

Industrijski robotski sustav za manipulaciju dijelovima u pokretu

Radić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:686849>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Radić

Zagreb, 2023. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Marko Švaco, dipl. ing.

Student:

Ivan Radić

Zagreb, 2023. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim tijekom studija i navedenom literaturom.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Marku Švaci što je prihvatio biti moj mentor i omogućio mi rad s opremom u Regionalnom centru izvrsnosti za robotske tehnologije – CRTA. Neizmjereno sam zahvalan na njegovu strpljenju, razumijevanju i povjerenju tijekom izrade projektnog zadatka ovoga diplomskog rada.

Nadalje, zahvaljujem dr. sc. Josipu Vidakoviću na pomoći pruženoj pri konfiguraciji i integraciji Siemens uređaja s Fanuc robotima, te doktorandu Branimiru Čaranu, koji je redovno provjeravao moj rad i pazio da se ne dogode ozbiljne pogreške. Uz to, zahvaljujem dr. sc. Bojanu Šekoranji na savjetima, literaturi i pomoći pri rješavanju pogrešaka i upozorenja nastalih tijekom konfiguriranja i programiranja robota. Za kraj, zahvaljujem tvrtki Trolist d. o. o. na brzom i kvalitetnoj izradi konstrukcije za montažu enkodera.

Ivan Radić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Radić**

JMBAG: 0035210178

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Industrijski robotski sustav za manipulaciju dijelovima u pokretu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Industrial robotic system for manipulation of moving parts**

Opis zadatka:

Industrijski roboti svoje zadaće (npr. rukovanje, sklapanje, druge pomoćne operacije) mogu obavljati na statičnim predmetima rada ili na predmetima u pokretu. U slučajevima kada su potrebna kratka vremena ciklusa, rad industrijskih robota moguće je uskladiti s kretanjem predmeta rada. U industrijskim sustavima dva najčešća standarda uključuju praćenje dijelova na transportnim sustavima koristeći davač impulsa (npr. inkrementalni enkoder) i jednostavan senzor prisutnosti ili enkoder i vizijski sustav.

U Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i nalazi se robotska stanica s dva protusmjerna trakasta transportera i tri industrijska robota s mogućnošću praćenja dijelova u pokretu (jedan SCARA robot i dva robota paralelne kinematike). U radu je potrebno programirati robote i transportne sustave na način da se omogući zatvoreni (kružni) transport zadanih predmeta rada na dva otvorena trakasta transportera. Roboti trebaju rukovati dijelovima u pokretu koristeći softverske opcije za praćenje dijelova (eng. Line tracking) i za vizualno praćenje dijelova u pokretu (eng. Visual line tracking). SCARA robot koristeći vizijski sustav treba napuniti transportni sustav s predmetima koji se nalaze slobodno raspoređeni u ravnini.

Kako bi se postigla opisana funkcionalnost u radu je potrebno:

- osposobiti rad svih potrebnih robotskih softverskih opcija za praćenje trake,
- podesiti i kalibrirati vizijske sustave i ostale senzore,
- omogućiti i validirati pokretanje cijelog sustava u automatskom režimu rada,
- integrirati minimalno potrebne sigurnosne funkcije,
- oblikovati, konstruirati, izraditi i funkcionalno integrirati zadane dijelove stanice i
- dokumentirati izvedeno stanje.

Rad sustava potrebno je validirati na opremi u Laboratoriju za autonomne sustave. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

4. svibnja 2023.

6. srpnja 2023.

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Marko Švaco

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Strojni vid..... | 4 |
| 1.2. Linijsko praćenje pokretne trake..... | 8 |
| 1.3. Vizualno praćenje objekta..... | 11 |
| 2. UPRAVLJANJE SCARA ROBOTOM SR-3iA UPORABOM OPCIJE STROJNOG VIDA | 13 |
| 2.1. Opis pozicije | 13 |
| 2.2. Popis sastavnica | 15 |
| 2.2.1. Fanuc SCARA robot SR-6iA..... | 15 |
| 2.2.2. Fanuc kamera SC130EF2 | 16 |
| 2.3. Instaliranje i integracija sastavnica | 17 |
| 2.4. Konfiguracija opcije strojnog vida..... | 22 |
| 2.5. Opis programskog kôda SCARA robota SR-6iA | 31 |
| 3. UPRAVLJANJE DELTA-ROBOTOM M-3iA UPORABOM OPCIJE ZA LINIJSKO PRAĆENJE OBJEKTA..... | 33 |
| 3.1. Opis pozicije | 33 |
| 3.2. Popis sastavnica | 35 |
| 3.2.1. Fanuc Delta-robot M-3iA..... | 35 |
| 3.2.2. Odvojena jedinica sučelja detektora | 36 |
| 3.2.3. Enkoderi..... | 37 |
| 3.2.4. Fotoelektrični senzor..... | 37 |
| 3.3. Integracija i instaliranje sastavnica | 38 |
| 3.4. Konfiguracija opcije za linijsko praćenje objekta..... | 44 |
| 3.5. Opis programskog kôda robota M-3iA | 49 |
| 4. UPRAVLJANJE DELTA-ROBOTOM DR-3iB UPORABOM OPCIJE ZA VIZUALNO PRAĆENJE OBJEKTA..... | 51 |
| 4.1. Opis položaja..... | 51 |
| 4.2. Popis sastavnica | 53 |
| 4.2.1. Fanuc delta-robot DR-3iB..... | 53 |
| 4.2.2. Fanuc-kamera..... | 54 |
| 4.2.3. Retroreflektivni fotosenzor | 54 |
| 4.2.4. SIMATIC ET200SP | 55 |
| 4.3. Integracija i instaliranje sastavnica | 56 |
| 4.4. Konfiguracija opcije za vizualno praćenje objekta | 64 |
| 4.5. Opis programskog kôda delta-robota DR-3iA | 69 |
| 5. SIGURNOSNE FUNKCIJE | 71 |

| | |
|--|----|
| 5.1. Opis funkcije za osiguranje robotskog radnog prostora..... | 71 |
| 5.2. Opis primijenjenih sigurnosnih senzora..... | 71 |
| 5.3. Integracija sigurnosnih senzora u robotski sustav..... | 72 |
| 5.4. Opis sigurnosnog programskog kôda..... | 75 |
| 6. AUTOMATSKO POKRETANJE | 79 |
| 6.1. Opis funkcije automatskog pokretanja..... | 79 |
| 6.2. Oblikovanje upravljačkog HMI zaslona | 80 |
| 6.3. Povezivanje signala PLC-a s digitalnim ulazima robota | 81 |
| 6.4. Opis konfiguracije zahtjeva za uslugu robota | 82 |
| 6.5. Pokretanje sustava..... | 84 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 86 |
| LITERATURA..... | 88 |
| PRILOZI..... | 91 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Shematski prikaz tehničkog rješenja | 1 |
| Slika 2. | Prikaz pozicija SCARA robota SR-6iA i delta robota DR-3iB..... | 2 |
| Slika 3. | Prikaz pozicije delta robota M-3iA | 2 |
| Slika 4. | Primjeri <i>Machine Vision</i> rasvjete [1]..... | 4 |
| Slika 5. | Uloga objektiva u sustavu <i>Machine Vision</i> [2] | 5 |
| Slika 6. | Prikaz CCD (lijevo) senzora slike [3] i CMOS (desno) senzora slike [4] | 6 |
| Slika 7. | Prikaz rada kamere za linijski pregled [5]..... | 7 |
| Slika 8. | Prikaz rada kamere za skeniranje područja [5] | 7 |
| Slika 9. | Prikaz rada kamere za 3D skeniranje [6]..... | 8 |
| Slika 10. | Shematski prikaz rada inkrementalnog enkodera [7] | 9 |
| Slika 11. | Shematski prikaz rada apsolutnog enkodera [8]..... | 10 |
| Slika 12. | Linijsko praćenje objekata [9]..... | 10 |
| Slika 13. | Kružno praćenje objekata [9] | 11 |
| Slika 14. | Shematski prikaz prve pozicije..... | 13 |
| Slika 15. | Transfer ključnih signala na prvoj poziciji..... | 14 |
| Slika 16. | Prikaz prve pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave | 14 |
| Slika 17. | Fanuc SCARA robot SR-6iA [10]..... | 16 |
| Slika 18. | Fanuc kamera SC130EF2 | 16 |
| Slika 19. | Prikaz horizontalne ravnine | 17 |
| Slika 20. | Neuspješno hvatanje predmeta rada na kosoj ravnini | 18 |
| Slika 21. | Položaj Fanuc kamere SC130EF2 u prvoj fazi sustava..... | 18 |
| Slika 22. | Industrijski kabel za Fanuc kameru SC130EF2 [11]..... | 19 |
| Slika 23. | R-30iB Compact Plus kontroler [9]..... | 19 |
| Slika 24. | Prikaz spajanja pneumatike na Fanuc robota SR-6iA | 20 |
| Slika 25. | Prikaz spajanja ulaza i izlaza pneumatike | 20 |
| Slika 26. | Generator vakuuma serije ZU [12]..... | 21 |
| Slika 27. | CAD model prihvatnice vakuumske hvataljke..... | 21 |
| Slika 28. | Sastavnice radnog alata SCARA robota SR-6iA | 22 |
| Slika 29. | Prikaz konfiguracije fiksne kamere [9] | 23 |
| Slika 30. | Kalibracijska mreža [9] | 23 |
| Slika 31. | Definirani <i>User Frame</i> za <i>iRVision</i> | 24 |
| Slika 32. | Početni <i>iRVision</i> prozor - robot SR-6iA..... | 25 |
| Slika 33. | Prozor za odabir kamere - robot SR-6iA..... | 25 |
| Slika 34. | Prozor za odabir kalibracijske mreže - robot SR-6iA | 26 |
| Slika 35. | Prozor za odabir lokacije mreže - robot SR-6iA | 26 |
| Slika 36. | Prozor za definiranje žarišne duljine objektiva - robot SR-6iA | 27 |
| Slika 37. | Prikaz označavanja točaka kalibracijske mreže | 27 |
| Slika 38. | Zaslon s rezultatima kalibracije kamere - robot SR-6iA..... | 28 |
| Slika 39. | Odabir kamere koja se rabi za program detekcije objekta - robot SR-6iA | 28 |
| Slika 40. | Odabir opcije automatskog podešavanja ekspozicije kamere - robot SR-6iA | 29 |
| Slika 41. | Prozor za učenje karakteristika predmeta rada - robot SR-6iA..... | 29 |
| Slika 42. | Prozor za definiranje referentne točke hvatanja – robot SR-6iA | 30 |
| Slika 43. | Dijagram toka programa SCARA robota SR-6iA | 32 |
| Slika 44. | Shematski prikaz druge pozicije..... | 33 |
| Slika 45. | Transfer ključnih signala na drugoj poziciji..... | 34 |
| Slika 46. | Prikaz druge pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave..... | 35 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 47. | Fanuc delta-robot M-3iA [13] | 36 |
| Slika 48. | <i>Separate Detector Interface Unit</i> [14]..... | 36 |
| Slika 49. | SICK enkoder (lijevo) [15], Fanuc enkoder (desno) [16] | 37 |
| Slika 50. | Allen-Bradley fotoelektrični senzor [17] | 37 |
| Slika 51. | Prikaz instaliranja konstrukcije za montažu enkodera | 38 |
| Slika 52. | CAD model konstrukcije za montažu enkodera | 39 |
| Slika 53. | Popis sastavnica nosača enkodera | 39 |
| Slika 54. | Prikaz spajanja enkodera na odvojenoj jedinici sučelja detektora | 40 |
| Slika 55. | Prikaz instaliranog fotoelektričnog senzora | 40 |
| Slika 56. | Prikaz konektora CRMA 62 i CRMA 63 na kontroleru robota [18]..... | 41 |
| Slika 57. | CRMA konektor [19] | 41 |
| Slika 58. | Prikaz vanjske <i>input</i> kutije za delta-robot M-3iA | 43 |
| Slika 59. | Prikaz vanjske <i>output</i> kutije za delta-robot M-3iA | 43 |
| Slika 60. | Izbornik za konfiguraciju sustava praćenja linije pri hvatanju objekta..... | 44 |
| Slika 61. | Izbornik za konfiguraciju prvog enkodera (lijevo) i izbornik za konfiguraciju drugog enkodera (desno) | 45 |
| Slika 62. | Prikaz instaliranog prvog enkodera (lijevo) i drugog enkodera (desno) | 45 |
| Slika 63. | Shematski prikaz udaljenosti između senzora i centra robota..... | 46 |
| Slika 64. | Shematski prikaz granica gibanja robota..... | 47 |
| Slika 65. | Izbornik za definiranje nominalnog okvira za prvi raspored praćenja | 47 |
| Slika 66. | Izbornik za konfiguraciju sustava praćenja linije pri odlaganju objekta..... | 48 |
| Slika 67. | Izbornik za definiranje nominalnog okvira za drugi raspored praćenja | 48 |
| Slika 68. | Dijagram toka programa delta-robota M-3iA | 50 |
| Slika 69. | Shematski prikaz treće pozicije | 51 |
| Slika 70. | Transfer ključnih signala na trećoj poziciji | 52 |
| Slika 71. | Prikaz druge pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave..... | 53 |
| Slika 72. | Fanuc delta-robot DR-3iB [22] | 54 |
| Slika 73. | Fanuc-kamera SC130EF2 – treća pozicija | 54 |
| Slika 74. | Odabrani retroreflektivni fotosenzor (lijevo) [23] i reflektor (desno) [24] | 55 |
| Slika 75. | Distributivni I/O sustav ET200 SP [25] | 55 |
| Slika 76. | Prikaz instalirane prihvatnice pneumatske hvataljke (lijevo) i dizajniranog CAD modela (desno) | 57 |
| Slika 77. | Sastavnice radnog alata delta-robota DR-3iB | 57 |
| Slika 78. | Prikaz sustava za automatsku izmjenu alata robota [26]..... | 58 |
| Slika 79. | Prikaz instalirane <i>Machine Vision</i> rasvjete i Fanuc-kamere | 59 |
| Slika 80. | Prikaz instaliranog fotosenzora za okidanje kamere | 60 |
| Slika 81. | Prikaz instaliranog retroreflektivnog senzora..... | 60 |
| Slika 82. | Prikaz vanjske <i>input</i> kutije za delta-robot DR-3iB | 61 |
| Slika 83. | Prikaz vanjske <i>output</i> kutije za delta-robot DR-3iB | 61 |
| Slika 84. | Prikaz instaliranog pneumatskog bloka s razvodnicima | 62 |
| Slika 85. | Prikaz spiralnih pneumatskih cijevi | 63 |
| Slika 86. | Konfiguracija enkodera servomotora (lijevo), prikaz enkodera servomotora koji pokreće izlaznu pokretnu traku (desno) | 64 |
| Slika 87. | Prozor za konfiguraciju parametara opcije <i>Tracking</i> | 65 |
| Slika 88. | Početni <i>iRVision</i> prozor - robot DR-3iB | 65 |
| Slika 89. | Prozor za odabir kamere - robot DR-3iB | 66 |
| Slika 90. | Prozor za definiranje udaljenosti između kalibracijske mreže i kamere - robot DR-3iB | 66 |
| Slika 91. | Zaslon s rezultatima kalibracije kamere - robot DR-3iB | 67 |
| Slika 92. | Odabir opcije automatskog podešavanja ekspozicije kamere - robot DR-3iB..... | 67 |

