

Primjena 3D stereovizijskog sustava na industrijskom robotu

Prekrat, Franjo

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:861511>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Franjo Prekrat

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Marko Švaco, mag. ing. mech.

Student:

Franjo Prekrat

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Marku Švaci na prihvaćanju mentorstva, prenesenom znanju tijekom studija te stručnim i korisnim savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada. Također, zahvaljujem se mlađem istraživaču na projektu mag. ing. Lovri Čehuliću koji je uvijek strpljivo saslušao moja pitanja i svojim sugestijama pomogao prilikom izrade praktičnog dijela diplomskog rada. Hvala i svim djelatnicima u Regionalnom centru izvrsnosti za robotske tehnologije koji su uvijek bili spremni podijeliti savjet za vrijeme izrade praktičnog dijela. Hvala svim prijateljima i kolegama s kojima mi je bilo zadovoljstvo zajedno studirati.

Veliko hvala mojoj obitelji, ocu Borisu, majci Boženi i sestrama Moniki i Bernardi na velikoj podršci, odricanju i razumijevanju kojim su me pratili tijekom mog studiranja.

Za kraj želim se posebno zahvaliti svojoj zaručnici Marti na bezuvjetnoj podršci i razumijevanju tijekom izrade diplomskog rada. Od srca ti hvala!

Franjo Prekrat



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|---------------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: | 602-04/22-6/1 |
| Ur. broj: | 15-1703-22- |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **FRANJO PREKRAT** Mat. br.: 0035200031

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena 3D stereovizijskog sustava na industrijskom robotu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of 3D stereo vision system on an industrial robot**

Opis zadatka:

Primjena industrijskih robota u nestrukturiranoj radnoj okolini danas već postaje standard zbog raznovrsnih vizijskih sustava koji imaju mogućnost izravne integracije s upravljačkom jedinicom i programskim sučeljem robota. FANUC je prvi proizvođač industrijskih robota koji je komercijalno počeo proizvoditi 2D i 3D vizijske sustave za gamu svojih robota. Najnoviji FANUC vizijski sustav za 3D percepciju radne okoline koristi princip strukturiranog svjetla i dvije kamere. U ovom diplomskom radu potrebno je upoznati se s radom FANUC robota i načinima programiranja i korištenja vizijskih procesa. U radu je potrebno napraviti sljedeće:

- Predložiti prostorni raspored osnovnih elemenata robotske stanice za rukovanje dijelovima u nestrukturiranoj radnoj okolini (robotska ruka, vizijski sustav, radni stol s predmetima rada),
- Provesti standardni proces kalibracije vizijskog sustava i robota,
- Oblikovati sve potrebne robotske alate za rukovanje predmetima rada,
- Ispitati točnost i ponovljivost 3D vizijskog sustava za različite predmete rada (napraviti kvantitativnu analizu),
- Ispitati i kvalitativno (te prema mogućnosti kvantitativno) verificirati rad vizijskog sustava pri različitim svjetlosnim uvjetima,
- Ispitati mogućnosti rada 3D vizijskog sustava u simulacijskom programskom paketu Roboguide.


Eksperimentalnu validaciju postava za rukovanje predmetima rada u nestrukturiranoj radnoj okolini potrebno je napraviti na dostupnom FANUC robotu u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i.

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

Zadatak zadan:
11. studenog 2021.

Rok predaje rada:
13. siječnja 2022.

Predvideni datum obrane:
17. siječnja do 21. siječnja 2022.

Zadatak zadao: 
doc. dr. sc. Marko Švaco

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| POPIS KRATICA | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Vrste 3D vizijskih sustava..... | 1 |
| 1.2. Primjena mekanih robotskih hvataljki | 4 |
| 1.2.1. mGrip mekana robotska hvataljka | 5 |
| 1.2.2. Festo Flex Shape Gripper..... | 8 |
| 1.2.3. Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka..... | 9 |
| 2. PROSTORNI RASPORED OSNOVNIH ELEMENATA ROBOTSKE STANICE..... | 12 |
| 2.1.1. Fanuc 3D Area senzor..... | 14 |
| 2.1.2. Robot Fanuc M-710iC/45M..... | 18 |
| 2.1.3. Güdel TMF-2 eksterna linearna os..... | 20 |
| 2.1.4. Sklop robotskog alata s Piab Kenos KCS vakuumskom hvataljkom | 21 |
| 3. PROCES KALIBRACIJE VIZIJSKOG SUSTAVA I ROBOTA..... | 23 |
| 3.1. Kalibracija vizijskog sustava | 23 |
| 3.1.1. Izrada alata za kalibraciju kamera..... | 23 |
| 3.1.2. Kalibracija koordinatnog sustava alata za kalibraciju kamera..... | 24 |
| 3.1.3. Proces kalibracije kamera | 25 |
| 3.2. Kalibracija koordinatnog sustava Piab vakuumske hvataljke..... | 29 |
| 4. KREIRANJE VIZIJSKOG PROCESA ZA LOKALIZACIJU PREDMETA RADA | 31 |
| 4.1. 3D Data Preprocess Tool | 31 |
| 4.2. Vizijski proces FP_1CEDEVITA | 32 |
| 4.3. Vizijski proces FP_2AXE..... | 32 |
| 4.4. Vizijski proces FP_POMAK..... | 33 |
| 4.5. Part List Manager..... | 34 |
| 4.5.1. PICK Position List | 34 |
| 4.6. Interference Avoidance | 34 |
| 5. IZRADA TP PROGRAMA..... | 37 |
| 5.1. Opis BINPICK makro naredbi | 37 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.1.1. | BINPICK_CLEAR | 37 |
| 5.1.2. | BINPICK_ACQUIRE3DMAP | 37 |
| 5.1.3. | BINPICK_SEARCH | 37 |
| 5.1.4. | BINPICK_POP | 38 |
| 5.1.5. | BINPICK_GETPICKPOS | 38 |
| 5.1.6. | BINPICK_SETSTAT | 39 |
| 5.2. | Opis glavnog TP programa | 39 |
| 6. | KVALITATIVNA VERIFIKACIJA RADA VIZIJSKOG SUSTAVA PRI RAZLIČITIM SVJETLOSNIH UVJETIMA | 42 |
| 6.1. | Mjerenje intenziteta osvjetljenja | 43 |
| 6.2. | Rezultati provedenog mjerenja | 44 |
| 6.2.1. | Verifikacija rada vizijskog sustava pri različitim svjetlosnim uvjetima za proces lokalizacije paketa Cedevite..... | 44 |
| 6.2.2. | Verifikacija rada vizijskog sustava pri različitim svjetlosnim uvjetima za proces lokalizacije AXE dezodoransa | 47 |
| 7. | ISPITIVANJE TOČNOSTI I PONOVLJIVOSTI 3D VIZIJSKOG SUSTAVA | 50 |
| 7.1. | Baumer laserski senzor | 51 |
| 7.2. | Mjerenje ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata | 53 |
| 7.3. | Rezultati mjerenja ponovljivosti Fanuc 3D stereovizijskog sustava | 55 |
| 7.3.1. | Prikaz rezultata izmjerenih Baumer laserskim senzorom | 59 |
| 8. | PRIMJENA 3D VIZIJSKOG SUSTAVA U SIMULACIJSKOM PROGRAMSKOM PAKETU ROBOGUIDE | 61 |
| 8.1. | Osnovne postavke Roboguide-a za izradu bin picking simulacije | 61 |
| 8.2. | Opis Roboguide simulacijske robotske stanice..... | 62 |
| 9. | ZAKLJUČAK..... | 65 |
| | LITERATURA..... | 66 |
| | PRILOZI..... | 67 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Vrste 3D vizijskih sustava [1] | 1 |
| Slika 2. Intel RealSense D435 | 3 |
| Slika 3. Ensenso N35-606-16-BL | 3 |
| Slika 4. Hvataljka mGrip Soft Robotics | 5 |
| Slika 5. Hvataljka Festo Flex Shape Gripper | 5 |
| Slika 6. Eksplozirani prikaz mGrip hvataljke | 5 |
| Slika 7. CAD model prirubnice mGrip mekane hvataljke | 6 |
| Slika 8. Korisničko sučelje softvera za podešavanje parametara mGrip hvataljke..... | 7 |
| Slika 9. Primjer hvatanja predmeta mGrip mekanom hvataljkom | 8 |
| Slika 10. Flex Shape Gripper hvataljka s izbočenim i uvučenim silikonskim dijelom..... | 8 |
| Slika 11. Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka..... | 10 |
| Slika 12. Simbol elektromagnetskog ventila SMC SYJ714..... | 11 |
| Slika 13. Prikaz robotske stanice..... | 13 |
| Slika 14. Kutija 1 sa slobodno raspoređenim predmetima rada | 13 |
| Slika 15. Eksperimentalni postav s predmetima široke potrošnje..... | 14 |
| Slika 16. Uzorak strukturiranog svjetla projektora Fanuc 3D Area senzora..... | 15 |
| Slika 17. Fanuc 3D Area senzor | 15 |
| Slika 18. Korištene kamere Fanuc 3D Area senzora..... | 16 |
| Slika 19. Korišten projektor Fanuc 3D Area senzora..... | 16 |
| Slika 20. Shematski prikaz položaja Fanuc 3D Area senzora [4] | 17 |
| Slika 21. Fanuc M-710iC/45M..... | 18 |
| Slika 22. Fanuc privjesak za učenje (eng. <i>Teach pendant</i>) | 19 |
| Slika 23. Radni prostor Fanuc M-710iC/45M robota [5]..... | 19 |
| Slika 24. Güdel TMF-2 linearna os [6] | 21 |
| Slika 25. Prikaz hvatanja predmeta rada s Piab Kenos KCS vakuumskom hvataljkom..... | 22 |
| Slika 26. Primjer izgleda ispravnih oznaka za proces kalibracije kamera [7]..... | 23 |
| Slika 27. CAD model alata za kalibriranje..... | 23 |
| Slika 28. Alat za kalibraciju kamera izrađen 3D printanjem | 24 |
| Slika 29. Konačni izgled alata za kalibraciju kamera | 24 |
| Slika 30. Prikaz postupka kalibracije koordinatnog sustava alata za kalibraciju kamera | 25 |
| Slika 31. Koordinatni sustav alata za kalibraciju kamera | 25 |
| Slika 32. Postavke kalibracije kamera Fanuc 3D Area senzora | 26 |
| Slika 33. Učenje modela oznake za kalibraciju kamera Fanuc 3D Area senzora | 26 |
| Slika 34. Početak izvođenja procesa kalibracije kamera Fanuc 3D Area senzora..... | 27 |
| Slika 35. Rezultati kalibracije Fanuc 3D Area senzora..... | 27 |
| Slika 36. Postavke Fanuc 3D Area senzora nakon kalibracije kamera | 28 |
| Slika 37. Prikaz 3D oblaka točaka | 28 |
| Slika 38. a) Točka prihvata alata b) Koordinatni sustav središta alata [9]..... | 29 |
| Slika 39. Smjer Z-osi koordinatnog sustava Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke..... | 29 |
| Slika 40. Koordinatni sustav Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke | 30 |
| Slika 41. 3D Data Preprocess tool..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Slika 42. Vizijski proces FP_1CEDEVITA | 32 |
| Slika 43. Vizijski proces FP_2AXE..... | 33 |
| Slika 44. Vizijski proces FP_POMAK..... | 33 |
| Slika 45. Pick position list..... | 34 |
| Slika 46. Prikaz područja uključenog u Interference Avoidance robotske hvataljke i kutije .. | 35 |
| Slika 47. Interference Avoidance kutija 1 | 36 |
| Slika 48. Interference Avoidance robotska hvataljka..... | 36 |
| Slika 49. Prikaz kutija 2 i 3 nakon završetka izvođenja glavnog TP programa | 40 |
| Slika 50. Dijagram toka izvršavanja programa BIN_PICKING_CEDEVITA.TP | 41 |
| Slika 51. Prikaz ambijentalne rasvjete u Laboratoriju za autonomne sustave | 42 |
| Slika 52. Tenmars TM-201 mjerač intenziteta osvjetljenja | 43 |
| Slika 53. Prikaz izmjerenih vrijednosti intenziteta ambijentalnog osvjetljenja u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i..... | 44 |
| Slika 54. Lijevo ravni položaj paketa Cedevida, desno paketi Cedevida pod kutem | 45 |
| Slika 55. Grafički prikaz utjecaja intenziteta osvjetljenja na rad vizijskog procesa traženja paketa Cedevida | 47 |
| Slika 56. Lijevo ravni položaj AXE dezodoransa, desno položaj AXE dezodoransa pod kutem | 48 |
| Slika 57. Grafički prikaz utjecaja intenziteta ambijentalnog osvjetljenja na rad vizijskog procesu traženja paketa dezodoransa..... | 49 |
| Slika 58. Eksperimentalni postava za ispitivanje točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D Area senzora..... | 50 |
| Slika 59. Postolje za izvođenje mjerenja točnosti i ponovljivosti 3D vizijskog sustava | 51 |
| Slika 60. Baumer OM70-P0250.HH0130.VI laserski senzor | 52 |
| Slika 61. Karakteristika laserske zrake Baumer OM70 laserskog senzora | 53 |
| Slika 62. Schunk SHK 040 ručni izmjenjivač robotskog alata | 53 |
| Slika 63. Prikaz postupka mjerenja ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata | 54 |
| Slika 64. Prikaz postupka mjerenja točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D vizijskog sustava..... | 56 |
| Slika 65. Odstupanje x-koordinate pozicije odlaganja od x-koordinate referentne pozicije ... | 58 |
| Slika 66. Odstupanje y-koordinate pozicije odlaganja od y-koordinate referentne pozicije ... | 58 |
| Slika 67. Odstupanje x-koordinate pozicije odlaganja izmjereno Baumer laserskim senzorom | 59 |
| Slika 68. Odstupanje y-koordinate pozicije odlaganja izmjereno Baumer laserskim senzorom | 60 |
| Slika 69. Roboguide instalacija Bin Pick dodatka | 61 |
| Slika 70. Roboguide konfiguracija robotske stanice..... | 62 |
| Slika 71. Prikaz robotske stanice u Roboguide-u..... | 63 |
| Slika 72. Kalibracija Fanuc 3D Area senzora u Roboguide-u | 63 |
| Slika 73. Roboguide kreiranje proizvoljno raspoređene hrpe predmeta unutar kutije..... | 64 |
| Slika 74. Prikaz izrade simulacijskih programa za izuzimanje i odlaganje predmeta | 64 |
| Slika 75. Roboguide prikaz putanje vrha robotskog alata nakon izvršene simulacije | 64 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Tehničke karakteristike Soft robotic mGrip hvataljke [3] | 6 |
| Tablica 2. Tehničke karakteristike Festo Flex Shape Gripper hvataljke..... | 9 |
| Tablica 3. Tehničke karakteristike Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke | 10 |
| Tablica 4. Osnovne tehničke karakteristike Fanuc M-710iC/45M industrijskog robota [5] ... | 20 |
| Tablica 5. Osnovne tehničke karakteristike linearne osi Güdel TMF-2 [6]..... | 21 |
| Tablica 6. Tehničke karakteristike Fanuc FS-100iA senzora sile i momenta [7] | 22 |
| Tablica 7. Rezultati ispitivanja rada vizijskog sustava za traženje paketa Cedevita..... | 46 |
| Tablica 8. Rezultati ispitivanja rada vizijskog sustava za 3D lokalizaciju dezodoransa | 48 |
| Tablica 9. Karakteristike Baumer OM70-P0250.HH0130.VI laserskog senzora [12]..... | 52 |
| Tablica 10. Rezultati mjerenja ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata | 54 |
| Tablica 11. Rezultati mjerenja točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D vizijskog sustava | 57 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|----------------------|-----------------|-----------------|
| <i>F</i> | N | Nazivna sila |
| <i>M</i> | Nm | Nazivni moment |
| <i>l</i> | mm | Duljina |
| <i>D</i> | mm | Srednji promjer |
| <i>h</i> | mm | Visina |
| <i>v</i> | m/s | Brzina |
| <i>p</i> | Pa | Tlak |
| <i>t</i> | s | Vrijeme |
| <i>m</i> | kg | Masa |
| <i>T</i> | °C | Temperatura |
| <i>E_s</i> | LUX | Osvjetljenje |

POPIS KRATICA

| Kratika | Opis |
|----------------|---|
| CRTA | Regionalni centar izvrsnosti za robotske tehnologije |
| Lidar | <i>Light detection and ranging</i> |
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje |
| TCP | <i>Tool center point</i> – Točka središta alata |
| TP | <i>Teach pendant</i> – privjesak za učenje |
| ISO | <i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju |

SAŽETAK

Zadatak ovog diplomskog rada je ispitati mogućnosti primjene 3D stereovizijskog sustava na industrijskom robotu u nestrukturiranoj radnoj okolini. Na početku je osmišljen prostorni raspored osnovnih elemenata robotske stanice koja se sastoji od Fanuc robotske ruke, Fanuc 3D stereovizijskog sustava te dva radna stola na kojima se nalaze kutije s predmetima rada. Nakon toga, proveden je standardni proces kalibracije vizijskog sustava i robotskih alata te je u programskom sučelju robota provedeno učenje vizijskog procesa koji traži poziciju i prostornu orijentaciju raznovrsnih predmeta rada koji su proizvoljno stavljeni u kutiju. Na temelju naučenih vizijskih procesa izrađen je Fanuc TP program koji prepoznaje i lokalizira različite predmete u kutiji, hvata ih vakuumskom hvataljkom te izvršava odvojenu paletizaciju za pojedinu vrstu predmeta. Također, u sklopu ovoga rada izvršeno je ispitivanje točnosti i ponovljivosti 3D stereovizijskog sustava te je verificiran njegov rad pri različitim svjetlosnim uvjetima. Na kraju, izrađena je simulacija robotske stanice s 3D stereovizijskim sustavom u Fanuc-ovom simulacijskom programskom paketu Roboguide. Cjelokupna eksperimentalna validacija postava za rukovanje predmetima rada u nestrukturiranoj radnoj okolini napravljena je na Fanuc M-710iC/45M industrijskom robotu u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i.

Ključne riječi: 3D stereovizijski sustav, Fanuc industrijski robot, Fanuc 3D Area senzor, nestrukturirana radna okolina, Roboguide

SUMMARY

The task of this master's thesis is to examine the possibilities of application of 3D stereo vision system on an industrial robot in an unstructured working environment. At the beginning, the spatial arrangement of the basic elements of the robotic station was designed, which consists of a Fanuc industrial robot (Fanuc robotic arm), a Fanuc 3D stereo vision system and two tables with boxes containing work items. After that, a standard process of calibration of the vision system and robotic tools was performed, and in the robot's programming interface the learning of the vision process was performed, which requires the position and spatial orientation of various working objects that have been arbitrarily placed in the box. Based on the learned vision processes, the Fanuc TP program was created that recognizes and localizes various objects in the box, gripping them with a vacuum gripper and performs separate palletizing for each type of object. Also, as part of this master's thesis, the accuracy and repeatability of the 3D stereo vision system was tested and its work in different light conditions was verified. Finally, a simulation of a robotic station with a 3D stereo vision system was created in Fanuc's Roboguide simulation software package. The complete experimental validation of the workpiece handling setup in an unstructured working environment was performed on the Fanuc M-710iC/45M industrial robot in the Autonomous Systems Laboratory at CRTA.

Key words: 3D stereo vision system, Fanuc industrial robot, Fanuc 3D Area Sensor, unstructured work environment, Roboguide

1. UVOD

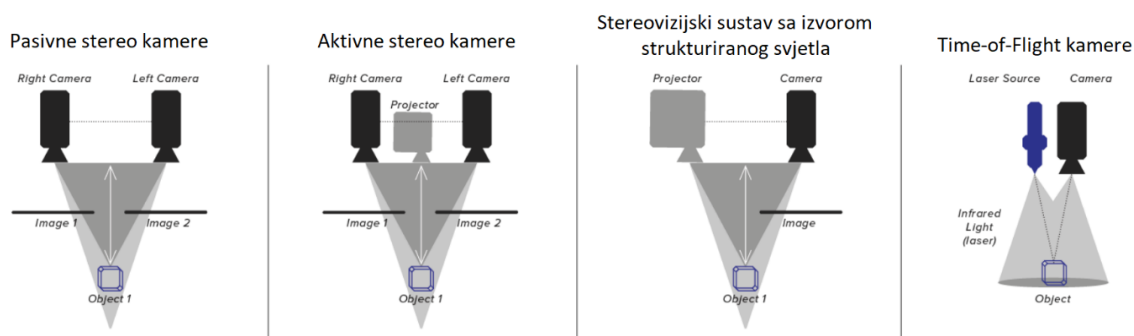
Razvojem tehnologije primjena 3D vizijskih sustava postaje sve raširenija u industrijskoj robotici, medicinskoj robotici, mobilnoj robotici te seže sve do primjene u autonomnim vozilima. Kada govorimo o primjeni u industrijskoj robotici, u današnje vrijeme primjena industrijskih robotu u nestrukturiranoj radnoj okolini postaje standard zbog raznovrsnih vizijskih sustava koji imaju mogućnost izravne integracije s upravljačkom jedinicom i programskim sučeljem robota. Među proizvođačima industrijskih robota Fanuc je prvi komercijalno počeo proizvoditi 2D i 3D vizijske sustave za gamu svojih robota. U ovome radu opisana je primjena Fanuc-ovog vizijskog sustava za 3D percepciju radne okoline koji koristi princip strukturiranog svjetla i dvije kamera.

U uvodnom dijelu opisana je osnovna podjela 3D vizijskih sustava te su nakon toga prikazane dvije vrste mekanih robotskih hvataljki te jedna vakuumska hvataljka čije su funkcionalnosti ispitane u svrhu moguće primjene na industrijskom robotu za izvršavanje izuzimanja slobodno raspoređenih predmeta iz kutije.

1.1. Vrste 3D vizijskih sustava

Danas postoje razni 3D senzori i kamere koji omogućavaju dohvaćanje prostornih koordinata okoliša. Kada spominjemo stereovizijske sustave, oni se najčešće sastoje od dvije kamere. Na temelju slika snimljenih kamerama pokušava se rekonstruirati okolina. Generalno gledano, vrste 3D vizijskih sustava moguće je podijeliti u 4 osnovne skupine:

- Pasivne stereo kamere
- Aktivne stereo kamere
- Stereovizijski sustav s izvorom strukturiranog svjetla
- Time-of-Flight (ToF) kamere



Slika 1. Vrste 3D vizijskih sustava [1]

3D vizijski sustavi nalaze svoju primjenu u velikom broju aplikacija. Kada je riječ o industrijskoj primjeni koriste se u zadacima izuzimanja slobodno raspoređenih predmeta iz kutije (eng. *bin picking application*) te za prostorno mjerenje i inspekciju predmeta na pokretnoj traci. Tijekom izvođenja zadatka izuzimanja slobodno raspoređenih predmeta iz kutije, potrebno je predmetima unutar kutije odrediti točnu poziciju i orijentaciju kako bi industrijski robot uvijek na isti način pristupio predmetu i uhvatio ga te nakon toga izvršio paletizaciju ili poslao predmet na daljnju obradu. Kada 3D vizijski sustav snimi predmete u kutiji, samo nekima od njih uspije pronaći točnu poziciju i orijentaciju. Razlog je u tome što postoji međusobno preklapanje između predmeta te svi predmeti nisu potpuno vidljivi. Zbog toga 3D vizijski sustav mora sa što većom sigurnošću pronaći predmete snimljene kamerama kako bi mogao točno odrediti udaljenost predmeta i njegovu orijentaciju.

Velika je primjena i kod autonomnih vozila gdje se koristi cijeli niz različitih 3D vizijskih sustava kako bi se dohvatila informacija o udaljenosti objekata u okolini vozila. Jedan od njih je i Lidar (eng. *Light detection and ranging*) koji koristi lasersku svjetlost kako bi odredio lokaciju i udaljenost objekta ovisno o dobivenoj povratnoj informaciji te pruža mogućnost 3D mapiranja prostora. U ovom slučaju, zadatak 3D vizijskih sustava je lokalizacija relativno velikih objekata kao što su druga vozila, pješaci itd. na što većoj udaljenosti. [1]

Pasivne stereo kamere primjer su klasičnog stereovizijskog sustava koji se sastoji od dviju kamera. Snimanjem samo jednom kamerom dobiva se 2D slika te ako nemamo neku referencu u prostoru tj. neki predmet poznate veličine, ne možemo odrediti na kojoj se udaljenosti od kamere taj predmet nalazi. Dodavanjem druge kamere te snimanjem istog predmeta u prostoru s obje kamere moguće je preko triangulacije izračunati gdje se dubinski nalazi predmet. Na temelju dviju snimljenih slika potrebno je naći njihovu korespodenciju te na taj način možemo dohvatiti dubinsku informaciju. Iako su 2D slike snimljene kamerama potpune, sama rekonstrukcija koja omogućava dobivanje podataka o udaljenosti predmeta od kamera nije uvijek potpuna. Razlog tome je specifičnost tehnologije stereovizijskih sustava. Postoje situacije u kojima nije moguće izračunati točne koordinate te se u tom slučaju ne može dohvatiti dubinska koordinata određenog elementa. Primjer toga je snimanje jednoličnog prikaza bez teksture. U toj situaciji nije moguće iskoristiti algoritme za pronalazak razlika između dviju slika i na temelju toga se ne može stvoriti korespodencija kako bi se odredila dubinska informacija. To svojstvo nije poželjno jer želimo da vizijski sustav radi pouzdano u različitim okolinama. [1]

Zbog toga se često pasivnim stereo kamerama dodaje projektor koji projicira određeni uzorak na okolinu koju snimaju kamere. U velikom broju slučajeva projektor projicira infracrveno svjetlo koje ljudsko oko ne može vidjeti. Uz to što kamerama daje dodatne informacije, projektor projiciranjem poznatog uzorka poboljšava točnost pronalaženja objekta te povećava pouzdanost na način da se u puno većem broju slučajeva može dohvatiti dubinska informacija. Na slici 2. prikazana je aktivna stereokamera Intel RealSense D435 koja je komercijalno širokodostupna, dok je na slici 3. prikazana Ensensio N35-606-16-BL visokokalibrirana aktivna stereokamera koja se primjenjuje u industriji.



Slika 2. Intel RealSense D435



Slika 3. Ensensio N35-606-16-BL

Pasivne stereokamere u većini slučajeva su jednostavne i jeftine te omogućavaju rad na unutarnjim i vanjskim scenama. Kao nedostatak mogu se navesti loše performanse kod slabog osvjetljenja, ne rade dobro prilikom snimanja površina bez teksture te je potrebna visoka snaga obrade za dobivanje karte dubine.

