P$. Da bi se dobila ta poza, prvo je potrebno dobiti transformaciju $\mathbf{T}_I^P$ od centroida OptiTrack markera na Kalipenu do vrha Kalipena, što se postiže kroz postupak kalibracije. Kalibracija se pokreće odabirom opcije "Calibrate" na grafičkom sučelju.

Nakon toga, potrebno je pritisnuti gumb na Kalipenu ili Xbox kontroleru kako bi započela kalibracija. Kalibracija se izvršava tako da se Kalipen rotira oko njegovog fiksiranog vrha. OptiTrack sustav bilježi položaje i orijentaciju markera $\mathbf{T}_{0,i}^I$, dok se snimljeni podaci spremaju u listu.

Ova metoda zasniva se na pretpostavci da su sve zabilježene transformacije usmjerene prema istoj točki (fiksiranom vrhu Kalipena) uz uvjet krute transformacije. Cilj optimizacije je minimizirati disperziju transformiranih točaka.

Budući da orijentacija vrha Kalipena nije bitna, traži se samo položaj vrha Kalipena. Rotacijski dio transformacije uzima se kao jedinična matrica, dok se translacijski dio računa minimizacijom:

$$\mathbf{P}^* = \arg \min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \|\mathbf{T}_{0,i}^I \cdot \mathbf{T}_I^P - \mathbf{T}_{0,j}^I \cdot \mathbf{T}_I^P\| \quad (3.1)$$

gdje je $\mathbf{P}^*$ optimalni translacijski dio transformacije $\mathbf{T}_I^P$. U daljnjim eksperimentima, kamere generiraju transformacije iz svijeta do centroida markera, koje se dodatno transformiraju do vrha Kalipena, čime se dobiva transformacija vrha Kalipena u koordinatnom sustavu svijeta $\mathbf{T}_0^P$ [49]. Dobivena transformacija dodaje se u datoteku `ControllerNode.py`, koja kontinuirano transformira pozu Kalipena i objavljuje na topic `/pose_transformed`.

3.3. Kalibracija baze

Kako sada `ControllerNode.py` šalje transformiranu pozu od koordinatnog sustava svijeta do vrha Kalipena, pozu baze robota u koordinatnom sustavu svijeta možemo dobiti na dva načina:

1. Algoritam za izračunavanje poze baze robota u koordinatnom sustavu svijeta pomoću postolja manipulatora i
2. Poravnanje snimljene baze robota sa STL modelom baze (ICP i RANSAC)

Algoritam za izračunavanje poze baze robota u koordinatnom sustavu svijeta pomoću postolja manipulatora Jedan način za izračunavanje poze baze robota u koordinatnom sustavu svijeta je pomoću skripte `calculateWorldTf.py`². Nakon pokretanja, skripta čeka objavu triju točaka redoslijedom: $\mathbf{T}_1$, $\mathbf{T}_2$ i $\mathbf{T}_3$ na topicu `/pose_transformed`, ove točke su zabilježene kao što je prikazano na *Slici 3.3*. Na temelju tih točaka, skripta računa pozu baze robota u koordinatnom sustavu svijeta. U nastavku je opisan postupak izračunavanja ove transformacije.

Skripta prvo izračuna vektor $\hat{\mathbf{c}}_1$ pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\hat{\mathbf{c}}_1 = \frac{\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1}{\|\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1\|} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}. \quad (3.2)$$

Budući da je nerealno pretpostaviti da točke $\mathbf{T}_1$, $\mathbf{T}_2$ i $\mathbf{T}_3$ označene rukom čine savršeni pravokutni trokut, potrebno je poduzeti dodatan korak kako bi se formirao ortonormalni koordinatni sustav. Kako bi se ovo riješilo, izračunava se privremeni vektor $\hat{\mathbf{c}}'_2$ koristeći jednadžbu:

$$\hat{\mathbf{c}}'_2 = \frac{\mathbf{T}_3 - \mathbf{T}_1}{\|\mathbf{T}_3 - \mathbf{T}_1\|} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}. \quad (3.3)$$

Sada se vektor $\hat{\mathbf{c}}_3$ može dobiti kao:

$$\hat{\mathbf{c}}_3 = \hat{\mathbf{c}}_1 \times \hat{\mathbf{c}}'_2. \quad (3.4)$$

Slično, vektor $\hat{\mathbf{c}}_2$ dobiva se kao:

$$\hat{\mathbf{c}}_2 = \hat{\mathbf{c}}_3 \times \hat{\mathbf{c}}_1, \quad (3.5)$$

što će dati rotacijsku matricu $\mathbf{R}_W^B$:

$$\mathbf{R}_W^B = [\hat{\mathbf{c}}_1 \quad \hat{\mathbf{c}}_2 \quad \hat{\mathbf{c}}_3] \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (3.6)$$

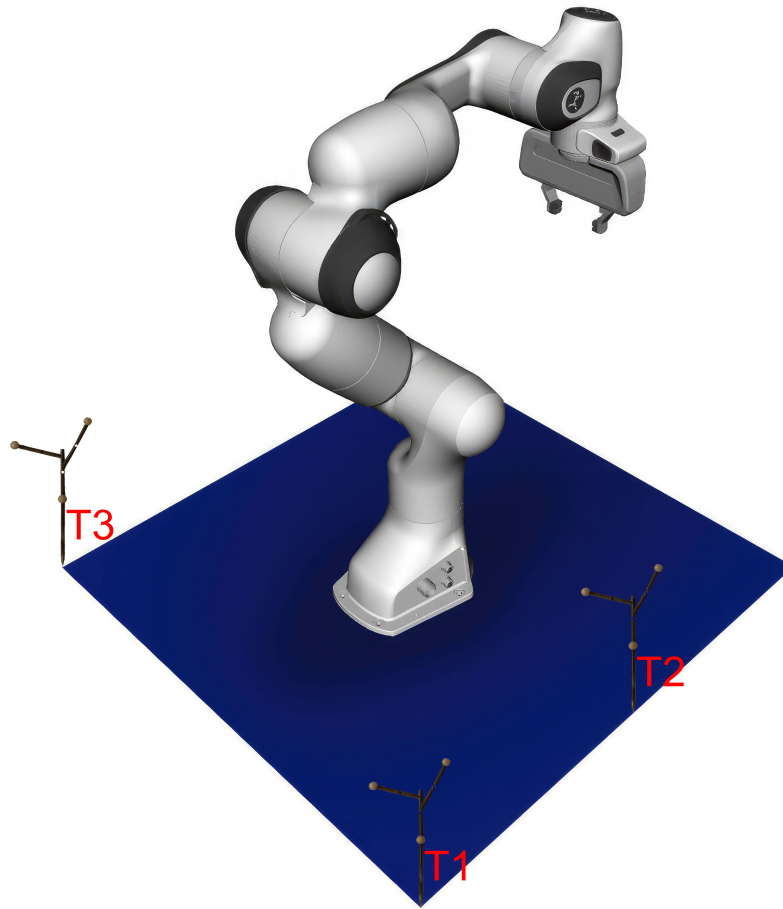
Komponenta translacije matrice transformacije određuje se kao:

$$\mathbf{p}_W^B = \left[\frac{T_{2x} - T_{1x}}{2} \quad T_{3y} - T_{1y} \quad 0 \right]^\top \quad (3.7)$$

Na temelju navedenog definiramo matricu transformacije kao:

$$\mathbf{T}_W^B = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_W^B & \mathbf{p}_W^B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4} \quad (3.8)$$

²<https://github.com/larics/clickmark>



Slika 3.3: Pozicije točaka koje je potrebno snimiti na postolju manipulatora kako bi kalibrirali pozu baze manipulatora u koordinatnom sustavu svijeta (OptiTrack-a).

Poravnanje snimljene baze robota sa STL modelom baze (ICP i RANSAC) Drugi način je šaranjem baze robota pomoću Kalipena. Snimljena baza sprema se u .bag datoteku, koja se obrađuje i dodaje u listu kao skup točaka. Dobiveni skup točaka se objavljuje kao `PointCloud2` poruka. Paket `cloud_match_ros`³ prima ovu poruku i koristi metode lokalne registracije (ICP) i globalne registracije (RANSAC) za usporedbu svih točaka unutar te poruke s točkama dobivenim iz .stl modela (Slika 3.4). Rezultat uparivanja točaka je transformacija iz svijeta u bazu robota.

ICP - metoda lokalne registracije Kao metodu lokalne registracije paket koristi algoritam Iterative Closest Point (ICP), koji minimizira razliku udaljenosti između dva skupa točaka, odnosno *point cloud*-ova. Ako imamo dva skupa točaka X i P :

$$X = \{x_1, \dots, x_n\}$$

³<https://github.com/larics/clickmark>

$$P = \{p_1, \dots, p_n\}$$

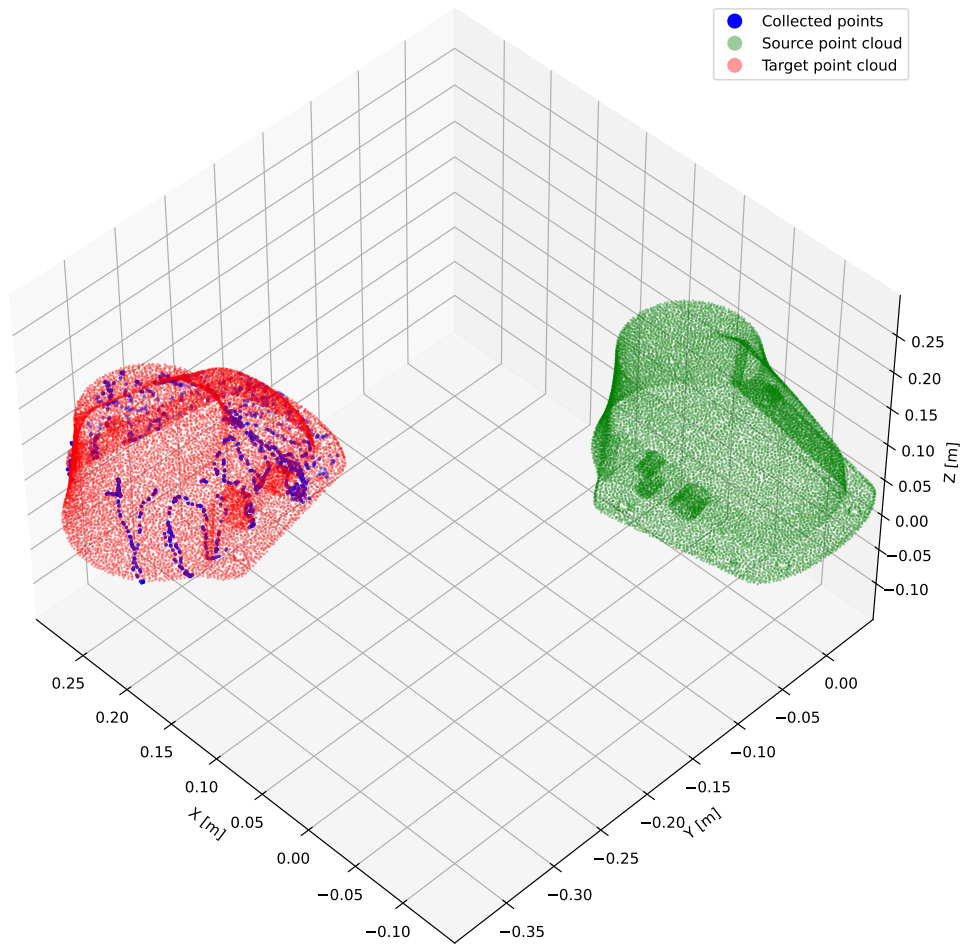
Algoritam radi tako da skup točaka X fiksira, dok za drugi skup P provjerava za svaku od točaka p_i koliko je udaljena do svih točaka u skupu X . Sve točke u skupu P koje imaju zajedničke najbliže točke u skupu X grupira i pronade im centroid. Skup P translira i rotira tako da se dobiveni centriodi grupiranih točaka poravnaju s korespondiranim točkama u skupu X . Algoritam ponavlja ovaj proces sve dok greška, odnosno udaljenost između svih točaka u skupovima nije manja od definirane vrijednosti. Funkcija koju pritom minimizira je:

$$E(R, t) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|x_i - Rp_i - t\|^2 \quad (3.9)$$

Gdje je R rotacija, t translacija, x_i i p_i korespondirane točke, a N_p broj točaka skupa P .