| | | |
|------------|--|----|
| Slika 93. | Prozor za učenje karakteristika predmeta rada - robot DR-3iB | 68 |
| Slika 94. | Dijagram toka programa delta-robot DR-3iB..... | 70 |
| Slika 95. | ReeR sigurnosna zavjesa (lijevo) [29] i model sučelja (desno) [30]..... | 72 |
| Slika 96. | Prikaz montiranih sigurnosnih senzora – robotska ćelija delta-robot M-3iA (lijevo) i robotska ćelija delta-robot DR-3iB (desno)..... | 73 |
| Slika 97. | Elektroshema spajanja modula sučelja za automatski način rada [32] | 73 |
| Slika 98. | Koncept povezivanja <i>System status</i> signala s robotima | 74 |
| Slika 99. | Ožičenje <i>System status</i> signala u ormaru napajanja robota DR-3iB (lijevo) i robota M-3iA (desno) | 75 |
| Slika 100. | Sigurnosni program <i>Open Fence</i> | 75 |
| Slika 101. | Pozivanje programa <i>Open Fence</i> naredbom <i>RUN</i> – SCARA robot SR-6iA | 76 |
| Slika 102. | Poruka korisničkog alarma..... | 76 |
| Slika 103. | Vrijednost sistemske varijable korisničkog alarma..... | 78 |
| Slika 104. | Idejno rješenje automatskog pokretanja sustava | 79 |
| Slika 105. | Zaslona za aktivaciju sustava na HMI-ju | 80 |
| Slika 106. | Dio PLC kôda za aktivaciju sustava..... | 80 |
| Slika 107. | Prikaz releja s trima radnim kontaktima..... | 81 |
| Slika 108. | Postavljanje RSR opcije za način odabira programa..... | 82 |
| Slika 109. | Aktivni ulazni signali kod RSR konfiguracije | 82 |
| Slika 110. | Mapiranje ulaznog signala za aktivaciju RSR zahtjeva | 83 |
| Slika 111. | Postavljanje robota u automatski način rada | 84 |
| Slika 112. | Postavljanje predmeta rada na horizontalnu ravninu | 84 |
| Slika 113. | Unos brzine ulazne pokretne trake te otvaranje zaslona za pokretanje sustava | 85 |
| Slika 114. | Resetiranje statusa na robotima i pokretanje sustava | 85 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Specifikacije Fanuc kamere..... | 17 |
| Tablica 2. Popis značenja pinova konektora [18]..... | 42 |
| Tablica 3. Popis sastavnica distributivnog I/O sustava | 56 |
| Tablica 4. Popis sastavnica sigurnosnog senzora | 72 |
| Tablica 5. Opis akcija sistemski varijabli korisničkog alarma [34] | 77 |
| Tablica 6. Način zaustavljanja robota s pomoću signala lijevog i desnog modula sučelja sigurnosnih senzora | 78 |

SAŽETAK

U ovom je radu opisan robotski sustav za manipulaciju dijelovima u pokretu, realiziran uporabom industrijske opreme u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Sustav je izveden sinkronizacijom rada triju industrijskih robota na zadatku kružnog transporta objekata na transportne trake. Primjenom softverskih opcija *Machine vision*, *Line tracking* i *Vision Line Tracking* postignut je nadzor putanje robota pri izvršavanju *pick and place* zadataka. U radu se svaki robot koristi jednom od navedenih softverskih opcija da bi pronašao položaj zadanog objekta na pokretnoj traci ili horizontalnoj ravnini, što je početni položaj objekata u sustavu. Cilj robotskog sustava za manipulaciju dijelovima u pokretu je, nakon početnog punjenja sustava objektima pomoću SCARA robota, kontrolom dvaju delta-robota ostvariti neprekidan kružni rad hvatanja i odlaganja objekta u pokretu. Da bi se ostvarila definirana funkcionalnost sustava, bilo je potrebno za rad osposobiti tri robotske stanice.

U ovom je radu za vizualno pronalaženje objekata na stanici SCARA robota SR-6iA primijenjen softverski paket *iRVision*. Na delta-robotu M-3iA konfigurirana je *Tracking* opcija za linijsko praćenje objekta na traci, dok je za vizualno praćenje objekta s pomoću delta-robota DR-3iB bilo potrebno izraditi programski kôd za određivanje položaja objekta na traci. Programskim kôdom kombiniraju se podaci prikupljeni iz *iRVision* i *Tracking* programa, konfiguriranih na delta-robotu DR-3iB.

Što se tiče hardverskih rješenja, konstruiran je i instaliran nosač za enkodere, koji su konfigurirani da bi robotima slali podatke o položaju ulazne pokretne trake. Da bi se pronašla prisutnost objekata, na bočne strane pokretnih traka postavljeni su senzori, koji su potom ožičeni na digitalne ulaze robota. Izrađeni su nosači za kamere, te su one postavljene i na SCARA robotu SR-6iA i delta-robotu DR-3iB kalibrirani su vizijski sustavi za pronalaženje objekta. Nadalje, za početni položaj predmeta rada postavljena je horizontalna ravnina, s koje SCARA robot puni sustav predmetima rada. Za sve robote bilo je potrebno instalirati pneumatske sustave za dotok zraka i ožičiti signale digitalnih izlaza za aktivaciju pneumatskih ventila. Uz to, na SCARA robotu SR-6iA i delta-robotu DR-3iB konstruirani su i integrirani radni alati s pneumatskim hvataljkama. Na svim su robotima izrađeni sigurnosni programski

kodovi za zaustavljanje cijelog sustava ako dođe do prekida snopa sigurnosnih senzora. Na kraju je bilo potrebno dizajnirati upravljački HMI zaslon, kao centralno mjesto za automatsko pokretanje sustava.

Ključne riječi: Fanuc roboti, *pick and place*, softverska opcija iRVision, strojni vid, linijsko praćenje objekta, vizualno praćenje objekta.

SUMMARY

This master thesis describes a robotic system for the manipulation of moving parts realized, using industrial equipment in the Laboratory for Autonomous Systems at CRTA at the Faculty of Mechanical Engineering and Shipbuilding. The system was implemented by synchronizing the work of three industrial robots on the task of circular object transportation onto conveyor belts. By using the software options Machine Vision, Line Tracking, and Vision Line Tracking, it was possible to control the paths of the robot during the execution of pick-and-place tasks. During the operation, each robot uses one of the listed software options to detect the position of a given object on the conveyor belt or horizontal plane, which is the initial position of the objects in the system. After the initial filling of the system with objects using the SCARA robot, the goal of the robot system for manipulating parts in motion is to achieve a continuous circular operation of catching and placing objects in motion, under the control of two delta robots. To achieve the defined functionality of the system, it was necessary to capacitate three robotic stations.

In this project, the iRVision software package was used for visual detection of objects at the SCARA robot SR-6iA station. On the delta robot M-3iA, the Tracking option was configured for linear tracking of the object on the track, while for the visual tracking of the object using the delta robot DR-3iB, it was necessary to create a program code to determine the position of the object on the track. The program code combines the data collected from the iRVision and Tracking programs configured on the delta Robot DR-3iB.

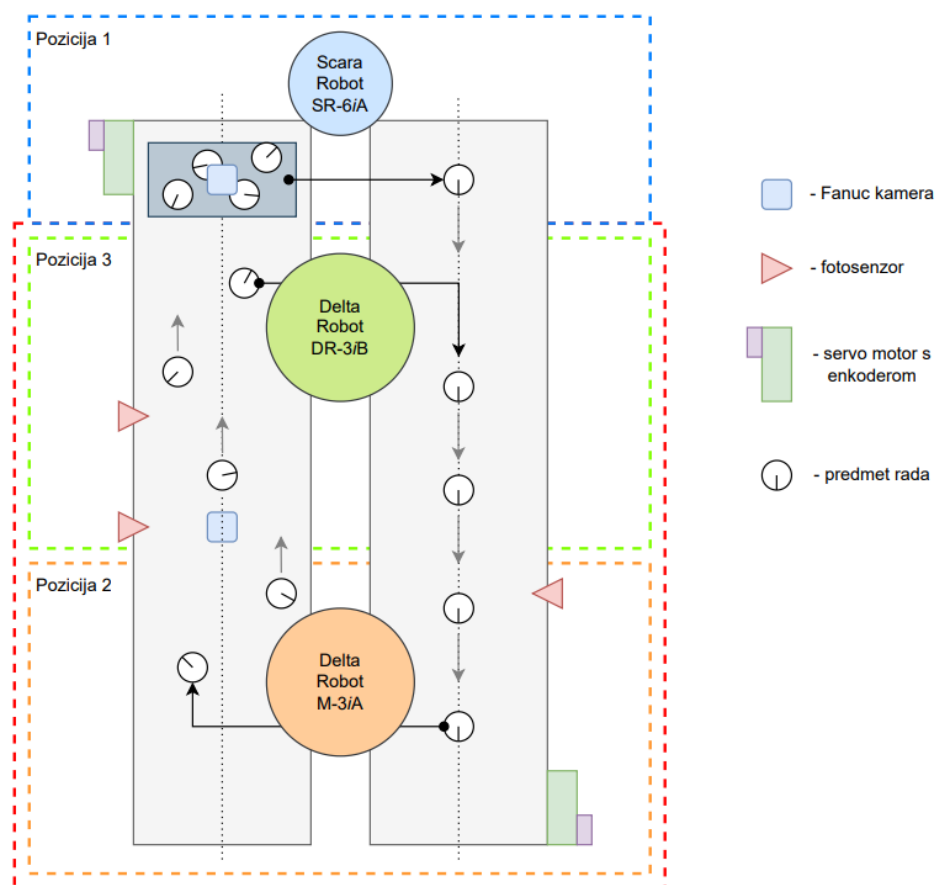
As for the hardware solutions, a holder for the encoders was designed and installed, and the encoders were configured to send information about the input conveyor belt position to the robots. To detect the presence of objects, sensors were placed on the sides of the conveyor belts and wired to the Robot's digital inputs. Camera mounts were made, cameras were installed and the vision system for object detection was calibrated on the SCARA Robot SR-6iA and delta Robot DR-3iB. Furthermore, a horizontal plane was set for the initial position of the work object, from which the robot fills the system with work objects. It was necessary for all robots to install pneumatic systems for the air supply and to wire digital output signals to activate the pneumatic valves. In addition, integrated work tools with pneumatic grippers

were designed on the SCARA Robot SR-6iA and delta Robot DR-3iB. Safety programming codes have been created on all robots, to stop the entire system if the beam of safety sensors is interrupted. In the end, it was necessary to design a control HMI screen as the main place for automatic system startup.

Key words: Fanuc roboti, *pick and place*, softverska opcija iRVision, strojni vid, linijsko praćenje objekta, vizualno praćenje objekta.

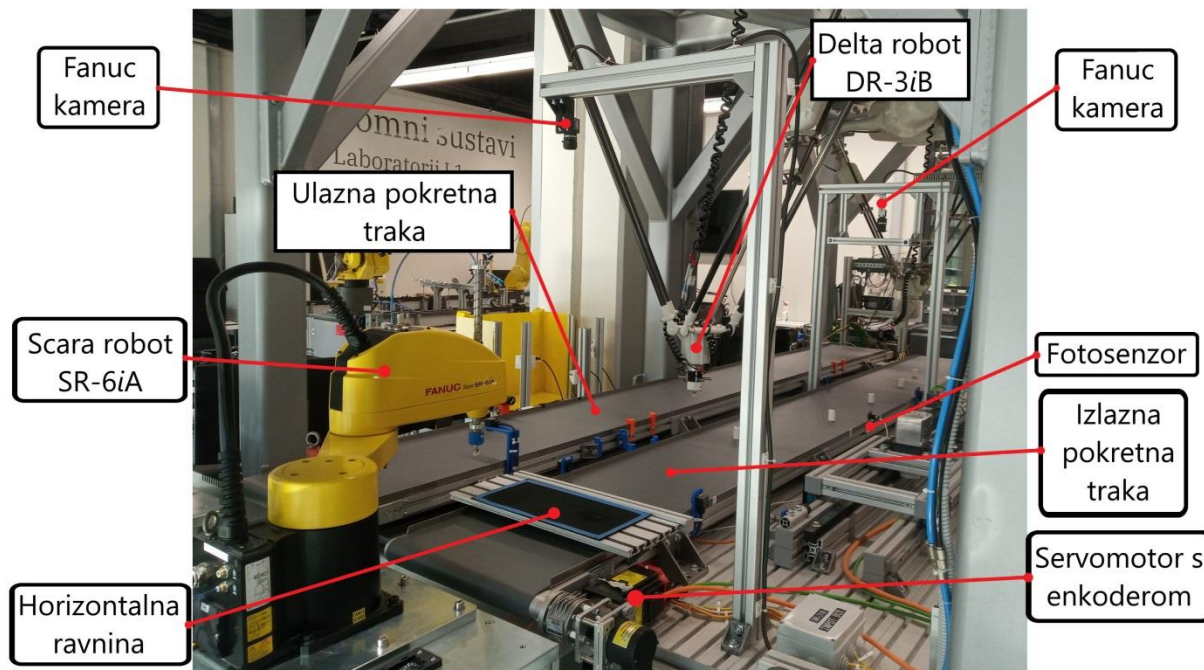
1. UVOD

Industrijski robotski sustav za manipulaciju dijelovima u pokretu, shematski prikazan na slici 1, sustav je za demonstraciju sinkroniziranog rada više robotskih ćelija na neprekidnom *pick and place* zadatku prebacivanja objekata u pokretu, s jedne pokretne trake na drugu. Sastoji se od triju Fanuc robota koji obavljaju *pick and place* radnje, dviju pokretnih traka suprotnog smjera gibanja za prijenos predmeta rada, kamera za prepoznavanje definiranih značajki objekata te senzora koji služe za pronalaženje prisutnosti objekata i aktiviranje pojedinih opcija sustava.

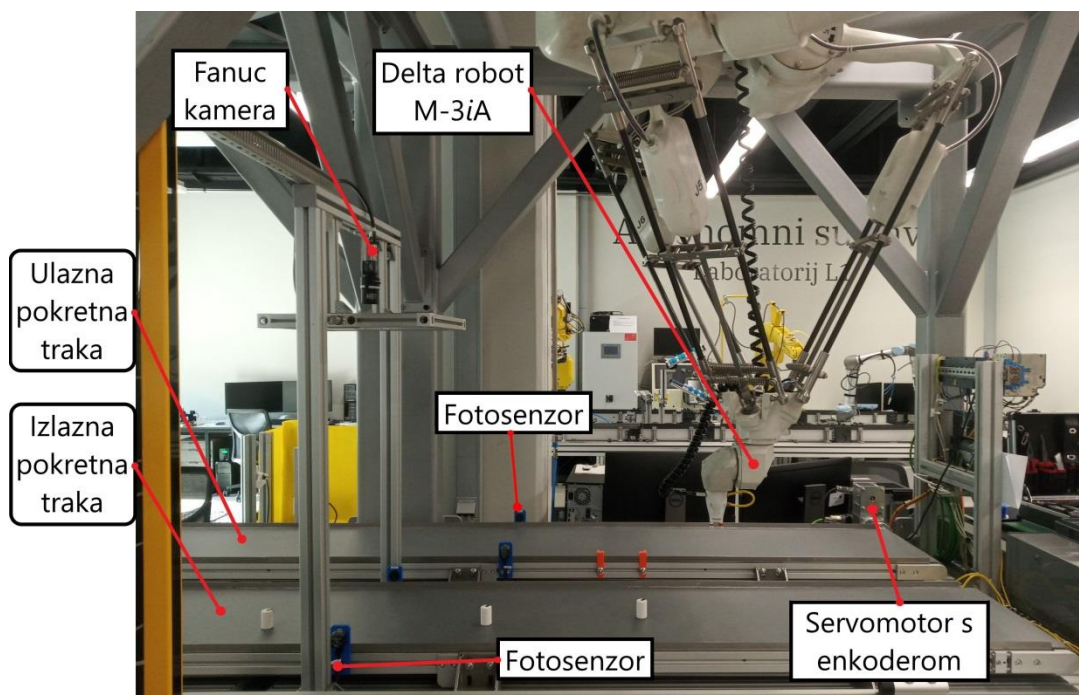


Slika 1. Shematski prikaz tehničkog rješenja

Na slikama 2 i 3 prikazani su položaji robota u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i.