Sustav sa strukturiranim svjetlom sastoji se od jedne kamere i jednog projektor. Koristi se princip rada aktivnih stereo kamera na način da se umjesto mjerenja razlike između pogleda dviju kamera u ovom slučaju mjeri razlika između projektor i kamere. Projektor projicira uzorak koji najčešće izgleda kao niz paralelnih linija. Na temelju prelamanja paralelnih linija po predmetu te njihove različite raspodjele ovisno o tome da li se neki dio predmeta nalazi bliže ili dalje od projektor, mogu se za svaki piksel u kameri izračunati udaljenosti.

Kod stereovizijskih sustava s izvorom strukturiranog svjetla pojavljuje se problem kada je sustav smješten u radnoj okolini gdje postoji dodatno osvjetljenje koje je dovoljno jako da kamere ne mogu prepoznati uzorak koji projicira projektor. Zbog toga je poželjno da je stereovizijski sustav s izvorom strukturiranog svjetla smješten u radnoj okolini gdje je utjecaj ambijentalnog osvjetljenja vrlo nizak. Također, na uspješnost dohvaćanja prostornih koordinata predmeta utječu i reflektirajuća svojstva površine tj. ako predmet ima sjajnu površinu, reflektirat će se svjetlo te će se dobiti loši i nepouzdana rezultati. Njihova prednost je to što imaju veću razlučivost i točnost od Time-of-Flight kamera.

Time-of-flight (ToF) kamere su kombinacija obične 2D kamere s laserskim izvorom. Princip rada je taj da ToF kamera osvjetljava punu scenu kontinuiranim valom moduliranog svjetla te prima reflektirano svjetlo pomoću standardnih CCD ili CMOS senzora. Mjeri se fazni pomak primljenog svjetlosnog vala i na temelju njega izračunava se udaljenost između kamere i reflektirajuće površine. Specifičnost ToF kamere je da imaju jednostavan i kompaktan hardver, veliku brzinu dohvaćanja te su cijene tih poluvodičkih komponenata relativno niske. Kao i kod stereovizijskog sustava s izvorom strukturiranog svjetla lošija izvedba se postiže na otvorenom svjetlu te je loš odziv kod predmeta sa reflektirajućom površinom. [1]

1.2. Primjena mekanih robotskih hvataljki

Robotske hvataljke sastavni su dio robotske ruke u tehničkim procesima rukovanja, paletizacije i montaže predmeta rada. U užem smislu hvataljke su podsustavi sustava za rukovanje i manipulaciju koji osiguravaju privremeni kontakt s predmetom kojim se rukuje. Termin hvataljka se koristi i u slučajevima gdje nema direktnog hvatanja izratka steznom silom, već samo držanja kao u slučaju vakuumskih hvataljki gdje sila držanja djeluje u točki, liniji ili površini predmeta rukovanja i manipuliranja. [2]

Mekane robotske hvataljke pripadaju domeni robotskih sustava izrađenih od mekih i deformabilnih materijala poput silikona, plastike, gume te elastičnih metalnih dijelova poput opruga. Za razliku od konvencionalnih robotskih hvataljki, mekane robotske hvataljke mogu biti podvrgnute iznimno velikim strukturnim deformacijama, sigurne su za rad u neposrednoj ljudskoj okolini, otporne su na mehanička oštećenja i izrađene su od jeftinijih materijala. Njihova posebna prednost je u tome što omogućavaju hvatanje predmeta različitih nepravilnih geometrija i veličina te su pogodne za hvatanje predmeta koji su osjetljivi na mehaničko oštećenje. Primjeri mekanih robotskih hvataljki koje su opisane u nastavku su hvataljka mGrip proizvođača Soft Robotics prikazana na slici 4. te Flex Shape Gripper proizvođača Festo na slici 5.



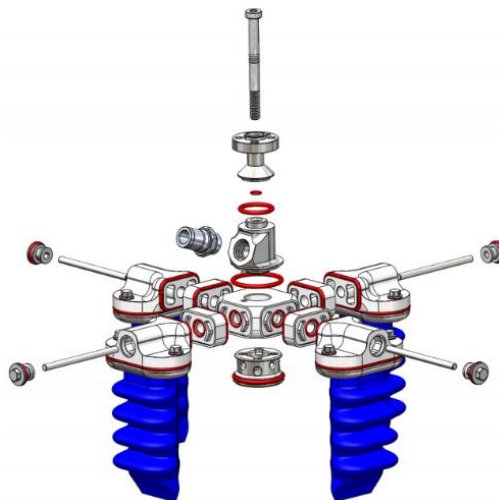
Slika 4. Hvataljka mGrip Soft Robotics



Slika 5. Hvataljka Festo Flex Shape Gripper

1.2.1. mGrip mekana robotska hvataljka

Mekana robotska hvataljka mGrip dolazi pakirana u dijelovima iz razloga što se može slagati u nekoliko različitih konfiguracija ovisno o željenom broju prstiju hvataljke. Uz to moguće je prilagoditi razmak prstiju zato što u paketu dolaze odstoynici različitih dimenzija i na taj način pružaju vrlo fleksibilno sklapanje hvataljke prilagodljivo dimenzijama predmeta kojega želimo hvatati. Slika 6. prikazuje eksplodirani model mGrip hvataljke sastavljene u konfiguraciju od četiri prsta sa svim potrebnim dijelovima od kojih se sastoji hvataljka.



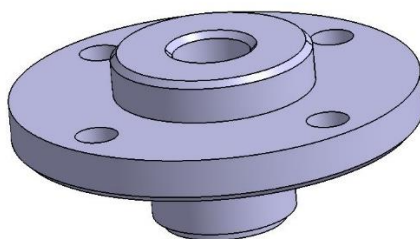
Slika 6. Eksplodirani prikaz mGrip hvataljke

U tablici 1. navedene su tehničke karakteristike mGrip mekane hvataljke.

Tablica 1. Tehničke karakteristike Soft robotic mGrip hvataljke [3]

| | mGrip hvataljka s 2 prsta | mGrip hvataljka s 4 prsta |
|---|------------------------------|------------------------------|
| Masa hvataljke | 334g | 577g |
| Maksimalna sila hvatanja jednog prsta | 8 N | 8N |
| Radni tlak | -0,35 do 0,7 bar | -0,35 do 0,7 bar |
| Napajanje kontrolera | 24V, 1,7A max, $\pm 10\%$ | 24V, 1,7A max, $\pm 10\%$ |
| Vrijeme potrebno za otvaranje hvataljke | 0,41 s | 0,58 s |
| Vrijeme potrebno za zatvaranje hvataljke | 0,53 s | 0,76 s |
| Trajanje jednog ciklusa otvaranja i zatvaranja hvataljke | Manje od 1 s po ciklusu | Manje od 1,5 s po ciklusu |
| Mogući razmak između prstiju | Od 40 do 120 mm | Od 65 do 145 mm |

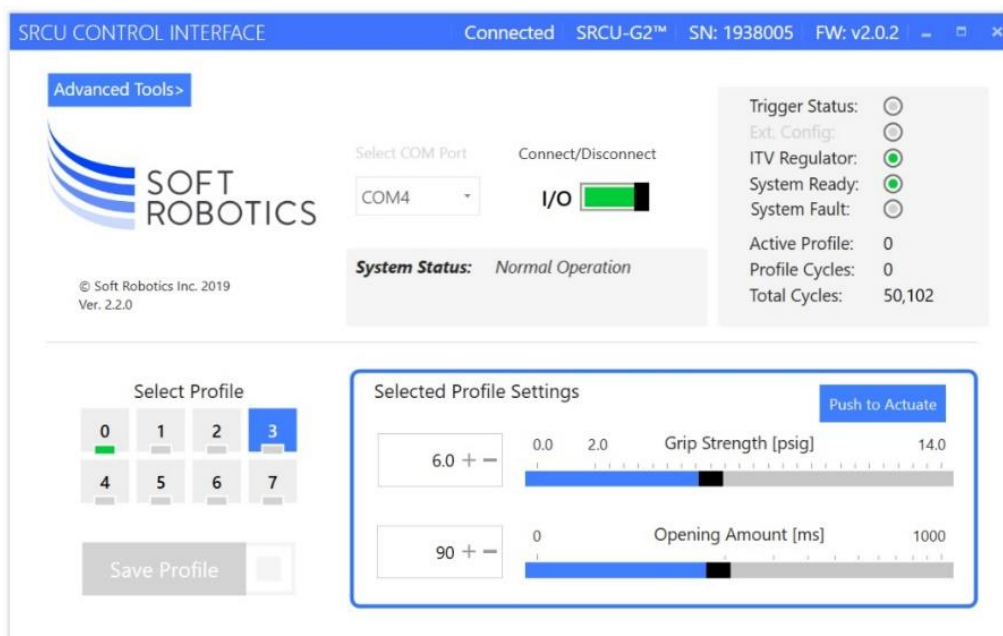
Nakon sklapanja hvataljke bilo je potrebno izraditi prirubnicu uz pomoć koje će hvataljka biti pričvršćena na robotsku ruku. Iz tog razloga u programskom paketu Catia V5 izrađen je model prirubnice prema dimenzijama dijelova na koje će se ona spojiti. Na slici 7. prikazan je CAD model prirubnice.



Slika 7. CAD model prirubnice mGrip mekane hvataljke

Prirubnica je izrađena postupkom 3D printanja. Nakon pričvršćivanja mGrip hvataljke s robotskom rukom krenulo se sa povezivanjem upravljačke jedinice hvataljke sa upravljačkom jedinicom robota kako bi hvataljka bila u potpunosti spremna za korištenje. Upravljačka jedinica hvataljke spaja se na ulazni tlak preporučene vrijednosti 6,5 bara i ulazni napon od 24V. Povezivanje signalnog kabla s upravljačkom jedinicom robota izvršeno je prema

uputama u tehničkoj dokumentaciji. Prije same upotrebe hvataljke potrebno je na računalo instalirati softver proizvođača mGrip hvataljke koji omogućava podešavanje tlaka kojim će prsti hvataljke obuhvatiti predmet te brzinu otvaranja/zatvaranja prstiju hvataljke. Na slici 8. nalazi se prikaz korisničkog sučelja softvera za podešavanje parametara mGrip hvataljke.



Slika 8. Korisničko sučelje softvera za podešavanje parametara mGrip hvataljke

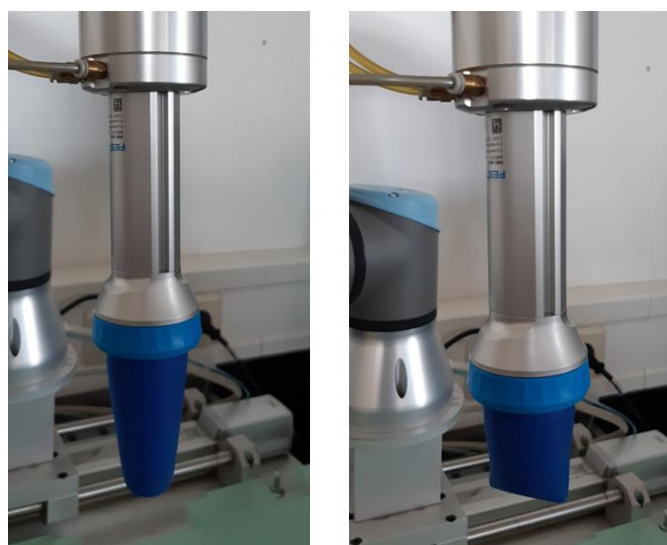
Kada se vrijednosti tih parametara podese moguće ih je spremiti u jedan od osam profila. Nakon što su parametri podešeni i spremljeni, hvataljka je spremna za korištenje te je omogućeno upravljanje otvaranjem i zatvaranjem hvataljke preko upravljačke jedinice robota. Različitim podešavanjem parametara vidjelo se kako hvataljka reagira i prema tome krenulo se u praktičnu primjenu hvatanjem predmeta različitih dimenzija, oblika, materijala i struktura površina. Za tu namjenu izrađen je jedan *pick and place* program koji je poslužio kao simulacija jednostavne robotske radnje kojom se ispitao rad hvataljke prilikom hvatanja različitih predmeta. Testni primjeri pokazali su da je mGrip hvataljka vrlo prilagodljiva i da omogućuje vrlo široku primjenu u pogledu hvatanja predmeta koji su potpuno različitih oblika i dimenzija, a da pri tome nije potrebno mijenjati prethodno podešene i spremljene parametre hvataljke. Na slici 9. prikazan je testni primjeri hvatanja predmeta sa mGrip hvataljkom.



Slika 9. Primjer hvatanja predmeta mGrip mekanom hvataljkom

1.2.2. Festo Flex Shape Gripper

Flex Shape Gripper hvataljka inspirirana je primjerom iz prirode. Princip rada zamišljen je po uzoru na kameleonov jezik i način na koji kameleon hvata svoj plijen. Flex Shape Gripper hvataljka svojim mekanim silikonskim dijelom obuhvaća predmet koji hvata na način da se prilagodi vanjskom obliku predmeta. Unutar hvataljke nalazi se pneumatski dvoradni cilindar. Tijekom postupka hvatanja, pomiče se klip dvoradnog cilindra i skupa s njim uvlači se silikonski dio prema unutra te je na taj način uhvaćen predmet. Elastičnošću silikonskog dijela omogućena je precizna prilagodba predmetima različitih oblika ali relativno malih dimenzija. Na lijevom dijelu slike 10. prikazana je Flex Shape Gripper hvataljka u slučaju kada je silikonski dio izbočen, dok desni dio prikazuje hvataljku s uvučenim silikonskim dijelom što je slučaj kada hvataljka uhvati predmet rada.



Slika 10. Flex Shape Gripper hvataljka s izbočenim i uvučenim silikonskim dijelom

Za razliku od mGrip hvataljke koju je moguće sastaviti u nekoliko različitih konfiguracija jer dolazi u dijelovima koji omogućuju njezinu prilagodbu dimenzijama predmeta, hvataljka Flex Shape Gripper nema dodatnih dijelova koji omogućuju njezinu prilagodbu. Ulazni tlak koji se dovodi u komoru s mekanim silikonskim dijelom iznosi 0,07 bar i potrebno ga je ispravno podesiti uz pomoć regulatora tlaka koji dolazi s hvataljkom kako se hvataljka ne bi oštetila. Ostala dva ulaza hvataljke spajaju se s nepovratnim ventilom i omogućuju upravljanje hvataljkom. Raspon veličina predmeta koji se mogu hvatati Flex Shape Gripper hvataljkom kreće se od 12 mm do 38 mm što znači da se mogu hvatati samo predmeti manjih dimenzija, a uz to bitna je i orijentacija predmeta kojeg želimo uhvatiti. U tablici 2. navedene su tehničke karakteristike Festo Flex Shape Gripper hvataljke.

Tablica 2. Tehničke karakteristike Festo Flex Shape Gripper hvataljke

| Pokretački medij | Pneumatski upravljana hvataljka |
|--|---------------------------------|
| Hod cilindra | 66 mm |
| Tlak pokretačkog medija, p | 1 - 8 bar |
| Radni tlak kape | 0,07 – 0,1 bar |
| Maksimalna brzina kretanja s uhvaćenim predmetom | 120 mm/s |
| Temperatura radnog okruženja | 0 ... 60°C |
| Masa hvataljke, m | 475 g |
| Minimalan promjer predmeta hvatanja | 12 mm |
| Maksimalan promjer predmeta hvatanja | 38 mm |

1.2.3. Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka

Kada je riječ o vakuumskim hvataljkama one induciraju silu hvatanja na principu potlaka. U industrijskoj primjeni najčešće se koriste vakuumske hvataljke s usisnim kapticama, ali postoje i drugačije izvedbe kao npr. Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka čija je površina s kojom hvataljka hvata predmete izrađena od mekane spužve te se na taj način prilagođava površini predmeta kojega hvata. Dimenzije spužve su 110x110x30mm. Na slici 11. prikazana je Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka.



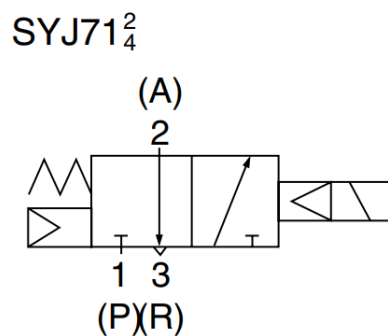
Slika 11. Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka

U tablici 3. navedene su tehničke karakteristike Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke.

Tablica 3. Tehničke karakteristike Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke

| | |
|--|---------------|
| Raspon radnog tlaka, p | 1,5 do 7 bar |
| Dimenzije spužve (d/š/v) | 110x110x30 mm |
| Razina buke | 70 dBA |
| Pneumatski priključak | Ø6 / M5 |
| Raspon radne temperature, T | -10 do +50 °C |
| Nazivni napon elektromagnetskog ventila SMC SYJ714 | 24 V |
| Potrošnja struje, I | 17 mA |

Sastavni dio Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke je Piab PNP NO LM8 podesivi vakuum senzor koji u digitalni oblik pretvara podešenu razinu vakuuma. Uz pomoć njega moguće je podesiti tlak na hvataljci. Dolazi s integriranim M8 muškim konektorom za kabel.



Slika 12. Simbol elektromagnetskog ventila SMC SYJ714

Na slici 13. prikazan je simbol SMC SYJ714 elektromagnetskog ventila s tri priključka i dva razvodna položaja. Ventil je zatvoren u početnom položaju te je za njegovo otvaranje potrebno poslati upravljački signal s robota te je nakon toga moguće hvatanja predmeta sa hvataljkom.

Za izradu praktičnog dijela ovog diplomskog rada odabrana je Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka zbog svojih tehničkih karakteristika koje su prikladne s obzirom na veličinu i masu predmeta koji će se izuzimati iz kutije.

2. PROSTORNI RASPORED OSNOVNIH ELEMENATA ROBOTSKE STANICE

U ovom poglavlju bit će opisan postupak definiranja prostornog rasporeda osnovnih elemenata robotske stanice za rukovanje dijelovima u nestrukturiranoj radnoj okolini. Na samom početku bilo je potrebno odrediti položaj gdje će se postaviti kamere i projektor Fanuc 3D stereovizijskog sustava te položaj radnih stolova s obzirom na izvršavanje zadatka izuzimanja slobodno raspoređenih predmeta iz kutije (eng. *bin picking application*). Prilikom odabira optimalnog položaja kamere i projektora bilo je potrebno zadovoljiti nekoliko kriterija, a neki od njih su da se vidno polje kamera mora nalaziti unutar radnog prostora robotske ruke, da je vizijski sustav postavljen na odgovarajuću visinu s obzirom na veličinu kutije u kojoj će se nalaziti predmeti rada te da je postavljen na mjesto gdje će biti što manji utjecaj osvjetljenja na njegov rad. S obzirom na raspoloživ prostor oko Fanuc M-710iC/45M industrijskog robota u Laboratoriju za autonomne sustave, odlučeno je da će se kamere i projektor na zajedničkom nosaču montirati na već postavljene čelične profile pričvršćene za strop na visinu od 3,5 metra od poda. Na taj način izbjegnuta je dodatna izrada postolja s nosačem na kojeg bi se pričvrstile kamere i projektor što bi ograničilo radni prostor robota, a ujedno su zadovoljeni kriteriji za optimalan rad 3D stereovizijskog sustava.

Položaj radnog stola 1 određen je uz pomoć izvora strukturiranog svjetla tako da je radni stol 1 postavljen točno u centru projiciranog uzorka strukturiranog svjetla, što je vrlo bitno za ispravan rad vizijskog sustava tj. pronalazak pozicije i prostorne orijentacije predmeta u kutiji. Prilikom prvog namještanja položaja kutije 1 na radni stol 1 vodilo se računa da se kutija 1 također nalazi na sredini stola, no u kasnijoj fazi izrade praktičnog dijela diplomskog rada omogućen je rad vizijskog procesa i kada se kutija 1 nalazi pomaknuta u neki drugi položaj na radnom stolu 1. Unutar kutije 1 proizvoljno su smješteni raznovrsni predmeti rada. Položaj radnog stola 2 na kojem će se nalaziti kutije 2 i 3 u koje će se odvojeno odlagati pojedina vrsta predmeta određen je tako da bude okomit u odnosu na radni stol 1.

Robotska stanica za rukovanje dijelovima u nestrukturiranoj radnoj okolini sastoji se od Fanuc M-710iC/45M robotske ruke čija se baza nalazi na eksternoj linearnoj osi proizvođača Güdel koja pruža dodatan sedmi stupanj slobode gibanja robotske ruke i time povećava radni prostor i pokretljivost industrijskog robota. Na vrhu robotske ruke nalazi se Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka s kojom će se hvatati predmeti lokalizirani 3D stereovizijskim sustavom.

Na slici 13. prikazan je prostorni raspored osnovnih elemenata robotske stanice za izuzimanje slobodno raspoređenih predmeta iz kutije koji je postavljen u Laboratoriju za autonomne sustave.



Slika 13. Prikaz robotske stanice

Na slici 14. prikazana je kutija 1 smještena na radnom stolu 1 u kojoj se nalaze slobodno raspoređeni predmeti rada.



Slika 14. Kutija 1 sa slobodno raspoređenim predmetima rada

U sklopu ovog diplomskog rada cilj je ispitati primjenjivost industrijskog robota povezanog s 3D vizijskim sustavom za obavljanje zadataka izuzimanja slobodno raspoređenih predmeta široke potrošnje iz kutije. Sastavni dio Laboratorija za autonomne sustave je eksperimentalni postav sastavljen od predmeta za široku potrošnju koji su prikazani na slici 15.



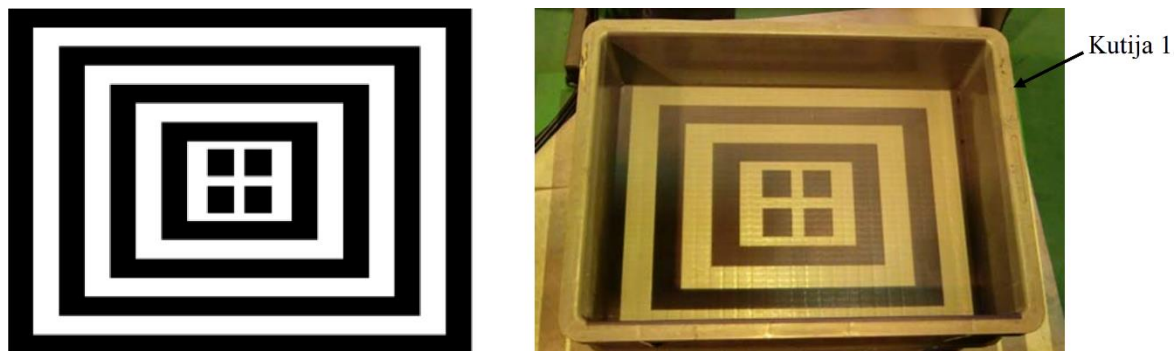
Slika 15. Eksperimentalni postav s predmetima široke potrošnje

Karakteristika tih predmeta je da su oni deformabilni te zbog toga što se proizvode u velikim serijama moguća su određena odstupanja prilikom njihovog pakiranja u ambalažu. Za predmete rada s kojima će se izvršiti ispitivanje odabrani su paketi Cedevite i AXE dezodoransi. Izabrani su jer su od svih ostalih ponuđenih predmeta paketi Cedevite i AXE dezodoransi imali najveće izgleda za uspješnu primjenu u vizijskim procesima lokalizacije.

2.1.1. Fanuc 3D Area senzor

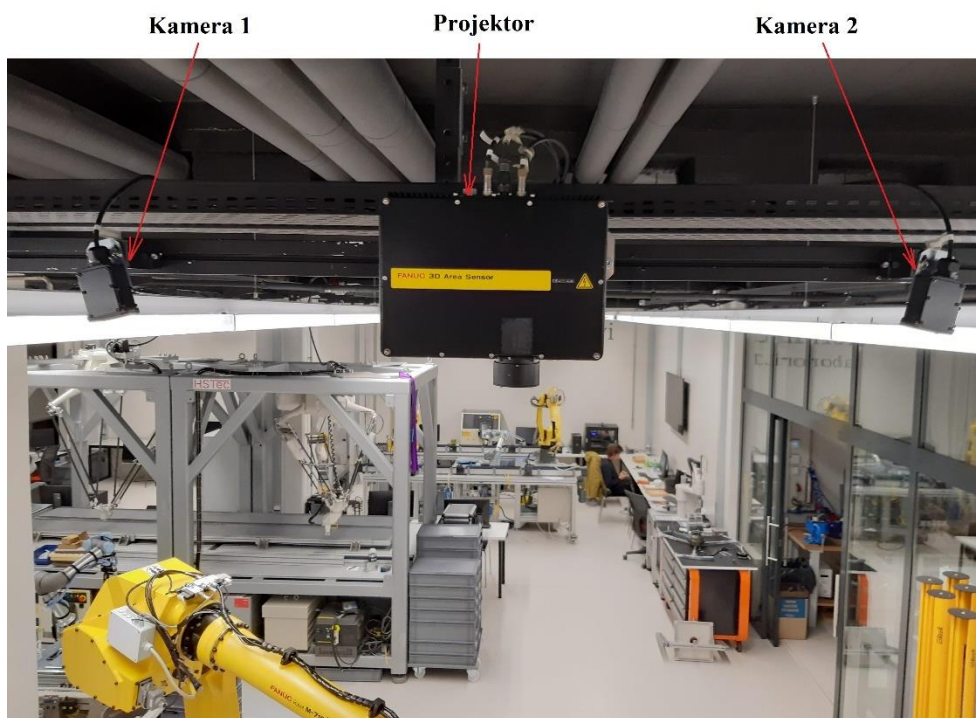
Fanuc 3D Area senzor sastoji se od tri komponente, a to su dvije kamere i jedan projektor. Projektor velikom brzinom projicira strukturirano svjetlo dok za to vrijeme kamere snimaju slike. Na temelju preklapanja snimljenih slika s dviju kamera 3D vizijski sustav generira oblak točaka s kojim je moguće predočiti 3D prikaz predmeta rada. Svaka točka prostorno je točno određena te joj se može dodijeliti boja koja predstavlja određenu vrijednost ovisno o udaljenosti od kamera. Na taj način izvršava se prepoznavanje prostornih značajki predmeta unutar kutije.

Udaljenost između kamera iznosi 1200 milimetara, dok je udaljenost između projektora i korisničkog koordinatnog sustava definiranog na gornjem rubu kutije 2400 milimetra. Izgled strukturiranog uzorka svjetla prikazan je na slici 16.