RANSAC - metoda globalne registracije, ICP je metoda lokalne registracije koja se oslanja na početno poravnanje skupova točaka, ostvareno korištenjem neke od metoda grubog poravnanja. Te metode se još nazivaju metodama globalne registracije. Ovim algoritmima nije potrebna inicijalizacija poravnanjem, ali krajnje poravnanje im je manje precizno, stoga se koriste kao inicijalizacija za lokalne metode.

U paketu `cloud_match_ros` za metodu globalne registracije koristi se RANSAC algoritam, koji primjenjuje nekoliko heurističkih metoda, čime se povećavaju preciznost i učinkovitost procjene. Tijekom svake iteracije, algoritam nasumično odabire n točaka iz skupa snimljenih točaka baze robota i traži njihove podudarnosti s točkama iz STL modela baze. Prije usporedbe, algoritam pretvara odabrane točke u FPFH (Fast Point Feature Histogram) značajke. FPFH značajke omogućuju brže i robusnije poravnanje jer koriste opisnike koji bi trebali biti jedinstveni i invarijantni na translaciju i rotaciju.



Slika 3.4: Vizualizacija sakupljenih točaka (plavo), početnog skupa točaka dobivenog iz .stl modela (zeleno) i skupa točaka dobivenog nakon registracije (crveno) korištenih za kalibraciju baze robota

3.4. Algoritam za označavanje prepreka

Nakon završetka kalibracije korisnik može započeti označavanje prepreka, tako da pritisne gumb na Kalipenu, ovo će prebaciti sustav u stanje „Collect“. `ControllerNode.py` prikuplja točke sve dok se ne otpusti gumb na Kalipenu, točke se spremaju u listu, koja se objavljuje na `sensor_msgs/PointCloud` poruku.

Skripta `obstacleMaker.py`⁴ obrađuje `PointCloud` poruku koja sadrži skup točaka P , gdje je svaka točka p definirana s:

$$\mathbf{p} = [x \quad y \quad z] \in \mathbb{R}^3. \quad (3.10)$$

⁴<https://github.com/larics/clickmark>

Kako bi se kvadrom što točnije opisao dobiveni skup točaka, koriste se tri različite metode koje osiguravaju maksimalnu preciznost i računalnu optimalnost:

1. Linearna regresija - za definiranje Z osi,
2. Rotiranje X i Y osi oko Z osi - za definiranje optimalnog smjera X i Y osi i
3. Minimizacija volumena kvadra Nelder-Mead metodom

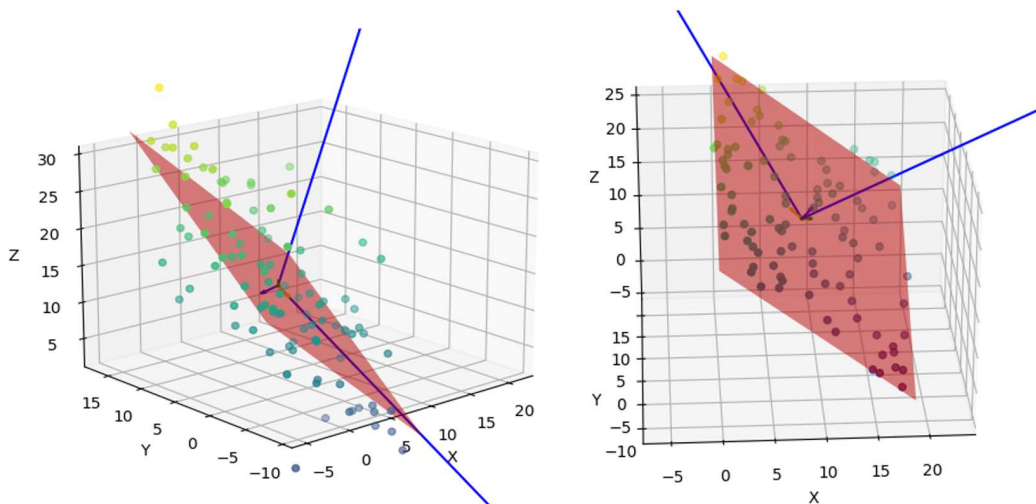
Definiranje Z-osi pomoću linearne regresije Prvi korak u obradi dobivenog skupa točaka je izračun centroida, koji se uzima kao srednja vrijednost svih točaka, i definiran je s:

$$c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i \quad (3.11)$$

Slijedi opisivanje tog skupa pomoću linearne regresije, kako bi se dobili koeficijenti 2D ravnine. Na temelju dobivenih koeficijenata: θ_0 , θ_1 and θ_2 i x i y koordinata, kao izlaz se dobiva z komponenta definirana kao:

$$z = \theta_0 + \theta_1 x + \theta_2 y \quad (3.12)$$

Ova metoda se očekivano dobro pokazala za opisivanje ravnine (*Slika 3.5*, desno), ali i kada podatci nisu striktno bili jednodimenzionalni linearna regresija je dobro opisivala usmjerenost podataka (*Slika 3.5*, lijevo).

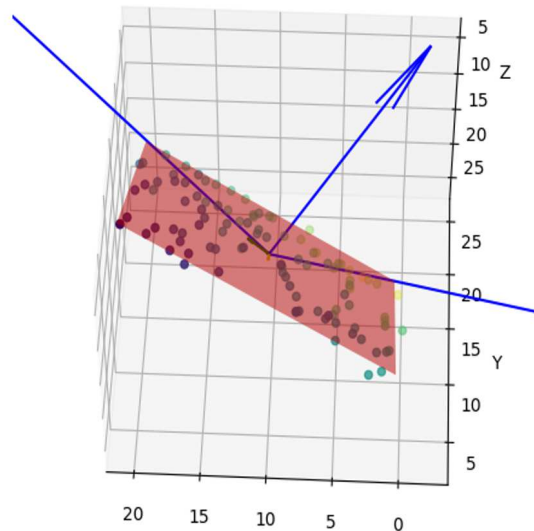


Slika 3.5: Ravnine (crveno) opisuju sintetički generirane skupove točaka korištene u svrhu testiranja

Nakon što su određeni ravnina i centroid koji opisuju dobiveni skup točaka, definiraju se dva vektora koji leže na toj ravnini. Njihove krajnje x i y koordinate postavljaju

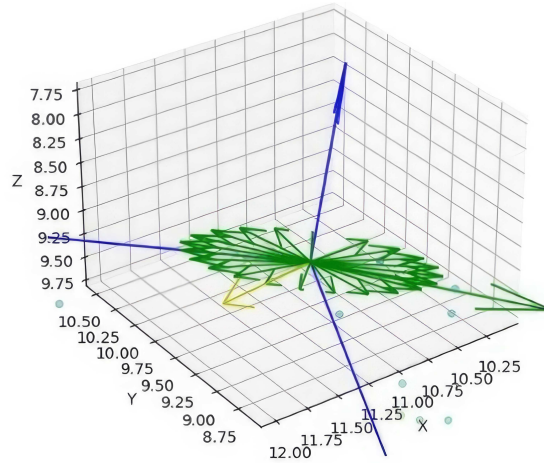
se u beskonačnost ($[1e30, 1e30]$, $[1e30, -1e30]$) kako bi se osiguralo da kut između ta dva vektora nije 0 ili 180 stupnjeva, jer bi u tim slučajevima vektorski umnožak bio 0. Vektorski umnožak tih dvaju vektora dat će normalu, prikazanu na *Slici 3.6* i definiranu kao:

$$\mathbf{n} = \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2. \quad (3.13)$$



Slika 3.6: Generirana normala i dva vektora koji leže na ravnini

Definiranje najboljeg smjera X i Y osi Sada kada je definirana normala (Z os), treba još odrediti najbolji smjer za X i Y os. X i Y osi su okomite na Z, a optimalni X i Y određuju se tako da se vektor koji predstavlja Y os rotira oko Z osi, kao što se vidi na *Slici 3.7*. Ortogonalni vektori koji predstavljaju Y os dobiveni su tako da se za svaki korak rotacije oko Z osi dobije skew simetrična matrica, Uzimanjem eksponencijale ovih matrica dobit će se rotacijske matrice. Na kraju množenjem dobivenih rotacijski matrica s proizvoljnim vektorom ortogonalnim na Z os dat će sve vektore okomite na Z os, odnosno Y osi.