Slika 2. Prikaz pozicija SCARA robota SR-6iA i delta robota DR-3iB



Slika 3. Prikaz pozicije delta robota M-3iA

Sustav je, ovisno o tipu robota i opciji za kontrolu, podijeljen na tri pozicije:

- Pozicija 1:

Na prvoj poziciji nalazi se SCARA robot SR-6iA, koji se kontrolira s pomoću opcije *Machine Vision*. Ključni zadatak robota je napuniti sustav predmeta rada, na temelju podataka dobivenih analizom digitalne slike, a prebacivanjem objekta s horizontalne ravnine na ulaznu pokretnu traku.

- Pozicija 2:

Na sljedećoj poziciji *pick and place* zadatak obavlja Fanuc delta robot M-3iA, koji se koristi opcijom *Line tracking* za definiranje putanje pri hvatanju predmeta rada s jedne pokretne trake te odlaganja na drugu. Na drugu pokretnu traku, robot odlaže objekte na nasumično odabranu poziciju po širini trake i rotaciji objekta oko njegove osi.

- Pozicija 3:

U posljednjem koraku, delta robot DR-3iB uz pomoć opcije *Vision Line Tracking* pronalazi poziciju i rotaciju objekta na traci, te ga hvata u pokretu i prenosi na ulaznu pokretnu traku.

Nakon što SCARA robot SR-6iA napuni sustav svim objektima koji se nalaze na horizontalnoj ravnini, tada dva delta robota izvršavaju kontinuirani *pick and place* zadatak – prebacivanje predmeta rada s jedne trake na drugu. U nastavku ovog poglavlja mogu se pročitati opisi navedenih softverskih opcija kojima se koriste roboti pri detektiranju objekata na pokretnoj traci.

1.1. Strojni vid

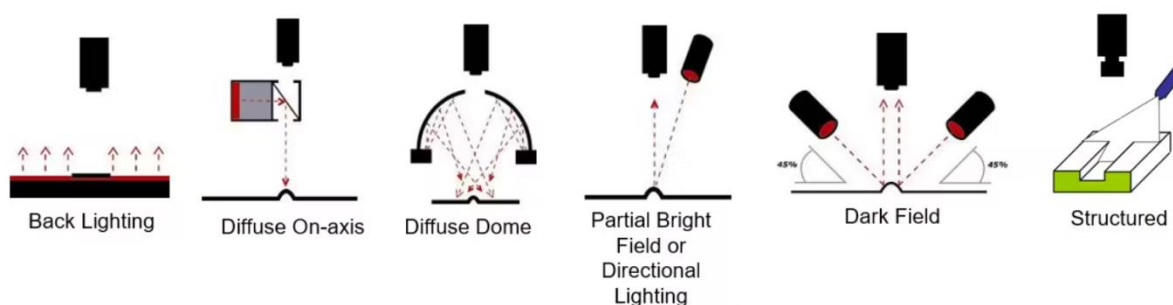
Strojni vid (*Machine Vision*) je tehnologija za pronalaženje objekta na zadanom području i izvršavanje radnji definiranih na temelju podataka dobivenih analizom digitalne slike.

Zadaci strojnog vida su: razotkrivanje objekta, prepoznavanje definiranih karakteristika ili svojstava objekta te izvlačenje i prosljeđivanje podatka iz obrađene slike. Podaci koje prosljeđuje sustav strojnog vida mogu biti strukturirani kao jednostavni signali „da/ne“ ili kao složen skup podataka o traženim značajkama objekta – kao što su dimenzije objekta, orijentacija ili udaljenost. Kod sustava strojnog vida ključno je da okruženje bude kontrolirano, bez promjene definiranih svojstava sustava.

Sustav strojnog vida obično se sastoji od sljedećih pet komponenti:

1) *Machine Vision* rasvjete

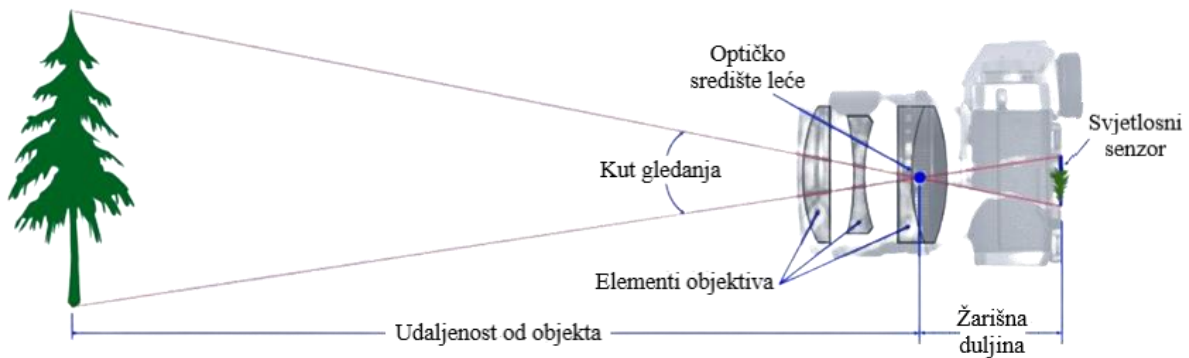
Rasvjeta je zadužena za osvjetljavanje objekata i isticanje njihovih posebnih značajki koje kamera treba vidjeti. Ovisno o značajkama objekta koje se žele naglasiti, postoje razni oblici, vrste i položaji montaže izvora rasvjete; kao što se može vidjeti na slici 4. Rasvjeta je jedna od najkritičnijih sastavnica sustava strojnog vida. Ako se pri planiranju sastavnica sustava odabere pogrešan tip rasvjete, može doći do toga da kamera ne može vidjeti željene značajke objekta.



Slika 4. Primjeri *Machine Vision* rasvjete [1]

2) Objektiv

Objektiv je dio optičke naprave koji je zadužen za prikupljanje svjetla s promatranog predmeta u tijelo fotoaparata na njegov svjetlosni senzor, što se može vidjeti na slici 5.



Slika 5. Uloga objektivna u sustavu *Machine Vision* [2]

Leće karakteriziraju sljedeća svojstva, koja opisuju kvalitetu slike koju mogu snimiti:

- Vidno polje – područje koje vidi svjetlosni senzor. Što je žarišna duljina leće veća, to je vidno polje manje.
- Dubina polja – sposobnost zadržavanja fokusa pri pomicanju objekta od ravnine najboljeg fokusa.
- Dubina fokusa – kvaliteta fokusa pri pomicanju svjetlosnog senzora dok je objekt na istom položaju.
- Otvor blende – kontrola količine svjetlosti koja prolazi i ulazi u kameru. Ostvaruje se zatvaranjem i otvaranjem otvora leće.

3) Senzora slike

Senzor slike je senzor koji se nalazi unutar kamere i služi za pretvaranje fotona u električne signale koji se mogu pohraniti i analizirati. Izlaz senzora slike je digitalna slika sastavljena od piksela, koja pokazuje prisutnost svjetla u područjima koja je objektiv promatrao.

Ovisno o tehnologiji pretvaranja svjetlosti u električne signale, senzori slike dijele se na:

- CCD senzore – senzori sa spregnutim nabojem (slika 6 - lijevo)
- CMOS senzore – senzori aktivnog piksela (slika 6 - desno).



Slika 6. Prikaz CCD (lijevo) senzora slike [3] i CMOS (desno) senzora slike [4]

4) Jedinice za obradu vida

Jedinica za obradu vida sustav je koji se koristi algoritmima za obradu slike da bi se na njoj istaknule potrebne značajke. Prvi korak je prijenos digitalne slike sa senzora na računalo, nakon čega započinje analiza slike, lociranje specifičnih značajki i usporedba s definiranim i zadanim specifikacijama i kriterijima. Nakon obrade digitalne slike donosi se odluka, te se ispisuju rezultati o traženim značajkama. Jedan od sustava za obradu digitalne slike je i sustav Fanuc *iRVision*, koji je upotrijebljen u ovom projektu, a detaljnije je opisan u nastavku.

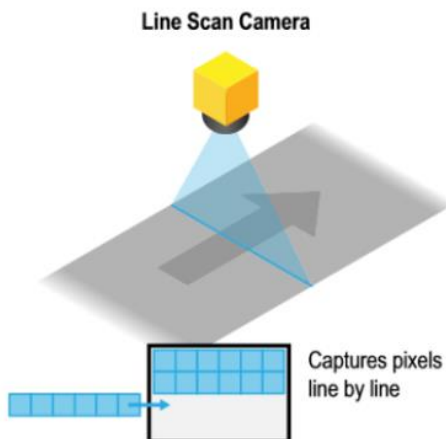
5) Komunikacijskog sustava

Komunikacijski sustav prosljeđuje informacije i odluke koje je donijela jedinica za vizualnu obradu prema određenim strojnim elementima, u ovom slučaju kontroleru robota. Na temelju podataka donesenih sustavom za obradu digitalne slike, strojni elementi primaju signal te interveniraju i kontroliraju proces. Ovaj proces ostvaruje se primjenom ulazno-izlaznih signala ili izmjenom podataka putem serijske veze ili Etherneta.

Ovisno o načinu snimanja slike, *Machine Vision* kamere dijele se na tri osnovne grupe:

1) Kamere s linijskim skeniranjem

Ovaj tip kamera specifičan je po tome što snima digitalne slike red po red. To znači da je za stvaranje potpune slike objekta potrebno naknadno softverski obraditi redove piksela i spojiti ih u jednu sliku. U ovom slučaju, da bi se omogućilo snimanje red po red, nužno je da se tijekom procesa pregleda kreću ili objekt ili kamera .

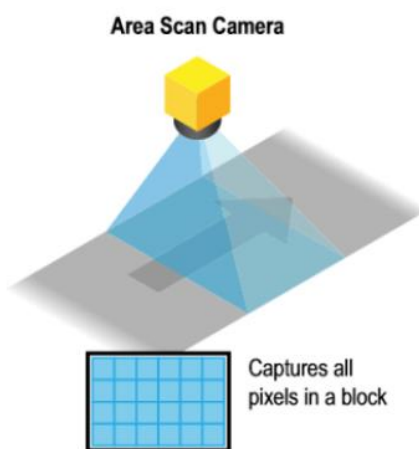


Slika 7. Prikaz rada kamere za linijski pregled [5]

Kamere za linijski pregled idealan su izbor u transportnim sustavima velike brzine ili kontinuiranim procesima, jer mogu pregledavati više objekata u jednom redu. Prikladni su za kontinuirane mreže materijala poput papira, metala i tekstila, velikih dijelova i cilindara.

2) Kamere za skeniranje područja

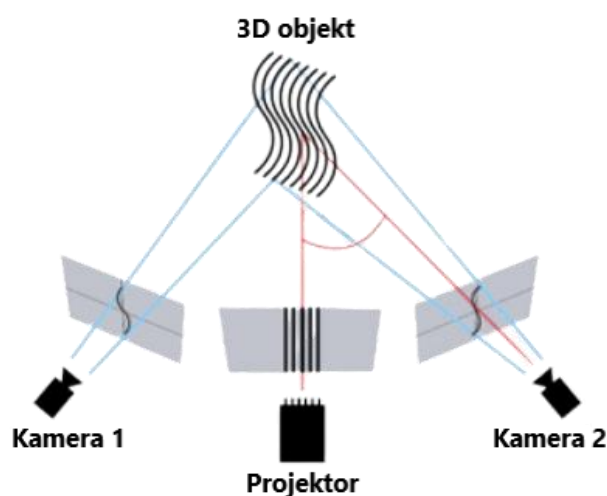
Kamere za skeniranje područja koriste se sensorima pravokutnog oblika, tako da se pri snimanju iz samo jednog kadra dobije cjelovita slika. Visinu i širinu digitalne slike ovisni o broja piksela u horizontalnom i vertikalnom smjeru na senzoru. Uspoređujući ovaj tip kamere s kamerama za linijsko skeniranje, očita je prednost ta što objekt ne mora biti u pokretu. Da bi se omogućio pregled, objekti se mogu na trenutak zaustaviti ispred kamere za skeniranje područja.



Slika 8. Prikaz rada kamere za skeniranje područja [5]

3) Kamere za 3D skeniranje

Kamera za 3D skeniranje je senzor koji obavlja inspekciju objekata u svim trima ravninama, izračunavajući položaj i orijentaciju objekta u prostoru. Proces 3D skeniranja može se opisati kao beskontaktna i nedestruktivna tehnologija za snimanja točne veličine i oblika fizičkog objekta da bi se izradio visoko precizni 3D model objekta. Za proces 3D skeniranja primjenjuje se jedna ili više kamere te laserski senzor pomaka.



Slika 9. Prikaz rada kamere za 3D skeniranje [6]

Kod postavke s jednom kamerom, kamera se mora pomicati tijekom procesa skeniranja da bi se generirala karta visina točaka objekta. Finalni trodimenzionalni model skeniranog objekta dobiva se softverskom obradom podataka postignutih 3D skeniranjem.