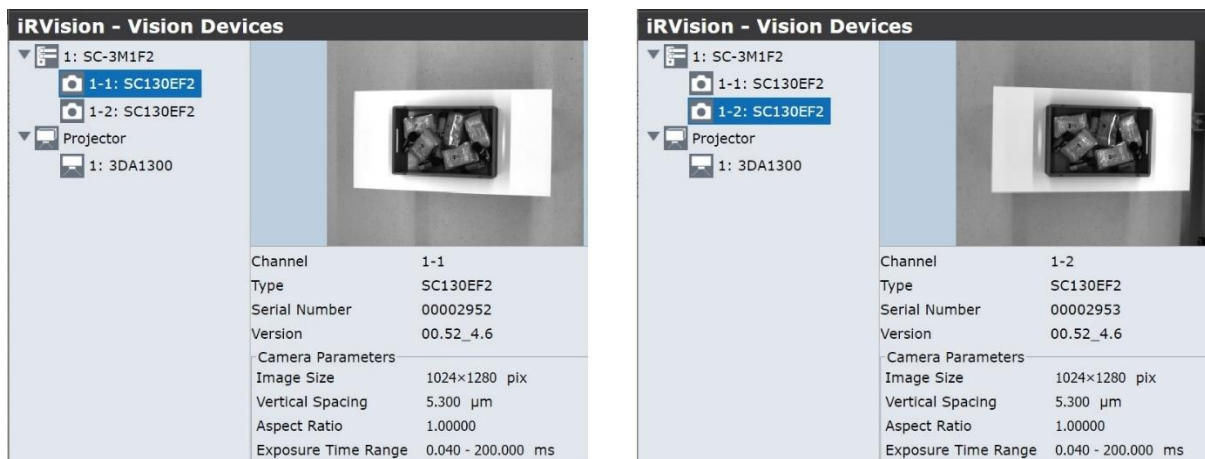
Slika 16. Uzorak strukturiranog svjetla projektora Fanuc 3D Area senzora

Kamere i projektor postavljaju se na čvrsto postolje koje se nalazi na preporučenoj udaljenosti od predviđenog radnog mjesta. 3D Area senzor nije zamišljen da se montira na robotsku ruku. Na slici 17. prikazan je Fanuc 3D Area senzor postavljen u Laboratoriju za autonomne sustave.



Slika 17. Fanuc 3D Area senzor

Unutar alata “Vision Devices“ moguće je vidjeti informacije o vizijskim jedinicama koje su spojene s robotskim kontrolerom. Na slici 18. prikazane su osnovne informacije o kamerama Fanuc 3D Area senzora koje će se koristiti u praktičnom dijelu ovog diplomskog rada.



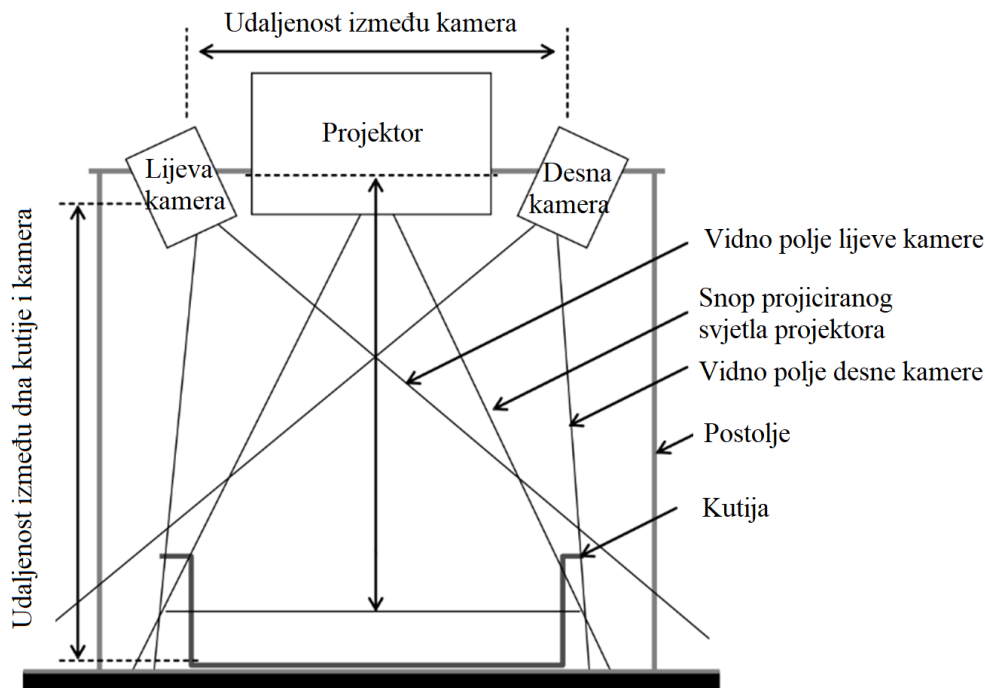
Slika 18. Korištene kamere Fanuc 3D Area senzora

Osnovni podaci o projektoru Fanuc 3D Area senzora prikazani su na slici 19.



Slika 19. Korišten projektor Fanuc 3D Area senzora

Na slici 20. dan je shematski prikaz pravilnog smještaja 3D Area senzora. Kamere i projektor postavljene su u istoj ravnini na zajedničkom nosaču.



Slika 20. Shematski prikaz položaja Fanuc 3D Area senzora [4]

Vrijednost točnosti Fanuc 3D Area senzora po Z osi može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$\text{Točnost po Z osi} = \frac{\text{Duljina duže strane vidnog polja kamere} \times \text{Udaljenost između dna kutije i kamere}}{\text{Broj piksela duže strane slike} \times \text{Udaljenost između kamera}}$$

Točnosti po Z osi izračunata prema vrijednostima udaljenosti fizičkog postava 3D Area senzora u Laboratoriju za autonomne sustave iznosi $\pm 2,83$ mm.

$$\text{Točnost po Z osi} = \frac{1400 \times 2400}{989 \times 1200} = \pm 2,83 \text{ mm}$$

Važno je napomenuti kako je izračunata točnost po Z osi teoretska vrijednost. Na stvarnu vrijednost točnosti po Z-osi utječu fokus projiciranog uzorka, fokus kamere, ambijentalno svjetlo, točnost kalibracije svake kamere itd. [3]

Intenzitet osvjetljenja projektorske jedinice je ograničen. Kako bi se dobio dobar kontrast između svijetlih i tamnih pruga projiciranog uzorka te kako bi se dobila što stabilnija 3D mapa, područje projiciranog svjetla projektora treba biti što je moguće uže. To posebno dolazi do izražaja kada je boja predmeta slična boji strukturiranog svjetla i/ili je omjer refleksije površine predmeta vrlo nizak. Prema procijenjenim vrijednostima proizvođača, Fanuc 3D Area senzor može stabilno dohvatiti 3D mapu kada je vrijednost intenziteta ambijentalnog svjetla za pola manja od intenziteta svjetla projektora.

2.1.2. Robot Fanuc M-710iC/45M

Fanuc M-710iC/45M industrijski robot ima šest stupnjeva slobode gibanja gdje su svi zglobovi rotacijski. U nazivu robota oznaka M-710 na početku označava seriju, oznaka iC verziju robota, a 45M na kraju označava tip te ujedno daje informaciju o maksimalnoj nosivosti robota od 45kg, dok slovo M upućuje na karakteristiku velike inercije ovoga robota. Primjena Fanuc M-710iC/45M industrijskih robota je široka, od zadataka automatiziranog rukovanja predmetima rada kod paletizacije i depaletizacije, zadataka montaže dijelova u automobilskoj industriji do primjene u postupcima zavarivanja. Ovaj robot prikladan je izbor za radna mjesta gdje je potreban veliki radni doseg. Na slici 21. prikazan je robot Fanuc M-710iC/45M koji će se koristiti u praktičnom dijelu ovog diplomskog rada.



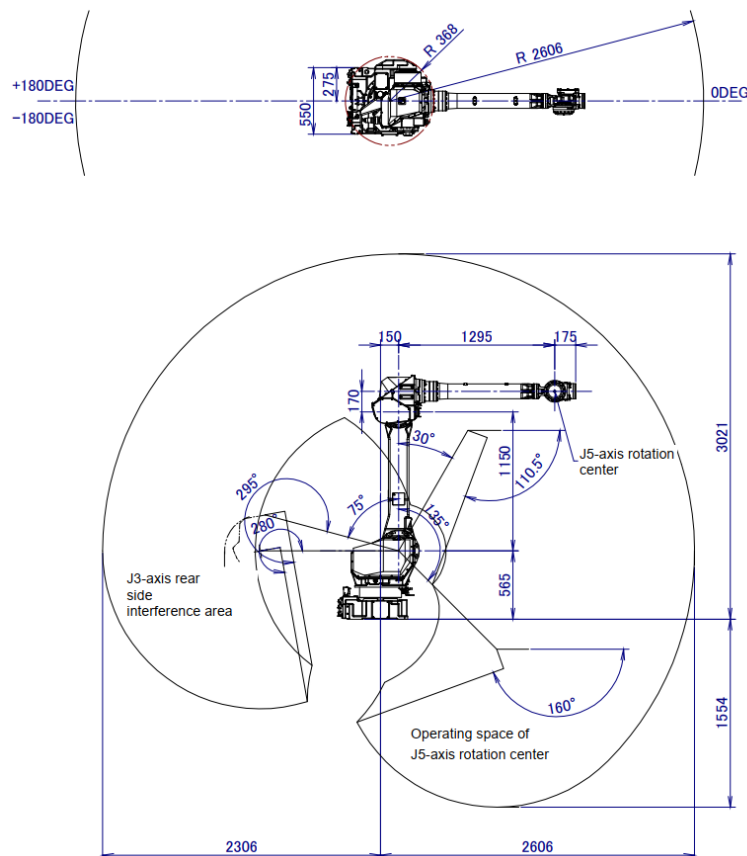
Slika 21. Fanuc M-710iC/45M

Na slici 22. prikazan je Fanuc privjesak za učenje (eng. *Teach pendant*) koji omogućava pisanje TP programa te njihovo ručno pokretanje.



Slika 22. Fanuc privjesak za učenje (eng. Teach pendant)

Na slici 23. prikazan je radni doseg Fanuc M-710iC/45M industrijskog robota.



Slika 23. Radni prostor Fanuc M-710iC/45M robota [5]

U tablici 4. navedene su osnovne tehničke karakteristike Fanuc M-710iC/45M industrijskog robota.

Tablica 4. Osnovne tehničke karakteristike Fanuc M-710iC/45M industrijskog robota [5]

| | | |
|---|-------------|----------------------|
| Broj osi | 6 | |
| Masa | 570 kg | |
| Doseg | 2606 mm | |
| Točnost ponavljanja (ISO 9283) | ± 0,06 mm | |
| Maksimalna nosivost na zglobu | 45 kg | |
| Verzija robotskog kontrolera | R-30iB Plus | |
| Verzija software-a robotskog kontrolera | V9.30 | |
| Opseg gibanja | J1 | 360° (6,28 rad) |
| | J2 | 225° (3,93 rad) |
| | J3 | 440° (7,68 rad) |
| | J4 | 800° (13,96 rad) |
| | J5 | 250° (4,36 rad) |
| | J6 | 800° (13,96 rad) |
| Maksimalna brzina | J1 | 180 °/s (3,14 rad/s) |
| | J2 | 180 °/s (3,14 rad/s) |
| | J3 | 180 °/s (3,14 rad/s) |
| | J4 | 250 °/s (4,36 rad/s) |
| | J5 | 250 °/s (4,36 rad/s) |
| | J6 | 360 °/s (6,28 rad/s) |
| Dozvoljeni moment na zglobu | J4 | 206 Nm |
| | J5 | 206 Nm |
| | J6 | 127 Nm |
| Prosječna potrošnja energije | 2,5 kW | |

2.1.3. Güdel TMF-2 eksterna linearna os

Eksterna linearna os Güdel TMF-2 omogućuje linearno kretanje Fanuc M-710iC/45M robota koji se nalazi na postolju preko zupčastog prijenosa. Ova linearna os omogućava dodatnu fleksibilnost robotskih stanica za strojnu obradu, opsluživanje CNC strojeva, zavarivanje, lijevanje, paletizaciju itd. Na slici 24. prikazana je eksterna linearna os osi Güdel TMF-2.



Slika 24. Güdel TMF-2 linearna os [6]

U tablici 5. navedene su osnovne tehničke karakteristike Güdel TMF-2 eksterne linearne osi.

Tablica 5. Osnovne tehničke karakteristike linearne osi Güdel TMF-2 [6]

| | Dinamičko opterećenje | Statičko opterećenje |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Maksimalna nosivost, N | 9000 | 25000 |
| Dopuštena brzina, v , m/min | 150 | 90 |
| Dopušteno ubrzanje, m/s^2 | 4 | 1,5 |
| Prijenosni omjer zupčanika | 5 | 8 |
| Hod osi po okretaju motora, mm | 32 | 20 |
| Vrijeme ubrzanja t , s | 0,63 | 1 |
| Dozvoljena brzina motora, min^{-1} | 4500 | 4500 |
| Okretni moment motora, Nm | 3,1 | 5 |
| Maksimalni okretni moment motora, Nm | 31,1 | 22 |
| Ponovljivost, mm | $\pm 0,02$ | |

2.1.4. Sklop robotskog alata s Piab Kenos KCS vakuuskom hvataljkom

Sklop robotskog alata s Piab Kenos KCS vakuuskom hvataljkom na vrhu sastoji se od nekoliko dijelova. Prva komponenta montirana na pribudnicu robotske ruke je Fanuc FS-100iA senzor sile i momenta uz pomoć kojeg je moguće pratiti iznose sile koje djeluju na vrhu robotske ruke tijekom izvršavanja zadataka. Upotrebom informacija o promjeni sile i momenata omogućeno je sigurnije djelovanje robota kao što je npr. zaustavljanje robota u situaciji kada robotski alat dođe u nepredviđenu koliziju s predmetom rada ili nekim drugim dijelom u radnom prostoru robota. Senzor sile i momenta jedna je od ključnih komponenti prilikom izvršavanja robotskih zadataka sklapanja i montaže dijelova, testiranja proizvoda, rukovanja materijalima i još u mnogim drugim robotskim aplikacijama. U tablici 6. dane su osnovne tehničke karakteristike Fanuc FS-100iA senzora sile i momenta.

Tablica 6. Tehničke karakteristike Fanuc FS-100iA senzora sile i momenta [7]

| | | |
|---|------------|----------------------------------|
| Srednji promjer, D | | Ø142,1 mm |
| Visina, h | | 74,5 mm |
| Masa, m | | 3,2 kg |
| Nazivno opterećenje | Fx, Fy, Fz | 980 N |
| | Mx, My, Mz | 156 Nm |
| Statičko preopterećenje | Fx, Fy, Fz | 9800 N |
| | Mx, My, Mz | 1560 Nm |
| Razlučivost | Fx, Fy, Fz | 2,0 N |
| | Mx, My, Mz | 0,08 Nm |
| Točnost | | Manje od 2% nazivnog opterećenja |
| Modeli Fanuc robota na kojima se može koristiti | | M-710iC, R-1000iA, R-2000iB/125L |

Na senzor sile pričvršćen je Schunk SWA-040 veliki izmjenjivač alata, zatim čelična adapterska ploča za prelazak s velikog na mali Schunk SWK-011 izmjenjivač alata što se iznimno koristi u ovom slučaju zato što Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka dolazi s izrađenom pribudnicom koja po dimenzijama odgovara za pričvršćivanje na Schunk SWK-011 izmjenjivač alata. Na vrhu sklopa robotskog alata nalazi se Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka koja je detaljnije opisana u potpoglavlju 1.2.3. Lijevo na slici 25. prikazana je Piab Kenos KCS vakuumska hvataljka s uhvaćenim paketom Cedevite, dok je desno prikazan način hvatanja AXE dezodoransa.

**Slika 25. Prikaz hvatanja predmeta rada s Piab Kenos KCS vakuumskom hvataljkom**

3. PROCES KALIBRACIJE VIZIJSKOG SUSTAVA I ROBOTA

3.1. Kalibracija vizijskog sustava

Kalibracijom vizijskog sustava povezuju se koordinatni sustavi kamera s koordinatnim sustavom robota. Proces kalibracije Fanuc 3D Area senzora proveden je u nekoliko koraka koji su opisani u nastavku.

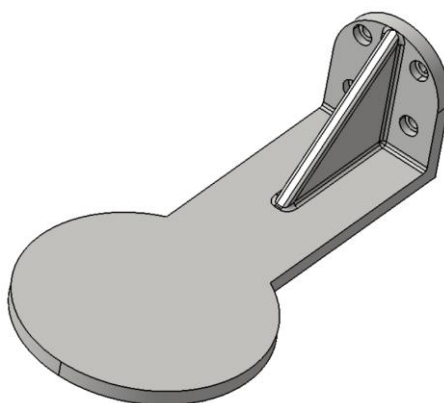
3.1.1. Izrada alata za kalibraciju kamera

Za proces kalibracije kamera potrebno je izraditi robotski alat na kojem će se nalaziti posebna oznaka koju prepoznaje vizijski sustav. Na temelju velikog broja točaka u prostoru u koje će robot dovesti robotski alat kalibrirat će se vizijski sustav. Na slici 26. prikazani su primjeri triju vrsta ispravnog izgleda oznaka za provedbu kalibracije kamera Fanuc 3D Area senzora.



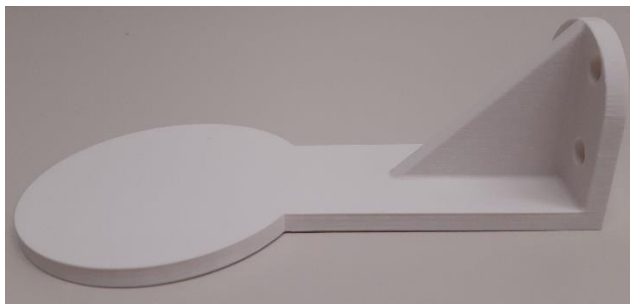
Slika 26. Primjer izgleda ispravnih oznaka za proces kalibracije kamera [7]

S obzirom na ponuđene oblike oznaka i preporučene dimenzije navedene u priručniku, u programskom paketu Catia V5 napravljen je 3D model alata za kalibraciju kamera koji je prikazan na slici 27.



Slika 27. CAD model alata za kalibriranje

Na slici 28. prikazan je alat za kalibraciju kamera izrađen iz PLA materijala aditivnom tehnologijom na Prusa i3 MK3 3D printeru.



Slika 28. Alat za kalibraciju kamera izrađen 3D printanjem

U programskom paketu Inkscape za vektorsko grafičko uređivanje, prema modeliranim dimenzijama alata za kalibriranje, izrađen je uzorak s kojim će se izvršiti kalibracija kamera. Uzorak je isprintan na papir, izrezan te nakon toga zalijepljen na alat za kalibraciju kamera. Na slici 29. prikazan je konačni izgled alata za kalibraciju kamera.



Slika 29. Konačni izgled alata za kalibraciju kamera

Alat za kalibraciju kamera pričvršćen je na vrh robotske ruke te je nakon toga potrebno izvršiti kalibraciju njegovog koordinatnog sustava.

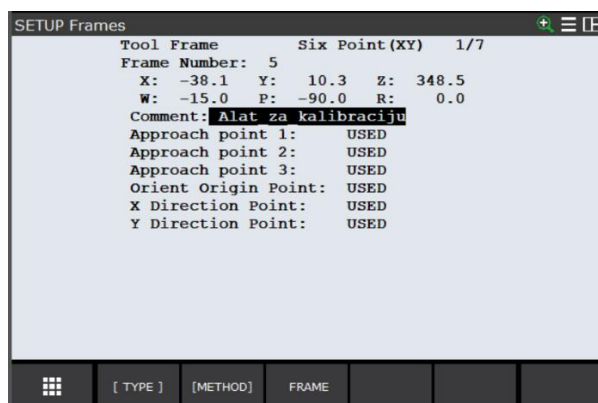
3.1.2. Kalibracija koordinatnog sustava alata za kalibraciju kamera

Proces kalibracije koordinatnog sustava alata za kalibraciju kamera izvršen je metodom šest točaka. Na početku je za fiksno postolje pričvršćen standardni aluminijski profil na kojem se nalazi šiljak za kalibraciju izrađen 3D printanjem. Kako bi koordinatni sustav alata bio ispravno kalibriran potrebno je s robotskom rukom što preciznije približiti središnji dio oznake za kalibraciju kamera na vrh šiljka. Na slici 30. prikazan je proces kalibracije koordinatnog sustava alata za kalibraciju kamera gdje se robotskom rukom u tri različita položaja približilo središte oznake za kalibraciju kamera na vrh šiljka. Nakon toga definirana je točka ishodišta koordinatnog sustava alata te smjerovi X i Z koordinatnih osi.



Slika 30. Prikaz postupka kalibracije koordinatnog sustava alata za kalibraciju kamera

Nakon provedenog procesa kalibracije koordinatnog sustava alata za kalibriranje kamera, na slici 31. prikazane su vrijednosti koje definiraju položaj točke središta alata (eng. *TCP – Tool Center Point*) u odnosu na predefimirani koordinatni sustav prihвата alata koji se nalazi u osi šestog zgloba.

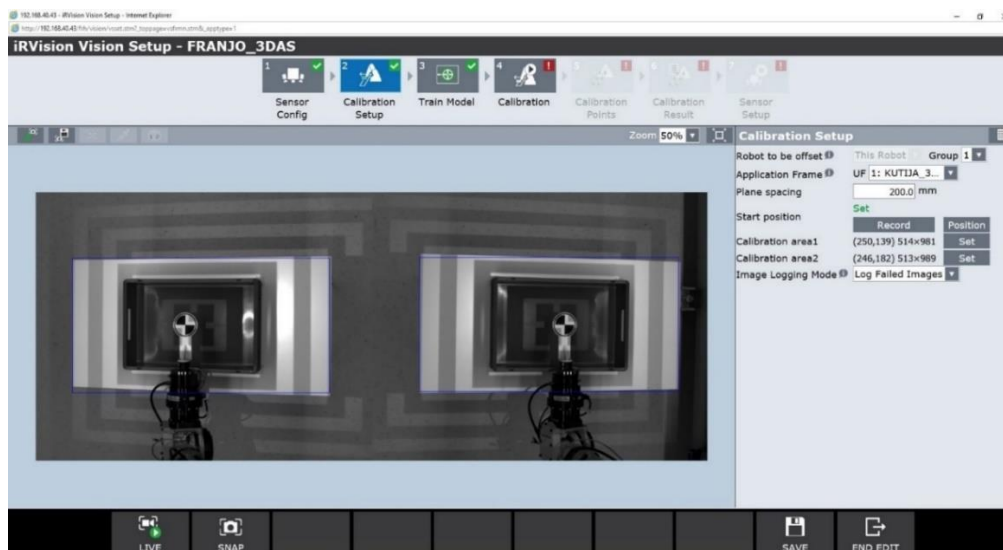


Slika 31. Koordinatni sustav alata za kalibraciju kamera

3.1.3. Proces kalibracije kamera

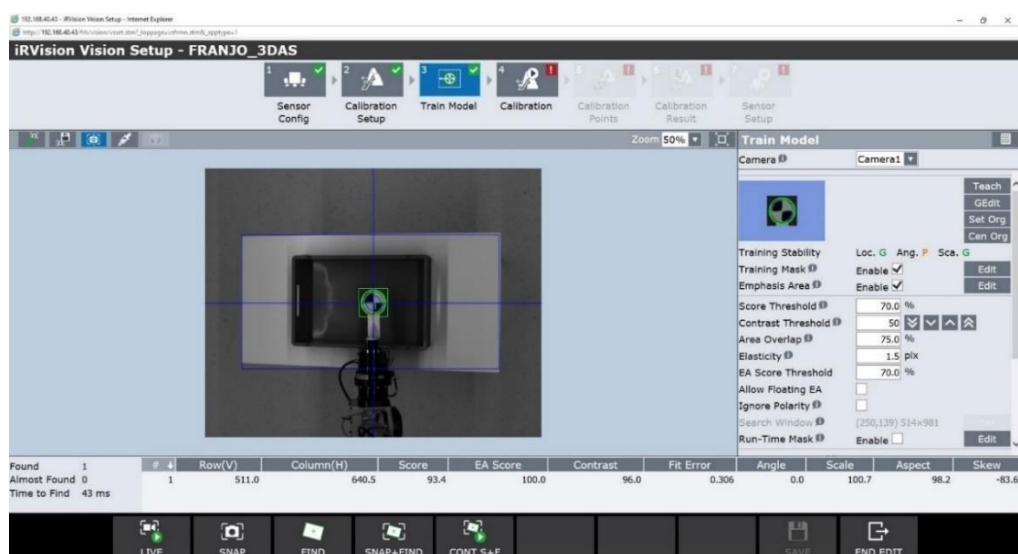
U ovome dijelu opisat će se postupak postavljanja potrebnih parametara kako bi se izvršila kalibracija kamera. Na slici 32. pod opcijom [Application Frame] odabire se referentni korisnički koordinatni sustav u odnosu na kojeg će biti izvršena kalibracija kamera. U ovome radu, korisnički koordinatni sustav 1 definiran je na gornjem uglu kutije 1 tako da x i y osi prate stranice kutije, a os z je usmjerena prema gore. Ovakav smještaj korisničkog koordinatnog sustava uvelike olakšava daljnje postavljanje parametara vizijskog procesa. Opcijom [Plane spacing] definiramo razmak između dviju kalibracijskih ravnina u kojima će se izvršiti pomicanje robotske ruke s alatom za kalibraciju kamera. Ovdje je definirana vrijednost od 200 mm zato što je u tehničkoj dokumentaciji navedeno da ta vrijednost razmaka iznosi oko 10% vrijednosti udaljenosti između kamere i ravnine na kojoj je smješten referentni korisnički koordinatni sustav, što u ovome primjeru iznosi 2400mm. Nakon toga dovodimo robotsku ruku

s alatom u središte vidnog polja kamere i tu poziciju spremamo kao početnu. Pod [Calibration area 1 i 2] određujemo područje vidnog polja kamere u kojem želimo da se izvrši kalibracija kamera. Ovdje je odabrano područje površina radnog stola 1 zato što će u tom području biti položaj kutije. Na slici 32. prikazan je prozor sučelja vizijskog procesa za izvođenje kalibracije kamera Fanuc 3D Area senzora.