Slika 3.7: Vektori koji predstavljaju Y os (zeleno) rotirani oko Z osi (plavo) s korakom od 16 stupnjeva

Ove Y osi pomnožene su s vektorom koji definira Z os, kao rezultat daju X osi:

$$\mathbf{X} = \mathbf{Y} \times \mathbf{Z}. \quad (3.14)$$

Optimalni smjer definira se najmanjim volumenom kvadra. Izračunavanje volumena kvadra započinje izračunavanjem skalarnog umnoška vektora od centroida do svih točaka u skupu s trenutnim vektorom koji predstavlja Y os. Ovaj skalarni umnožak daje projekciju svake točke na trenutni vektor, što omogućuje određivanje udaljenosti od ravnine na koju je taj vektor okomit:

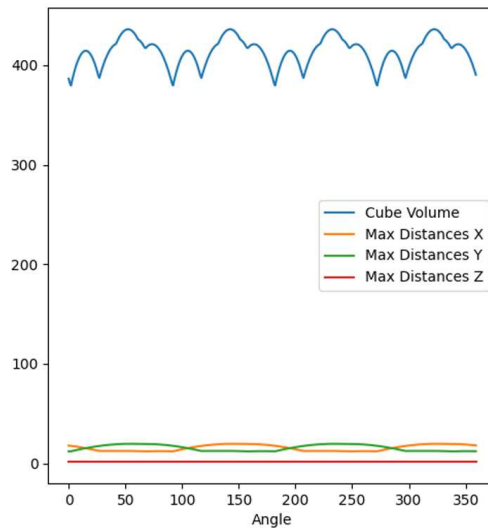
$$\text{dist}_X = (\mathbf{P} - \mathbf{c}) \cdot \mathbf{X}, \quad (3.15)$$

$$\text{dist}_Y = (\mathbf{P} - \mathbf{c}) \cdot \mathbf{Y}, \quad (3.16)$$

$$\text{dist}_Z = (\mathbf{P} - \mathbf{c}) \cdot \mathbf{Z}. \quad (3.17)$$

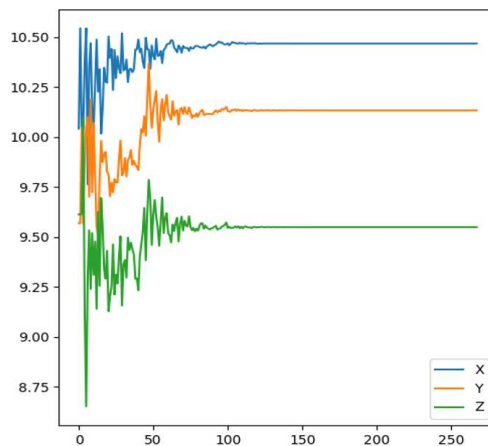
Ako se uzmu maksimalne vrijednosti udaljenosti od ravnina do točaka mogu se izračunati volumeni kvadra za različite orijentacije X i Y osi. Optimalan smjer bit će onaj koji minimizira volumen kvadra.

Na *Slici 3.8* vidi se da, kako se vektor rotira tako se mijenja i volumen kvadra. Odabire se onaj volumen kvadra koji je najmanji, time se dobije i optimalni smjer X i Y osi.



Slika 3.8: Graf ovisnosti volumena kvadra o kutu zakreta (plavo), grafovi ovisnost maksimalnih udaljenosti u X (narančasto), Y (zeleno) i Z (crveno) smjeru ovisno o kutu zakreta

Minimizacija volumena kvadra Nelder-Mead metodom Idući korak u optimizaciji je perturbacija centroida u optimalni položaj (*Slika 3.9*), jer je izračunati centroid ponekad malo pomaknut od centra podataka. Na primjer, ako je raspodjela točaka gušća u jednom dijelu skupa točaka nego u drugima, taj gušći skup točaka će povući centroid. Da bi se ovo ispravilo na kraju se izvodi optimizacija perturbiranja položaja centroida, koristeći SciPy funkciju `minimize`, s ciljem minimiziranja volumena kvadra.

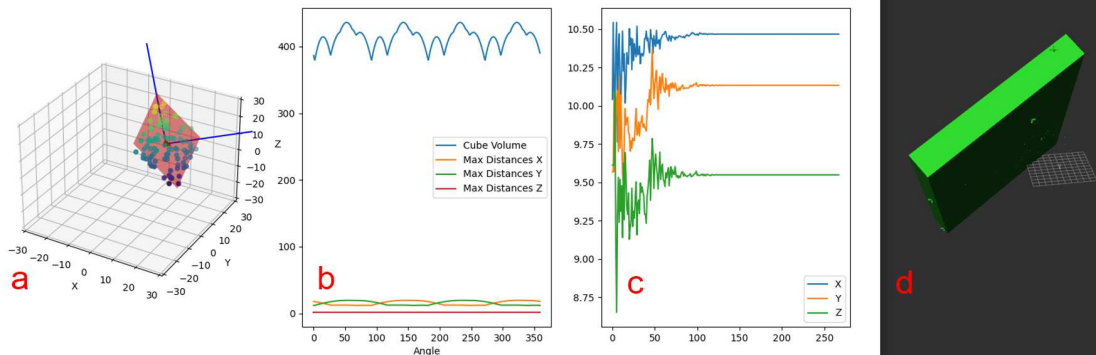


Slika 3.9: Optimizacija centroida i stabilizacija nakon 120-te iteracije

I konačno s koordinatama centroida c , rotacijskom matricom R i dimenzijama w , h i l dobivenih rotacijom vektora koji predstavljaju X i Y os oko Z osi, generira se objekt

u RVizu (*Slika 3.10d*), definiran s:

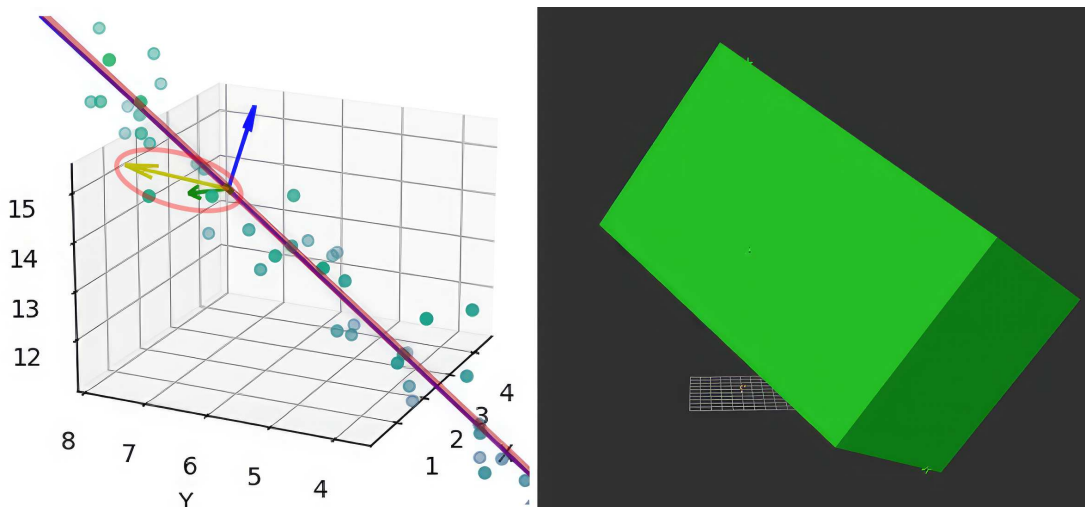
$$O = (c, \mathbf{R}, w, h, l). \quad (3.18)$$



Slika 3.10: a) Skup točaka i ravnina koja ih opisuje (crveno), b) grafovi ovisnosti volumena i maksimalnih udaljenosti o rotaciji, c) graf pomicanja centroida minimizacijom po 'Nelder-Mead' metodi i d) ravnina generirana u RVizu

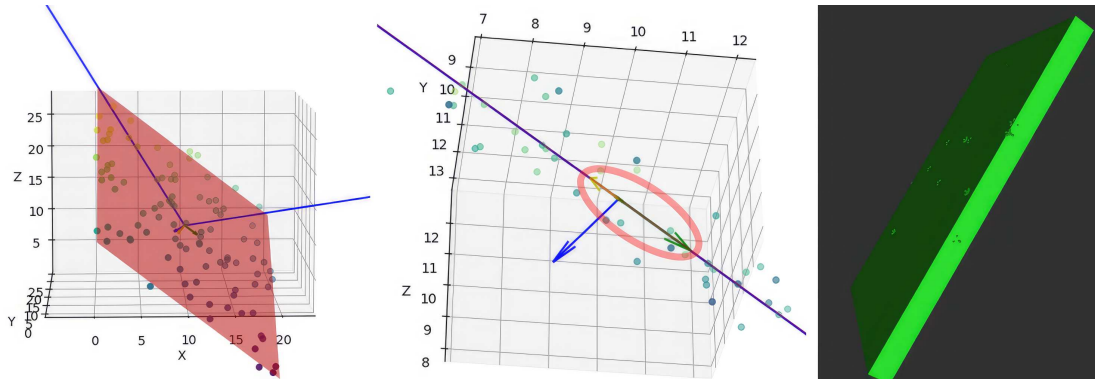
3.4.1. Usporedba s metodom određivanja orijentacije pomoću svojstvenih vektora

Predstavljena metoda uspoređena je s metodom svojstvenih vektora tako da je dobivena matrica kovarijacije, te su pomoću nje izračunati svojstveni vektori. Pomoću svojstvenih vektora određena je orijentacija podataka u prostoru te su tako dobivene tri glavne osi podataka. Pokazalo se da metoda svojstvenih vektora lošije radi od prethodno objašnjene metode, a u nastavku je usporedba metode svojstvenih vektora i predstavljene metode.



Slika 3.11: Svojstveni vektori i kvadar generiran pomoću svojstvenih vektora

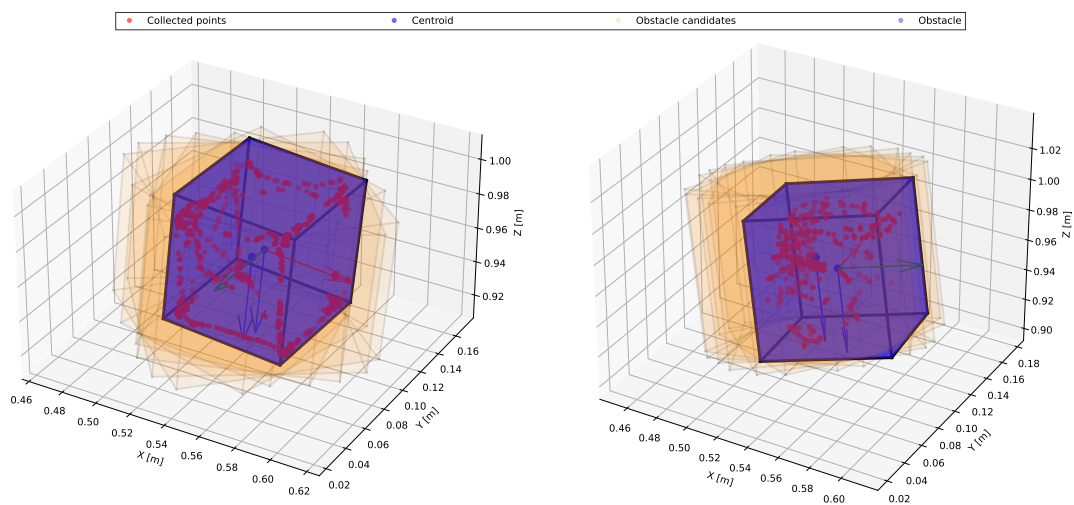
Na *Slici 3.11* se vidi kako svojstveni vektori nisu uspjeli dobro prikazati usmjerenost ravnine točaka (žuti i zeleni vector na lijevoj slici), stoga je generiran kvadar puno većeg volumena nego što bi optimalno bio. Na *Slici 3.12* je isti skup točaka, gdje je kvadar opisan predstavljenom metodom. Vidi se da se kvadar bolje prilagodio podatcima, jer su X i Y osi u ravnini s točkama (na srednjoj slici zeleni i žuti vector)



Slika 3.12: Vektori generirani predstavljenom metodom i kvadar generiran u RVizu

3.4.2. Generiranje objekta na temelju nepotpunog skupa podataka

Ako se ne iscrtaju svi bridovi objekta, generirani objekt neće biti pravilno orijentiran jer linearna regresija pokušava poravnati ravninu na temelju nepotpunog skupa podataka. Zbog toga je objekt na *Slici 3.13* desno nagnut, iako je snimljen isti objekt kao i na lijevoj slici.