1.2. Linijsko praćenje pokretne trake

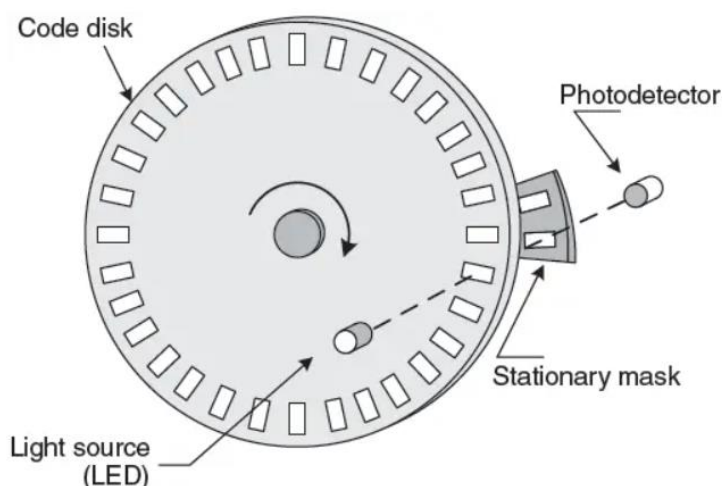
Linijsko praćenje pokretne trake (*Line Tracking*) proces je sinkronizacije putanje središnje točke alata robota i položaja objekta na pokretnoj traci. To znači da robot mora pratiti i manipulirati predmetom rada koji se nalazi na pokretnoj traci. Ovakvim sustavom postiže se značajna ušteda vremena proizvodnje jer omogućuje da se radni komad nastavi kretati bez zahtijevanja za zaustavljanjem pokretne trake, uklanjanjem predmeta s trake ili postavljanjem predmeta na stacionarno mjesto. Najčešći zadatak procesa je praćenje, te hvatanje objekta s pokretne trake bez zaustavljanja, nakon čega slijedi prebacivanje objekta na drugu pokretnu

traku ili na paletu za sortiranje. Ovakvi se zadaci izvode s velikom točnošću, neovisno o brzini pokretne trake, uključujući zaustavljanje i kretanje unazad. Položaj objekta na pokretnoj traci registrira se s pomoću senzora za pronalaženje objekta i enkodera ugrađenog na pogonsku jedinicu transportne trake.

U sustavu praćenja pokretne trake upotrebljavaju se dvije vrste enkodera:

a) Inkrementalni enkoder

Inkrementalni enkoder je senzor koji pretvara rotacijski pomak u impulsne signale. Glavne komponente ove vrste enkodera su: rotirajući disk s uzorkom prozirnih i neprozirnih sektora, izvor svjetlosti i fotodetektor. Shematski prikaz inkrementalnog senzora može se vidjeti na slici 10.

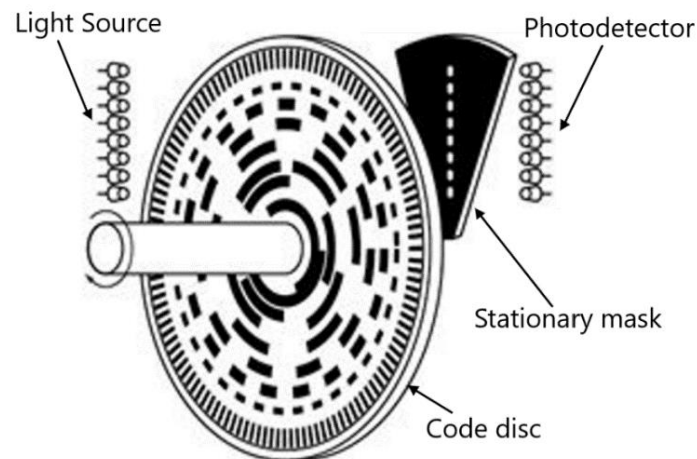


Slika 10. Shematski prikaz rada inkrementalnog enkodera [7]

Disk je montiran na rotirajuću osovinu, koja je povezana s osovinom motora. Pri okretanju diska, uzorci na njemu prekidaju svjetlosni snop, koji pada na fotodetektor, čime se generiraju signali ovisno o frekvenciji pomaka motora. Rezolucija inkrementalnog enkodera definirana je brojem impulsa koji se generiraju jednim okretajem diska.

b) Apsolutni enkoder

Za razliku od inkrementalnih enkodera, koji daju broj impulsa po okretaju, signal apsolutnog enkodera daje podatak o točnom položaju osovine, slika 11. Skeniranjem položaja kodiranog diska, pri čemu svi položaji odgovaraju određenom kôdu, može se odrediti točan položaj osovine.

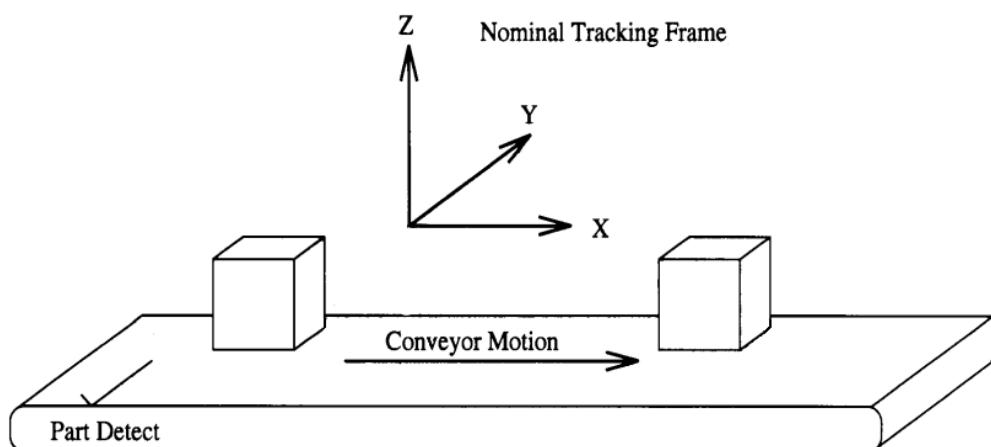


Slika 11. Shematski prikaz rada apsolutnog enkodera [8]

Uz to, sustav praćenja pokretne trake može se implementirati na:

a) Linearne pokretne trake

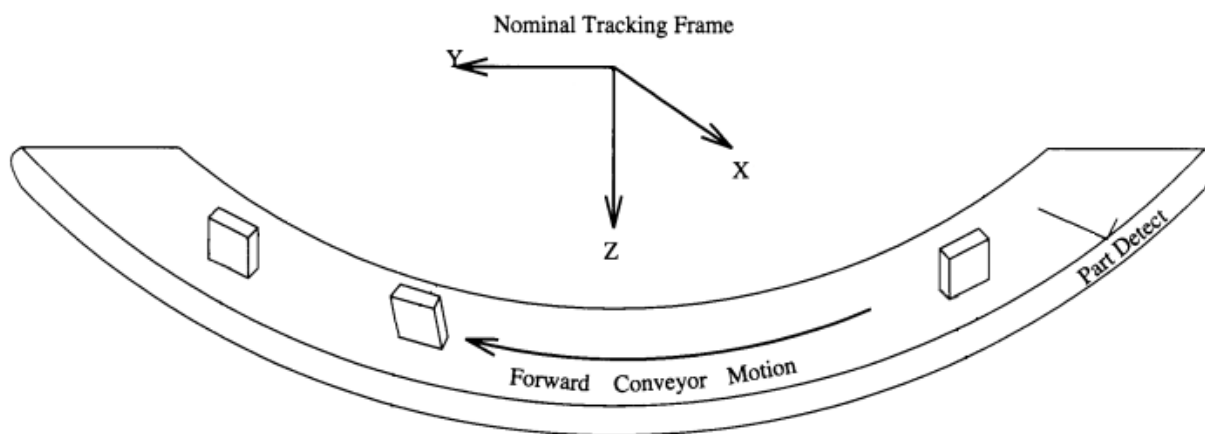
Praćenje linije sastoji se od robota i linearne pokretne trake koja pomiče dijelove pored robota. Robot se obično postavlja na stacionarno postolje pokraj transportera, gdje može lako dosegnuti dijelove dok se kreću kraj njega. Robot se također može montirati iznad ili ispod transportera, ili na tračnicu ili drugu integriranu produženu os, ovisno o potrebama primjene.



Slika 12. Linijsko praćenje objekata [9]

b) Kružne pokretne trake

Kružno praćenje sastoji se od kružne pokretne trake ili rotacijskog stola koji pomiče dijelove pored robota. Ova funkcija robotu omogućuje praćenje objekta na lučnoj stazi, postizujući rad bez zaustavljanja rotacijskog stola. Robot se može nalaziti unutar ili izvan kruga pokretne trake. Robot se također može montirati iznad ili ispod transportera.



Slika 13. Kružno praćenje objekata [9]

Treba obratiti pozornost na dvije opisane implementacije praćenja objekta u pokretu, jer se u konfiguraciji programa za praćenje zahtijeva odabir vrste pokretne trake, što je prikazano u potpoglavlju konfiguracije opcije *Line Tracking* za robota M-3iA.

1.3. Vizualno praćenje objekta

Robotsko vizualno praćenje objekta (*Visual Line Tracking*) zadatak je u kojem robot, koristeći se podacima prikupljenima iz vizijskog sustava, hvata objekt u pokretu te ga odlaže na drugu pokretnu traku, kutiju ili paletu za sortiranje. Prednost ovakvog sustava nasuprot klasičnom *Line Tracking* sustavu je u tome što robot može hvatati objekte koji imaju specifične karakteristike, propuštati neželjene objekte te ih hvatati nasumično postavljene na pokretnoj traci. Za razliku od klasičnog senzora za detekciju prisutnosti, ultrazvučnog senzora ili fotoelektričnog senzora, senzori za vid pružaju više informacija o karakteristikama i položaju objekta na pokretnoj traci.

Softversko rješenje vizijskog praćenja objekta u pokretu sastoji se od opcija za praćenje linije i vizijske detekcije, koja obavlja zadatke prepoznavanja objekata i izdvajanja informacija o njegovom položaju i orijentaciji.

Osnovni zadaci funkcioniranja vizijskog praćenja robota su:

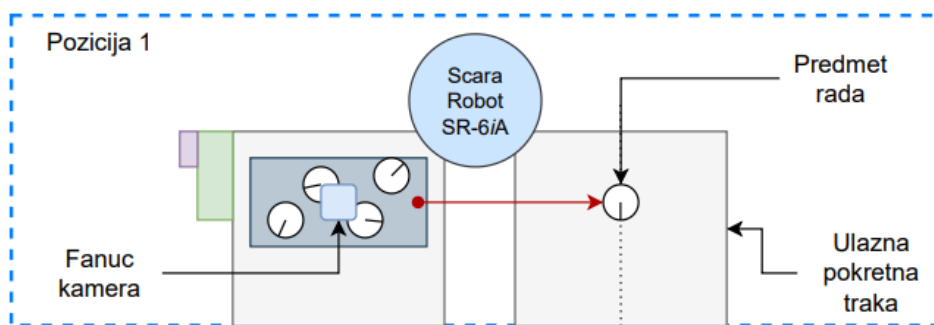
1. kamera koja se nalazi uzvodno od robota snima sliku neisprekidano ili na signal okidanja
2. kada objekt dođe u vidno područje kamere, tada ga ona snima i prenosi podatke softveru za obradu slike
3. softversko rješenje čini mrežu pokretne trake, locira objekte, dijeli ih po zadanim karakteristikama i izračunava položaj objekta i njegovu orijentaciju
4. lokacija svakog objekta prenosi se na robota kao skup koordinata
5. kada objekt dođe u područje rada robota, tada robot započinje zadatak hvatanja objekta u pokretu
6. objekt se zatim stavlja u kutiju, odlaže na drugu transportnu traku ili se upotrebljava kao dio procesa sastavljanja.

2. UPRAVLJANJE SCARA ROBOTOM SR-3iA UPORABOM OPCIJE STROJNOG VIDA

U ovom će poglavlju biti opisana prva pozicija sustava za manipulaciju dijelova u pokretu. U nastavku se mogu pronaći objašnjenja konfiguracija pojedinih komponenti prve faze sustava.

2.1. Opis pozicije

U uvodnom poglavlju ovog rada ukratko je opisana funkcija pozicije sa SCARA robotom SR-6iA. Na temelju slike 14, koja prikazuje glavne komponente prve pozicije, u nastavku je detaljnije opisan rad SCARA robota te funkcija cijelog sustava unutar ove pozicije.

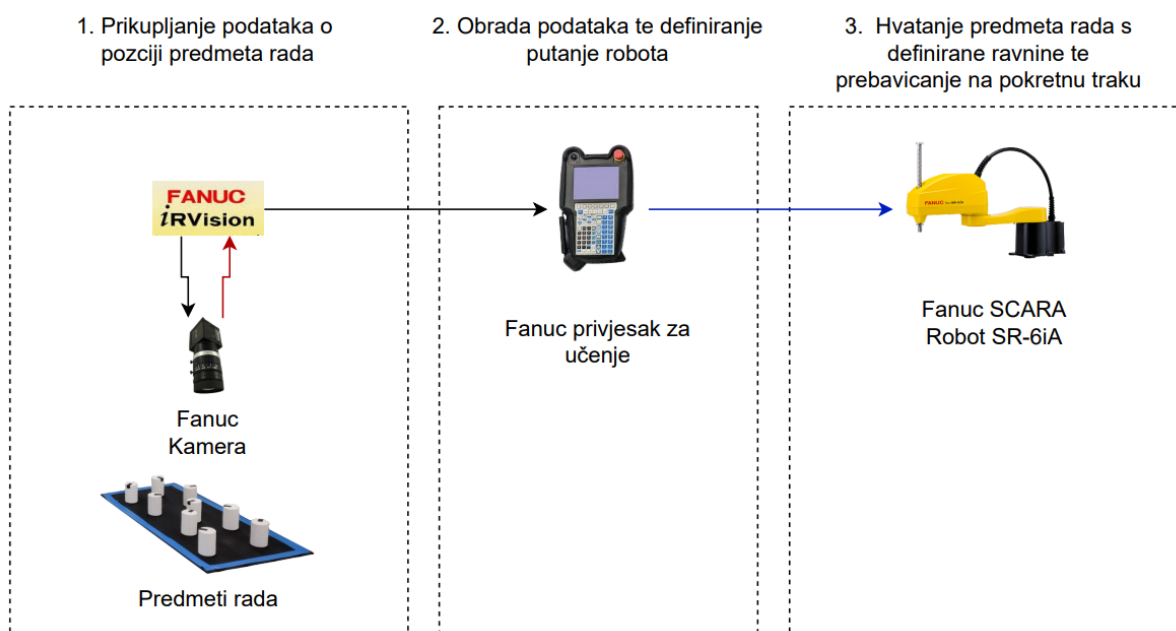


Slika 14. Shematski prikaz prve pozicije

Kao što je prikazano na slici 15, tri ključne komponente prve pozicije su SCARA robot, Fanuc kamera i pokretna traka. Glavna funkcija SCARA robota je, koristeći se podacima iz vizijskog sustava, dohvatiti predmet rada i prenijeti ga na ulaznu pokretnu traku.