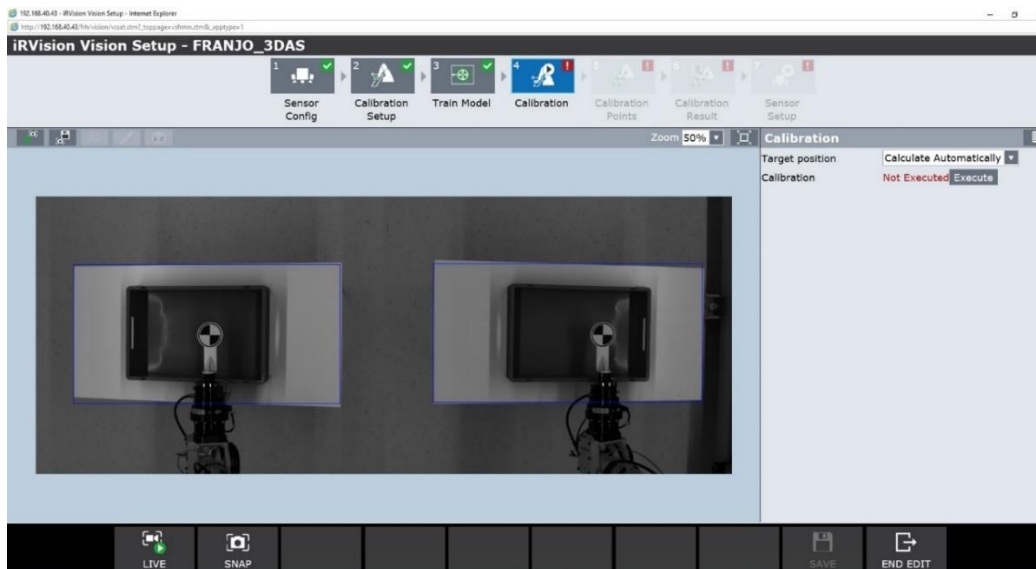
Slika 32. Postavke kalibracije kamera Fanuc 3D Area senzora

Nakon toga potrebno je vizijskom procesu definirati izgled oznake uz pomoć koje će se izvršiti kalibracija kamera. Kao što prikazuje slika 33. oznaka se nalazi pričvršćena na vrhu robotske ruke te će tu oznaku u procesu kalibracije kamera robotska ruka pomicati u velik broj različitih točaka u prostoru.



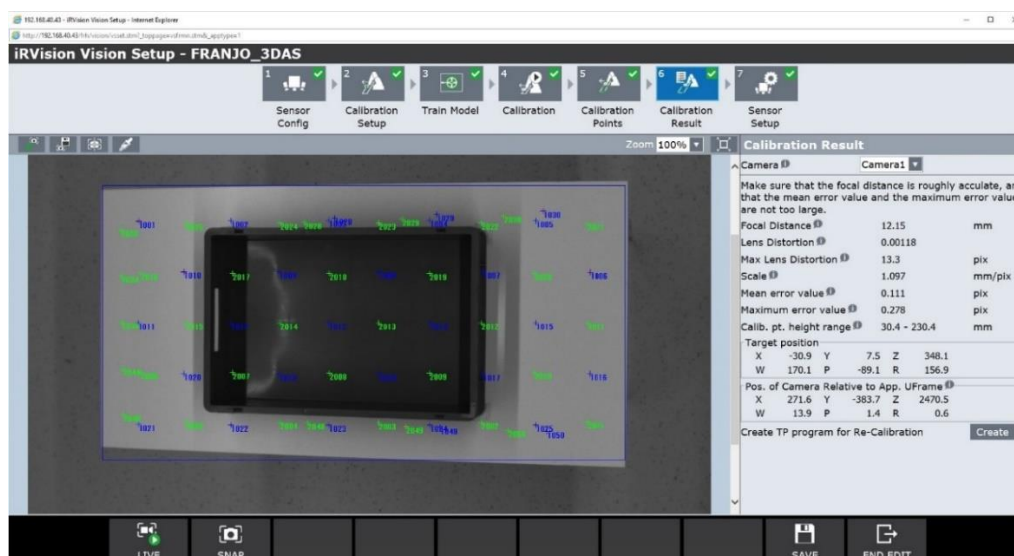
Slika 33. Učenje modela oznake za kalibraciju kamera Fanuc 3D Area senzora

Kada vizijski proces uspješno pronađe oznaku potrebno je pokrenuti kalibraciju kamera koja se u verziji softvera V9.30 izvodi odabirom opcije *Calculate Automatically* kako je prikazano na slici 34.



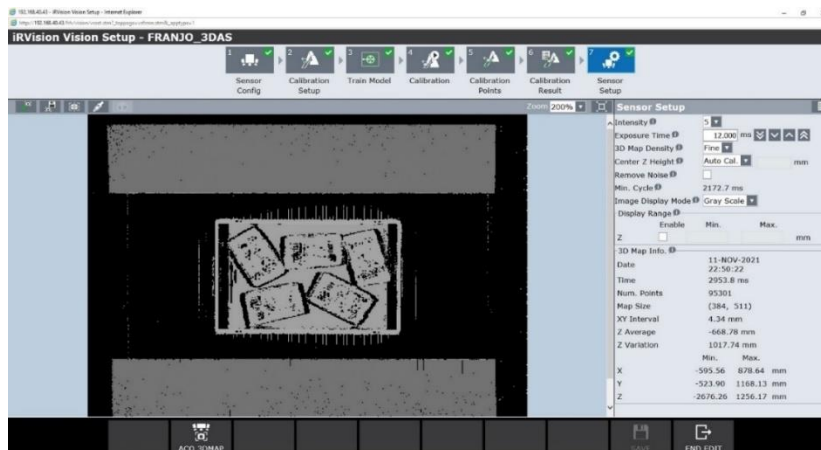
Slika 34. Početak izvođenja procesa kalibracije kamera Fanuc 3D Area senzora

Izvođenje automatske kalibracije kamera traje 15 minuta te nakon toga vizijski proces prikazuje točke u prostoru snimljene kamerama tijekom procesa kalibracije. Kalibracija kamera provedena je s ukupno 100 snimljenih točaka. Rezultati kalibracije kamera prikazani su na slici 35. Iz rezultata se vidi položaj koordinatnog sustava kamera u odnosu na korisnički koordinatni sustav koji se nalazi na gornjem rubu kutije 1.



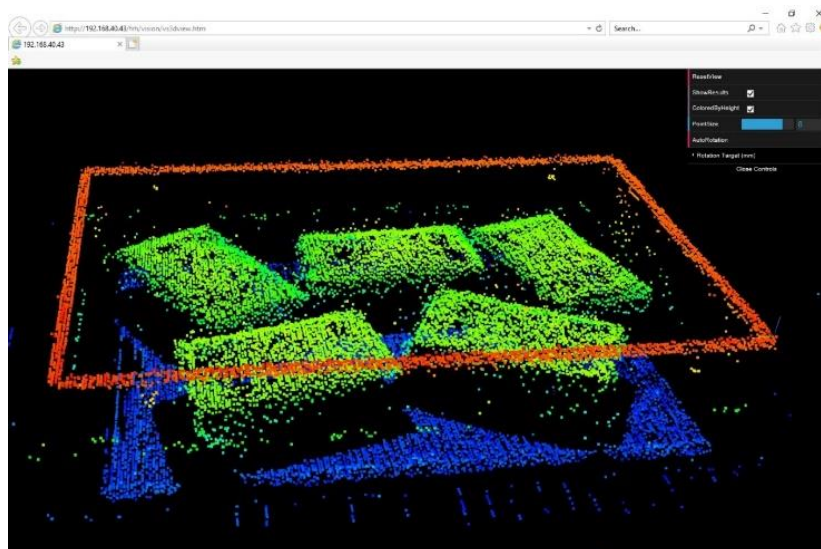
Slika 35. Rezultati kalibracije Fanuc 3D Area senzora

Slika 36. prikazuje postavke Fanuc 3D Area senzora nakon provedene kalibracije kamera. Odabirom naredbe ACQ 3DMAP kreira se 3D oblak točaka te se u programskom sučelju vizijskog procesa prikazuju podaci snimljenog 3D oblaka točaka.



Slika 36. Postavke Fanuc 3D Area senzora nakon kalibracije kamera

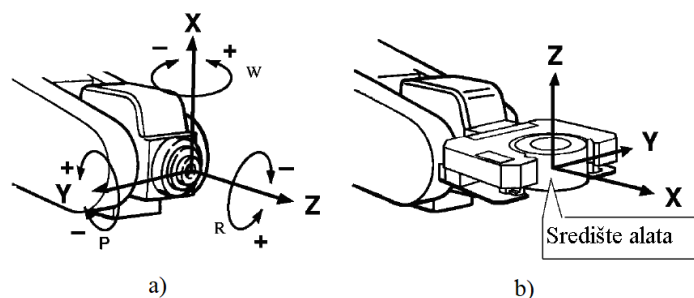
3D oblak točaka generira se na temelju preklapanja snimljenih slika s dviju kamera 3D Area senzora. Uz pomoć oblaka točaka moguće je predočiti 3D prikaz predmeta rada. Svaka točka ima točno definiranu poziciju u prostoru s obzirom na zadani koordinatni sustav. Što je više točaka u generiranom oblaku točaka to će vizijski proces kvalitetnije i pouzdanije izvršiti lokalizaciju predmeta unutar kutije. Svakoj točki dodijeljena je boja s obzirom na udaljenost od ishodišta definiranog koordinatnog sustava. Na slici 37. prikazan je 3D oblak točaka snimljenih predmeta u kutiji. Točke obojene crvenom bojom najbliže su ishodištu koordinatnog sustava, dok točke obojene plavom bojom označavaju da su najudaljenije od ishodišta koordinatnog sustava.



Slika 37. Prikaz 3D oblaka točaka

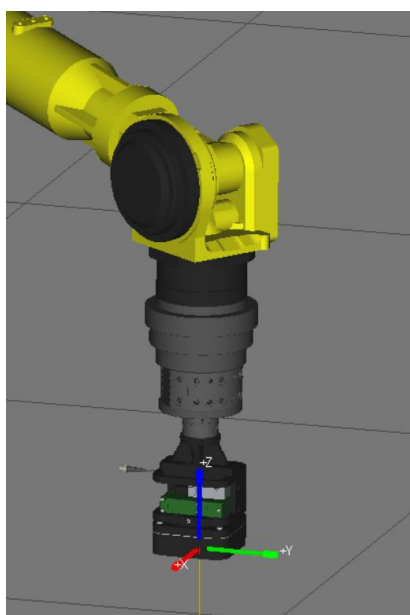
3.2. Kalibracija koordinatnog sustava Piab vakuumske hvataljke

Kako bi vrh alata uvijek izvršavao željeno gibanje potrebno je definirati koordinatni sustav alata. Analogno preddefiniranom koordinatnom sustavu svijeta robota postoji i preddefinirani koordinatni sustav prihvata alata koji se nalazi u osi šestog zgloba. Ovisno o alatu koji se nalazi na vrhu robotske ruke, prema toj točki dalje se definira bilo koji drugi koordinatni sustav alata. Upravljačka jedinica Fanuc robota pruža mogućnost definiranja do deset koordinatnih sustava alata. [9]



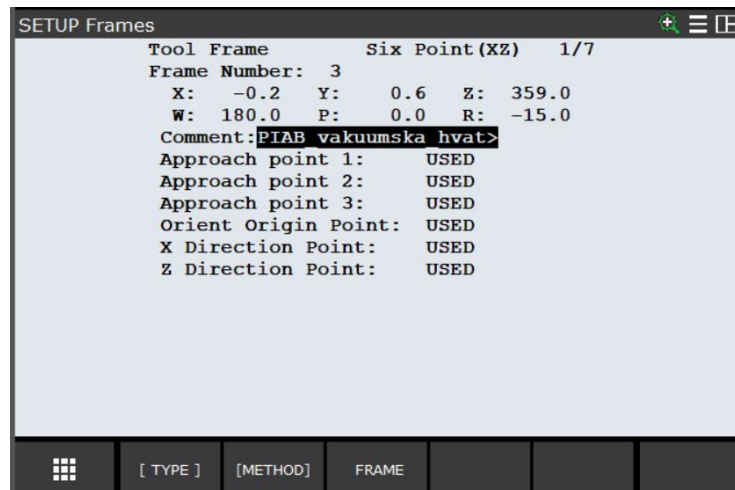
Slika 38. a) Točka prihvata alata b) Koordinatni sustav središta alata [9]

Koordinatni sustav alata bitan je za ispravno pomicanje točke središta alata (eng. *TCP- Tool center point*) u točku hvatanja predmeta. Z-os koordinatnog sustava Piab vakuumske hvataljke treba postaviti duž smjera u kojem se hvataljka približava radnom predmetu. Pozitivan smjer Z-osi treba biti obrnut u usporedbi sa smjerom u kojem se hvataljka približava predmetu hvatanja kao što prikazuje slika 39.



Slika 39. Smjer Z-osi koordinatnog sustava Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke

Kalibracija koordinatnog sustava Piab vakuumske hvataljke provedena je metodom šest točaka u sklopu koje je definiran smjer X i Z osi. Dobivene vrijednosti nakon kalibracije koordinatnog sustava Piab vakuumske hvataljke prikazane su na slici 40.



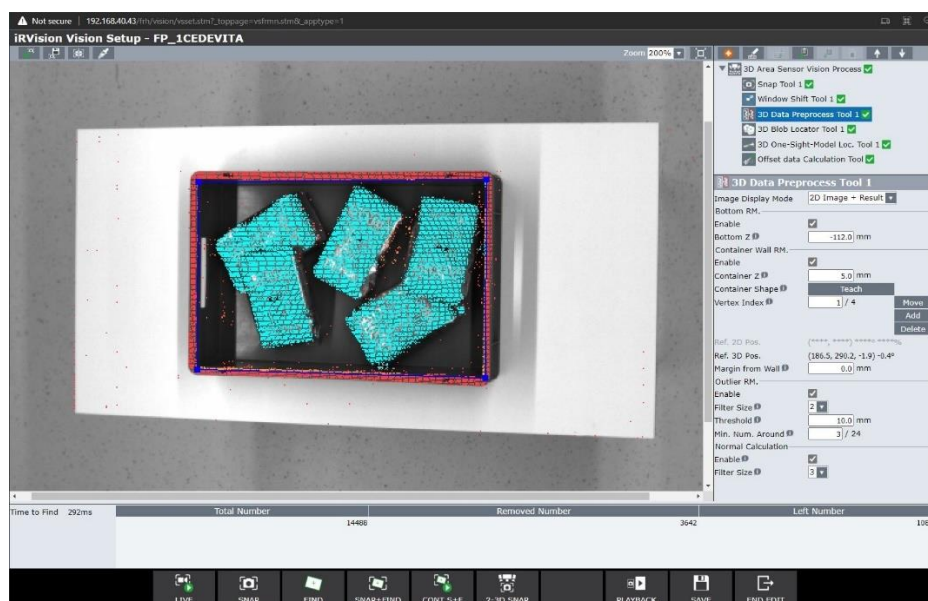
Slika 40. Koordinatni sustav Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke

4. KREIRANJE VIZIJSKOG PROCESA ZA LOKALIZACIJU PREDMETA RADA

Nakon provedenog procesa kalibracije kamera Fanuc 3D Area senzora kreirani su vizijski procesi uz pomoć kojih je vizijski sustav pronalazio poziciju i prostornu orijentaciju predmeta rada unutar kutije. Primjenom dostupnih alata unutar Fanuc iRVision programskog sučelja moguće je izraditi vizijske procese za prepoznavanje predmeta različitih oblika i dimenzija te izvršiti lokalizaciju na temelju prepoznavanja specifičnih karakteristika predmeta.

4.1. 3D Data Preprocess Tool

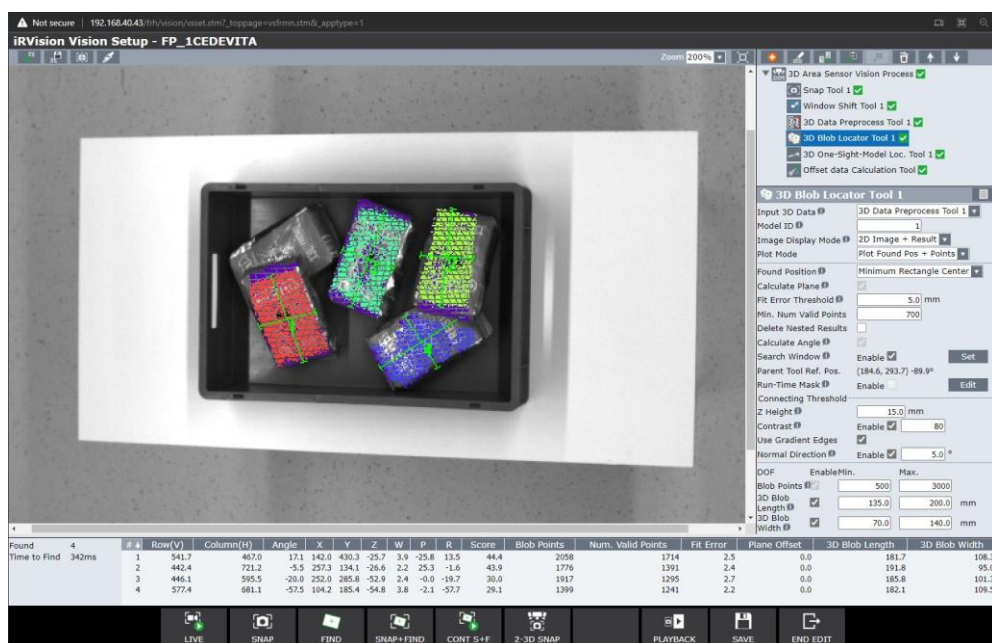
Alat 3D Data Preprocess Tool služi za uklanjanje točaka unutar 3D oblaka točaka koje pripadaju bočnim stranicama kutije i dnu kutije. Definiranjem vrijednosti Bottom Z u odnosu na korisnički koordinatni sustav, vizijski proces neće uzimati u obzir sve točke koje su na većoj udaljenosti od Bottom Z. Ako su sve vrijednosti pravilno definirane, odabirom opcije 2-3D SNAP prikazuje se rezultat dohvaćanja 3D mape u kojem vizijski proces pronalazi samo oblak točaka koji opisuje površinu predmeta. Ovaj alat korišten je i u postupku verifikacije rada vizijskog sustava pri različitim svjetlosnim uvjetima koji je opisan u poglavlju 6. ovog diplomskog rada gdje se bilježio broj dohvaćenih točaka u oblaku točaka prilikom promjene intenziteta ambijentalnog osvjetljenja. Na slici 41. prikazan je izgled korisničkog sučelja alata 3D Data Preprocess tool koji se koristi u vizijskom procesu lokalizacije paketa Cedevite.



Slika 41. 3D Data Preprocess tool

4.2. Vizijski proces FP_1CEDEVITA

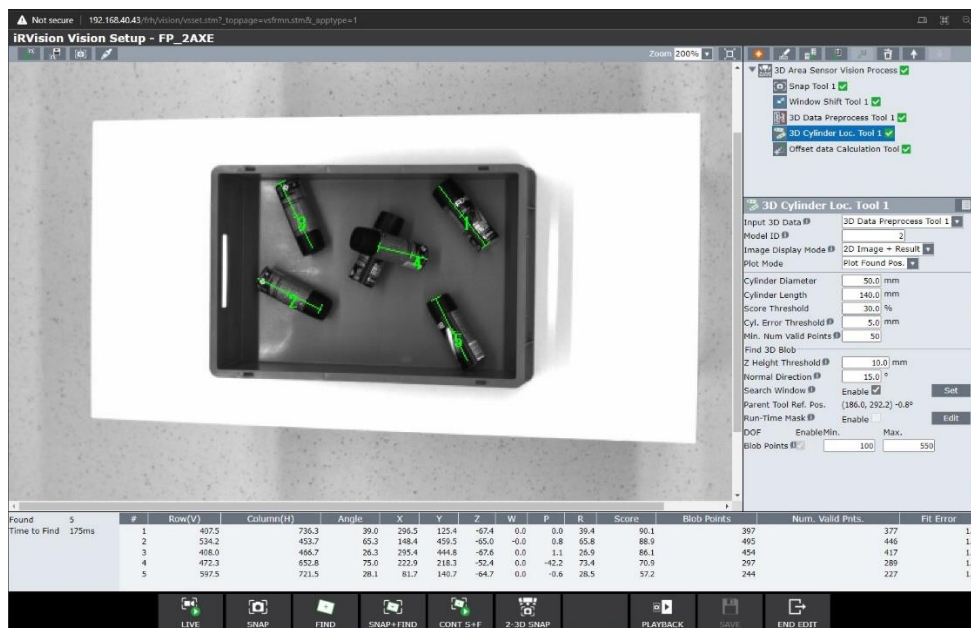
Vizijski proces FP_1CEDEVITA izrađen je za potrebe lokalizacije paketa Cedevida unutar kutije 1. Traženje paketa Cedevida izvršava se uz pomoć dva alata te na temelju boljih rezultata traženja dohvaća se prostorna pozicija i orijentacija paketa Cedevide. Korišteni alati u ovom vizijskom procesu su 3D Blob locator tool i 3D One-sight-model locator tool. Također, u vizijskom procesu FP_1CEDEVITA koristi se alat Window Shift tool koji služi za pronalaženje položaja kutije kada se kutija pomakne u novi položaj na radnom stolu 1. Nova pozicija kutije zapisuje se u vizijski registar. Na taj način osigurano je ispravno izvođenje vizijskog procesa FP_1CEDEVITA kada je pomaknuta kutija 1. Na slici 42. prikazan je prozor korisničkog sučelja vizijskog procesa za traženje položaja i prostorne orijentacije paketa Cedevida.



Slika 42. Vizijski proces FP_1CEDEVITA

4.3. Vizijski proces FP_2AXE

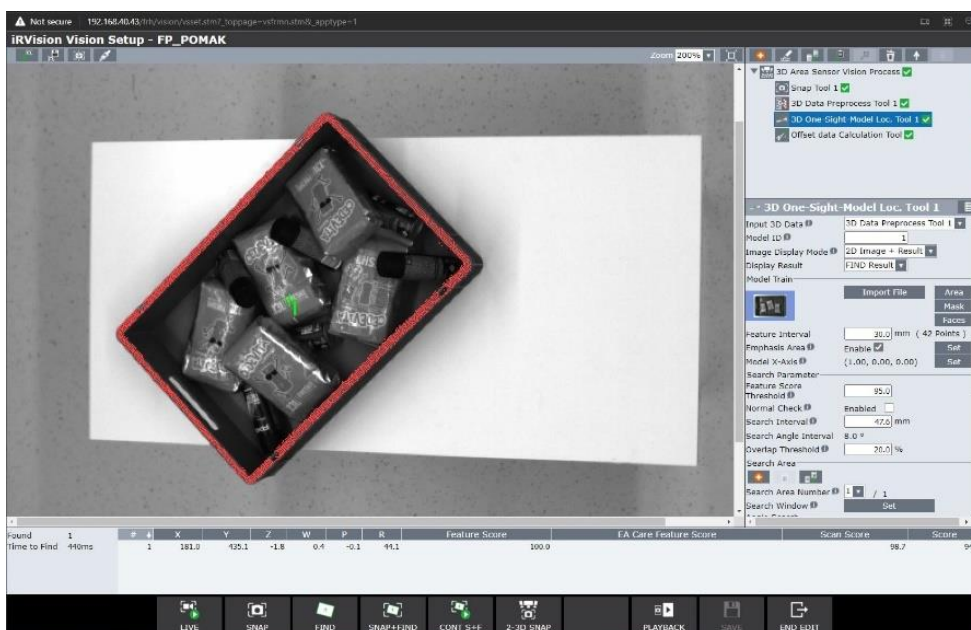
Vizijski proces FP_2AXE izrađen je kako bi se mogao izvršavati TP program lokalizacije AXE dezodoransa unutar kutije 1. Za prepoznavanje položaja AXE dezodoransa korišten je alat 3D Cylinder loc. Tool koji je namijenjen traženju predmeta valjkastog oblika. Na temelju unesenih podataka o promjeru i visini valjkastog predmeta vizijski proces pronalazi prostornu poziciju i orijentaciju valjkastih predmeta. Na slici 43. prikazan je prozor korisničkog sučelja vizijskog procesa za lokalizaciju AXE dezodoransa.



Slika 43. Vizijski proces FP_2AXE

4.4. Vizijski proces FP_POMAK

Vizijski proces FP_POMAK izrađen je kako bi se mogao izvoditi TP program traženja položaja kutije 1 kada je kutija pomaknuta u novi položaj na radnom stolu 1. Za prepoznavanje položaja kutije korišten je alat 3D One-sight-model locator tool. Pokretanjem TP programa, položaj kutije zapisuje se u vizijski registar. Na slici 44. prikazan je prozor korisničkog sučelja vizijskog procesa za lokalizaciju položaja kutije 1.



Slika 44. Vizijski proces FP_POMAK

4.5. Part List Manager

Unutar Part List Managera definiraju se podaci o predmetima rada koji se koriste u kreiranim vizijskim procesima. Part List Manager sastoji se od 5 odvojenih alata, a to su: Search VP List, Pick Position List, Push Part Data Setup, Status Setup List i Part Data monitor.

4.5.1. PICK Position List

PICK Position List je alat unutar kojeg definiramo referentnu poziciju hvatanja koju povežemo s izrađenim vizijskim procesom za lokalizaciju predmeta u kutiji. Svakom predmetu dodjeljuje se jedinstveni broj tj. Model ID koji se koristi za njegovu identifikaciju. Unutar alata Pick Position List moguće je definirati vrijednost posmaka po alatu s obzirom na pronađenu poziciju hvatanja predmeta. Na slici 45. prikazano je korisničko sučelje alata Pick Position List koji se koristi u procesu lokalizacije predmeta rada.

| # | Comment | Vision Process Name | Model ID | Interference Setup | Approach Setup | Reference PICK Position |
|---|-------------------------------|---------------------|----------|-------------------------|--------------------|--|
| 1 | Bin Picking Cadevita | FP_1CEDEVITA | 1 | (KUTJA.V_ROB.CONDITION) | (CONDITION, 0, 55) | (174.2, 275.9, -70.9, -0.0, 0.0, -0.0) |
| 2 | Bin Picking AXE | FP_2AXE | 2 | (KUTJA.V_ROB.CONDITION) | (CONDITION, 0, 55) | (190.3, 286.9, -95.3, -0.0, 0.0, -0.0) |
| 3 | | FP_3PONOVINTEL | 3 | Disabled | (0, 55) | (296.0, 198.0, 45.0, -0.0, 0.0, 0.0) |
| 4 | Ponovljivost- Plastična ploča | FP_4PONOVPLEXI | 4 | Disabled | (0, 55) | (171.5, 441.0, 25.0, 0.0, 0.0, -2.2) |

Comment: Bin Picking AXE

Use Found Position: Enable

Vision Process Name: Trained AXE Bin picking- 15.12.2021.