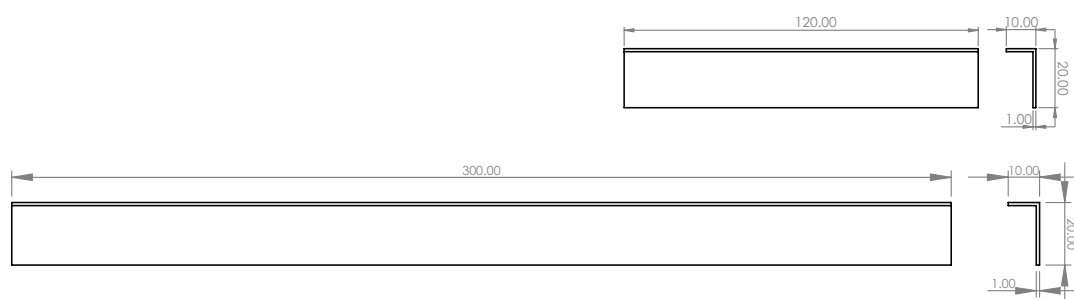
Slika 3.13: Usporedba generiranja objekta. Lijevo je objekt generiran na temelju skupa točaka koji u potpunosti opisuje snimljeni objekt, desno je objekt generiran na temelju skupa točaka koji ne opisuje u potpunosti isti taj snimljeni objekt

Rješenje za ovaj problem može biti preskakanje koraka linearne regresije i fiksiranje Z osi (`z_axis = np.array([0, 0, 1])`), pod uvjetom da su svi iscrtavani objekti vodoravno položeni, a ne pod nagibom.

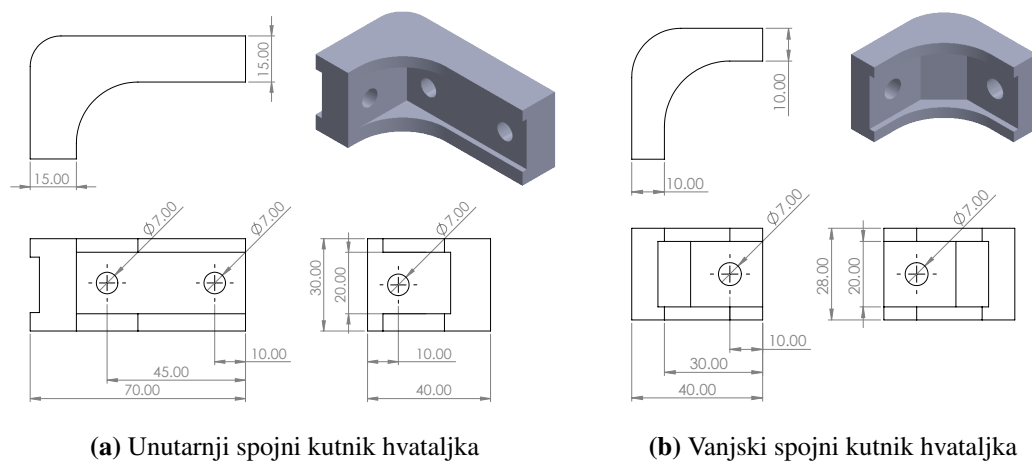
4. Korišteni alati i konektori

4.1. Povećavanje raspona hvatanja Franka hvataljke

Budući da su kutije koje manipulator treba nositi dosta velike, a Franka hvataljka ima 80 mm maksimalan raspon prstiju, konstruirane su hvataljke koje omogućuju prihvat većih objekata. Hvataljka se sastoji od aluminijskih rubnih profila (*Slika 4.1*) i 3D printanih spojnih kutnika (*Slika 4.2*).

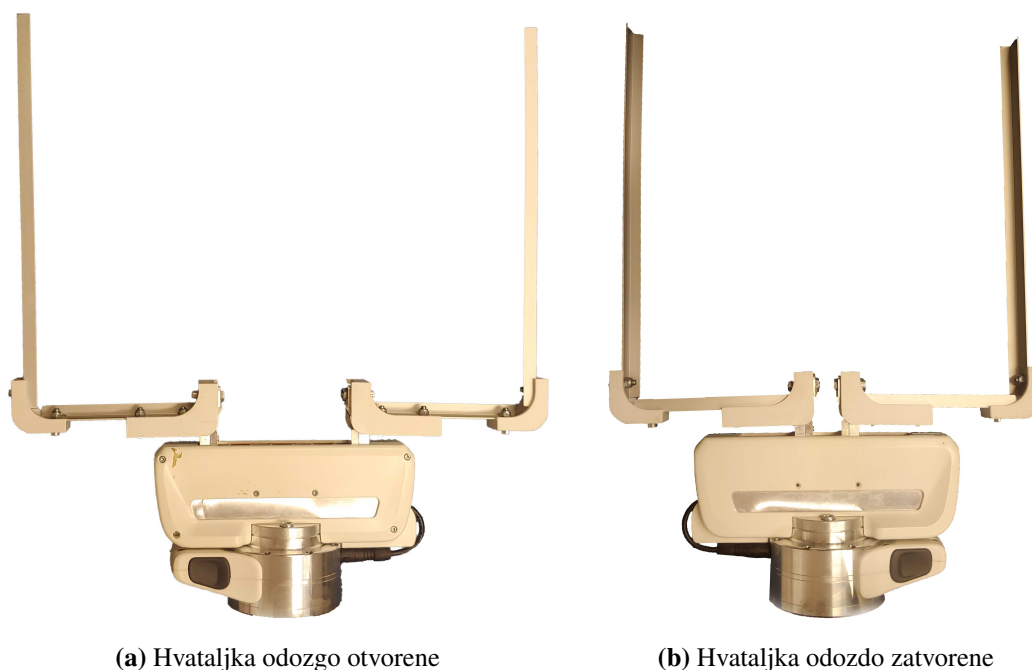


Slika 4.1: Dimenzije aluminijskih rubnih profila



Slika 4.2: Dimenzije spojnih kutnika hvataljka

Na *Slici 4.3* prikazana je sastavljena hvataljka učvršćena pomoću vijaka u prste Franka hvataljke.



Slika 4.3: Hvataljka učvršćene na Franka hvataljku

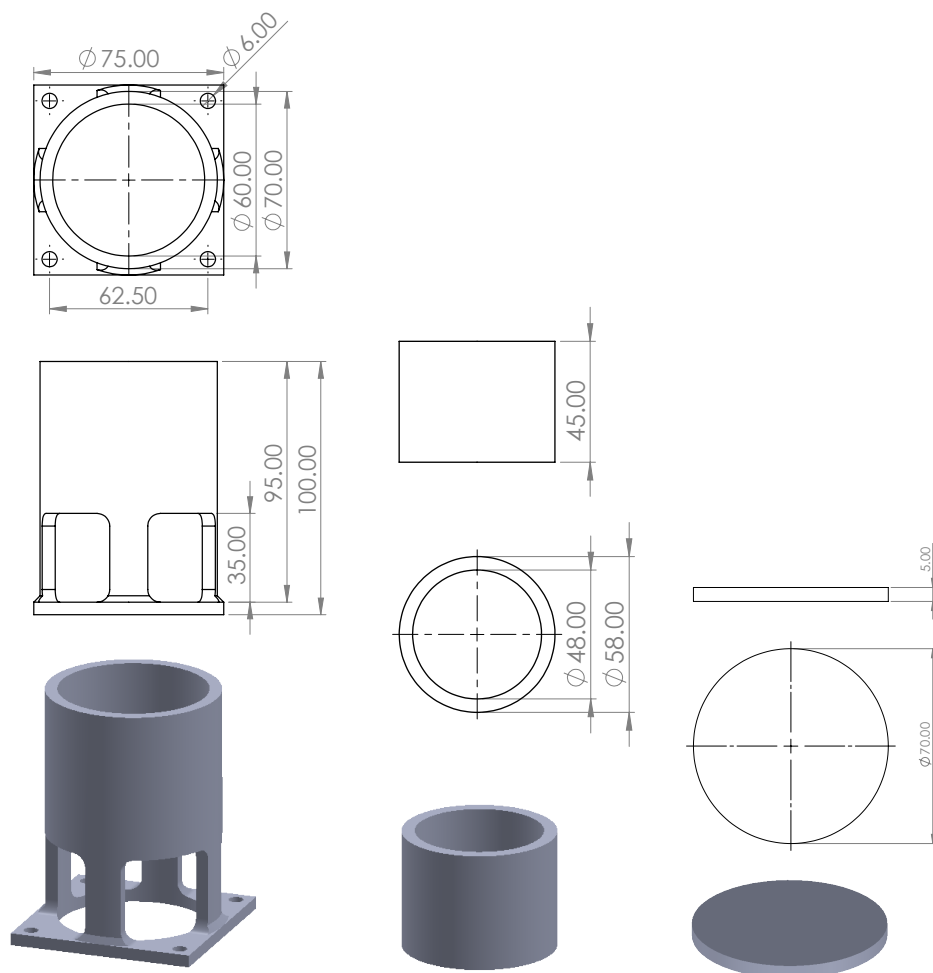
4.2. Spajanje dviju kutija pomoću konektora

Životni ciklus crnih vojničkih muha sastoji se od nekoliko stadija, kao što je navedeno u poglavlju 1.1. Jedan od zadataka robota je premještanje ličinaka odnosno muha iz jednog stadija razvoja u drugi.

Jedna do tih tranzicija koju treba napraviti jest premjestiti ih iz tamne komore u komoru za razmnožavanje. Ličinke crne vojničke muhe u zadnjem stadiju ličinačkog razvoja traže suhi medij i tamu. Stoga ih se stavlja u tamne komore, kako bi se preobrazile. Crne vojničke muhe se drže u ovoj komori dok sve ne prođu preobražaj. Komora je tamna kako se muhe u međuvremenu ne bi počele razmnožavati. Nakon što su bile 25 dana u tami, tamna komora se povezuje s komorom za razmnožavanje. Kako bi se privukle iz tamne komore u komoru za razmnožavanje koristi se svjetlo i tunel koji povezuje ove dvije komore [50].