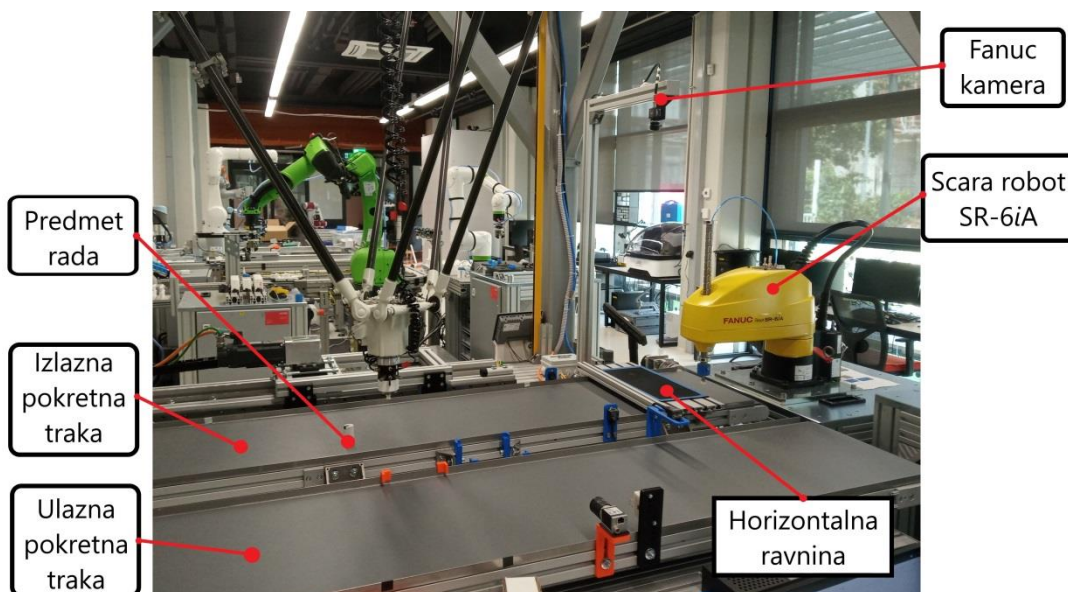
Koristeći se *iRVision* opcijom, Fanuc kamera detektira predmete rada koji se nalaze slobodno raspoređeni na fiksno definiranoj ravnini, te puni bazu podataka robota koordinatama pojedinog objekta. Robotski program obrađuje prikupljene podatke i određuje položaje u koje robot treba doći. U trenutku postizanja zadane pozicije šalje se signal za aktivaciju pneumatskih ventila, čime se omogućuje hvatanje detektiranog objekta s ravnine. U posljednjem koraku, robot se pomiče na definirani položaj za odlaganje objekta te ga, brzinom jednakom brzini pokretne trake, postavlja na traku u pokretu. Nakon toga, kamera pronalazi sljedeći objekt, te se cijeli proces ponavlja sve dok se svi objekti sa zadane ravnine ne prebace na pokretnu traku, odnosno sve dok kamera ne prestane puniti bazu podataka

koordinatama predmeta rada postavljenih na ravninu. Slikoviti prikaz transfera signala tijekom prve faze, može se vidjeti na slici 15.



Slika 15. Transfer ključnih signala na prvoj poziciji

Na sljedećoj slici mogu se vidjeti komponente prve pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i.



Slika 16. Prikaz prve pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave

2.2. Popis sastavnica

U ovom će potpoglavlju biti opisane sve ključne sastavnice prve pozicije sustava za manipulaciju predmetima rada u pokretu.

2.2.1. *Fanuc SCARA robot SR-6iA*

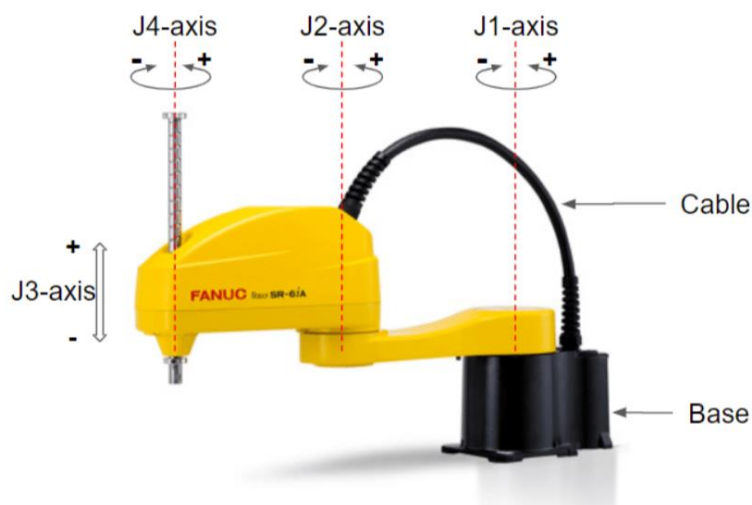
SCARA robot ima prepoznatljivu strukturu konfiguracije, kojom oponaša rad ljudske ruke u jednoj ravnini. Kao što se može vidjeti na slici 17, mehanizam SCARA robota sastoji se od baze, prvog linka (nadraktice) i drugog linka (podlaktice), a linkovi se pokreću kontrolom četiriju servo osi. Prva os pomiče prvi link (podlakticu), koji se okreće u podnožju. Druga os pomiče drugi link (nadrakticu), a na kraju drugog linka nalazi se vreteno za montažu radnog alata, koje se može pomicati gore – dolje s trećom servo osi i rotirati s četvrtom osi. Ovakvom konfiguracijom omogućeno je gibanje alata u trodimenzionalnom Kartezijevom prostoru; X, Y, Z, dok je s četvrtim stupnjem slobode rotacija oko vertikalne Z-osi.

Mehanička konfiguracija SCARA robota ključno je svojstvo koje definira prednosti i mane ove vrste robota. Da bi se tijekom procesa projektiranja i planiranja automatizacije proizvodne linije odredio optimalan tip robota za određene zadatke, nužno je razumjeti prednosti i ograničenja pojedine vrste robota. Zbog svoje mehaničke krutosti, SCARA roboti prepoznatljivi su po svojoj:

- brzini
- preciznosti
- kompaktnosti.

Naravno, SCARA roboti imaju svoja ograničenja. Ne smatraju se robotima opće uporabe, koji se mogu rabiti u većini aplikacija. Ova ograničenja uključuju:

- mali raspon pokreta
- malu nosivost
- selektivnu usklađenost.



Slika 17. FANUC SCARA robot SR-6iA [10]

Prema navedenim karakteristikama, SCARA robot je izvrsno rješenje za opće brze aplikacije *pick and place*, te isplativ izbor pri obavljanju istog zadatka u horizontalnoj ravnini. SCARA roboti mogu vrlo lako rukovati višestrukim operacijama odabiranja i postavljanja na svim stranama kompaktne radne stanice, uz dodatnu fleksibilnost za buduće promjene. Ovakav tip robota obavlja pomicanje od 180 stupnjeva od jedne do druge krajnje pozicije. Ne samo da robot nudi kompaktan radni prostor, nego za razliku od fiksne automatizacije, nudi i fleksibilnost za opsluživanje više stanica za odabir i postavljanje u svom radnom području s ekstremnom preciznošću, preciznošću brzine i fleksibilnošću.

2.2.2. FANUC kamera SC130EF2

Kamera upotrijebljena za pronalaženje predmeta rada s pomoću opcije iRVision, uz leću žarišne duljine 12 mm, industrijska je kamera, FANUC SC130EF2, proizvođača Kowa; a prikazana je na slici 18.



Slika 18. FANUC kamera SC130EF2

U sljedećoj tablici mogu se pronaći osnovne karakteristike navedene kamere.

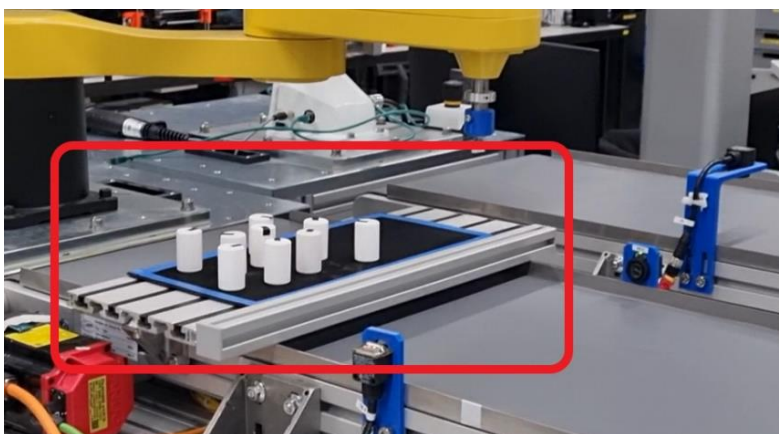
Tablica 1. Specifikacije Fanuc kamere

| Specifikacije Fanuc kamere SC130EF2 | |
|-------------------------------------|---------------------|
| Vrsta senzora | CCD |
| Veličina senzora | 6.784 mm x 5.427 mm |
| Rezolucija | 1280 x 1024 |
| Veličina piksela | 5.300 μ m |
| Mono/Boja | Monokromatska |

2.3. Instaliranje i integracija sastavnica

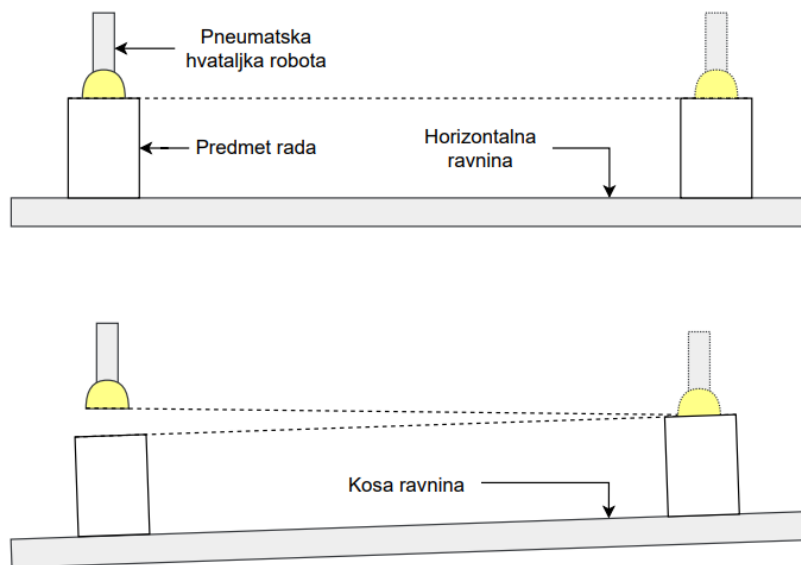
Da bi sve komponente prve pozicije sinkronizirano i uspješno funkcionirale, potrebno ih je ispravno konfigurirati i međusobno uskladiti.

Prije svega, potrebno je postaviti horizontalnu ravninu unutar dohvata SCARA robota. Pri pokretanju sustava, na horizontalnu se ravninu postavljaju predmeti rada u proizvoljnom rasporedu i rotaciji oko osi Z, kao što se može vidjeti na slici 19.



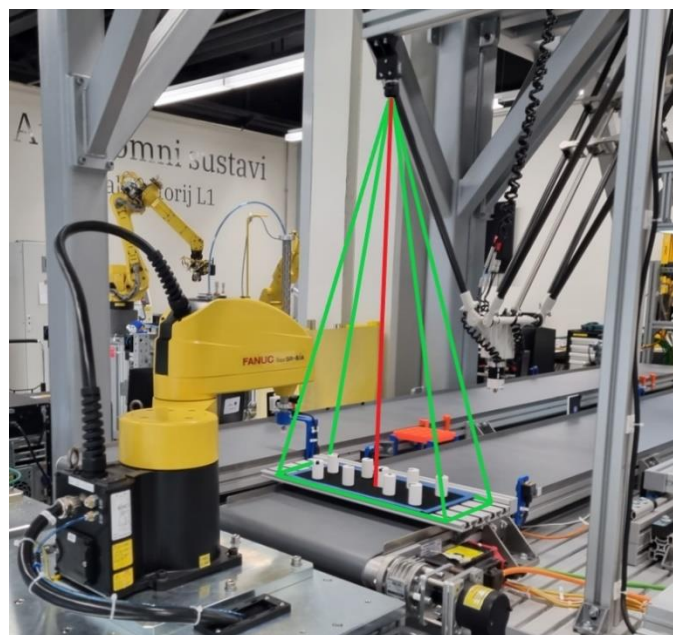
Slika 19. Prikaz horizontalne ravnine

Nužno je postaviti ravninu tako da bude horizontalna sa XY ravninom robota da ne bi došlo do pogrešaka pri hvatanju predmeta rada pneumatskom hvataljkom robota. Ono što se može dogoditi ako je ravnina pod kosinom i nije horizontalna s ravninom robota, može se vidjeti na sljedećoj slici.



Slika 20. Neuspješno hvatanje predmeta rada na kosoj ravnini

Nakon toga, Fanuc kamera postavljena je tako da je centar vidnog polja kamere usmjeren u centar horizontalne ravnine, što je prikazano na slici 21. Uz to, ključno je to da vidno polje kamere pokriva cijelu označenu površinu horizontalne ravnine da bi se svi postavljeni predmeti rada unutar označenih granica mogli očitati s pomoću kamere.

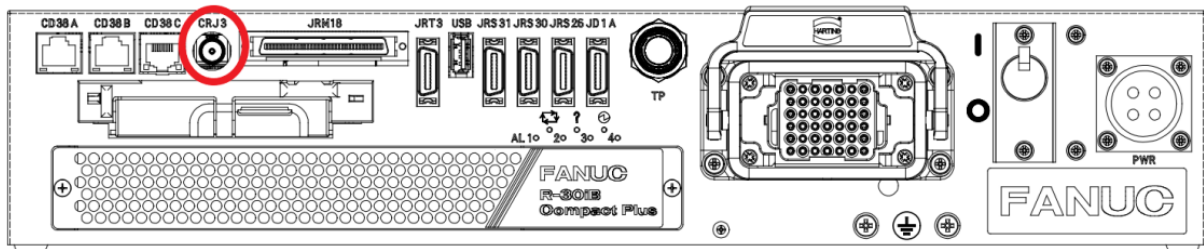


Slika 21. Položaj Fanuc kamere SC130EF2 u prvoj fazi sustava

Fanuc kamera spojena je u ulaz CBJ3 kontrolera SCARA robota R-30iB Compact Plus, slika 23, s pomoću prikladnog industrijskog kabela za kameru, slika 22.



Slika 22. Industrijski kabel za Fanuc kameru SC130EF2 [11]



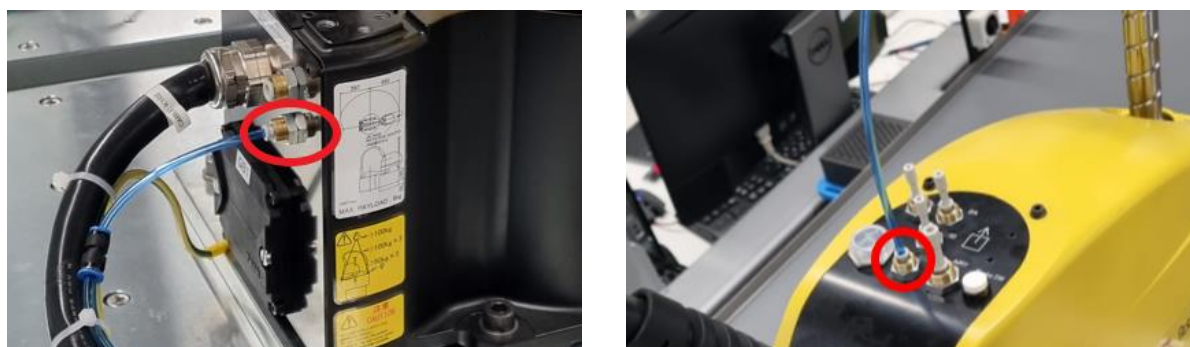
Slika 23. R-30iB Compact Plus kontroler [9]

SCARA robot SR-6iA već ima ugrađene sve potrebne sastavnice za kontrolu pneumatskih hvataljki: ulazne konektore, ventile i izlazne konektore.

Da bi SCARA robot mogao hvatati predmete rada s pomoću vakuumske hvataljke, bilo je potrebno spojiti dotok zraka na priključni konektor koji se nalazi na samom robotu – ulaz za pneumatiku AIR 2, slika 25 – lijevo. Unutar SCARA robota nalaze se ventili koji kontroliraju protok zraka na izlazne priključne konektore za pneumatiku, slika 25 – desno, a aktiviraju se s pomoću RO robotskih izlaza.