Model ID:

Interference Setup: Enable

Calculate IA: KUTJA UF:1

JASYS: V_ROB

JACND: UT:3

Approach Setup: UT:3

JACND: Not Used

Cfs: Not Used

Tofs: 55

Reference PICK Position: UF: 1 UT: 3 NUT 000

PICK Position X: mm

PICK Position Y: mm

PICK Position Z: mm

PICK Position W: °

PICK Position P: °

PICK Position R: °

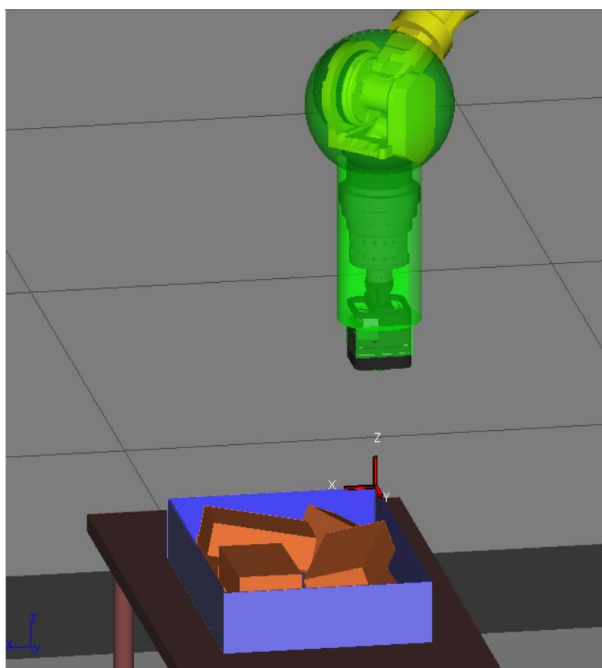
Slika 45. Pick position list

4.6. Interference Avoidance

Interference Avoidance je funkcija za izbjegavanje kolizije koju je nužno koristiti u vizijskim procesima izuzimanja slobodno raspoređenih predmeta iz kutije iz razloga što se unutar radnog prostora robota nalaze predmeti koji mogu ometati hvataljku kao što su kutija i stalak za kameru koji se u ovom konkretnom primjeru ne koristi te zbog toga što postoji mogućnost da se tijekom

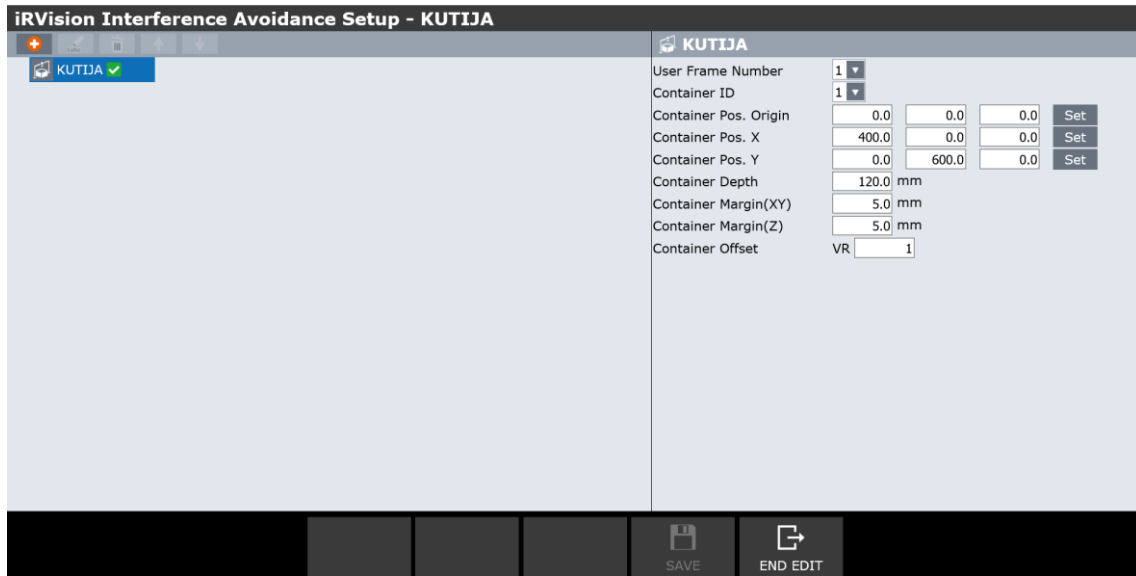
procesa hvatanja predmeta iz kutije robotska ruka nagne pod velikim kutem te dođe u koliziju s kutijom. Kako bi se to spriječilo, unutar alata Interference Avoidance definira se područje oko robotske hvataljke i kutije. Na temelju tih podataka robot izbjegava dolazak u koliziju robotske hvataljke s ostalim predmetima u svojoj radnoj okolini.

Područje oko Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke te šestog zgloba robota koje je definirano kako bi se izbjegla kolizija s drugim predmetima u radnom prostoru robota prikazano je zelenom bojom na slici 46. Ovdje je bitno da se dio površine vakuumske hvataljke koji prilikom hvatanja dolazi u kontakt s predmetom rada ne definira kao područje uključeno u izbjegavanje kolizije. Također na slici 46. plavom bojom prikazano je područje oko kutije 1 koje služi za izbjegavanje kolizije s robotskom hvataljkom.



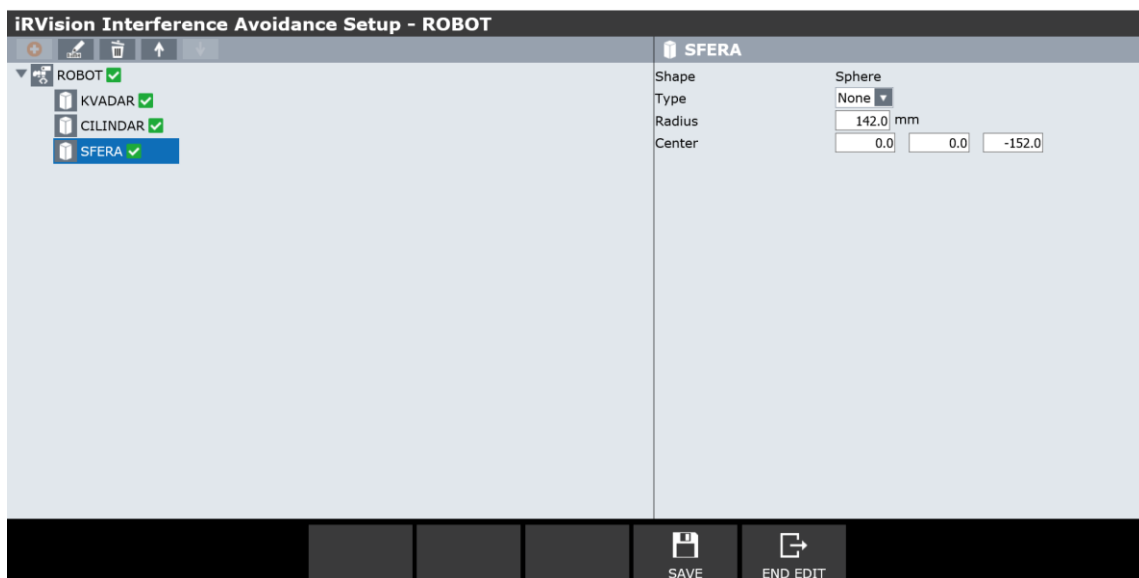
Slika 46. Prikaz područja uključenog u Interference Avoidance robotske hvataljke i kutije

Na slici 47. prikazano je korisničko sučelje vizijskog alata Interference Avoidance u kojem se upisuju vrijednosti definiranog područja oko kutije za izbjegavanje kolizije s robotskom hvataljkom. Za pravilno definiranje tog područja bitno je znati položaj korisničkog koordinatnog sustava kutije zato što se u odnosu na taj koordinatni sustav definiraju sve ostale vrijednosti. Iz tog razloga, za lakše snalaženje poželjno je da je korisnički koordinatni sustav kutije definiran na gornjem rubu kutije kao što se može vidjeti na slici 46.



Slika 47. Interference Avoidance kutija 1

Na slici 48. prikazano je korisničko sučelje vizijskog alata Interference Avoidance u kojem se upisuju vrijednosti kojima će se definirati područje oko vakuumske hvataljke i šestog zgloba robotske ruke kako bi se izbjegla kolizija s ostalim predmetima u radnom prostoru robota. Sa slike se može vidjeti da su za definiranje tog područja korištena tri različita geometrijska tijela tj. kvadar, cilindar i sfera.



Slika 48. Interference Avoidance robotska hvataljka

5. IZRADA TP PROGRAMA

5.1. Opis BINPICK makro naredbi

Općenito makro programi mogu raditi sve što i TP programi te se većinom koriste kako bi se neki jednostavniji procesi kao što je npr. rad s hvataljkom povezao s određenom tipkom na privjesku za učenje ili s nekim vanjskim signalom. Za izradu TP programa koji obavlja zadatak traženja, lokalizacije i izuzimanja predmeta iz kutije u nestrukturiranoj radnoj okolini (eng. *bin picking application*) potrebno je poznavanje preddefiniranih Binpick makro naredbi koje su podržane na robotskom kontroleru ukoliko se na njemu nalazi instaliran programski paket koji omogućuje konfiguraciju Bin picking aplikacije. Uz pomoć tih makro naredbi moguće je izraditi TP program.

5.1.1. BINPICK_CLEAR

Makro naredba BINPICK_CLEAR briše podatke o dijelovima koji su ostali zapisani u Parts List-i. Kao argument unutar okruglih zagrada upisuje se broj "Parts List ID" pod kojim su spremljeni podaci vizijskog procesa u Part list manager-u. Ova makro naredba uvijek se definira na početku programa te nakon nje slijede ostale Binpick makro naredbe.

BINPICK_CLEAR("Parts List ID")

5.1.2. BINPICK_ACQUIRE3DMAP

Sljedeća Binpick makro naredba koju je potrebno definirati je BINPICK_ACQUIRE3DMAP. Ta naredba služi za dohvaćanje 3D mape predmeta koji se nalaze unutar vidnog polja kamera i projektora, tj. područja koje je definirano u procesu kalibracije kamera. Iz tog razloga unutar okruglih zagrada, kao argument "3D Area Sensor" upisuje se naziv vizijskog procesa u kojem je izvršena kalibracija kamera.

BINPICK_ACQUIRE3DMAP("3D Area Sensor")

5.1.3. BINPICK_SEARCH

BINPICK_SEARCH makro naredba obavlja proces traženja naučenih predmeta unutar područja koje je definirano u vizijskom procesu. Podaci o pronađenom predmetu zapisuju se u Parts List-i s obzirom na odabrani vizijski proces. Na mjesto prvog argumenta upisuje se broj "Parts List ID" pod kojim su spremljeni podaci vizijskog procesa u Part list manager-u. Drugi

argument je broj pod kojim su spremljene postavke "Search VP list" u Part list manager-u. Pod trećim argumentom upisuje se redni broj numeričkog registra u kojem će se biti zapisana brojučana vrijednost nakon što se izvrši BINPICK_SEARCH makro naredba. Te brojučane vrijednosti mogu biti 0 ili 1. Ako je u registru zapisana vrijednost 0 to označava da je vizijski sustav pronašao predmet. U suprotnom slučaju kada vizijski sustav ne pronađe predmet u registru je zapisana vrijednost 1.

BINPICK_SEARCH("Parts List ID","SEARCH VP ID","Status R")

5.1.4. BINPICK_POP

BINPICK_POP makronaredba služi za dohvaćanje podataka o pronađenom predmetu iz definirane Parts List-e. Isto kao i kod BINPICK_CLEAR i BINPICK_SEARCH makro naredbi prvi argument je isti broj "Parts List ID". Drugi argument je redni broj numeričkog registra u kojem će biti zapisana brojučana vrijednost nakon što se izvrši BINPICK_POP makronaredba. Ta brojučana vrijednost može biti 0 ili 1, ako je 0 to označava da je vizijski sustav uspješno dohvatio podatke, a ako je 1 tada podaci nisu dohvaćeni. Treći argument je redni broj numeričkog registra u kojem je zapisan Model ID predmeta kojeg tražimo.

BINPICK_POP("Parts List ID","Status R","Model ID R")

5.1.5. BINPICK_GETPICKPOS

BINPICK_GETPICKPOS makronaredba služi za izračunavanje pozicije u kojoj će robotska hvataljka uhvatiti pronađeni predmet. Za pravilno izvođenje ove makro naredbe u TP programu potrebno je prije toga pravilno definirati parametre u "Pick position List" što je detaljnije opisano u poglavlju 4.5.1. Prvi argument ponovno je broj "Parts List ID". Drugi argument je redni broj "Pick Position list" pod kojim su spremljeni podaci o poziciji hvatanja predmeta. Treći argument je redni broj registra u kojemu se pohranjuje brojučana vrijednost na temelju koje će se provjeriti uspješnost izvršavanja BINPICK_GETPICKPOS makro naredbe. Postoje tri različita ishoda nakon traženja pozicije hvatanja; 0 označava da je vizijski proces uspješno izračunao poziciju hvatanja, ako je zapisana vrijednost 12 to znači da proces nije uspio izračunati poziciju hvatanja, dok vrijednost 13 označava da je došlo do greške prilikom izračunavanja pozicije za približavanje predmetu.

Kao četvrti argument "PICK Pos PR" zapisujemo redni broj pozicijskog registra u kojeg će vizijski proces spremi izračunatu vrijednost pozicije hvatanja. U petom argumentu "IA Offset

PR" zapisujemo redni broj pozicijskog registra u kojem je zapisana vrijednost pomaka alata koju smo definirali u postavkama "Pick position List". Kao šesti argument "APP Pos PR" navodimo redni broj pozicijskog registra u kojem će biti zapisana pozicija pristupanja robotske hvataljke predmetu.

BINPICK_GETPICKPOS("Parts List ID", "PICK Pos ID", "Status R", "PICK Pos PR", "IA Offset PR", "APP Pos PR")

5.1.6. BINPICK_SETSTAT

BINPICK_SETSTAT makro naredba definira status dohvaćenih podataka o pronađenom predmetu iz definirane Parts List-e. Prvi argument je broj "Parts List ID". Drugi argument je također broj kojeg upisujemo ovisno o statusu dohvaćenih podataka o pronađenom predmetu kojeg želimo ispitati. Postoji osam različitih statusa koji se mogu ispitati ovisno o upisanom broju:

- 10: FINE SUCCESS
- 11: FINE FAIL
- 12: FINE IA FAIL
- 13: FINE CL FAIL
- 20: PICK SUCCESS
- 21: PICK FAIL
- 22: PICK IA FAIL
- 23: PICK CL FAIL

U ovom diplomskom radu tijekom izrade TP programa za izuzimanje predmeta rada u nestrukturiranoj radnoj okolini, ispitivani su statusi 20: PICK SUCCESS i 22: PICK IA FAIL.

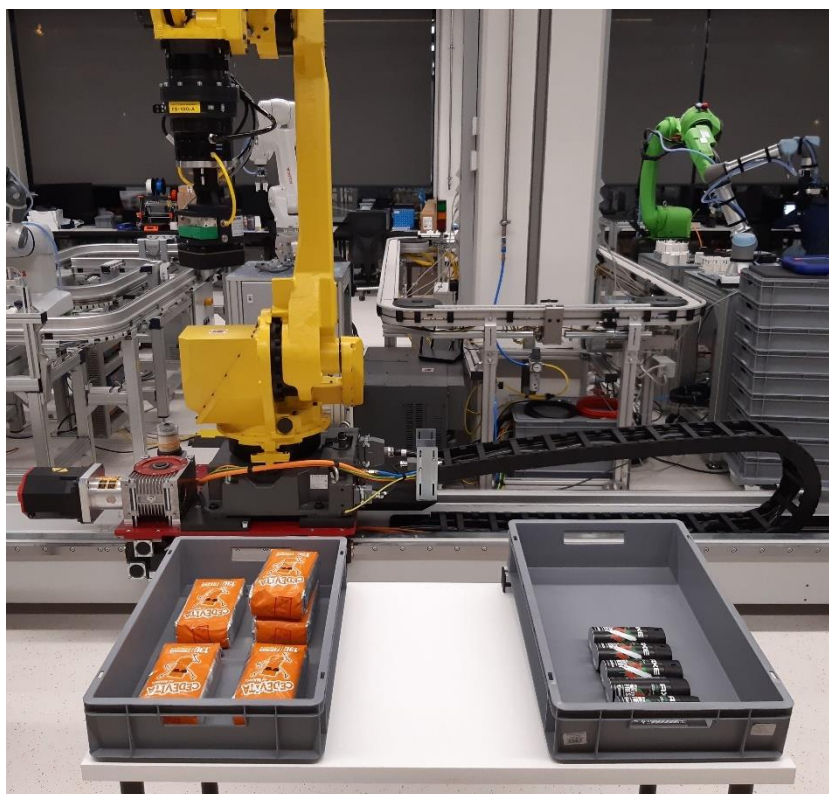
BINPICK_SETSTAT ("Parts List ID", "Part Status")

5.2. Opis glavnog TP programa

Glavni TP program napravljen je tako da izvršava proces traženja pozicije i prostorne orijentacije dvaju različitih predmeta rada koji se nalaze slobodno raspoređeni unutar kutije te nakon toga izvršava odvojenu paletizaciju za pojedinu vrstu predmeta. Na početku Glavnog programa poziva se TP program napisan za traženje AXE dezodoransa. Ako vizijski proces pronade i locira AXE dezodorans u kutiji izvršava se njegovo hvatanje te nakon toga slijedi njegovo odlaganje u kutiju 3. Nakon toga ponovno se provodi traženje pozicije i orijentacije AXE dezodoransa. U slučaju da se u procesu ponovnog traženja ne pronade ni jedan AXE dezodorans slijedi pozivanje TP programa za lokalizaciju paketa Cedevita. Kada vizijski proces lokalizira paket Cedevite izvršava se njihovo hvatanje te nakon toga slijedi paletizacija paketa Cedevite u kutiju 2. Taj program izvodi se sve dok vizijski proces uspijeva lokalizirati pakete

Cedevita u kutiji 1. U slučaju kada vizijski proces ne lokalizira nijedan paket Cedevite, izvršava se još jednom cijeli postupak traženja i lokalizacije AXE dezodoransa te nakon toga paketa Cedevite.

Unutar zasebnih TP programa za lokalizaciju i odlaganje paketa Cedevita i AXE dezodoransa nalazi se TP program koji uz pomoć vizijskog sustava pronalazi položaj kutije 1 kada je ona pomaknuta u novi položaj na radnom stolu 1. Na slici 49 prikazan je radni stol s kutijom 2 u koju su odloženi paketi Cedevite te kutiju 3 u ojoj su AXE dezodoransi nakon završetka glavnog TP programa.



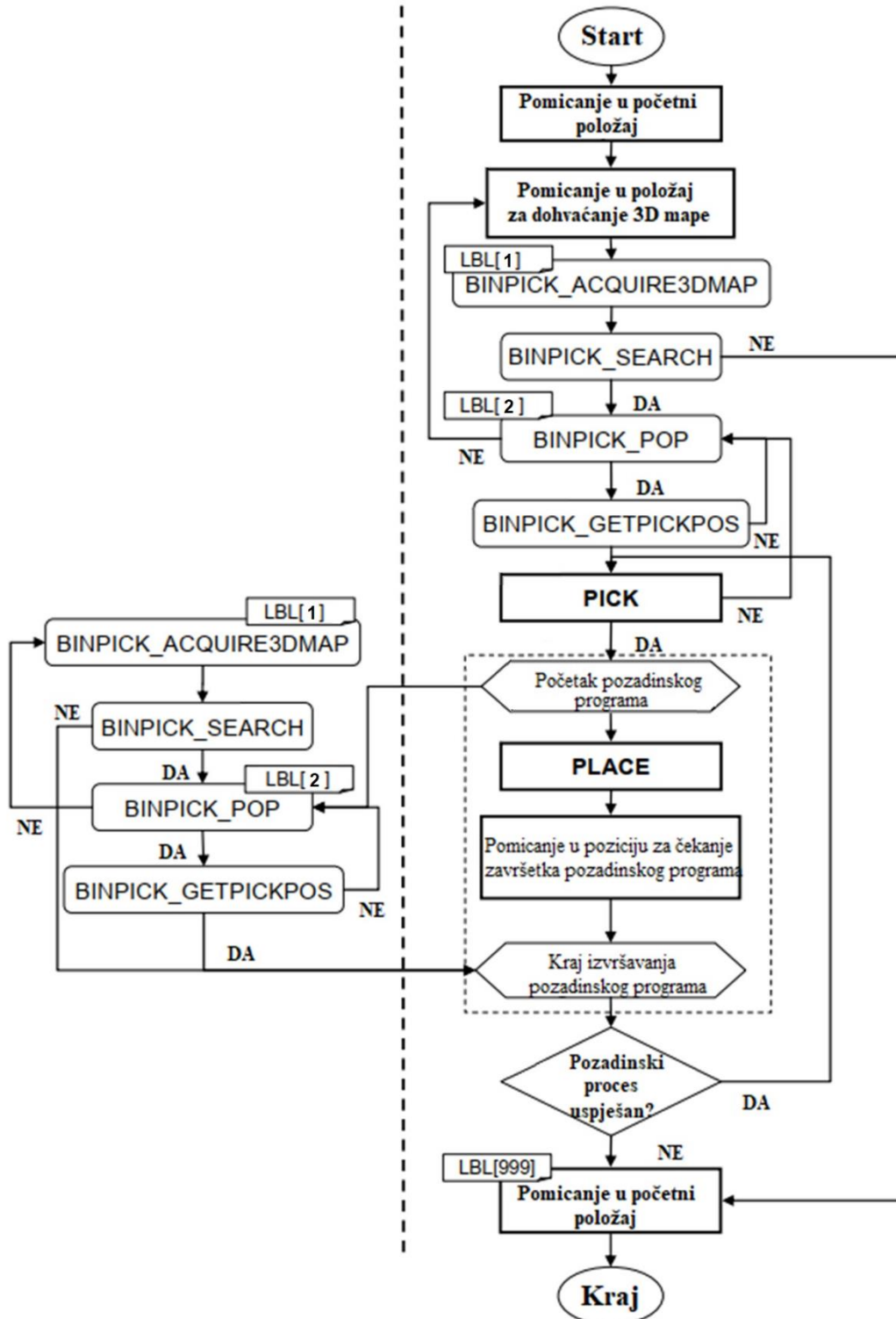
Slika 49. Prikaz kutija 2 i 3 nakon završetka izvođenja glavnog TP programa

U prilogu ovog diplomskog rada nalazi se kompletan kod TP programa izrađenih za rješavanje zadataka u nestrukturiranoj radnoj okolini sa Fanuc M-710iC/45M robotom.

Na slici 50. nalazi se dijagram toka BIN_PICKING_CEDEVITA.TP gdje se može vidjeti princip izvođenja Binpick makro naredbi u programu te način pozivanja pozadinskog programa za paralelno izvršavanje 3D lokalizacije paketa Cedevita čijim paralelnim izvođenjem se skraćuje ukupno vrijeme izvršavanja glavnog TP programa.

BP_CED_POTPROGRAM.TP

BIN_PICKING_CEDEVITA.TP



Slika 50. Dijagram toka izvršavanja programa BIN_PICKING_CEDEVITA.TP

6. KVALITATIVNA VERIFIKACIJA RADA VIZIJSKOG SUSTAVA PRI RAZLIČITIM SVJETLOSNIM UVJETIMA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja utjecaja ambijentalnog osvjetljenja na rad 3D stereovizijskog sustava. Kod primjene vizijskih sustava osvjetljenje ima ključnu ulogu pa tako ambijentalno svjetlo ima velik utjecaj na rad Fanuc 3D Area senzora. Ako ambijentalno osvjetljenje ima puno jači intenzitet u odnosu na intenzitet strukturiranog svjetla, dohvaćanje 3D mape predmeta u kutiji postaje nestabilno, a broj 3D točaka se smanjuje. Što je ambijentalno osvjetljenje jače, rezultati 3D lokalizacije predmeta mogu biti lošiji, odnosno moguće je da se predmeti rada uopće ne lokaliziraju. Zbog toga potrebno je prilagoditi intenzitet ambijentalnog osvjetljenja u radnom prostoru gdje je postavljen Fanuc 3D Area senzor. Na slici 51. prikazana je ambijentalna rasvjeta u laboratoriju za autonomne sustave.



Slika 51. Prikaz ambijentalne rasvjete u Laboratoriju za autonomne sustave

6.1. Mjerenje intenziteta osvjetljenja

Mjerenje intenziteta osvjetljenja provedeno je s uređajem Tenmars TM-201 koji je prikazan na slici 52. Tenmars TM-201 je digitalni mjerač intenziteta osvjetljenja s mjernim rasponom od 200 do 200000 LUX. Senzor sa silicijskom fotodiodom i filterom povezan je s glavnim dijelom kućišta pomoću fleksibilnog kabela duljine 1,5 m. Točnost senzora iznosi $\pm 8\%$. [10]



Slika 52. Tenmars TM-201 mjerač intenziteta osvjetljenja

Za početak, radi lakše predodžbe iznosa intenziteta osvjetljenja navedene su vrijednosti izmjerenog intenziteta osvjetljenja s Lux/Fc Tenmars TM-201 mjeračem intenzitea osvjetljenja vani na otvorenom.

- Noć, intenzitet osvjetljenja ulične rasvjete – 50 do 100 LUX
- Dnevno svjetlo tijekom oblačnog dana – 1800 LUX
- Dnevno svjetlo, intenzitet osvjetljenja izmjeren na direktnom sunčevom svjetlu – 60000 LUX

Izmjerene vrijednosti ambijentalnog osvjetljenja Laboratorija za autonomne sustave su sljedeće:

- Intenzitet osvjetljenja kada je upaljeno maksimalno osvjetljenje u Laboratoriju – 913 LUX
- Intenzitet osvjetljenja na kojem je napravljen glavni program vizijskog procesa za 3D lokalizaciju predmeta te na kojem su konfigurirani vizijski procesi – 292 LUX

Za usporedbu, iznos izmjerenog intenziteta osvjetljenja izvora strukturiranog svjetla Fanuc 3D Area senzora je 185 LUX.

Na slici 53. prikazane su izmjerene vrijednosti intenziteta ambijentalnog osvjetljenja u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i.