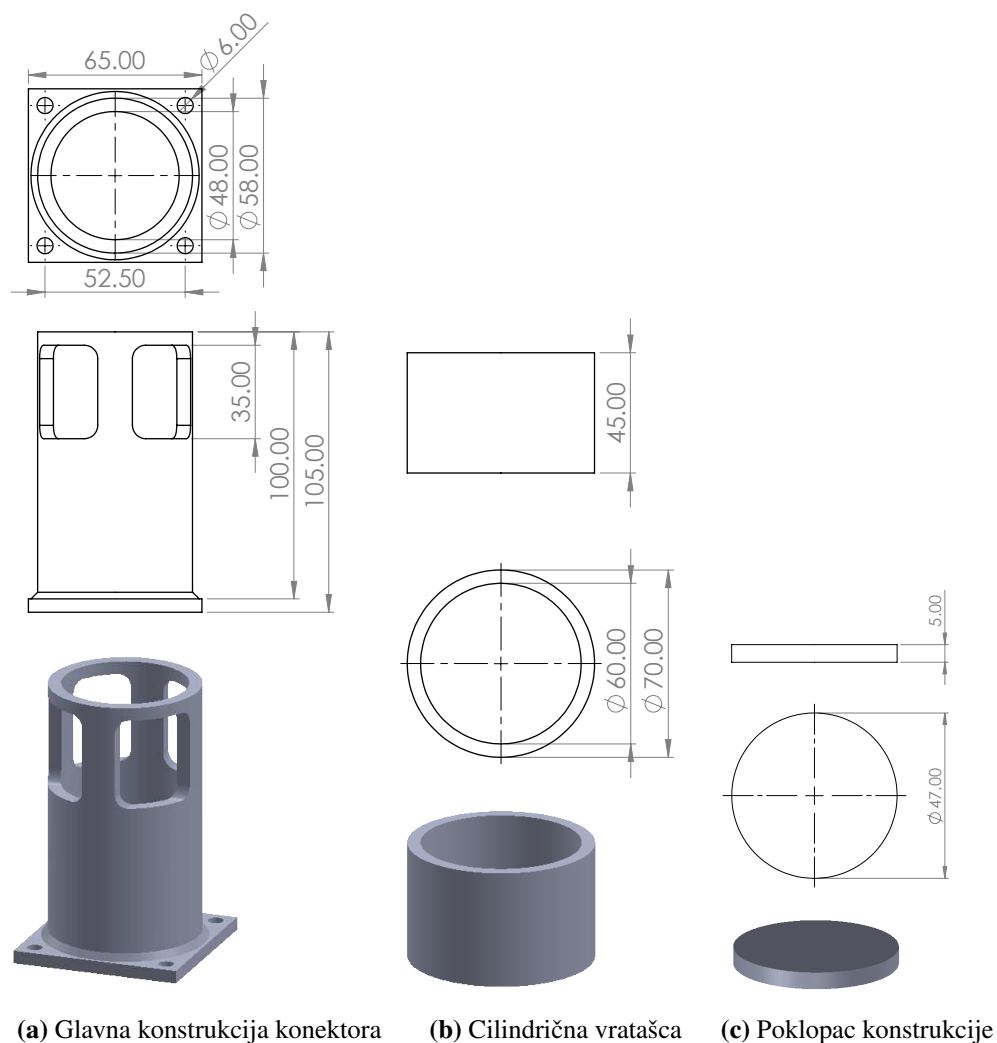
U svrhu povezivanja tamne komore i komore za razmnožavanje razvijen je konektor koji ih povezuje (*Slika 4.4* i *Slika 4.5*). Konektori su osmišljeni tako da ne propuštaju svjetlo kada konekcija nije uspostavljena, a da propuštaju maksimalno svjetla kada je konekcija uspostavljena. Opruge guraju cilindrična vratašca (*Slika 4.4b*, *Slika*

4.5b), koja ne dozvoljavaju prolaz muhama kada konekcija nije uspostavljena. Konektori su cilindričnog oblika, kako bi robot i dalje mogao uspostaviti konekciju u slučaju da je jedna kutija nagnuta. Uz to je konstruiran i ljevkasti 3D model koji se pričvrsti na ženski konektor i robotu pomaže da uspostavi konekciju (Slika 4.6).

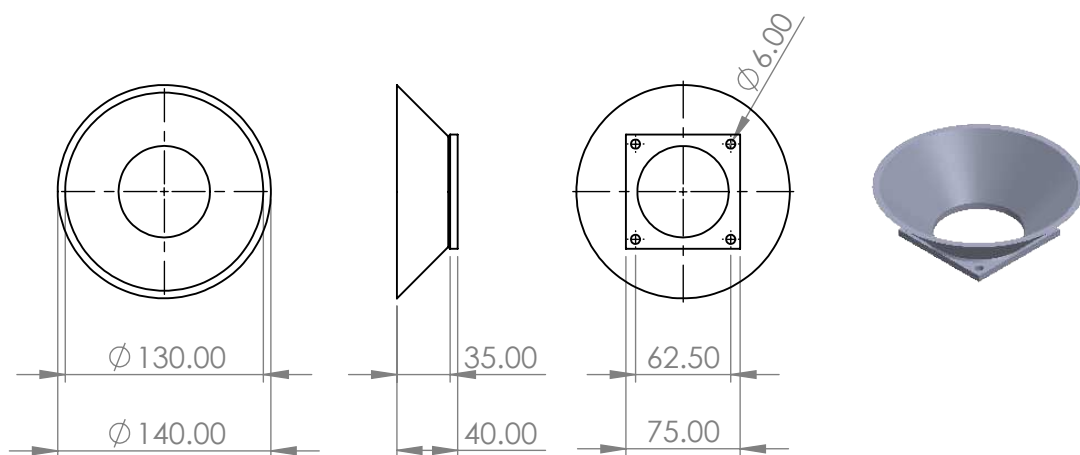


(a) Glavna konstrukcija konektora (b) Cilindrična vratašca (c) Poklopac konstrukcije

Slika 4.4: Dimenzije dijelova ženskog konektora



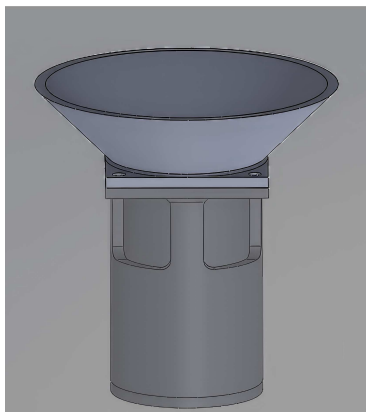
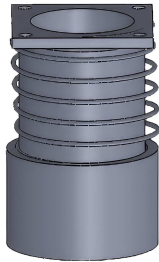
Slika 4.5: Dimenzije dijelova muškog konektora



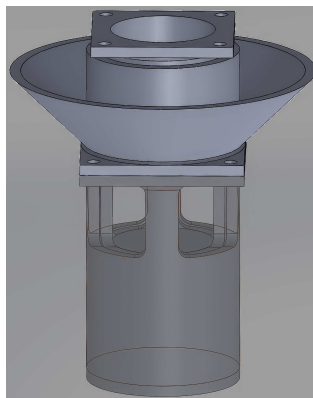
Slika 4.6: Dimenzije ljevkastog dijela ženskog konektora

Na *Slici 4.7a* prikazan je konektor dok konekcija nije uspostavljena, a na *Slici*

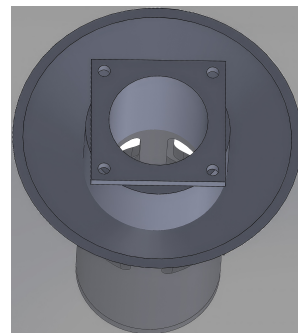
4.7b je prikazan konektor dok je konekcija uspostavljena. Na *Slici 4.7c* vidi se kako konektori propuštaju svjetlo dok je konekcija uspostavljena.



(a) Konektor dok konekcija nije uspostavljena



(b) Konektor dok je konekcija uspostavljena



(c) Konektor dok svjetlo prolazi

Slika 4.7: Sastavljeni konektor (donji dio slike predstavlja poluprozirnu kutiju na koju je pričvršćen konektor)

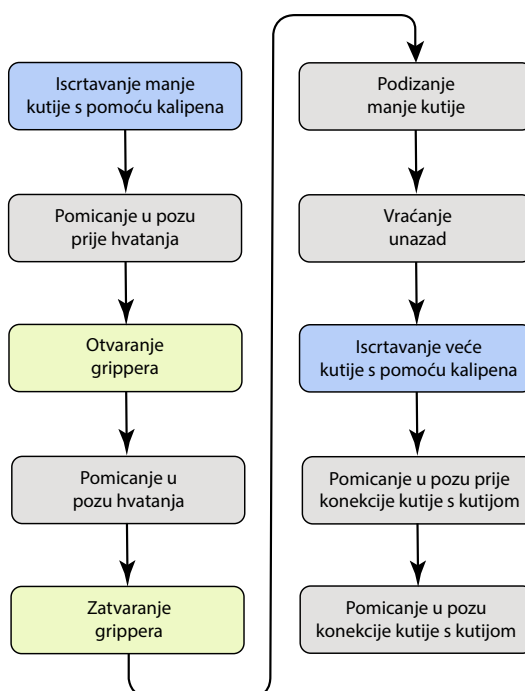
5. Eksperiment

Postavljanje eksperimenta se sastojalo iz dva dijela, prvo je bilo definirati pozu hvataljke robota u kojoj će robot moći primiti kutiju, drugo je razviti algoritam za premještanje kutija te njihovo povezivanje pomoću konektora. U nastavku je opisan algoritam pomoću kojeg je proveden eksperiment, a nakon toga i je opisan i sam eksperiment.

5.1. Opis algoritma za izvršavanje eksperimenta

5.1.1. Diagram izvršavanja zadatka

Na *Slici 5.1* s pomoću dijagrama opisani su pojedini koraci potrebni kako bi manipulator prenio kutiju i napravio konekciju između nje i druge kutije.



Slika 5.1: Diagram eksperimenta

5.1.2. Opis algoritma

Nakon što skripta `obstacleMaker.py` generira novi objekt u RViz planning sceni, informacije o tom objektu se objavljuju na topicu `/move_group/monitored_planning_scene`. Python skripta `franka_bsf.py` pretplaćuje se na ovaj topic i poziva *callback* funkciju svaki put kad je objavljen.

U ovom eksperimentu, *callback* funkcija se poziva dvaput. Nakon što se Kalipenom iscrta manja kutija, *callback* funkcija se poziva prvi put, pri čemu manipulator hvata i podiže manju kutiju. Kada se iscrta veća kutija, funkcija će biti pozvana drugi put. Manipulator sada drži manju kutiju i tu manju kutiju prinosi većoj kako bi se uspostavila konekcija. Radi ovoga je uvedena varijabla `self.callback_counter`, koja bilježi koliko je puta pozvana funkcija.

Unutar *callback* funkcije iz `/move_group/monitored_planning_scene` topica se dobivaju informacije o poziciji, orijentaciji i dimenziji objekata. Na temelju tih informacija definiraju se sve moguće poze hvataljke koje omogućuju hvatanje kutije.