Slika 24. Prikaz spajanja pneumatike na Fanuc robota SR-6iA



Slika 25. Prikaz spajanja ulaza i izlaza pneumatike

Za ostvarenje vakuuma upotrijebljen je generator vakuuma serije ZU, proizvođača SMC, prikazan na slici 26. Prema uputama proizvođača, dotok zraka priključen je na jedan kraj, dok je vakuum ostvaren na drugom kraju generatora, koji je spojen s pneumatskom hvataljkom robota. Prednost ovakvog rješenja je u tome što su generatori vakuuma ove serije

jednostavniji za uporabu, te su manji i lakši od klasičnih glomaznih vakuum vodova. Uz to, ima ugrađen ispušni prigušivač, koji buku generatora svodi na minimum.

Tehnička specifikacija o generatoru vakuuma serije ZU može se pronaći u prilogu rada.



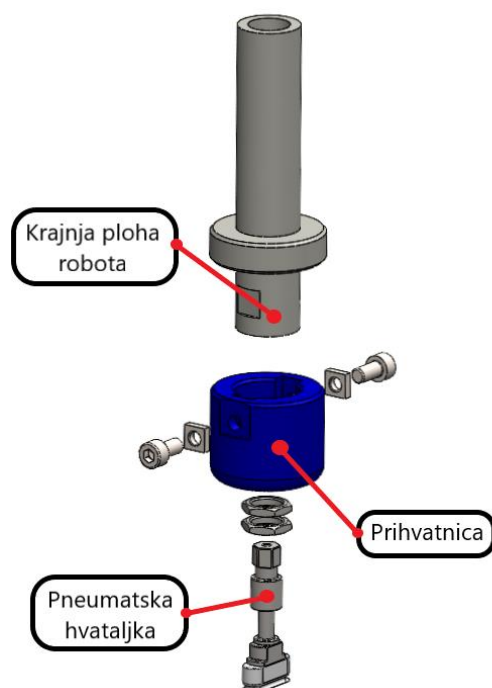
Slika 26. Generator vakuuma serije ZU [12]

Da bi SCARA robot uspješno hvatao predmete rada s pomoću vakuumske hvataljke, preostaje još samo prihvatnica, koja bi povezala pneumatsku hvataljku s krajnjom plohom za montažu radnog alata vretena treće osi. Na slici 27 može se vidjeti prihvatnica koja je modelirana unutar softverskog paketa *SolidWorks* i izrađena s pomoću 3D printera *Prusa*.



Slika 27. CAD model prihvatnice vakuumske hvataljke

Na sljedećoj slici prikazani su 3D modeli sastavnica radnog alata SCARA robota SR-6iA.



Slika 28. Sastavnice radnog alata SCARA robota SR-6iA

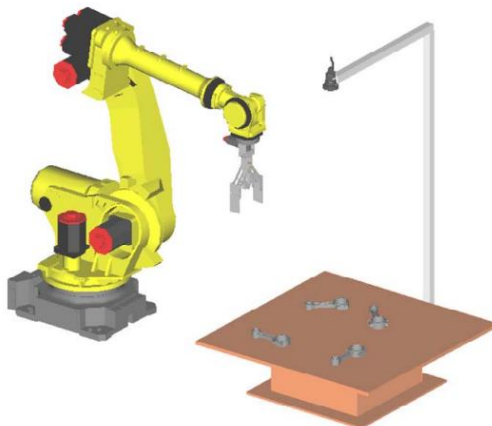
2.4. Konfiguracija opcije strojnog vida

U nastavku je prikazan proces konfiguracije vizualnog sustava s fiksnom kamerom i identifikacija položaja predmeta rada. Detaljno su razmotreni: opis konfiguracije kamere, definiranje TCP točke robota, definicija scene robota i postupak kalibracije kamere. Zatim je opisan proces učenja kalibracijskog uzorka i definicije referentnog položaja.

Za detekciju predmeta rada upotrijebljena je *iRVision* softverska opcija, sustav vizualne detekcije *plug-and-play* tvrtke Fanuc. Cilj ovoga sustava je omogućiti brzu instalaciju, jednostavnu uporabu i fleksibilnost. U potpunosti je integriran u robota, tako da ne zahtijeva nikakav dodatni hardver za konfiguraciju i rad, niti bilo kakvo sučelje prema vanjskim uređajima. Konfiguracija procesa vida može se izvršiti izravno – na samom kontroleru robota ili putem preglednika *Internet Explorer*.

Kao što je spomenuto i prikazano u prijašnjem potpoglavlju, kamera je montirana na fiksni stalak. U ovoj metodi kamera uvijek ima područje gledanja s iste udaljenost. Prednost fiksne kamere je ta što se vrijeme ciklusa rada robota može smanjiti, jer sustav *iRVision* prihvaća i

obrađuje sliku dok robot obavlja drugi zadatak. Na slici 29 prikazana je konfiguracija fiksne kamere.

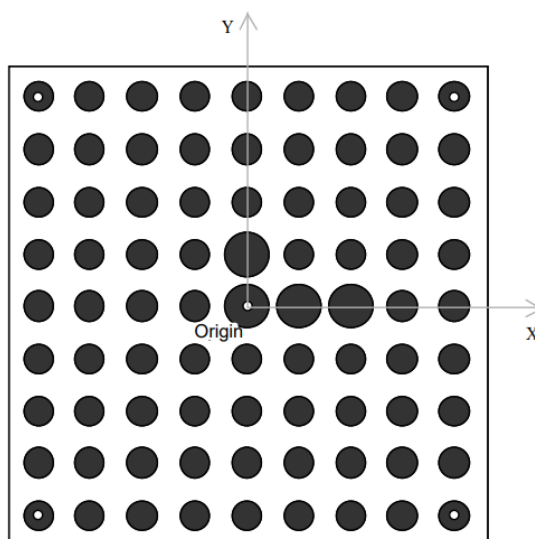


Slika 29. Prikaz konfiguracije fiksne kamere [9]

Unutar softverske opcije *iRVision* rabljen je sustav *2D vision*, koji određuje položaj objekta u obliku X i Y-koordinata, kao i orijentaciju oko Z-osi (definirana kao R-parametar).

Prije izrade programa za prepoznavanje objekta, u početnom prozoru opcije *iRVision* potrebno je definirati kameru koja se upotrebljava i provesti proces kalibracije kamere.

Za kalibraciju kamere upotrijebljena je kalibracijska mreža s definiranim uzorkom, koja se može vidjeti na slici 30.

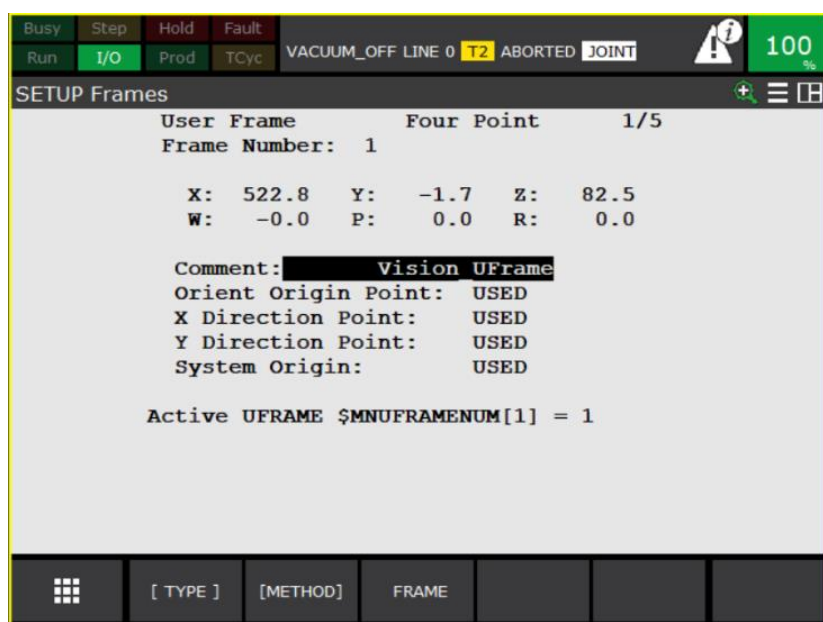


Slika 30. Kalibracijska mreža [9]

Sve crne točke kalibracijske mreže raspoređene su u kvadratnu rešetku. Četiri velike crne točke blizu središta označavaju ishodište i smjer okvira, kao što je prikazano na slici. U središnjoj crnoj točki kalibracijske mreže, kao i na četiri ugla, nalazi se bijela točka promjera 1 mm, koja se upotrebljava pri definiranju *User Frame* robota.

Kalibracijska je mreža postavljena tako da bude izravno ispod kamere i pričvršćena na definirano mjesto da bi se izbjegla neusklađenost ako bi se mreža pomaknula.

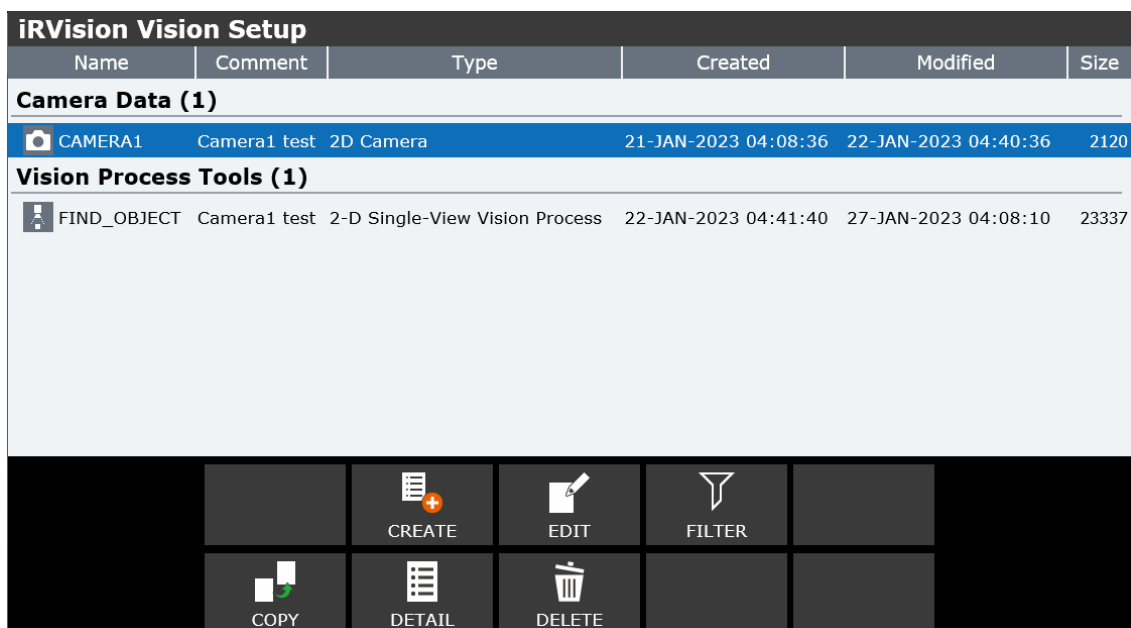
Početni korak pri kalibraciji je definiranje *User Frame* robota, koji se upotrebljava za opciju *2D iRvision*. Za određivanje koordinata *User Framea* primijenila se metoda četiriju točaka, a na sljedećoj se slici mogu vidjeti dobivene vrijednosti definiranog *User Framea*.



Slika 31. Definirani *User Frame* za *iRvision*

Za otvaranje *iRvision* zaslona unutar kojeg se izrađuje program za prepoznavanje objekta, na privjesku za učenje potrebno je odabrati *Vision Setup* unutar postavke *iRvision*.

Prije izrade vizijskog programa za prepoznavanje objekata, nužno je stvoriti podatke 2D kamere koja se upotrebljava za snimanje objekta. Kao što se može vidjeti na sljedećoj slici, načinjeni su podaci kamere, naziva CAMERA1.

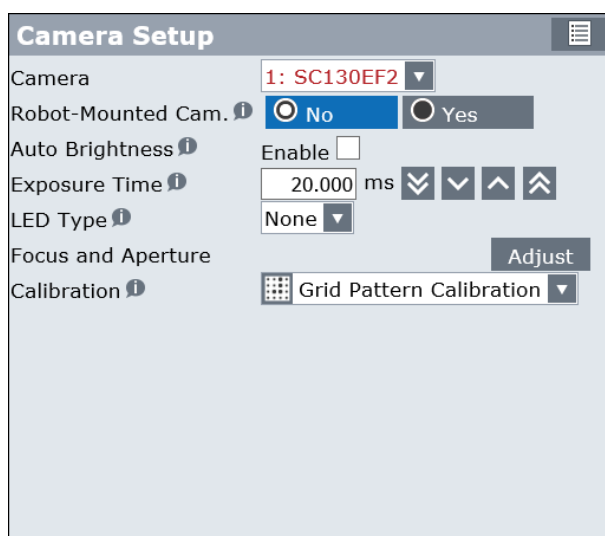


| iRVision Vision Setup | | | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|-------|
| Name | Comment | Type | Created | Modified | Size |
| Camera Data (1) | | | | | |
| CAMERA1 | Camera1 test | 2D Camera | 21-JAN-2023 04:08:36 | 22-JAN-2023 04:40:36 | 2120 |
| Vision Process Tools (1) | | | | | |
| FIND_OBJECT | Camera1 test | 2-D Single-View Vision Process | 22-JAN-2023 04:41:40 | 27-JAN-2023 04:08:10 | 23337 |

Toolbar icons: CREATE, EDIT, FILTER, COPY, DETAIL, DELETE

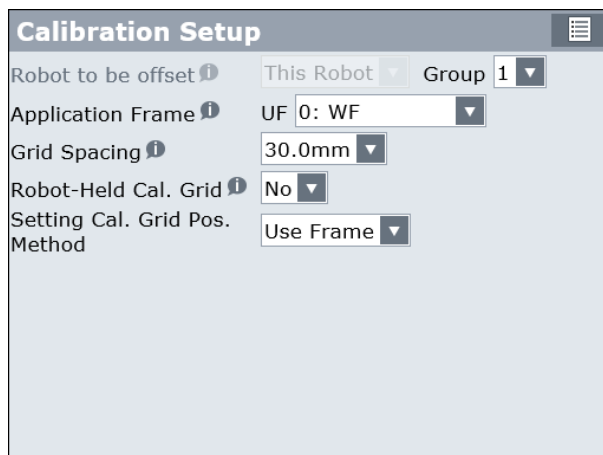
Slika 32. Početni *iRVision* prozor - robot SR-6iA

Na slici 33 može se vidjeti da je odabrana kamera SC130EF2. Za način postavljanja kamere odabrano je da kamera bude fiksna, odnosno da ne bude montirana na robota, te je odabrana kalibracija s pomoću kalibracijske mreže. Čim se odabere kamera koja će se upotrebljavati, na pomoćnom zaslonu pojavljuje se slika koju vidi kamera. Tijekom ovog koraka, kameru je potrebno fokusirati tako da rubovi, crni krugovi na slici, budu što oštrij.