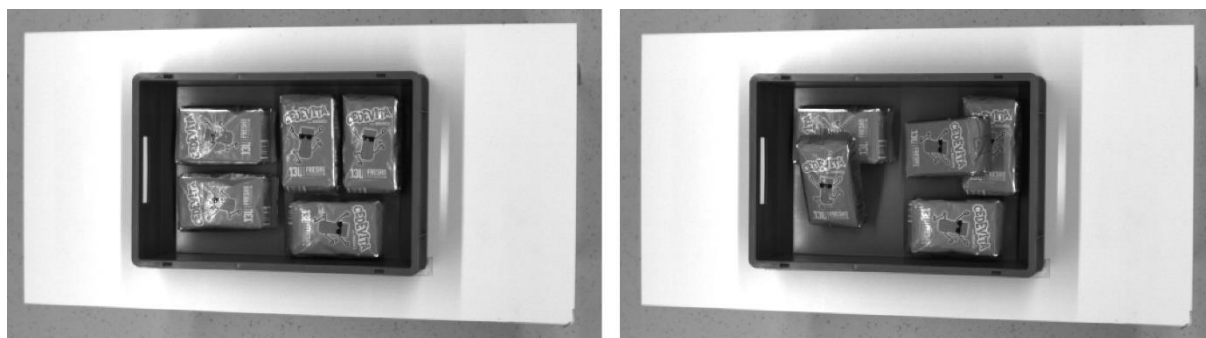
Slika 53. Prikaz izmjerenih vrijednosti intenziteta ambijentalnog osvjetljenja u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i

6.2. Rezultati provedenog mjerenja

Verifikacija rada 3D vizijskog sustava napravljena je s predmetima rada koji se koriste u procesu izuzimanja dijelova iz nestrukturirane radne okoline, tj. sa paketima Cedevita te sa AXE dezodoransima. U kutiji na radnom stolu 1 stavljeni su premeti na dva različita načina, u ravnom položaju te u položaju pod kutem kako bi se vidjelo postoji li razlika u lokalizaciji predmeta kada imaju različitu orijentaciju. Mjerenje je provedeno na način da se ručno mijenjao intenzitet ambijentalnog osvjetljenja u Laboratoriju za autonomne sustave, potom se ta vrijednost izmjerila s Tenmars TM-201 mjerачem intenziteta osvjetljenja i zapisala u tablicu. Nakon toga pokrenut je izrađeni vizijski proces lokalizacije predmeta u kutiji te se ovdje gledao broj dohvaćenih 3D točaka u kreiranom oblaku točaka uz pomoć alata 3D Dana Preprocess tool sadržanog u vizijskom procesu. Na temelju tih podataka može se vidjeti kolika je uspješnost lokalizacije predmeta rada u uvjetima kada se povećava intenzitet ambijentalnog osvjetljenja.

6.2.1. Verifikacija rada vizijskog sustava pri različitim svjetlosnim uvjetima za proces lokalizacije paketa Cedevite

Prvo mjerenje utjecaja ambijentalnog osvjetljenja na rad 3D vizijskog sustava provedeno je s paketima Cedevite. Lijevo na slici 54. prikazan je ravni položaj paketa Cedevita u kutiji, dok su na desnoj strani stavljeni dva paketa Cedevite pod kutem gdje se paketi Cedevite preklapaju te nisu svi potpuno vidljivi.



Slika 54. Lijevo ravni položaj paketa Cedevita, desno paketi Cedevita pod kutem

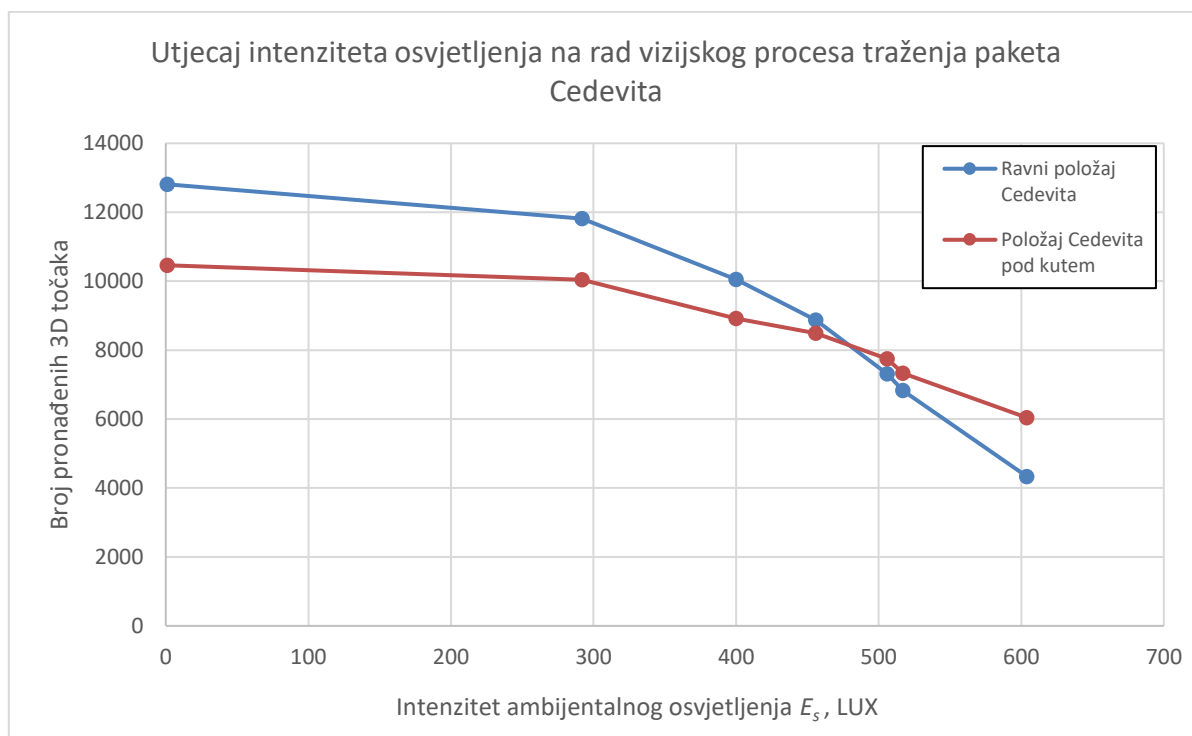
Prvo mjerenje provedeno je s potpuno ugašenim ambijentalnim osvjetljenjem te je Tenmars TM-201 mjerni uređaj izmjerio intenzitet osvjetljenja 1 LUX. Kao što se može vidjeti prema rezultatima u tablici, najveći broj dohvaćenih 3D točaka ostvaren je upravo u prvom mjerenju kada je ambijentalna rasvjeta bila potpuno ugašena, što se i očekivalo s obzirom na to da Fanuc 3D Area senzor ima vlastiti izvor strukturiranog svjetla te svi ostali izvori svjetla u njegovoj radnoj okolini otežavaju njegov rad. Nakon toga, drugo mjerenje je bilo vrlo važno iz razloga što je od samih početaka cijeli proces konfiguracije vizijskog procesa proveden na intenzitetu ambijentalnog osvjetljenja u iznosu 292 LUX. Prema dobivenim podacima može se vidjeti da je broj lociranih 3D točaka manji, ali u usporedbi s prvim mjerenjem nije prevelika razlika. Prema tome može se zaključiti da je rad vizijskog sustava i dalje zadovoljavajući pri izmjerenom intenzitetu ambijentalnog osvjetljenja u iznosu 292 LUX, kada je riječ o ispitivanju u laboratorijskim uvjetima. Naravno, u industrijskoj primjeni 3D vizijskih sustava s izvorom strukturiranog svjetla, za njihov stabilan i ispravan rad nužno je da vrijednost intenziteta ambijentalnog osvjetljenja bude na razini 50% intenziteta izvora strukturiranog svjetla. U daljnjim provedenim mjerenjima, ručno se povećavao intenzitet ambijentalnog osvjetljenja sve dok se nije došlo do vrijednosti intenziteta osvjetljenja na kojoj 3D vizijski sustav dohvaća premali broj 3D točaka da bi mogao uspješno lokalizirati predmet rada. Rezultati provedenog mjerenja s paketima Cedevita prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja rada vizijskog sustava za traženje paketa Cedevita

| Broj mjerenja | Izmjereni intenzitet osvjetljenja, E_s , LUX | Ravni položaj predmeta | | Predmeti postavljeni pod kutem | |
|---------------|--|---|---|---|---|
| | | Broj pronađenih / ukupni broj predmeta u kutiji | Broj 3D točaka lociranih u oblaku točaka predmeta | Broj pronađenih / ukupni broj predmeta u kutiji | Broj 3D točaka lociranih u oblaku točaka predmeta |
| 1. | 1 | 5/5 | 12811 | 4/5 | 10462 |
| 2. | 292 | 5/5 | 11814 | 3/5 | 10040 |
| 3. | 400 | 3/5 | 10046 | 3/5 | 8916 |
| 4. | 456 | 2/5 | 8874 | 3/5 | 8486 |
| 5. | 506 | 1/5 | 7312 | 2/5 | 7744 |
| 6. | 517 | 0/5 | 6827 | 2/5 | 7332 |
| 7. | 604 | 0/5 | 4333 | 0/5 | 6040 |

Granična vrijednost intenziteta ambijentalnog osvjetljenja na kojoj je vizijski sustav još uspijeva lokalizirati jedan paket Cedevite u ravnom položaju iznosi 506 LUX, dok je za položaj Cedevita pod kutem vizijski sustav uspio lokalizirati dva paketa Cedevite pri vrijednosti 517 LUX. Pri vrijednosti 506 LUX ispitano je da li zadano vrijeme ekspozicije vizijskog procesa utječe na lokalizaciju predmeta. Međutim, smanjivanjem vremena ekspozicije sa 11 ms na 2 ms nije došlo do poboljšanja te je prema tome zaključeno da u slučaju kada je iznos intenziteta ambijentalnog osvjetljenja granične vrijednosti, promjenom vremena ekspozicije ne postižu se bolji rezultati.

Na slici 55. grafički su uspoređeni dobiveni rezultati broja lokaliziranih 3D točaka u ovisnosti o povećanju intenziteta ambijentalnog osvjetljenja za ravni položaj paketa Cedevita te za položaj pod kutem.

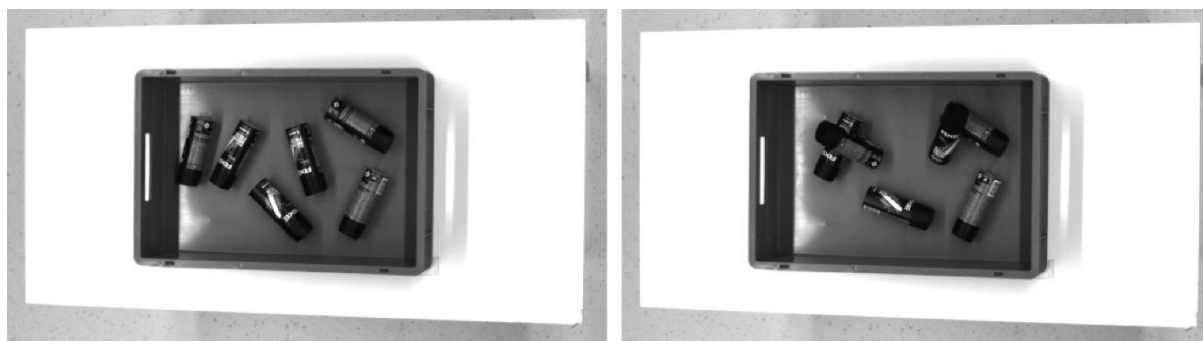


Slika 55. Grafički prikaz utjecaja intenziteta osvjetljenja na rad vizijskog procesa traženja paketa Cedevida

Iz grafikona na slici 55. vidljivo je kako se broj lokaliziranih 3D točaka smanjuje s povećanjem intenziteta ambijentalnog osvjetljenja. Zanimljivo je vidjeti kako je na vrijednostima intenziteta ambijentalnog osvjetljenja višim od 500 LUX dobiveni broj lokaliziranih 3D točaka paketa Cedevida pod kutem bio veći od broja lokaliziranih 3D točaka paketa Cedevida u ravnom položaju. Razlog tome je što ambalaža paketa Cedevice na nekim mjestima ima sjajnu površinu te se na tim dijelovima događa refleksija svjetlosti. Pošto su paketi Cedevice postavljeni pod takvim kutem gdje se svjetlost manje reflektirala, dohvaćeni broj 3D točaka bio je veći nego na paketima Cedevice koji su postavljeni u ravnom položaju.

6.2.2. Verifikacija rada vizijskog sustava pri različitim svjetlosnim uvjetima za proces lokalizacije AXE dezodoransa

Drugo mjerenje utjecaja ambijentalnog osvjetljenja na rad 3D vizijskog sustava provedeno je s AXE dezodoransima. Lijevo na slici 56. prikazan je ravni položaj AXE dezodoransa u kutiji 1, dok su na desnoj strani dva dezodoransa stavljena pod kutem te se međusobno preklapaju i nisu svi potpuno vidljivi.



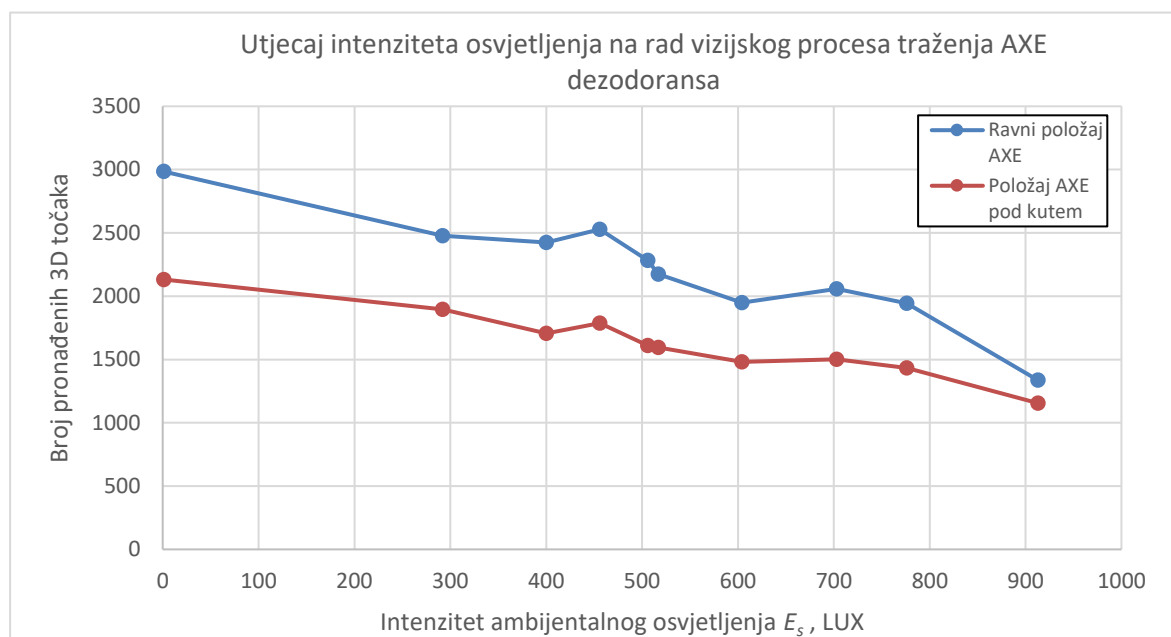
Slika 56. Lijevo ravni položaj AXE dezodoransa, desno položaj AXE dezodoransa pod kutem

Postupak mjerenja isti je kao i u prvom provedenom mjerenju. Prvo mjerenje izvršeno je u uvjetima potpuno ugašenog ambijentalnog osvjetljenja, a nakon toga postupno se povećavao intenzitet ambijentalnog osvjetljenja te se promatralo kako to utječe na 3D lokalizaciju predmeta u kutiji. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja rada vizijskog sustava za 3D lokalizaciju dezodoransa

| Broj mjerenja | Izmjereni intenzitet osvjetljenja, E_s , LUX | Ravni položaj predmeta | | Predmeti postavljeni pod kutem | |
|---------------|--|---|---|---|---|
| | | Broj pronađenih / ukupni broj predmeta u kutiji | Broj 3D točaka lociranih u oblaku točaka predmeta | Broj pronađenih / ukupni broj predmeta u kutiji | Broj 3D točaka lociranih u oblaku točaka predmeta |
| 1. | 1 | 6/6 | 2985 | 5/6 | 2132 |
| 2. | 292 | 6/6 | 2478 | 4/6 | 1895 |
| 3. | 400 | 6/6 | 2425 | 4/6 | 1706 |
| 4. | 456 | 6/6 | 2527 | 4/6 | 1788 |
| 5. | 506 | 5/6 | 2282 | 4/6 | 1610 |
| 6. | 517 | 5/6 | 2174 | 4/6 | 1594 |
| 7. | 604 | 4/6 | 1948 | 2/6 | 1481 |
| 8. | 703 | 3/6 | 2059 | 2/6 | 1502 |
| 9. | 776 | 3/6 | 1944 | 2/6 | 1434 |
| 10. | 913 | 2/6 | 1336 | 2/6 | 1155 |

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da vizijski sustav uspijeva lokalizirati predmete i pri iznosu intenziteta ambijentalnog osvjetljenja 913 LUX što je najveći izmjereni intenzitet ambijentalnog osvjetljenja u Laboratoriju za autonomne sustave. Jedan od razloga jest to što su predmeti u ovome mjerenju bili crne boje te je time bio kontrast u odnosu na boju kutije gdje su se nalazili, što je došlo do izražaja povećanjem intenziteta ambijentalnog osvjetljenja. Grafički prikaz broja lokaliziranih 3D točaka u ovisnosti o povećanju intenziteta ambijentalnog osvjetljenja za ravni položaj paketa dezodoransa te za položaj pod kutem prikazan je na slici 57.



Slika 57. Grafički prikaz utjecaja intenziteta ambijentalnog osvjetljenja na rad vizijskog procesa traženja paketa dezodoransa

Iz grafikona na slici 57. vidljivo je kako se broj lokaliziranih 3D točaka smanjuje s povećanjem intenziteta ambijentalnog osvjetljenja. Na ovom grafikonu vidljivo je da vrijednost lokaliziranih 3D točaka nije u konstantnom padu. U 4. i 8. mjerenju vizijski sustav dohvatio je nešto veći broj 3D točaka nego u mjerenjima provedenim prije njih kada je vrijednost intenziteta ambijentalnog osvjetljenja bila manja. Razlog tome je to što su to predmeti valjkastog oblika te nisu u svakom mjerenju imali identičan položaj te je to utjecalo na rezultate mjerenja. Za razliku od prvog mjerenja, ovdje se nije dogodio slučaj da broj lokaliziranih 3D točaka predmeta postavljenih pod kutem postane veći od broja lokaliziranih 3D točaka predmeta postavljenih u ravnom položaju. Razlog tome je taj što ovdje nema sjajnih dijelova površine predmeta te refleksija svjetlosti u ovome primjeru ima manji utjecaj na 3D lokalizaciju predmeta.

7. ISPITIVANJE TOČNOSTI I PONOVLJIVOSTI 3D VIZIJSKOG SUSTAVA

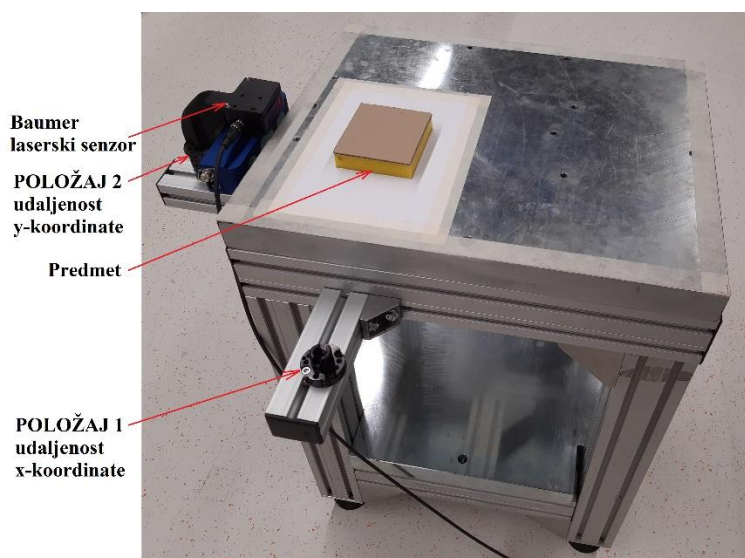
Ponovljivost se može definirati kao sposobnost robota da ponavljajući izvodi pozicioniranje s odgovarajućom točnošću, tj. da vrh robotskog alata dovede ponovno u isti položaj. Točnost se može definirati kao razlika između mogućeg i željenog položaja, tj. mjera sposobnosti robota da dovede prihvatnicu u proizvoljan položaj radnog prostora. [11]

Za potrebe ispitivanja točnosti i ponovljivosti 3D vizijskog sustava osmišljen je eksperimentalni postav s postoljem koje je postavljeno na mjesto radnog stola 1. Postolje je sastavljeno je od standardnih aluminijskih profila i čelične ploče što mu daje veliku krutost i robusnost. Time je osiguran fiksni položaj postolja u radnom prostoru robota te su spriječene neželjene promjene položaja postolja tijekom procesa mjerenja. S obzirom na to da se dimenzije postolja razlikuju od dimenzija radnog stola 1, bilo je potrebno kalibrirati novi korisnički koordinatni sustav koji ima ishodište u uglu gornje plohe postolja. U odnosu na ishodište koordinatnog sustava postolja, na njegovoj gornjoj plohi definirana je točna pozicija za odlaganje predmeta te je na tom mjestu postavljena oznaka. Ta oznaka ima isti oblik, dimenzije, boju i teksturu kao i gornja ploha predmeta s kojim će se izvršiti mjerenje točnosti i ponovljivosti. Na slici 58. prikazan je eksperimentalni postav za ispitivanje točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D Area senzora.



Slika 58. Eksperimentalni postav za ispitivanje točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D Area senzora

Kod odabira predmeta vodilo se računa da su dimenzije duljine i širine približno jednake dimenzijama spužve Piab Kenos KCS vakuumske hvataljke, tj. da nije prevelika razlika u dimenzijama spužve i predmeta. Iz tog razloga kao predmet s kojim će se provesti mjerenje odabran je komad plastične ploče dimenzija 101 x 112,6 x 26,6 mm i mase 292 g. Zbog svoje sjajne površine kojoj vizijski sustav ne može odrediti oblak točaka, na gornju plohu plastične ploče zalijepljen karton istih dimenzija duljine i širine kao i plastična ploča.



Slika 59. Postolje za izvođenje mjerenja točnosti i ponovljivosti 3D vizijskog sustava

S obzirom na definirani položaj koordinatnog sustava postolja, izvršena je ponovna kalibracija kamera 3D vizijskog sustava kako bi se mjerenje točnosti i ponovljivosti izvršilo s ispravnim vrijednostima udaljenosti od kamera. Postupak kalibracije kamera izvršen je analogno postupku opisanom u poglavlju 3.1.3. Izrađen je i novi vizijski proces koji pronalazi poziciju i prostornu orijentaciju plastične ploče. Nakon toga krenulo se u osmišljavanje procesa mjerenja točnosti i ponovljivosti 3D vizijskog sustava i izradu Fanuc TP programa s kojim će se provesti proces mjerenja.

7.1. Baumer laserski senzor

Kao referentni mjerni uređaj uz pomoć kojega će se kontrolirati vrijednosti odstupanja, izabran je Baumer OM70-P0250.HH0130.VI laserski senzor za precizno mjerenje udaljenosti. Baumer laserski senzor radi na principu triangulacije tako što emitira lasersku zraku prema objektu mjerenja te na temelju dohvaćenog kuta odbijanja zrake prikazuje vrijednost udaljenosti od objekta. Na slici 60. prikazan je Baumer OM70-P0250.HH0130.VI laserski senzor.



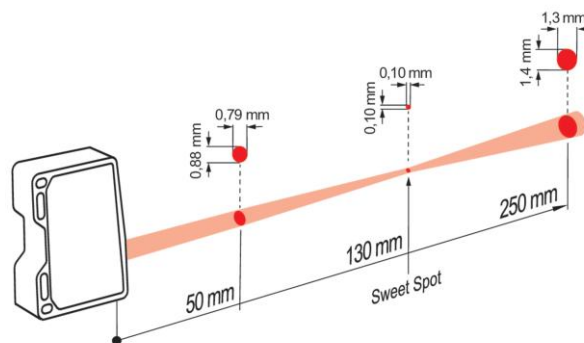
Slika 60. Baumer OM70-P0250.HH0130.VI laserski senzor

U tablici 9. prikazane su tehničke karakteristike Baumer OM70-P0250.HH0130.VI laserskog senzora.

Tablica 9. Karakteristike Baumer OM70-P0250.HH0130.VI laserskog senzora [12]

| | |
|--|------------------------------------|
| Verzija Baumer laserskog senzora | OM70 |
| Vrijednosti između kojih senzor očitava udaljenost | od 50 do 250 mm |
| Mjerni raspon | 200 mm |
| Udaljenost na kojoj su najmanja odstupanja | 130 mm |
| Mogućnosti podešavanja | preko zaslona osjetljivog na dodir |
| Komunikacija | RS 485 protokol |
| Razlučivost | od 1,4 do 6,3 μm |
| Ponovljivost mjerenja | od 0,3 do 2 μm |
| Valna duljina lasera | 660 nm, laser klase 1 |
| Vrijeme odziva | 0,8 ms |
| Mjerna frekvencija | 2500 Hz |
| Napajanje | 15-28V |
| Potrošnja struje | 75 mA |
| Dimenzije | 26x74x55 mm |
| Materijal kućišta | Aluminij, staklo |
| Masa | 130g |
| IP certifikat | IP 67 |

Na slici 61. prikazana je karakteristika laserske zrake Baumer OM70 laserskog senzora iz koje se jasno može vidjeti da se najveća točnost mjerenja postiže kada se mjerni predmet nalazi na udaljenosti 130 mm od laserskog senzora. Također, na slici su prikazane i vrijednosti udaljenosti 50 i 250 mm koje su ujedno i vrijednosti između kojih laserski sensor očitava udaljenost od mjernog predmeta. Sve ostale vrijednosti udaljenosti manje od 50 mm ili veće od 250 mm Baumer OM70-P0250.HH0130.VI laserski sensor ne može izmjeriti.