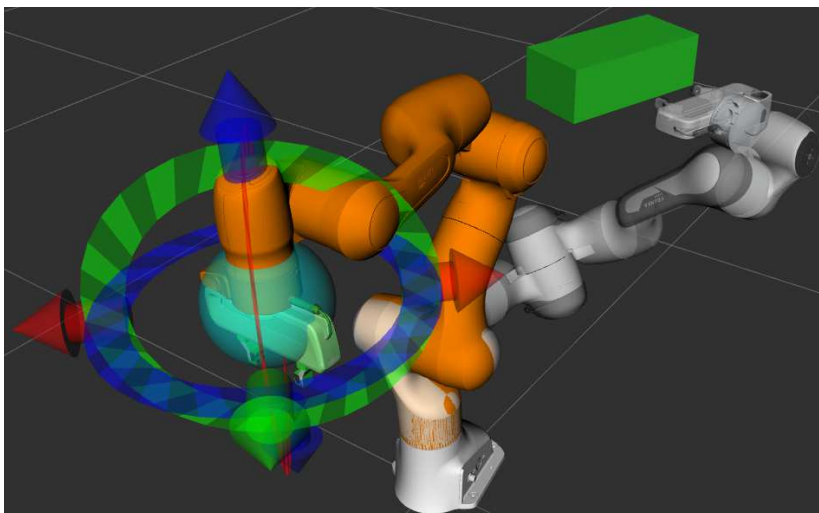
U *while* petlji, prilikom prvog poziva *callback* funkcije (`if self.callback_counter == 1`), algoritam očekuje dimenzije manje kutije te stoga traži stranicu koja odgovara dimenzijama hvataljke (`target = 0.33 + inflation`). Prilikom drugog poziva (`if self.callback_counter == 2`), algoritam očekuje dimenzije veće kutije i traži stranicu s dimenzijama najveće strane velike kutije (`target = 0.50 + inflation`), kako bi manipulator mogao približiti manju kutiju toj stranici.

Kada je stranica odabrana i poznata je njena poza, robota možemo postaviti u položaj u kojem je manipulator usmjeren prema toj odabranoj stranici kutije. Ostatak algoritma je izvršavanje koraka navedenih u diagramu na *Slici 5.1*.

5.2. Izvođenje eksperimenta

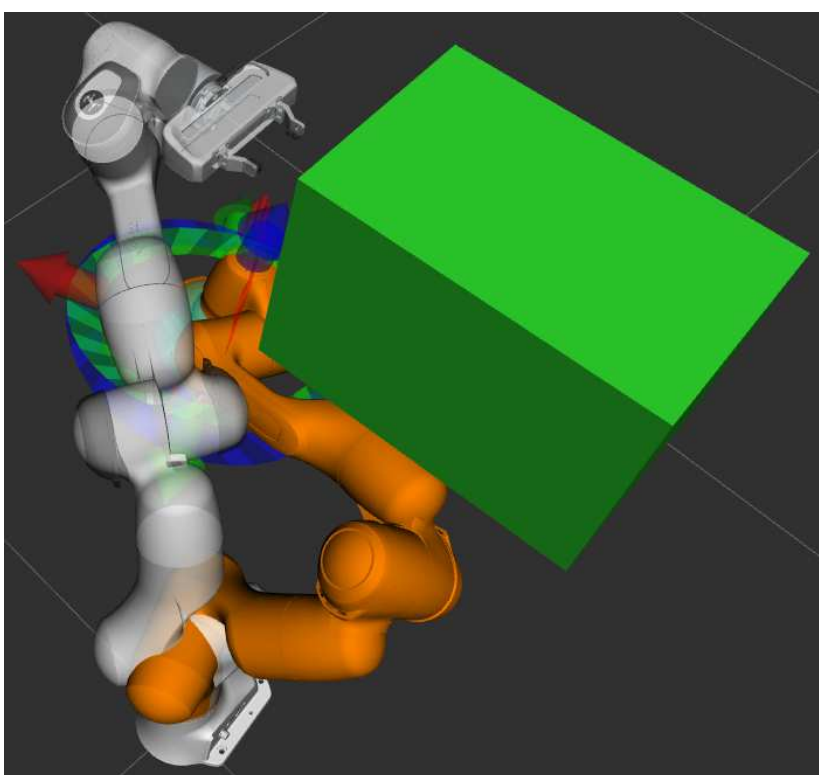
5.2.1. Ispitivanje u simulaciji

Prvi dio eksperimenta bio je ispitati u simulaciji, hoće li algoritam odabrati zadanu stranicu. Na *Slici 5.2* se vidi kao je gripper usmjeren prema većoj stranici kutije, zato jer je algoritam odbacio manju stranicu iako je bliža.



Slika 5.2: Simulacija prilaženja većoj stranici manje kutije

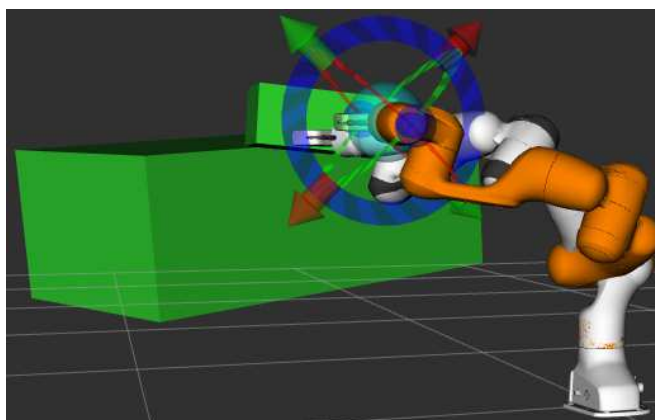
Isto tako na *Slici 5.3* se vidi kao je gripper usmjeren prema manjoj stranici kutije, jer je algoritam odbacio veću stranicu iako je bliža.



Slika 5.3: Simulacija prilaženja manjoj stranici veće kutije

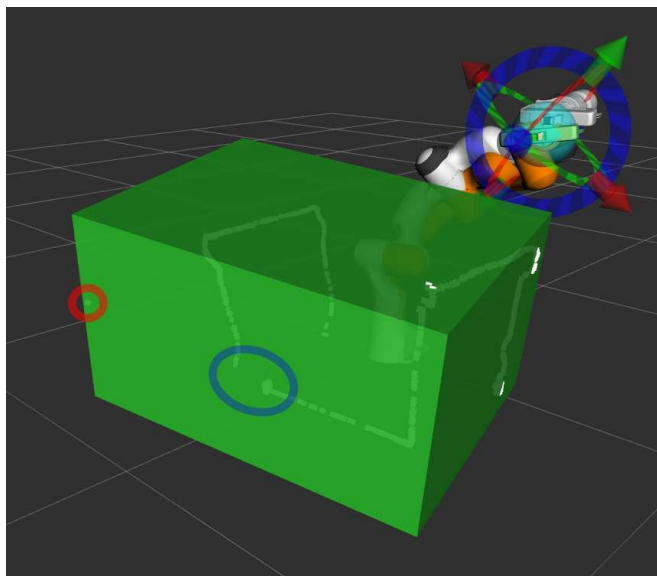
5.2.2. Poboljšanje stabilnosti i pouzdanosti Kalipena

Budući da je korišten OptiTrack Trio, koji može snimati samo iz jednog smjera, nije bilo moguće snimiti sve bridove kutija Kalipenom. Stoga su objekti generirani u RViz-u su bili nagnuti (*Slika 5.4*). Međutim, s obzirom na to da u ovoj specifičnoj primjeni poznato da su snimani objekti uvijek horizontalni, može se preskočiti korak određivanja Z osi objekta pomoću linearne regresije i definirati da je Z os uvijek okomita (`z_axis = np.array([0, 0, 1])`)



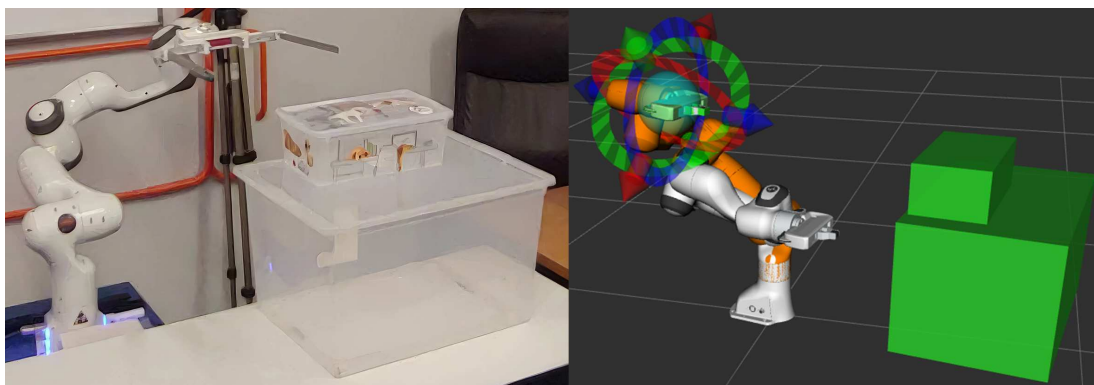
Slika 5.4: Kutije u simulaciji, nagnute uslijed nesavršenosti iscrtavanja Kalipenom

OptiTrack prilikom iscrtavanja velike kutije gubi položaj nekih od markera Kalipena (označeno plavo na *Slici 5.5*), što dovodi do rotacije koordinatnog sustava Kalipena u svim smjerovima. To rezultira netočnim procjenjivanjem njegove poze i pojavom stršućih vrijednosti (engl. outlier), što je označeno crveno na *Slici 5.5*.



Slika 5.5: Velika kutija generirana u RViz-u, bijele točke označavaju skup točaka dobiven iscrtavanjem velike kutije, plavo je označeno područje u kojem se izgubila pozicija Kalipena u prostoru, crveno je označena točka koja odskače od drugih

Kako bi OptiTrack bolje pratio markere prilikom snimanja velike kutije, Kalipen je produljen sa 16 na 23 cm i kutija je iscrtavana iz pozicije iza kutije relativno na OptiTrack. Generirani objekti u RViz-u su sada sumjerljivi pravima (*Slika 5.6*)



Slika 5.6: Lijevo je fotografija stvarnih objekata, desno su objekti generirani u RViz-u

Dodatno kako bi se spriječile stršće vrijednosti, mogao bi se koristiti filter pomičnog prosjeka, Kalmanov filter ili isključivanje mjerenja koja su izolirana u vremenu (vremensko filtriranje).

Filter pomičnog prosjeka: Ovaj filter izračunava prosjek nekoliko uzastopnih mjerenja kako bi se umanjio utjecaj naglih promjena. Nedostatak ove metode je da se mogu filtrirati i mjerenja koja nisu greška uzrokovana gubitkom markera, što dovodi

do smanjenja preciznosti pri označavanju detalja objekata. Ako u nekom trenutku prestanu pristizati mjerenja (označeno plavo na *Slici 5.5*), filter će zagladiti sva mjerenja kada podaci ponovno počnu pristizati. Uz to, ovaj filter ima kašnjenje u ovisnosti o tome koliko vrijednosti za prosjek uzima.