Slika 61. Karakteristika laserske zrake Baumer OM70 laserskog senzora

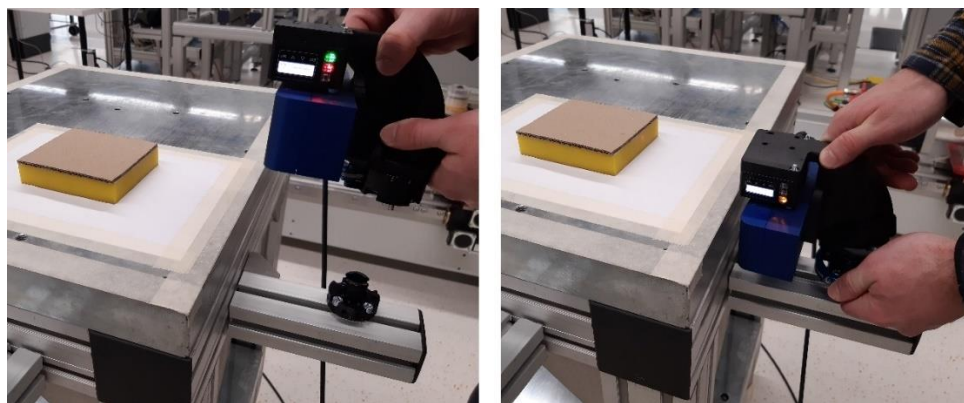
7.2. Mjerenje ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata

Za mjerenje udaljenosti predmeta od Baumer laserskog senzora po x i y osi, na postolje su pričvršćena još dodatna dva standardna aluminijska profila na koje će se pričvrstiti sklop s Baumer laserskim sensorom. S obzirom na to da je mjerenje udaljenosti po x i y koordinati zamišljeno s jednim laserskim sensorom, tijekom procesa mjerenja u svakom ciklusu potrebno je premjestiti sklop s Baumer laserskim sensorom s položaja 1 za mjerenje udaljenosti x-koordinate na položaj 2 za mjerenje udaljenosti y-koordinate. Kako bi se ta izmjena izvršila na jednostavan i pouzdan način korišten je Schunk SHK 040 ručni izmjenjivač alata prikazan na slici 62.



Slika 62. Schunk SHK 040 ručni izmjenjivač robotskog alata

U tehničkoj dokumentaciji proizvođača definiran je iznos ponovljivost Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata od 0,02 mm. Sa svrhom što pouzdanijih rezultata mjerenja, provedeno je mjerenje ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata kako bi se utvrdilo koliki će utjecaj imati ponovljivost izmjenjivača alata na ukupne rezultate odstupanja ponovljivosti sustava. Mjerenje ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata provedeno je 10 puta pričvršćivanjem te nakon toga odvajanjem s postolja kao što je prikazano na slici 63.



Slika 63. Prikaz postupka mjerenja ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata

Dobiveni rezultati ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati mjerenja ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata

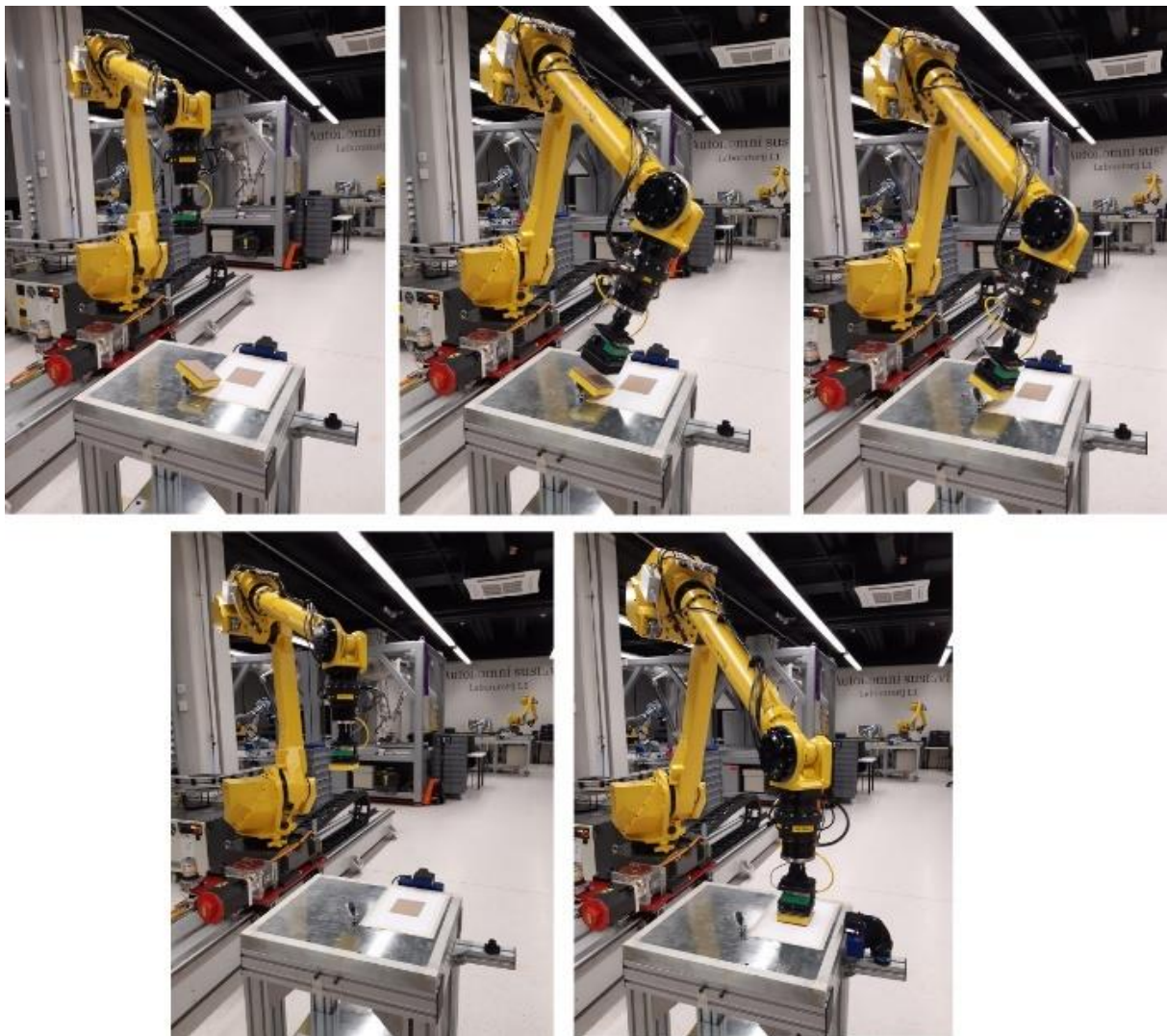
| Broj mjerenja | Očitana vrijednost sa Baumer laserskog senzora – Položaj 1, mm | Očitana vrijednost sa Baumer laserskog senzora – Položaj 2, mm |
|---------------|--|--|
| 1. | 120,078 | 110,080 |
| 2. | 120,073 | 110,078 |
| 3. | 120,069 | 110,081 |
| 4. | 120,071 | 110,074 |
| 5. | 120,084 | 110,083 |
| 6. | 120,079 | 110,082 |
| 7. | 120,068 | 110,076 |
| 8. | 120,053 | 110,079 |
| 9. | 120,056 | 110,077 |
| 10. | 120,061 | 110,075 |

Maksimalan iznos odstupanja ponovljivosti Schunk SHK 040 ručnog izmjenjivača alata dobiven mjerenjem na položaju 1 iznosi 0,031 mm, dok na položaju 2 iznosi 0,009mm. Kada se izračuna srednja vrijednost odstupanja dobiva se vrijednost ponovljivosti od 0,02 mm kako je definirano u tehničkoj dokumentaciji proizvođača.

7.3. Rezultati mjerenja ponovljivosti Fanuc 3D stereovizijskog sustava

Proces mjerenja točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D vizijskog sustava odvija se na način da se prvo na proizvoljnu poziciju na gornjoj plohi postolja ručno postavi mjerni predmet koji je u ovom primjeru plastična ploča. U svakom provedenom mjerenju predmet je imao različitu početnu poziciju i orijentaciju što se može vidjeti iz podataka dobivenih 3D vizijskim sustavom koji su zapisani u prvom stupcu tablice 11. Nakon toga pokrenut je TP program osmišljen za izvođenje procesa mjerenja točnosti i ponovljivosti 3D vizijskog sustava. Prilikom prvog snimanja 3D mape vizijski sustav pronalazi početnu poziciju i orijentaciju mjernog predmeta i zapisuje te podatke u prvi pozicijski registar. Nakon toga, robotska ruka dolazi u pronađeni položaj te s hvataljkom hvata mjerni predmet. S predmetom u hvataljci, robotska ruka pomiče se u predefiniranu točku u prostoru tako da vizijski sustav može ponovno snimiti 3D mapu i izvršiti traženje položaja oznake na gornjoj plohi postolja na koju će se odložiti mjerni predmet. Ti podaci zapisuju se u drugi pozicijski registar te su prikazani u drugom stupcu tablice 11. Na temelju pohranjenih podataka u drugom pozicijskom registru robotska ruka pomiče se s mjernim predmetom prema toj poziciji te se zaustavlja u točki koja je 3 mm iznad postolja kako bi se očitale vrijednosti udaljenosti predmeta po x i y osi s Baumer OM70 laserskim senzorom. Vrijednosti očitanih udaljenosti zapisane su u četvrtom stupcu tablice 11. Nakon toga, izvršava se odlaganje predmeta na postolje, pomicanje robotske ruke ponovno u istu predefiniranu točku u prostoru te se još jednom izvršava snimanje 3D mape kako bi se pronašla pozicija predmeta nakon odlaganja. Podaci s očitanim vrijednostima pozicije predmeta nakon odlaganja zapisani su u trećem pozicijskom registru te su prikazani u 3. stupcu tablice 11.

Slika 64. prikazuje postupak mjerenja točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D vizijskog sustava.



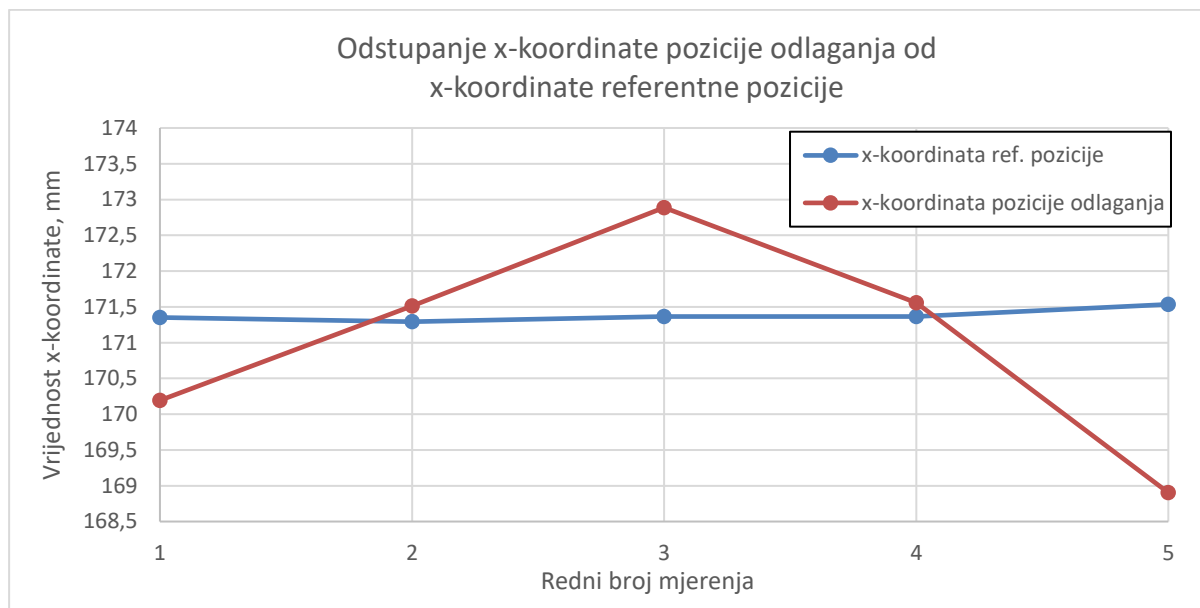
Slika 64. Prikaz postupka mjerenja točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D vizijskog sustava

Rezultati mjerenja točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D vizijskog sustava prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Rezultati mjerenja točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D vizijskog sustava

| Br. | Pozicije očitane Fanuc 3D Area Senzorom | | | | | | Očitana vrijednost odstupanja sa Baumer laserskim senzorom, mm |
|-----|---|-----------|---|-----------|--|-----------|--|
| | 1. Početna pozicija predmeta, mm | | 2. Očitana pozicija fiksne oznake za odlaganje predmeta na gornjoj plohi postolja, mm | | 3. Očitana pozicija predmeta nakon odlaganja, mm | | |
| 1 | X=323,410 | W=0,501 | X=171,350 | W=0,085 | X=170,194 | W=0,226 | X=117,932 |
| | Y=427,198 | P=-20,497 | Y=440,804 | P= -0,235 | Y=440,010 | P=0,255 | Y=110,768 |
| | Z=43,161 | R=39,680 | Z=1,372 | R=0,054 | Z=28,591 | R= -0,878 | |
| 2 | X=324,442 | W=-0,029 | X=171,293 | W= -0,061 | X=171,512 | W= -0,061 | X=120,773 |
| | Y=455,645 | P=18,511 | Y=441,875 | P= -0,170 | Y=444,115 | P= -0,232 | Y=108,236 |
| | Z=40,889 | R=-53,095 | Z=1,422 | R= -0,029 | Z=28,537 | R= 0,736 | |
| 3 | X=217,071 | W=22,383 | X=171,367 | W= -0,072 | X=172,888 | W=0,005 | X=121,175 |
| | Y=424,455 | P=1,901 | Y=440,792 | P= -0,357 | Y=436,871 | P= -0,390 | Y=113,640 |
| | Z=43,871 | R=71,952 | Z=1,396 | R= -0,263 | Z=28,574 | R= 0,533 | |
| 4 | X=335,798 | W=22,170 | X=171,365 | W= -0,048 | X=171,558 | W=0,302 | X=117,837 |
| | Y=383,628 | P=-17,595 | Y=440,678 | P= -0,244 | Y=440,302 | P= -0,116 | Y=110,990 |
| | Z=55,939 | R=-63,976 | Z=1,406 | R= -0,074 | Z=28,597 | R= 0,352 | |
| 5 | X=276,582 | W=-20,325 | X=171,535 | W= -0,076 | X=168,904 | W= -0,172 | X=121,261 |
| | Y=326,818 | P=15,439 | Y=440,811 | P= -0,294 | Y=436,761 | P= -0,377 | Y=113,344 |
| | Z=53,477 | R=69,359 | Z=1,406 | R= -0,128 | Z=28,485 | R= -0,005 | |

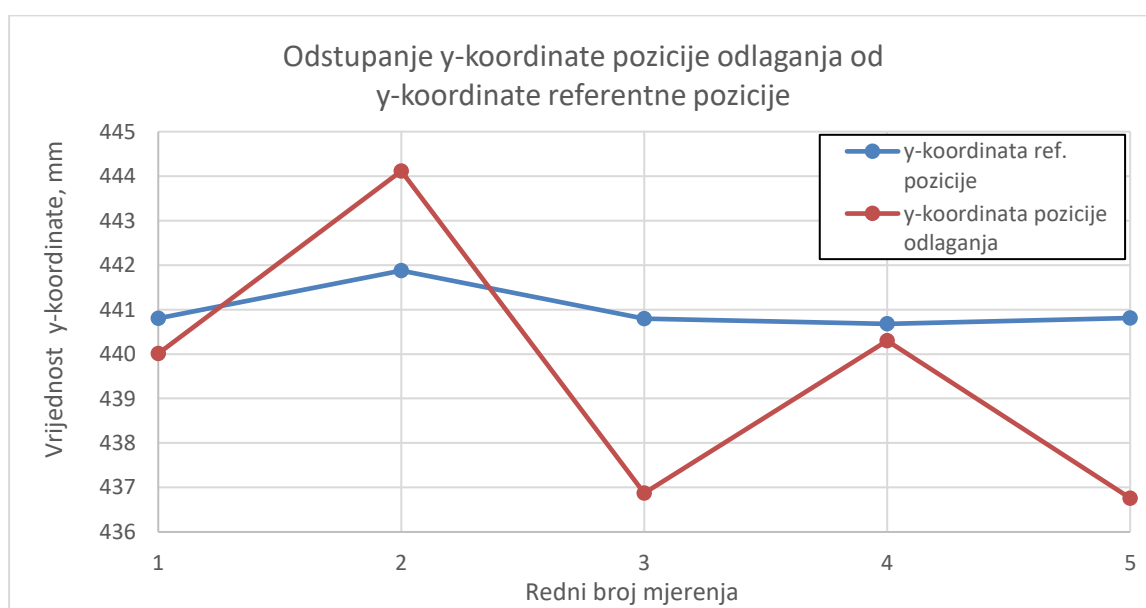
Na slici 65. prikazan je grafikon na kojem su uspoređene očitane vrijednosti izmjerenih x-koordinata referentne pozicije navedene u 2. stupcu tablice 11. s očitanim vrijednostima x-koordinata predmeta nakon odlaganja zapisane u 3. stupcu tablice 11.



Slika 65. Odstupanje x-koordinate pozicije odlaganja od x-koordinate referentne pozicije

Najveća vrijednost odstupanja x-koordinate pozicije odlaganja od x-koordinate referentne pozicije izmjerena je u 5. mjeranju i iznosi 2,631 mm, dok je iznos najmanjeg odstupanja od 0,193 mm dobiven u 4. mjeranju. Izračunata srednja vrijednost odstupanja x-koordinate iznosi 1,444 mm.

Na slici 66. prikazan je grafikon na kojem su uspoređene očitane vrijednosti izmjerenih y-koordinata referentne pozicije navedene u 2. stupcu tablice 11. s očitanim vrijednostima y-koordinata predmeta nakon odlaganja.



Slika 66. Odstupanje y-koordinate pozicije odlaganja od y-koordinate referentne pozicije

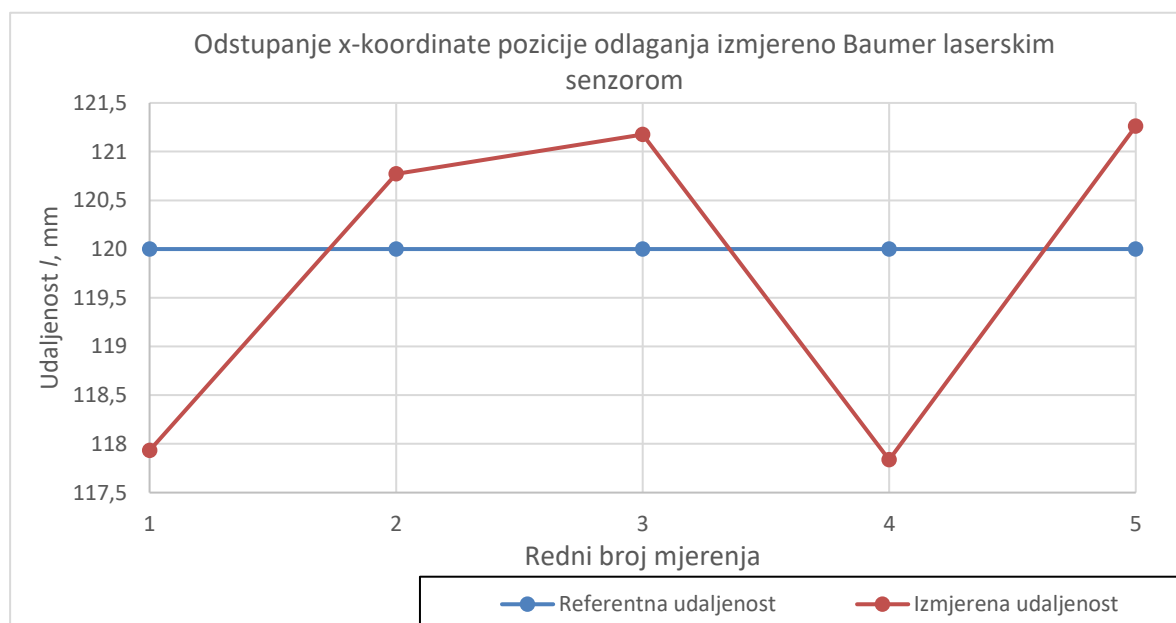
Odmah na prvi pogled može se primijetiti da su odstupanja y-koordinate veća u odnosu na dobivene vrijednosti odstupanja po x-koordinati. Najveća vrijednost odstupanja y-koordinate pozicije odlaganja od y-koordinate referentne pozicije izmjerena je u 5. mjeranju i iznosi 4,050 mm, dok je iznos najmanjeg odstupanja 0,376 mm dobiveno u 4. mjeranju. Izračunata srednja vrijednost odstupanja y-koordinate iznosi 2,276 mm.

Prema tim podacima vidljivo je da su dobivene vrijednosti odstupanja po x i y koordinatama najmanja u 4. mjeranju, a najveća u 5. mjeranju.

Prilikom izračuna greške ponovljivosti pozicioniranja predmeta prema podacima navedenim u 3. stupcu tablice 11., u obzir treba uzeti ponovljivost Fanuc M-710iC/45M robotske ruke koja iznosi ± 0.06 mm te grešku koja je nastala prilikom hvatanja predmeta u početnom položaju.

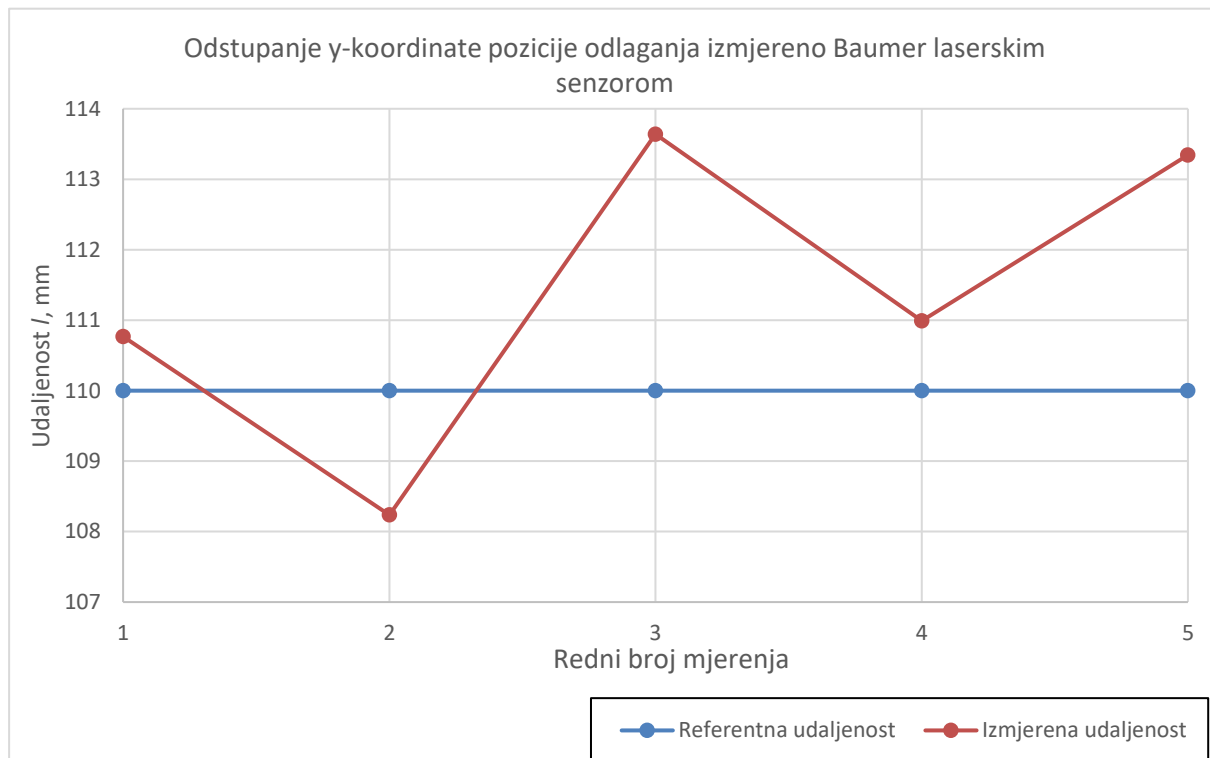
7.3.1. Prikaz rezultata izmjerenih Baumer laserskim senzorom

Referentna udaljenost između Baumer laserskog senzora i predmeta nakon odlaganja iznosi 120 mm po x-koordinati što je prikazano plavom linijom na grafu na slici 67. Crvenom linijom prikazana su izmjerena odstupanja od referentne vrijednosti x-koordinate. Najveći iznos odstupanja zabilježen je u 4. mjeranju te iznosi 2,163 mm, dok je iznos najmanjeg odstupanja 0,773 mm. Srednja vrijednost odstupanja dobivena na temelju provedenih mjerenja iznosi 1,488 mm.



Slika 67. Odstupanje x-koordinate pozicije odlaganja izmjereno Baumer laserskim senzorom

Referentna udaljenost između Baumer laserskog senzora i predmeta po x-koordinati iznosi 110 mm što je prikazano plavom linijom na grafu na slici 68. Najveći iznos odstupanja zabilježen je u 5. mjeranju te iznosi 3,344 mm, dok je iznos najmanjeg odstupanja 0,768 mm. Srednja vrijednost odstupanja dobivena na temelju provedenih mjerenja iznosi 2,101 mm.



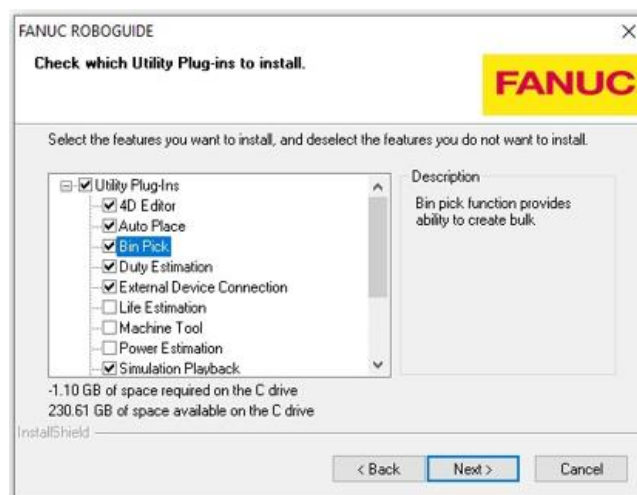
Slika 68. Odstupanje y-koordinate pozicije odlaganja izmjereno Baumer laserskim senzorom

8. PRIMJENA 3D VIZIJSKOG SUSTAVA U SIMULACIJSKOM PROGRAMSKOM PAKETU ROBOGUIDE

Nakon provedenih ispitivanja i verifikacije rada Fanuc 3D stereovizijskog sustava na stvarnom robotu, izrađen je simulacijski program istog tog procesa u Fanuc-ovom simulacijskom programskom paketu Roboguide. U Roboguide-u je moguće pokrenuti TP program izrađen na stvarnom robotu što pruža mogućnost testiranja i optimizacije programa. U nastavku su opisani koraci izrade simulacijske robotske stanice.

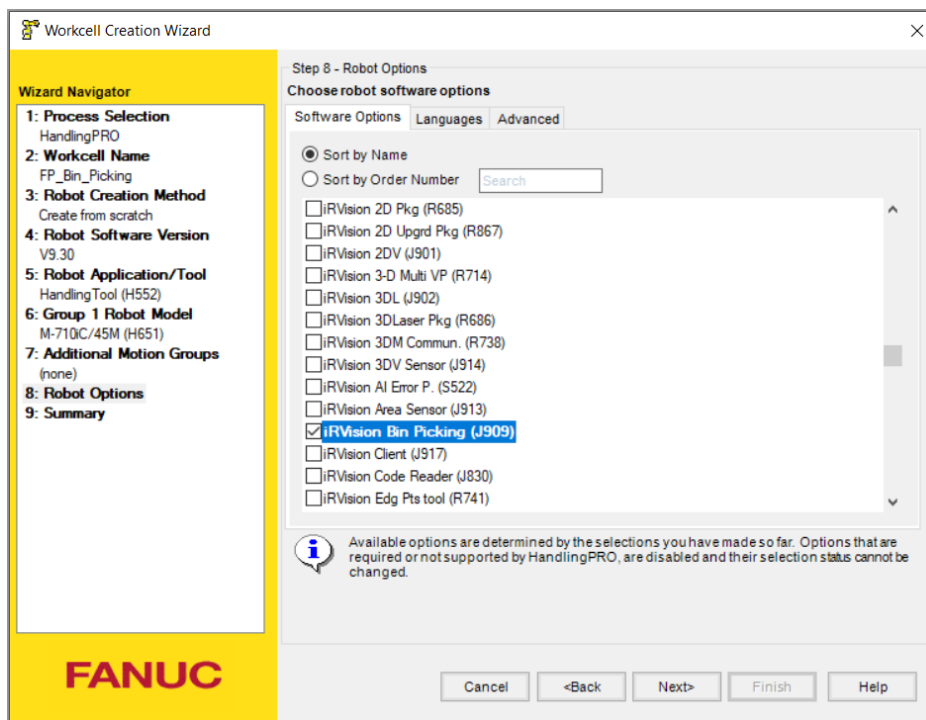
8.1. Osnovne postavke Roboguide-a za izradu bin picking simulacije

Kako bi u Roboguide-u bili sadržani svi potrebni programski paketi i opcije za izradu bin picking simulacije, prilikom instalacije Roboguide-a potrebno je instalirati Bin Pick dodatak kao što je prikazano na slici 69.



Slika 69. Roboguide instalacija Bin Pick dodatka

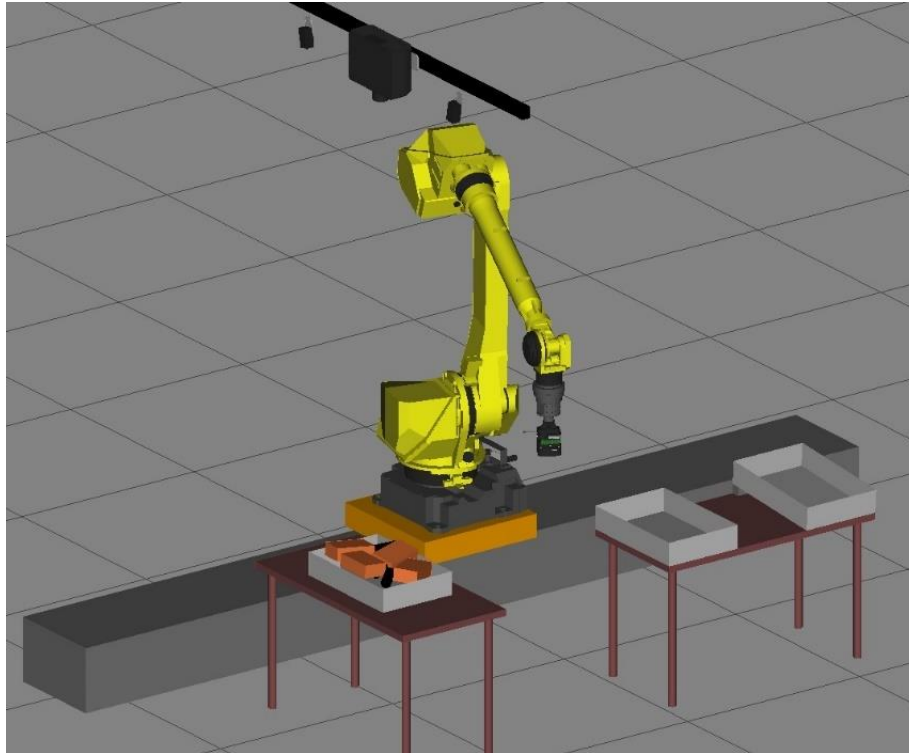
Odabrana verzija softvera ovisi o generaciji upravljačke jedinice stvarnog robota. S obzirom na to da robot Fanuc M-710iC/45M ima instaliranu verziju softvera V9.30 na svojoj upravljačkoj jedinici, potrebno je istu verziju softvera odabrati prilikom kreiranja nove robotske stanice u Roboguide-u kako bi se osigurala kompatibilnost sa stvarnim robotom. Prilikom odabira softverskih opcija robota potrebno je odabrati opciju iRVision Bin Picking (J909) kako je prikazano na slici 70. s kojom će biti omogućeni potrebni programski paketi za izradu bin picking simulacijskog programa.



Slika 70. Roboguide konfiguracija robotske stanice

8.2. Opis Roboguide simulacijske robotske stanice

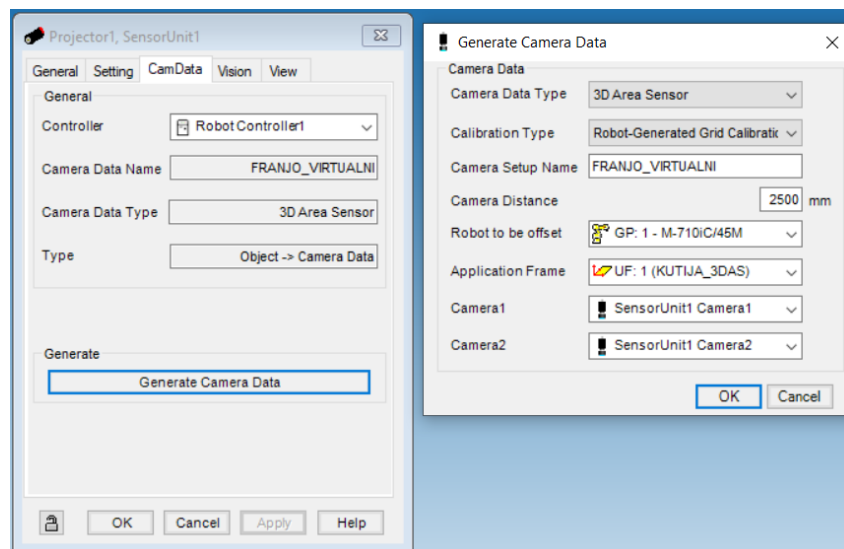
Kako bi prikaz robotske stanice u simulaciji bio što vjerniji realnom postavu, u Catia V5 programskom paketu sastavljen je CAD model sklopa robotskog alata s Piab Kenos KCS vakuumskom hvataljkom te je izrađen model radnog stola prema stvarnim dimenzijama. Također, s obzirom na položaje u stvarnom radnom okruženju robota, prema istim vrijednostima udaljenosti od FANUC M-710iC/45M robotske ruke smješteni su elementi u virtualnom radnom prostoru. Na slici 71. prikazan je izgled izrađene robotske stanice u programskom paketu Roboguide.



Slika 71. Prikaz robotske stanice u Roboguide-u

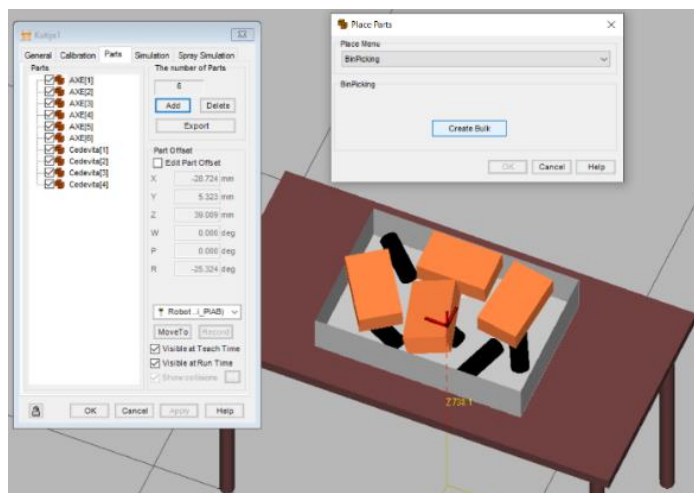
Uz pomoć naredbe *Fixtures* → *Add Fixtures* dodani su nepomični dijelovi u simulaciji tj. dva radna stola i tri kutije, dok su naredbom *Part* → *Add Part* dodani modeli predmeta rada.

Slika 72. prikazuje način izvršavanja kalibracije Fanuc 3D Area senzora u Roboguide-u.



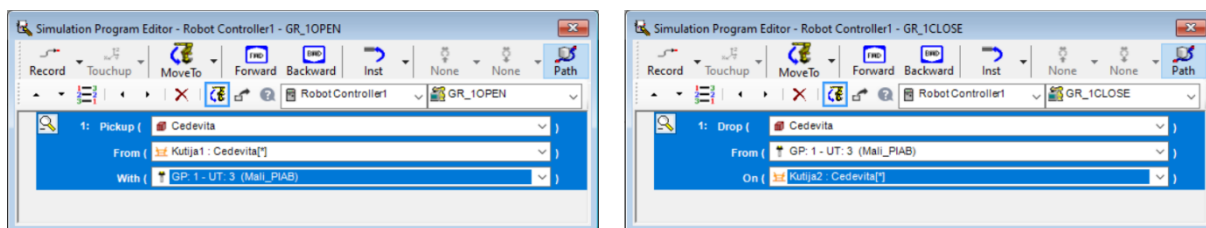
Slika 72. Kalibracija Fanuc 3D Area senzora u Roboguide-u

Na slici 73. prikazani su proizvoljno raspoređeni predmeti rada unutar kutije 1. Opcija *Create Bulk* omogućuje automatsko generiranje hrpe proizvoljno raspoređenih predmeta unutar kutije.



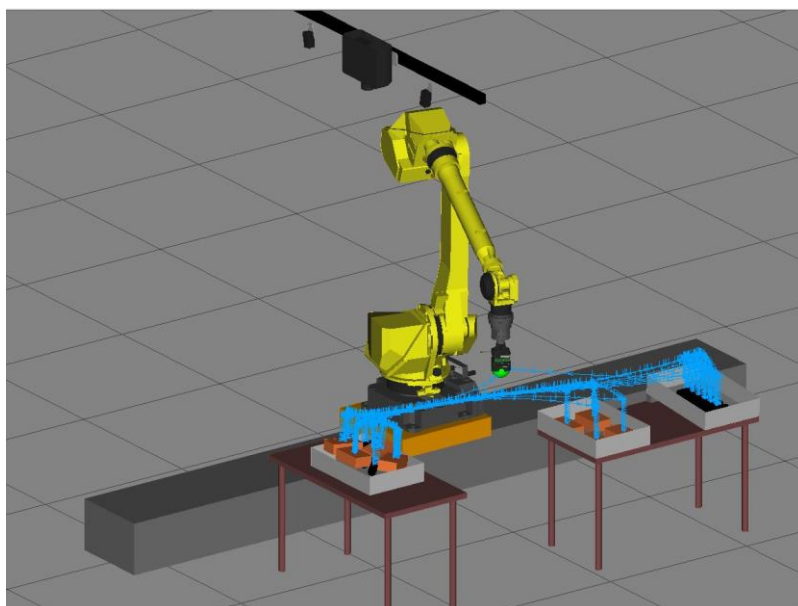
Slika 73. Roboguide kreiranje proizvoljno rasporedene hrpe predmeta unutar kutije

Na slici 78. prikazani su izrađeni simulacijski programi za izuzimanje i odlaganje predmeta rada s vakuumskom hvataljkom.



Slika 74. Prikaz izrade simulacijskih programa za izuzimanje i odlaganje predmeta

Slika 77. prikazuje putanju vrha robotskog alata nakon izvršene simulacije u Roboguide-u. Izvršavanje simulacije traje 188,3 sekunde.



Slika 75. Roboguide prikaz putanje vrha robotskog alata nakon izvršene simulacije

9. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog diplomskog rada cilj je bio ispitati mogućnosti primjene industrijskog robota povezanog s 3D vizijskim sustavom za obavljanje zadataka izuzimanja slobodno raspoređenih predmeta široke potrošnje iz kutije. Izvršenim ispitivanjima prikazano je da se standardna industrijska oprema, uz određena ograničenja ponajprije zbog karakteristike deformabilnosti predmeta rada, može primijeniti za rješavanje nestandardnih industrijskih zadataka.

Kroz ovaj diplomski rad prikazan je postupak konfiguracije 3D stereovizijskog sustava povezanog s industrijskim robotom te je na realnom primjeru verificiran rad vizijskog sustava za obavljanje zadataka u nestrukturiranoj radnoj okolini. Kroz izradu praktičnog dijela ovog rada upoznao sam se s radom Fanuc robota, načinom izrade TP programa te njegovom primjenom na industrijskom robotu, konfiguracijom i mogućnostima primjene vizijskog sustava, kreiranjem vizijskih procesa za rješavanje zadataka u nestrukturiranoj radnoj okolini te mogućnostima rada u Fanuc-ovom simulacijskom programskom paketu Roboguide. Verifikacijom rada Fanuc 3D Area senzora pri različitim svjetlosnim uvjetima potvrđene su pretpostavke kako se učinkovitost i pouzdanost sustava smanjuju s povećanjem intenziteta ambijentalnog osvjetljenja te su kvalitativno prikazani rezultati tih mjerenja. Provedenim mjerenjima točnosti i ponovljivosti Fanuc 3D Area senzora utvrđeni su iznosi odstupanja ponovljivosti koji se kreću u rasponu od ± 2 mm te se može zaključiti da su oni zadovoljavajući s obzirom na to da je Fanuc 3D Area senzor prvenstveno namijenjen za obavljanje zadataka u nestrukturiranoj radnoj okolini. Ovaj diplomski rad omogućio mi je da na realnom primjeru primjene 3D stereovizijskog sustava na industrijskom robotu upoznam sve potrebne korake koji su nužni u procesu konfiguracije robotske stanice koja izvršava zadani zadatak.

LITERATURA

- [1] Šuligoj F. Predavanje iz kolegija Vizijski sustavi, Zagreb; Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [2] Švaco M. Predavanje iz kolegija Projektiranje automatskih montažnih sustava, Zagreb; Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.
- [3] https://www.distrelec.biz/Web/Downloads/t/ds/Soft%20Robotics%20Gripper%20Kit_eng_tds.pdf, Pristupljeno 20.12.2021.
- [4] FANUC iRVision Operator's manual (Reference) B-83914EN/05, Robot series R-30iB Plus/ R-30iB Mate Plus/ R-30iB Compact Plus/ R-30iB Mini Plus CONTROLLER, Fanuc Corporation, 2021.
- [5] FANUC Robot M-710iC/50/70/50H/50S/45M/50E Mechanical unit Operator's manual, B-82274EN/11, Fanuc Corporation, 2015.
- [6] <https://www.gudel.com/products/linear-tracks-for-robots/tmf>, Pristupljeno 20.12.2021.
- [7] <https://www.productivity.com/wp-content/uploads/2019/06/Force-Sensor.pdf>, Pristupljeno 20.12.2021.
- [8] FANUC iRVision Bin Picking Application Operator's manual B-83914EN-6/01, Robot series R-30iB Plus CONTROLLER, Fanuc Corporation, 2017.
- [9] Predavanje iz kolegija Programiranje robota, FANUC - Osnovne podloge za vježbe, Zagreb; Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [10] <https://www.jalcinstruments.com/tenmars-tm-201.html>, Pristupljeno 20.12.2021.
- [11] <http://web.studenti.math.pmf.unizg.hr/~btrojko/semrac/karakteristike.html>, Pristupljeno 20.12.2021.
- [12] <https://www.baumer.com/us/en/product-overview/distance-measurement/laser-distance-sensors/high-performance/high-measuring-accuracy/om70-p0250-hh0130-vi/p/38595>, Pristupljeno 20.12.2021.

PRILOZI

I. Fanc TP programski kod

BIN_PICKING_GLAVNI_PROGRAM.TP

```
1: UFRAME_NUM=1 ;
2: UTOOL_NUM=3 ;
3: OVERRIDE=75% ;
4: ;
5: !Brojaci ;
6: R[51:Brojac_AXE]=0 ;
7: R[52:Brojac_CEDEVITA]=0 ;
8: ;
9:J PR[51:Home pos] 50% FINE ;
10: CALL BINPICK_CLEAR("Parts List ID"=1) ;
11: ;
12: !Trazenje poloazaja kutije ;
13: CALL POMAK_KUTIJE ;
14: ;
15: !Program za lokalizaciju AXE ;
16: LBL[100] ;
17: CALL BIN_PICKING_AXE ;
18: IF R[83:Search_Status_AX]=0,JMP LBL[100] ;
19: R[51:Brojac_AXE]=R[51:Brojac_AXE]+1 ;
20: ;
21: !Program za lokalizaciju CEDEVITA ;
22: LBL[200] ;
23: CALL BIN_PICKING_CEDEVITA ;
24: IF R[63:Search_Status_CE]=0,JMP LBL[200] ;
25: R[52:Brojac_CEDEVITA]=R[52:Brojac_CEDEVITA]+1 ;
26: ;
27: IF R[51:Brojac_AXE]=1,JMP LBL[100] ;
28: IF R[83:Search_Status_AX]<>0 AND R[63:Search_Status_CE]<>0,JMP
   LBL[900] ;
29: ;
30: LBL[900] ;
31:J PR[51:Home pos] 100% CNT100 ;
32: MESSAGE[Kraj glavnog programa!] ;
33: END ;
```

POMAK_KUTIJE.TP

```
1: R[56:Kutija_max_br_tr]=5 ;
2: R[57:Kutija_brojac_tr]=0 ;
3: ;
4: LBL[10] ;
5: IF R[57:Kutija_brojac_tr]>R[56:Kutija_max_br_tr],JMP LBL[99] ;
6: CALL BINPICK_ACQUIRE3DMAP("3D Area Sensor"='FRANJO_3DAS') ;
7: ;
8: VISION RUN_FIND 'FP_POMAK' ;
9: VISION GET_OFFSET 'FP_POMAK' VR[1] JMP LBL[90] ;
10: END ;
11: ;
12: LBL[90] ;
13: R[57:Kutija_brojac_tr]=R[57:Kutija_brojac_tr]+1 ;
14: JMP LBL[10] ;
15: ;
16: LBL[99] ;
17: END ;
```

BIN_PICKING_AXE.TP

```
1: UFRAME_NUM=1 ;
2: UTOOL_NUM=3 ;
3: OVERRIDE=75% ;
4: ;
5: F[1]=(OFF) ;
6: CALL BINPICK_CLEAR("Parts List ID"=1) ;
7: ;
8: !Potprogram za lokalizaciju AXE ;
9: CALL BP_AXE_POTPROGRAM ;
10: LBL[11] ;
11: WAIT (F[1]) ;
12: F[1]=(OFF) ;
13: IF R[83:Search_Status_AX]=1,JMP LBL[999] ;
14: J PR[58:Tocka PROLASKA] 75% CNT75 ;
15: J PR[57:Centar Kutije 1] 75% CNT100 ;
16: PR[54,7:Pick Appr Pos]=2000 ;
17: PR[52,7:pick pos]=2000 ;
18: L PR[54:Pick Appr Pos] 300mm/sec FINE ;
19: L PR[52:pick pos] 100mm/sec FINE ;
20: RO[1]=ON ;
21: WAIT .75(sec) ;
22: L PR[54:Pick Appr Pos] 100mm/sec FINE ;
23: L PR[57:Centar Kutije 1] 800mm/sec CNT50 ;
24: CALL BINPICK_SETSTAT("Parts List ID"=1,"Part Status"=20) ;
25: J P[1] 100% CNT100 ;
26: J P[2] 100% CNT100 ;
27: ;
28: !Potprogram za lokalizaciju AXE ;
29: RUN BP_AXE_POTPROGRAM ;
30: J P[3] 100% CNT75 Tool_Offset,PR[45:Tool_offset] ;
31: L P[3] 500mm/sec FINE ;
32: RO[1]=OFF ;
33: WAIT .40(sec) ;
34: L P[4] 500mm/sec CNT80 ;
35: JMP LBL[11] ;
36: ;
37: LBL[999] ;
38: END ;
```

BP_AXE_POTPROGRAM.TP

```
1: LBL[1] ;
2: CALL BINPICK_ACQUIRE3DMAP("3D Area Sensor"='FRANJO_3DAS') ;
3: CALL BINPICK_SEARCH("Parts List ID"=1,"SEARCH VP ID"=2,"Status R"=83) ;
4: IF R[83:Search_Status_AX]<>0,JMP LBL[999] ;
5: LBL[2] ;
6: CALL BINPICK_POP("Parts List ID"=1,"Status R"=84,"Model ID R"=85) ;
7: IF R[84:Pop_status_AXE]<>0,JMP LBL[1] ;
8: CALL BINPICK_GETPICKPOS("Parts List ID"=1,"PICK Pos ID"=2,"Status R"=86,"PICK Pos PR"=52,"IA Offset PR"=53,"APP Pos PR"=54) ;
9: IF R[86:Get_Pick_StatusA]=0,JMP LBL[3] ;
10: CALL BINPICK_SETSTAT("Parts List ID"=1,"Part Status"=22) ;
11: JMP LBL[2] ;
12: LBL[3] ;
13: LBL[999] ;
14: F[1]=(ON) ;
15: END ;
```

BIN_PICKING_CEDVITA.TP

```
1: UFRAME_NUM=1 ;
2: UTOOL_NUM=3 ;
3: OVERRIDE=75% ;
4: ;
5: F[1]=(OFF) ;
6: IF R[52:Brojac_CEDVITA]<>0,JMP LBL[20] ;
7: R[11:Red]=0 ;
8: R[12:Stupac]=0 ;
9: R[13:Red_offset]=160 ;
10: R[14:Stupac_offset]=250 ;
11: R[15:brojac]=0 ;
12: ;
13: CALL BINPICK_CLEAR("Parts List ID"=1) ;
14: LBL[20] ;
15: !Potprogram za lokalizaciju CED ;
16: CALL BP_CED_POTPROGRAM ;
17: LBL[15] ;
18: WAIT (F[1]) ;
19: F[1]=(OFF) ;
20: IF R[63:Search_Status_CE]=1,JMP LBL[999] ;
21:J PR[58:Tocka PROLASKA] 75% CNT75 ;
22:J PR[57:Centar Kutije 1] 75% CNT100 ;
23: PR[54,7:Pick Appr Pos]=2000 ;
24: PR[52,7:pick pos]=2000 ;
25:L PR[54:Pick Appr Pos] 300mm/sec FINE ;
26:L PR[52:pick pos] 100mm/sec FINE ;
27: RO[1]=ON ;
28: WAIT .75(sec) ;
29:L PR[54:Pick Appr Pos] 100mm/sec FINE ;
30:L PR[57:Centar Kutije 1] 800mm/sec CNT50 ;
31: CALL BINPICK_SETSTAT("Parts List ID"=1,"Part Status"=20) ;
32:J P[1] 100% CNT75 ;
33:J P[2] 100% CNT75 ;
34: !Potprogram za paletizaciju CED ;
35: CALL BP_CED_BROJAC ;
36: ;
37: !Potprogram za lokalizaciju CED ;
38: RUN BP_CED_POTPROGRAM ;
39: ;
40:J PR[63:Centar Kutije 2] 100% CNT100 ;
41:J P[3] 100% FINE Tool_Offset,PR[45:Tool_offset] Offset,PR[46:offset] ;
42:L P[3] 300mm/sec FINE Offset,PR[46:offset] ;
43: RO[1]=OFF ;
44: WAIT .40(sec) ;
45:L P[3] 2000mm/sec FINE Tool_Offset,PR[45:Tool_offset]
Offset,PR[46:offset] ;
46: JMP LBL[15] ;
47: ;
48: LBL[999] ;
49: END ;
```

BP_CED_BROJAC.TP

```
1: IF R[12:Stupac]=2, JMP LBL[1] ;
2: JMP LBL[2] ;
3: ;
4: LBL[1] ;
5: R[12:Stupac]=0 ;
6: R[11:Red]=R[11:Red]+1 ;
7: ;
8: LBL[2] ;
9: PR[46,1:offset]=R[11:Red]*R[13:Red_offset] ;
10: PR[46,2:offset]=R[12:Stupac]*R[14:Stupac_offset] ;
11: R[12:Stupac]=R[12:Stupac]+1 ;
```

BP_CED_POTPROGRAM.TP

```
1: LBL[1] ;
2: CALL BINPICK_ACQUIRE3DMAP("3D Area Sensor"='FRANJO_3DAS') ;
3: CALL BINPICK_SEARCH("Parts List ID"=1,"SEARCH VP ID"=1,"Status
   R"=63) ;
4: IF R[63:Search_Status_CE]<>0, JMP LBL[999] ;
5: LBL[2] ;
6: CALL BINPICK_POP("Parts List ID"=1,"Status R"=64,"Model ID R"=65) ;
7: IF R[64:Pop_Status]<>0, JMP LBL[1] ;
8: CALL BINPICK_GETPICKPOS("Parts List ID"=1,"PICK Pos ID"=1,"Status
   R"=66,"PICK Pos PR"=52,"IA Offset PR"=53,"APP Pos PR"=54) ;
9: IF R[66:Get_Pick_Status]=0, JMP LBL[3] ;
10: CALL BINPICK_SETSTAT("Parts List ID"=1,"Part Status"=22) ;
11: JMP LBL[2] ;
12: ;
13: LBL[3] ;
14: LBL[999] ;
15: F[1]=(ON) ;
16: END ;
```