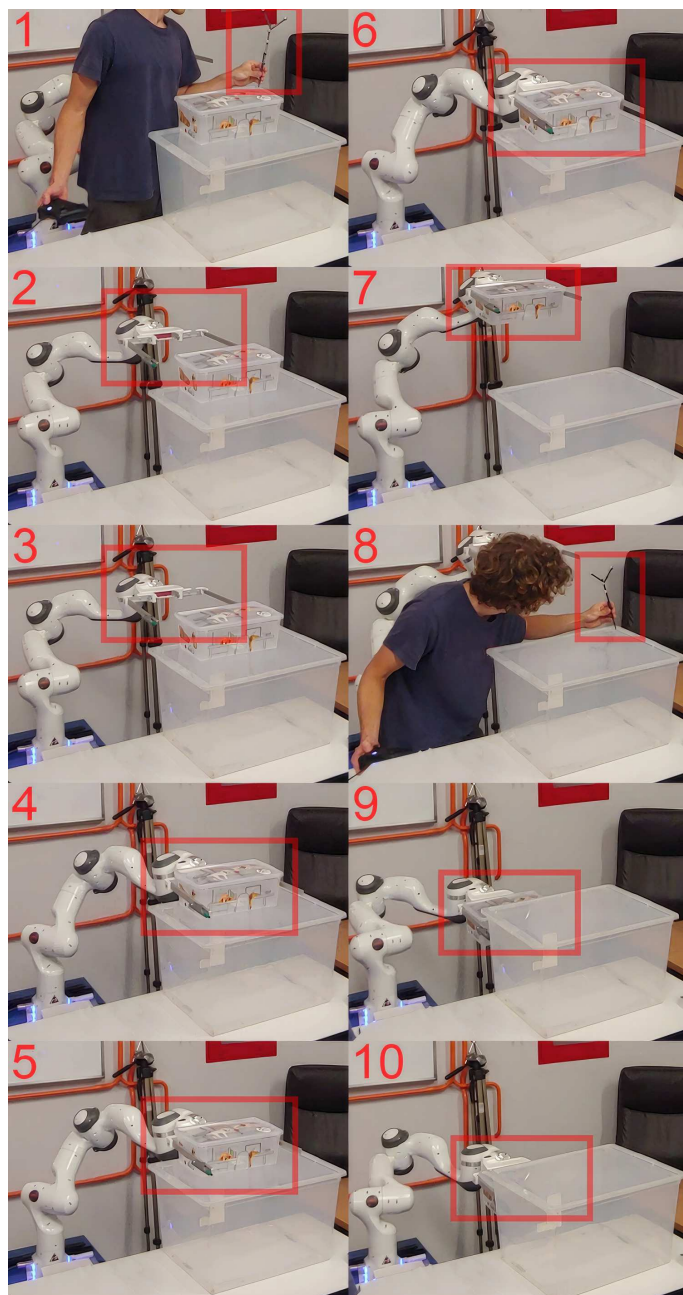
Kalmanov filter: Kalmanov filter smanjuje problem kašnjenja jer koristi predviđanje za procjenu položaja Kalipena čak i kada mjerenja nisu dostupna (što je korisno, ali možda nije presudno za jednostavne objekte poput kutija). Ovaj filter učinkovito uklanja stršeće vrijednosti, no može zagladiti podatke i time umanjiti preciznost kada su u pitanju detalji predmeta.

Vremensko filtriranje: Ovaj pristup isključuje mjerenja koja nemaju dovoljno vremenskih susjeda, na primjer, ako mjerenje nema tri ili više susjednih vrijednosti u prošlosti i budućnosti unutar četiri vremenska perioda prikupljanja. Iako ova metoda može eliminirati neke stršeće vrijednosti, moglo bi se dogoditi da su susjedi kontinuirani u vremenu ali su svi stršeće vrijednosti.

Na kraju odluka o metodi isključivanja stršećih vrijednosti se svodi na to što je bitnije, preciznost (bolje je vremensko filtriranje), pouzdanost i robusnost (Kalman) ili jednostavnost (filter pomičnog prosjeka).

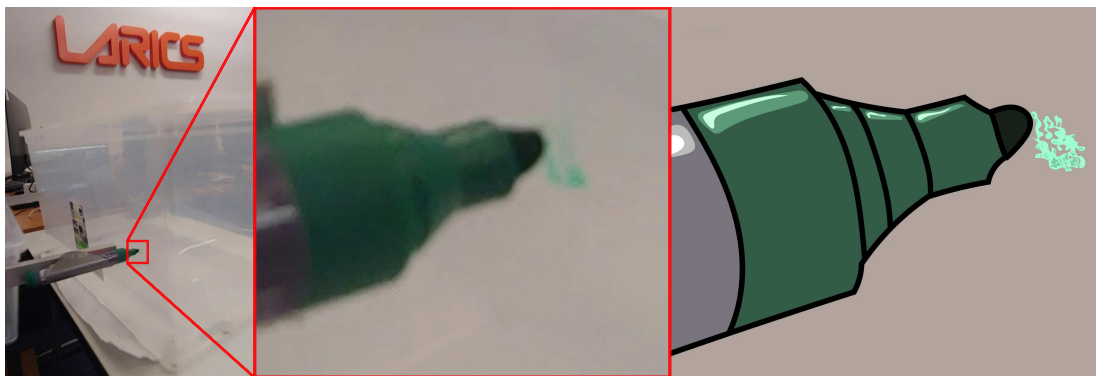
5.2.3. Preciznost Kalipena

Na *Slici 5.7* iz videa `Eksperiment.mp4` prikazano je svih deset koraka koji su navedeni na *Slici 5.1*.



Slika 5.7: Slijed koraka potrebnih kako bi manipulator prenio kutiju i napravio konekciju između nje i druge kutije.

Kako bi se ispitala ponovljivost eksperimenta i preciznost Kalipena na jedan od prstiju hvataljke pričvršćen je marker. Kako bi manipulator u zadnjem koraku prinio manju kutiju velikoj tako bi dotaknuo veliku kutiju s markerom. Tijekom sva tri eksperimenta, marker se nije pomicao, kao ni kutija. Marker je dodirivao kutiju, a najveći razmak između dviju točaka iznosio je 8 mm (*Slika 5.8*).



Slika 5.8: Lijevo je fotografija markera kako treći put dodiruje istu točku na kutiji, u sredini i desno je uvećana slika točke dodirivanja markera i kutije

Ovakva preciznost je dovoljna za povezivanja kutija pomoću konektora na *Slici 4.7*

6. Zaključak

U ovom diplomskom radu, *Razvoj robotiziranog postrojenja za biorazgradnju otpada*, postavljeni su temelji i razvijen je prototip automatiziranog sustava za uzgoj i razmnožavanje crnih vojničkih muha, koristeći robotsku manipulaciju tijekom različitih faza njihovog životnog ciklusa. Kalipen i optidraw sustav su se pokazali dovoljno preciznim za manipulaciju komorama u različitim stadijima njihovog životnog ciklusa, kao i za precizno povezivanje tih komora.

Predstavljeni sustav ima veliki potencijal u smanjenju potrebe za ljudskom radnom snagom, istovremeno povećavajući efikasnost i skalabilnost proizvodnje. Uvođenje vertikalnog uzgoja i robotskih manipulatora omogućuje optimizaciju procesa uz minimalnu ljudsku intervenciju, što je od ključne važnosti u industriji stočne hrane, gdje su troškovi i profitabilnost glavni faktori pri odabiru metode proizvodnje.

Nadolazeća istraživanja trebala bi se fokusirati na daljnju nadogradnju i implementaciju ovog prototipa, uključujući razvoj korisničkog sučelja za jednostavno upravljanje i nadzor robotskih radnji, poput manipulacije komorama i kašetama, mjerenja vlažnosti supstrata, te procjene veličine ličinki i broja odraslih muha.

LITERATURA

- [1] Colin A. Brammer and Carol D. von Dohlen. Evolutionary history of stratiomyidae (insecta: Diptera): The molecular phylogeny of a diverse family of flies. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 43:660–673, 5 2007.
- [2] D. Craig Sheppard, G. Larry Newton, Sidney A. Thompson, and Stan Savage. A value added manure management system using the black soldier fly. *Bioresource Technology*, 50:275–279, 1 1994.
- [3] Helena Čičková, G. Larry Newton, R. Curt Lacy, and Milan Kozánek. The use of fly larvae for organic waste treatment. *Waste Management*, 35:68–80, 1 2015.
- [4] Thomas Spranghers, Annelies Noyez, Kristof Schildermans, and Patrick De Clercq. Cold hardiness of the black soldier fly (diptera: Stratiomyidae). *Journal of Economic Entomology*, 110:1501–1507, 8 2017.
- [5] Qing Li, Longyu Zheng, Ning Qiu, Hao Cai, Jeffery K. Tomberlin, and Ziniu Yu. Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production. *Waste Management*, 31:1316–1320, 6 2011.
- [6] Jeffery K. Tomberlin and D. Craig Sheppard. Factors influencing mating and oviposition of black soldier flies (diptera: Stratiomyidae) in a colony. *Journal of Entomological Science*, 37:345–352, 10 2002.
- [7] R. Salomone, G. Saija, G. Mondello, A. Giannetto, S. Fasulo, and D. Savastano. Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of life cycle assessment to process using hermetia illucens. *Journal of Cleaner Production*, 140:890–905, 1 2017.
- [8] Kashif ur Rehman, Minmin Cai, Xiaopeng Xiao, Longyu Zheng, Hui Wang, Abdul Aziz Soomro, Yusha Zhou, Wu Li, Ziniu Yu, and Jibin Zhang. Cellulose

- decomposition and larval biomass production from the co-digestion of dairy manure and chicken manure by mini-livestock (*hermetia illucens* L.). *Journal of Environmental Management*, 196:458–465, 7 2017.
- [9] Wontae Kim, Sungwoo Bae, Kwanho Park, Sangbeom Lee, Youngcheol Choi, Sangmi Han, and Youngho Koh. Biochemical characterization of digestive enzymes in the black soldier fly, *hermetia illucens* (diptera: Stratiomyidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 14:11–14, 3 2011.
- [10] Dennis G. A. B. Oonincx, Sarah van Broekhoven, Arnold van Huis, and Joop J. A. van Loon. Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products. *PLOS ONE*, 10:e0144601, 12 2015.
- [11] Stefan Diener, Nandayure M. Studt Solano, Floria Roa Gutiérrez, Christian Zurbrugg, and Klement Tockner. Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae. *Waste and Biomass Valorization*, 2:357–363, 11 2011.
- [12] Terrence R. Green and Radu Popa. Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 166:1381–1387, 3 2012.
- [13] Cecilia H. Lalander, Jørgen Fidjeland, Stefan Diener, Sara Eriksson, and Björn Vinnerås. High waste-to-biomass conversion and efficient salmonella spp. reduction using black soldier fly for waste recycling. *Agronomy for Sustainable Development*, 35:261–271, 1 2015.
- [14] D. Craig Sheppard, Jeffery K. Tomberlin, John A. Joyce, Barbara C. Kiser, and Sonya M. Sumner. Rearing methods for the black soldier fly (diptera: Stratiomyidae): Table 1. *Journal of Medical Entomology*, 39:695–698, 7 2002.
- [15] Donald C. Booth and Craig Sheppard. Oviposition of the black soldier fly, *hermetia illucens* (diptera: Stratiomyidae): Eggs, masses, timing, and site characteristics. *Environmental Entomology*, 13:421–423, 4 1984.
- [16] Ian J. Banks, Walter T. Gibson, and Mary M. Cameron. Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human faeces and their implication for improving sanitation. *Tropical Medicine International Health*, 19:14–22, 1 2014.

- [17] International Feed Industry Federation (IFIF). *What Is the Global Feed Industry*.
- [18] A. McLeod. *World Livestock 2011-Livestock in Food Security*.
- [19] N. Tiengtam, P. Paengkoum, S. Sirivoharn, K. Phonsiri, and S. Boonanuntanasarn. *The effects of dietary inulin and Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) tuber on the growth performance, haematological, blood chemical and immune parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings*.
- [20] A. van Huis, E. B. Laconi, and E. Jayanegara. *Influence of various organic wastes on growth performance and nutrient composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): A meta-analysis*.
- [21] E. L. Fitriana and DGAB Oonincx. *The environmental sustainability of insects as food and feed*.
- [22] C. J. L. Balolong, B. S. Jumawan, and E. C. Taer. *Carcass quality evaluation of broilers fed with black soldier fly (*Hermetia Illucens*) larvae*.
- [23] T. Spanghers, M. Ottoboni, C. Klootwijk, A. Oryn, S. Deboosere, B. D. Melulenaer, J. Michiels, M. Eeckhout, P. D. Clercq, and S. D. Smet. *Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates*.
- [24] R. Popa and T. R. Green. *Using black soldier fly larvae for processing organic leachates*.
- [25] H. Harlystiarini, R. Mutia, I. W. T. Wibawan, and D. A. Astuti. *In vitro antibacterial activity of black soldier fly (*Hermetia Illucens*) larva extracts against gram-negative bacteria*.
- [26] D Purkayastha and Sudipta Sarkar. Sustainable waste management using black soldier fly larva: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, pages 1–26, 2021.
- [27] VO Onsongo, IM Osuga, CK Gachui, AM Wachira, DM Miano, CM Tanga, Sunday Ekesi, Dorothy Nakimbugwe, and KKM Fiaboe. Insects for income generation through animal feed: effect of dietary replacement of soybean and fish meal with black soldier fly meal on broiler growth and economic performance. *Journal of economic entomology*, 111(4):1966–1973, 2018.

- [28] Jibin Zhang, Ling Huang, Jin He, Jeffery K Tomberlin, Jianhong Li, Chaoliang Lei, Ming Sun, Ziduo Liu, and Ziniu Yu. An artificial light source influences mating and oviposition of black soldier flies, *hermetia illucens*. *Journal of insect science*, 10(1):202, 2010.
- [29] Jina Lee, Yun-Mi Kim, Young-Kyu Park, Young-Cheol Yang, Bock-Gie Jung, and Bong-Joo Lee. Black soldier fly (*hermetia illucens*) larvae enhances immune activities and increases survivability of broiler chicks against experimental infection of *salmonella gallinarum*. *Journal of Veterinary Medical Science*, 80(5):736–740, 2018.
- [30] Chia-Hung Su, Hoang Chinh Nguyen, Thi Loan Bui, and Deng-Liang Huang. Enzyme-assisted extraction of insect fat for biodiesel production. *Journal of cleaner production*, 223:436–444, 2019.
- [31] Christian Zurbrügg, Bram Dortmans, Audinisa Fadhila, Bart Verstappen, and Stefan Diener. From pilot to full scale operation of a waste-to-protein treatment facility. *Detritus*, 1(0):18–22, 2018.
- [32] S. Kroeckel, A. G. Harjes, I. Roth, H. Katz, S. Wuertz, A. Susenbeth, and C. Schulz. *When a turbot catches a fly: evaluation of pre-pupae meal of the black soldier fly (Hermetia illucens) as fish meal substitute-growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (Psetta maxima)*.
- [33] A. Schiavone, M. De Marco, S. Martinez, S. Dabbou, M. Renna, J. Madrid, F. Hernandez, L. Rotolo, P. Costa, F. Gai, and L. Gasco. *Nutritional value of a partially deffated and a highly deffated black soldier fly larvae (Hermetia illucens L.) meal for broiler chickens: apparent nutrient digestibility, apparent metabolizable energy and apparent ileal amino acids digestibility*.
- [34] G. Joly and J. Nikiema. Global experiences on waste processing with black soldier fly (*hermetia illucens*): from technology to business, 2019.
- [35] Domenico Caruso, Emilie Devic, I Subamia, Pascale Talamond, and Etienne Baras. *Technical handbook of domestication and production of diptera Black Soldier Fly (BSF) Hermetia illucens, Stratiomyidae*. 12 2013.
- [36] Stefan Diener, Floria Roa Gutiérrez, Christian Zurbruggbrügg, and KLEMENT Tockner. Are larvae of the black soldier fly-hermetia illucens-a financially viable

- option for organic waste management in costa rica. In *Proceedings Sardinia*, 2009.
- [37] Luis Alvarez. The role of black soldier fly, *hermetia illucens* (l.)(diptera: Stratiomyidae) in sustainable waste management in northern climates. 2012.
- [38] Entocycle. Entocycle. <https://entocycle.com/>, 2024.
- [39] Bioloop. Bioloop. <https://www.bioloop.com.my/>, 2024.
- [40] Jeffery K Tomberlin, D Craig Sheppard, and John A Joyce. Selected life-history traits of black soldier flies (diptera: Stratiomyidae) reared on three artificial diets. *Annals of the Entomological Society of America*, 95(3):379–386, 2002.
- [41] Shaphan Yong Chia, Chrysantus Mbi Tanga, Fathiya M. Khamis, Samira A. Mohamed, Daisy Salifu, Subramanian Sevgan, Komi K. M. Fiaboe, Saliou Niassy, Joop J. A. van Loon, Marcel Dicke, and Sunday Ekesi. Threshold temperatures and thermal requirements of black soldier fly *hermetia illucens*: Implications for mass production. *PLOS ONE*, 13:e0206097, 11 2018.
- [42] L. A. Holmes, S. L. Vanlaerhoven, and J. K. Tomberlin. Relative humidity effects on the life history of *hermetia illucens* (diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, 41:971–978, 8 2012.
- [43] D.G.A.B. Oonincx, N. Volk, J.J.E. Diehl, J.J.A. van Loon, and G. Belušič. Photoreceptor spectral sensitivity of the compound eyes of black soldier fly (*hermetia illucens*) informing the design of led-based illumination to enhance indoor reproduction. *Journal of Insect Physiology*, 95:133–139, 12 2016.
- [44] Nicolai Sundgaard Bekker, Søren Heidelbach, Sofie Zacho Vestergaard, Morten Eneberg Nielsen, Marie Riisgaard-Jensen, Emil Juel Zeuner, Simon Bahrndorff, and Niels Thomas Eriksen. Impact of substrate moisture content on growth and metabolic performance of black soldier fly larvae. *Waste Management*, 127:73–79, 5 2021.
- [45] Protix. Protix. <https://protix.eu/>, 2024.
- [46] EVOConversionSystems. Evoconversionsystems. <https://www.evoconsys.com/blog/what-we-do-in-china-teamwork-through-evo-jmgreen>, 2024.

- [47] Byfoodmachinery. Byfoodmachinery. <https://byfoodmachinery.com/>, 2024.
- [48] Franka Robotics GmbH. Denavit–hartenberg parameters. https://frankaemika.github.io/docs/control_parameters.html#denavit-hartenberg-parameters, 2023.
- [49] Bruno Maric, Marsela Polic, Tomislav Tabak, and Matko Orsag. Unsupervised optimization approach to in situ calibration of collaborative human-robot interaction tools. In *2020 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pages 255–262. IEEE, 9 2020.
- [50] Zurbrugbrügg C. Dortmans B.M.A. Egger J., Diener S. Black soldier fly biowaste processing - a step-by-step guide. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/swm/Practical_knowhow_on_BSF/BSF_Biowaste_Processing_2nd_Edition_LR.pdf, 2021.

Razvoj robotiziranog postrojenja za biorazgradnju otpada

Sažetak

U ovom diplomskom radu, *Razvoj robotiziranog postrojenja za biorazgradnju otpada*, te je razvijen optidraw sustav za označavanje objekata u radnom prostoru robota pomoću Kalipena, razvijen je sustav za manipulaciju i konekciju komora za uzgajenje razmnožavanje crnih vojničkih muha. Optidraw sustav pokazao se dovoljno preciznim za manipulaciju komorama i njihovim povezivanjem. Postavljen je temelj i razvijen prototip automatiziranog sustava za uzgoj crnih vojničkih muha koristeći robotsku manipulaciju tijekom različitih faza njihovog životnog ciklusa. Ovaj sustav ima veliki potencijal za smanjenje potrebe za ljudskom radnom snagom i povećanje efikasnosti proizvodnje. Implementacija robotskih manipulatora omogućuje optimizaciju procesa uz minimalnu ljudsku intervenciju, što je ključno za konkurentnost u industriju stočne hrane. Ovaj rad predstavlja značajan iskorak u automatizaciji sustava za uzgoj crnih vojničkih muha, postavljajući čvrste temelje za daljnji tehnološki razvoj i optimizaciju.

Ključne riječi: Kalipen, generiranje objekata, robotska manipulacija, automatizacija.

Development of a robotic facility for waste biodegradation

Abstract

In this thesis, *Development of a robotic facility for waste biodegradation*, the Optidraw system was developed for marking objects in the robot's workspace using the Kalipen, along with a system for manipulating and connecting chambers for breeding black soldier flies. The Optidraw system has proven to be precise enough for the manipulation and connection of chambers. A foundation was laid, and a prototype of an automated system for breeding black soldier flies was developed, utilizing robotic manipulation during different stages of their life cycle. This system has great potential to reduce the need for human labor and increase production efficiency. The implementation of robotic manipulators has enabled process optimization with minimal human intervention, which is crucial for maintaining competitiveness in the livestock feed industry. This thesis represents a significant step forward in automating black soldier fly farming systems, laying a solid foundation for further technological development and optimization.

Keywords: Kalipen, object generation, robotic manipulation, automation.