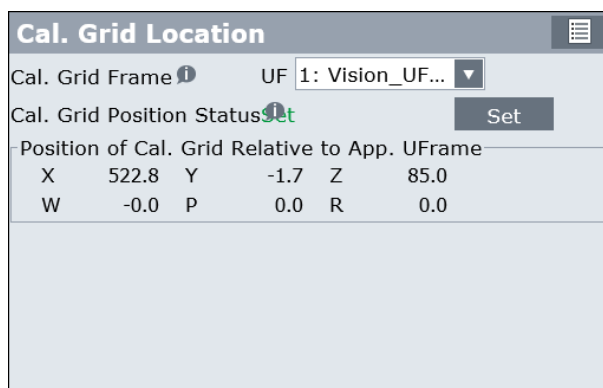
Slika 33. Prozor za odabir kamere - robot SR-6iA

Ovisno o razmaku između centara crnih točaka na kalibracijskoj mreži, mreže se razlikuju po veličini. Na sljedećem zaslonu procesa kalibracije potrebno je odrediti koja se veličina kalibracijske mreže upotrebljava, slika 34.



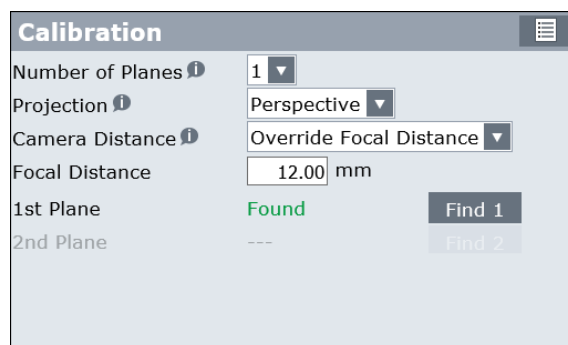
Slika 34. Prozor za odabir kalibracijske mreže - robot SR-6iA

User Frame izrađen s pomoću kalibracije mreže potrebno je odabrati za *parametar Calibration Grid Frame*, slika 35.



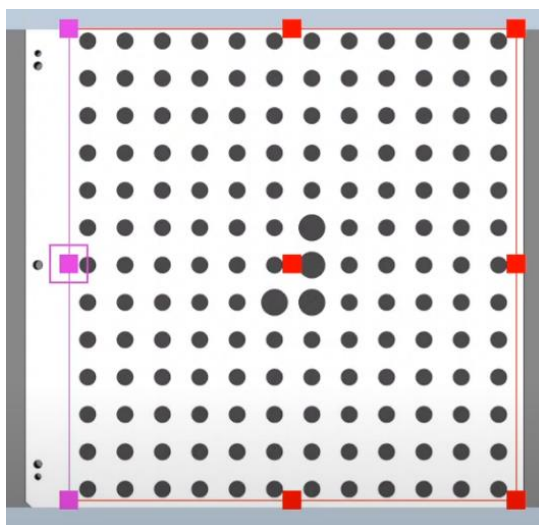
Slika 35. Prozor za odabir lokacije mreže - robot SR-6iA

Nakon definiranja *Calibration Grid Framea* potrebno je odabrati način definiranja žarišne duljine leće. Budući da je žarišna duljina leće poznata, odabrana je opcija *Override Focal Length* i upisana je vrijednost žarišne duljine naznačene na kućištu leće.



Slika 36. Prozor za definiranje žarišne duljine objektiva - robot SR-6iA

Pritiskom na gumb *Find*, pojavljuje se novi zaslon za detekciju crnih točaka na kalibracijskoj mreži, s područjem vidnog polja kamere, te crveni pravokutnik. Potrebno je postaviti pravokutnik tako da se sve crne točke na kalibracijskoj mreži nalaze unutar njega. Ako se neka od točaka izostavi, tada dolazi do netočne kalibracije kamere.



Slika 37. Prikaz označavanja točaka kalibracijske mreže

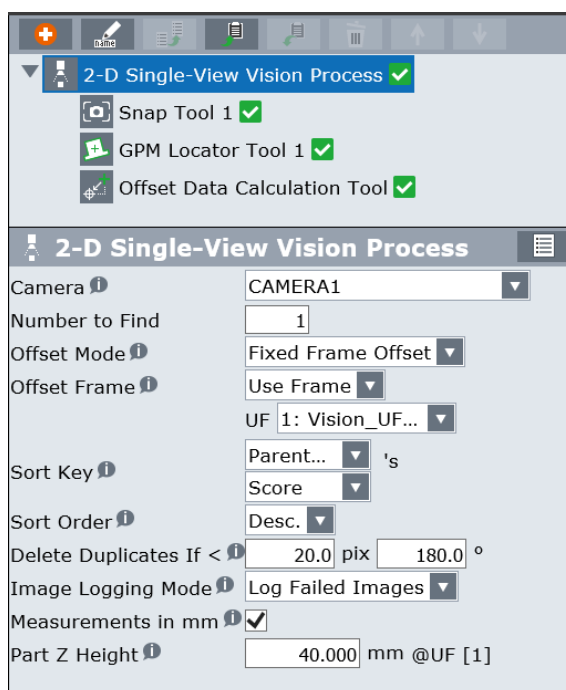
Ako je uzorak mreže uspješno pronađen, pojavljuje se zeleni križić u sredini svakog od pronađenih krugova. Pritiskom na gumb *Set*, ostatak procesa kalibracije kamere bit će automatski odrađen.

Na zaslonu *Calibration Results* mogu se provjeriti podaci vezani za kalibraciju kamere, što se može vidjeti na sljedećoj slici.

| Calibration Result | |
|---|--------------|
| Make sure that the focal distance is roughly accurate, and that the mean error value and the maximum error value are not too large. | |
| Focal Distance | 12.00 mm |
| Standoff Distance | 818.0 mm |
| Lens Distortion | 0.00106 |
| Max Lens Distortion | 0.0 pix |
| Scale | 0.360 mm/pix |
| Mean error value | 0.332 pix |
| Maximum error value | 1.287 pix |
| Position of Camera Relative to Cal. Grid | |
| X | 49.0 |
| Y | -33.3 |
| Z | 817.1 |
| W | 0.4 |
| P | 0.8 |
| R | -0.4 |
| Position of Cal. Grid Relative to App. UFrame | |
| X | 522.8 |
| Y | -1.7 |
| Z | 85.0 |
| W | -0.0 |
| P | 0.0 |
| R | 0.0 |

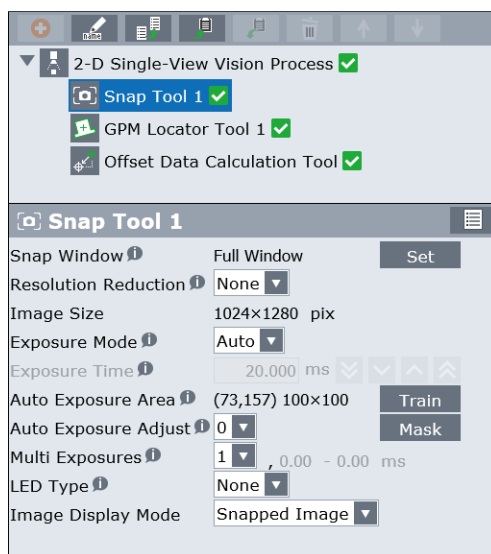
Slika 38. Zaslona s rezultatima kalibracije kamere - robot SR-6iA

Nakon definiranja podataka kamere, može se prijeći na sljedeći korak, izradu programa za prepoznavanje objekta. Nakon upisivanja imena programa, te komentara koji ukratko opisuje funkciju programa, potrebno je odabrati opciju *2-D Single-View Vision Process*. Unutar zaslona za konfiguraciju procesa, prvo se prema zadanom imenu kamere odabire prethodno kalibrirana kamera. Na sljedećoj slici mogu se vidjeti odabrani podaci i parametri za konfiguraciju procesa.



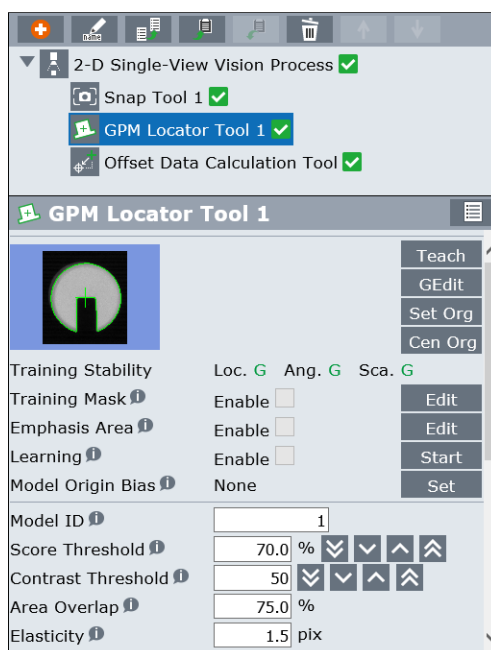
Slika 39. Odabir kamere koja se rabi za program detekcije objekta - robot SR-6iA

Unutar zaslona *Snap tool 1* definiraju se parametri o samom *Machine Vision* sustavu, kao što su: *Exposure time*, *LED type*, *Exposure Mode* i tako dalje (slika 40).



Slika 40. Odabir opcije automatskog podešavanja ekspozicije kamere - robot SR-6iA

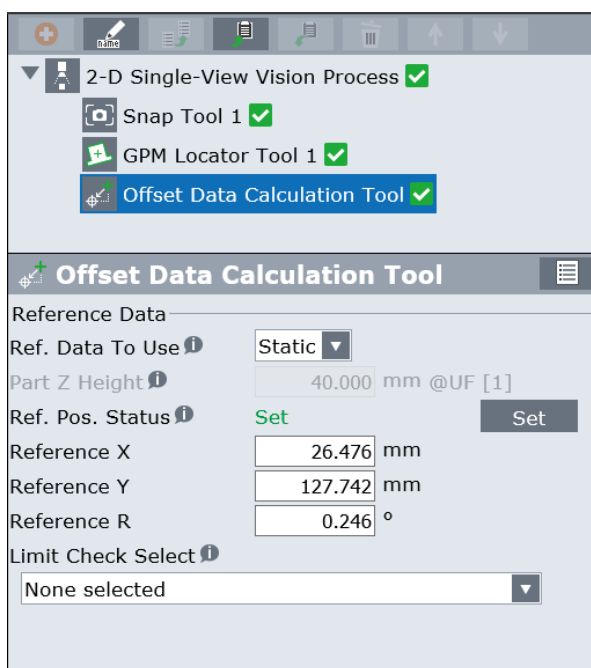
Može se primijetiti da je kod parametra *Exposure Mode* odabrana opcija *Auto*. U tom se slučaju vrijeme ekspozicije kamere automatski mijenja, takvom dinamikom da intenzitet slike bude uvijek približno jednak. To je odabrano jer se pokraj prvog položaja nalaze prozor i vanjsko svjetlo i ovisno o dobu dana, utječe na detekciju objekta. Sljedeći zaslon koji treba konfigurirati je alat za usklađivanje geometrijskih uzoraka, prikazan na slici 40.



Slika 41. Prozor za učenje karakteristika predmeta rada - robot SR-6iA

Ovaj alat može pronaći objekt na temelju njegovog izgleda. Prije procesa parametrizacije, predmet rada postavlja se ispod kamere. Pritiskom na gumb *Teach*, kao i u prethodno opisanom postupku kalibracije kamere, pojavljuje se novi zaslon s područjem vida kamere, te crveni pravokutnik. Potrebno je pravokutnik pomaknuti i po potrebi povećati ili smanjiti tako da se objekt nalazi unutar njega. Alat automatski pronalazi rubove objekta te ih označava zelenom bojom. Ako su neki rubovi nepotrebni ili nedostaju, unutar ovog zaslona nalaze se alati za brisanje i dodavanje rubova na uzorku.

U posljednjem koraku, nužno je vrh alata SCARA robota dovesti na željenu poziciju hvatanja objekta. U ovom slučaju je to centar gornje plohe objekta. Kada se vrh alata robota postavi u željenu poziciju, potrebno je pritisnuti gumb *Set* za opciju *Ref. Pos. Status* i ovime završava proces izrade programa za detekciju predmeta rada.



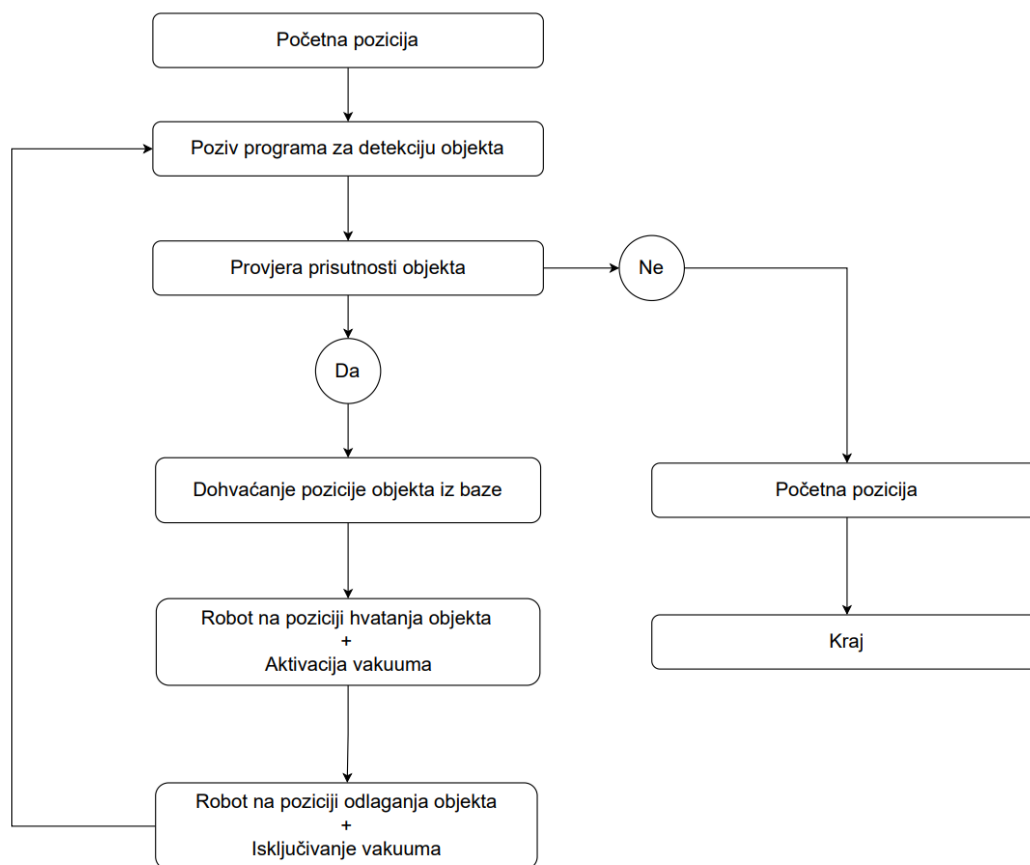
Slika 42. Prozor za definiranje referentne točke hvatanja – robot SR-6iA

2.5. Opis programskog kôda SCARA robota SR-6iA

U ovom je dijelu rada u koracima opisana logika programa SCARA robota SR-6iA. Kao što je prikazano na slici 43, programski kôd SCARA robota:

1. Započinje slanjem robota na početnu poziciju *Home_Position*.
2. Kada robot dođe u početnu poziciju, poziva se program za prepoznavanje objekata „FIND_OBJECT“ kreiran u *iRVision* softverskom paketu.
3. Zatim se provjerava varijabla koja daje informaciju o tome je li objekt pronađen.
4. Ako je objekt pronađen, izvršava se dio programa za hvatanje objekta. Pozicija hvatanja definirana je kao kombinacija koordinata referentne pozicije hvatanja *Ref_Position*, opisane na slici 41 i koordinata dobivenih obradom digitalne slike. Koordinate detektiranog objekta kao *vision offset* u program poziva referentna pozicija hvatanja s pomoću naredbe *VOFFSET,VR[1]*.
5. Kada robot dođe na poziciju hvatanja, a pneumatska se hvataljka nalazi na gornjoj plohi objekta, poziva se program „VACUUM_ON“. Ovim programom aktivira se pneumatski ventil instaliran unutar tijela robota. Kada se s pomoću robotskog izlaza signal *RO[1]* aktiva ventil, tada se protok zraka preusmjerava na izlazni konektor *A1*. Zrak prolazi kroz generator vakuuma, čime se ostvaruje vakuum na vrhu pneumatske hvataljke. Robotski izlazni signal ostaje u stanju *ON*.
6. Nakon hvatanja objekta sijedi izvršavanje dijela programa za odlaganje objekta na ulaznu pokretnu traku. Robot kreće prema definiranoj poziciji za odlaganje – *Place_Position* te spušta objekt na pokretnu traku prema definiranom z pomaku – *Place_Z_Offset*. On se tada, brzinom jednako brzini pokretne trake, kreće prema poziciji *Place_Motion* i 15,0 mm prije dolaska robota u zadanu poziciju, poziva se program „VACUUM_OFF“ – koji robotski izlazni signal *RO[1]* prebacuje u stanje *OFF*, a signal *RO[2]* u stanje *ON*. Promjenom stanja robotskih izlaznih signala zaustavlja se dotok zraka i objekt se ispušta na izlaznu pokretnu traku. Time je završen jedan ciklus rada SCARA robota.
7. U tom se trenutku pokazivač u aktivnom programu vraća na liniju kôda za poziv programa „FIND_OBJECT“, te se opisani ciklus rada ponavlja sve dok SCARA robot ne prebaci sve objekte s horizontalne ravnine na ulaznu pokretnu traku.

8. Kada se provjerom varijable o prisutnosti objekta ustanovi da kamera nije prepoznala nijedan objekt na horizontalnoj ravnini, tada SCARA robot ide u početnu poziciju *Home_Position* i izvođenje programa završava.



Slika 43. Dijagram toka programa SCARA robota SR-6iA

Detaljan programski kôd prikazan je u prologu „Programski kod SCARA robota SR-3iA“

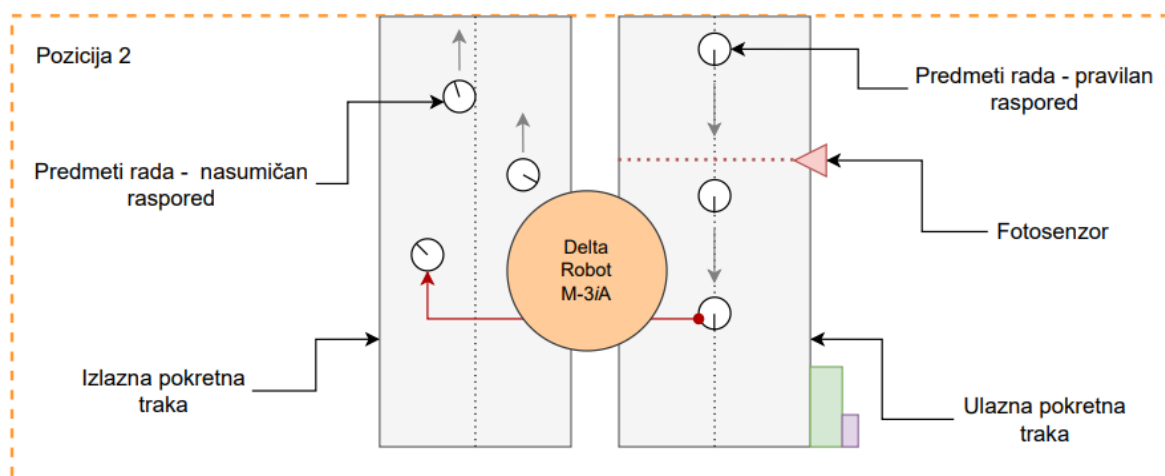
3. UPRAVLJANJE DELTA-ROBOTOM M-3iA UPORABOM OPCIJE ZA LINIJSKO PRAĆENJE OBJEKTA

Nakon što SCARA robot napuni sustav predmetima rada, delta-robot M-3iA treba prepoznati položaj objekta na ulaznoj pokretnoj traci i izvršiti *pick and place* zadatak. Detaljan opis funkcije druge pozicije i zadatka delta robota prikazan je u nastavku.

3.1. Opis pozicije

Druga pozicija sustava za manipulaciju objektima u pokretu temelji se na opciji *Line Tracking*, kojom se koristi robot M-3iA da bi odredio točan položaj objekta na traci pri zadatku hvatanja (slika 44). Objekti koje SCARA robot postavi na ulaznu pokretnu traku, kao i u slučaju kada ih postavlja delta-robot DR-3iB, smješteni su na istoj simetrali na traci. To je nužan uvjet za uspješno izvršavanje zadatka hvatanja objekta u pokretu, uporabom opcije *Line tracking*. Ključno je da robot zna na kojem se položaju po širini trake nalazi objekt.

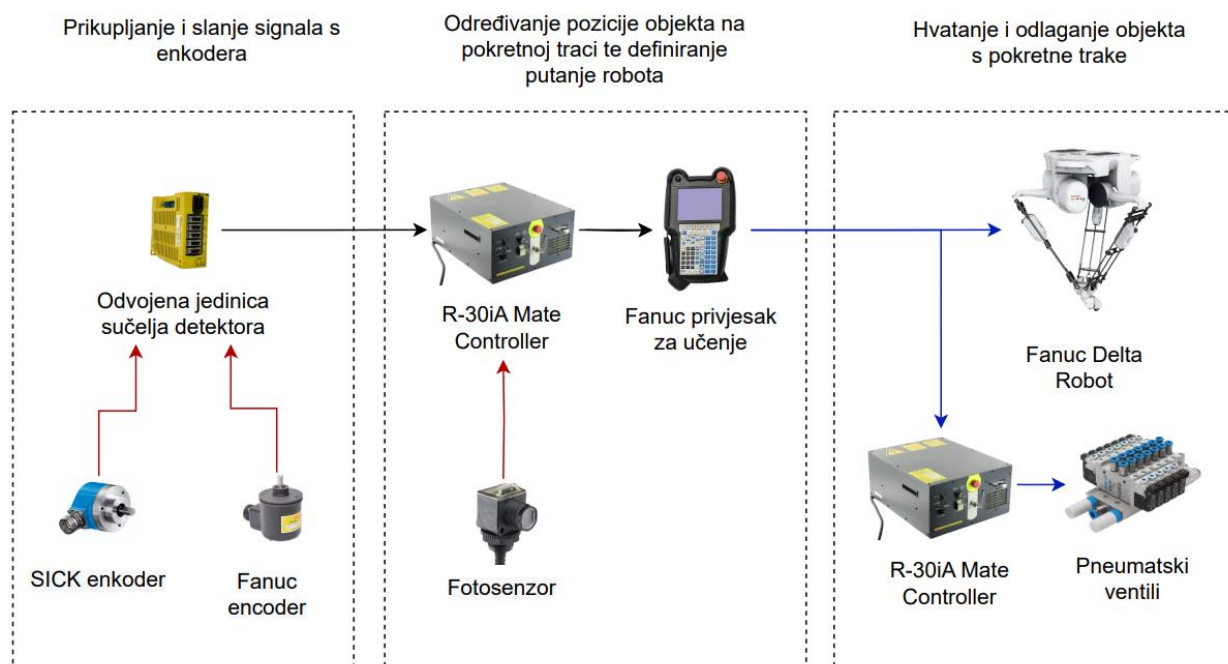
Nakon detektiranja prisutnosti objekta s pomoću fotoelektričnog senzora aktivira se *Line tracking* opcija te robot, kada objekt dođe u područje rada robota, hvata objekt pomoću pneumatske hvataljke. Nakon hvatanja objekta robot izračunava nasumični položaj po širini trake i orijentaciji objekta, te ga sinkronizirano s trakom odlaže na izlaznu pokretnu traku.



Slika 44. Shematski prikaz druge pozicije

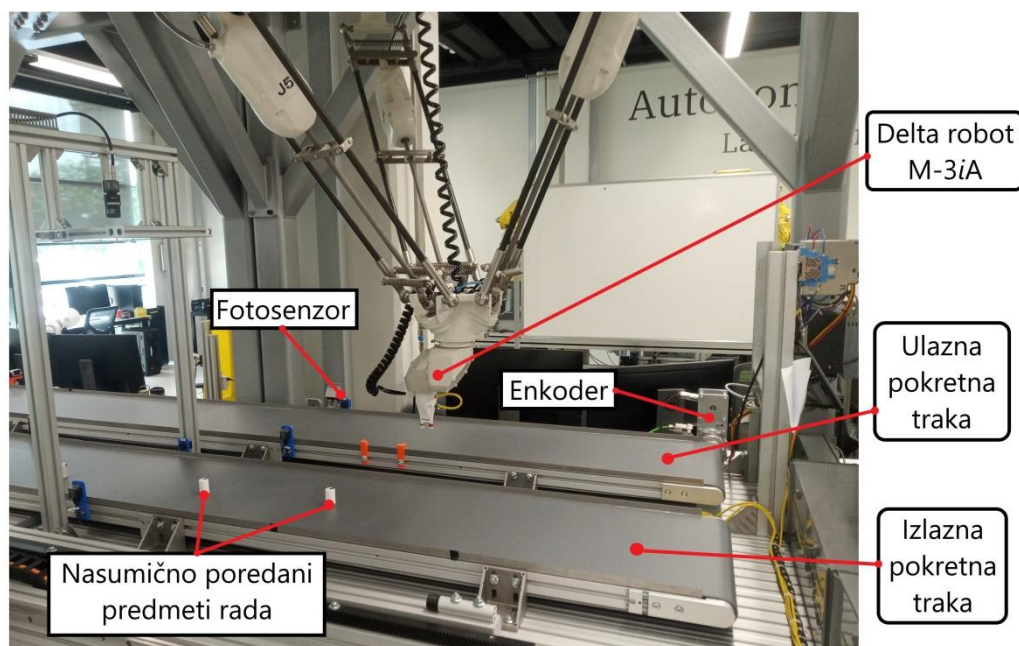
U početnoj fazi ove pozicije, primjenom odvojene jedinice sučelja koja je opisana u nastavku, kontroler robota prikuplja podatke o položajima ulazne i izlazne pokretne trake. Kada se aktivira fotoelektrični senzor, kontroler dobiva signal na pinu digitalnih ulaza, što pokreće opciju *Line Tracking*. Unutar programa izrađenog na privjesku za učenje, definiraju se položaji u koje robot treba doći da bi se pneumatska hvataljka, čiji se vrh nalazi na gornjoj plohi objekta, kretala sinkronizirano s trakom – bez rušenja ili pomicanja objekta. Tijekom procesa praćenja objekta šalje se signal za aktivaciju pneumatskog ventila, čime se ostvaruje vakuum na pneumatskoj hvataljci. U trenutku odlaganja objekta prestaje slanje signala za aktivaciju pneumatskog ventila, prekida se dotok zraka u generatoru vakuuma i objekt ostaje na traci.

Za bolje razumijevanje izmjene signala tijekom rada robota M-3iA, na sljedećoj se slici može vidjeti shematski prikaz ulaznih i izlaznih signala.



Slika 45. Transfer ključnih signala na drugoj poziciji

Na sljedećoj slici mogu se vidjeti komponente druge pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i.



Slika 46. Prikaz druge pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave

3.2. Popis sastavnica

Ključne sastavnice koje su se upotrebljavale za konfiguraciju drugog položaja, zasebno su opisane u nastavku.

3.2.1. *Fanuc Delta-robot M-3iA*

Delta-robot je tip paralelnog robota, čiji se dizajn temelji na uporabi paralelograma krakova, što omogućuje održavanje vodoravnog položaja radnog alata. Sastoji se od triju krakova koji povezuju bazu robota s krajnjim efektorom, gdje se nalazi radni alat robota. Ovakvim se dizajnom ograničava kretanje krajnjeg efektora na translatorno gibanje, odnosno kretanje samo u XY-ravnini – uz pomicanje, podizanje i spuštanje radne plohe u Z-smjeru.

U usporedbi s tradicionalnim robotskim rukama, aktuatori delta-robota smješteni su na njegovoj bazi, što omogućava da se krakovi pomiču velikom brzinom, što ovakav tip robota čini idealnim za *pick and place* operacije. Fanuc delta-robot koji je korišten na drugoj poziciji sustava za manipulaciju dijelovima u pokretu, može se vidjeti na slici 47.



Slika 47. Fanuc delta-robot M-3iA [13]

Za razliku od standardnih delta-robota koji mogu radni alat pomicati samo u horizontalnoj ravnini, Fanuc delta robot M-3iA na krajnjem efektoru ima zglob s trima osima, što omogućuje slobodnu rotaciju radnog predmeta i alata, u skladu s potrebama zadatka. Ovaj robot idealan je za brze operacije skupljanja, sklapanja, pakiranja i sastavljanja.

3.2.2. Odvojena jedinica sučelja detektora

Za parametrizaciju opcije *Line Tracking* upotrebljavaju se signali prikupljeni sa zasebnih rotacijskih enkodera, koji nisu direktno spojeni s kontrolerom robota. Za ovakve hardverske konfiguracije nužno je dodati odvojenu jedinicu sučelja detektora.



Slika 48. Separate Detector Interface Unit [14]

Povezivanjem odvojene jedinice sučelja s kontrolerom robota, omogućuje se spajanje i kontroliranje dodatnih četiriju servo-pogona. Odvojena jedinica sučelja detektora povezana je s kontrolerom robota putem kabela od optičkih vlakana, kao jedinica na FSSB liniju.

3.2.3. *Enkoderi*

Budući da se ulazna pokretna traka, s koje delta-robot M-3iA treba uhvatiti objekte, pokreće sa Siemensovim servomotorom Fanuc, oba delta-robot ne mogu direktno pristupiti podatku o položaju pokretne trake. Da bi se dobio podatak o položaju objekta i proslijedio Fanuc delta-robotima, potrebno je spojiti enkodere na spojnu osovinu ulazne pokretne trake. Na sljedećim slikama mogu se vidjeti enkodere koji su se primjenjivali za prepoznavanje položaja ulazne pokretne trake u opisanom sustavu.



Slika 49. SICK enkoder (lijevo) [15], Fanuc enkoder (desno) [16]

3.2.4. *Fotoelektrični senzor*

Za pronalaženje objekata na pokretnoj traci upotrebljavao se fotoelektrični senzor koji se sastoji od nekoliko odašiljača snopa i fotoprekidača proizvođača Allen-Bradley, slika 50.

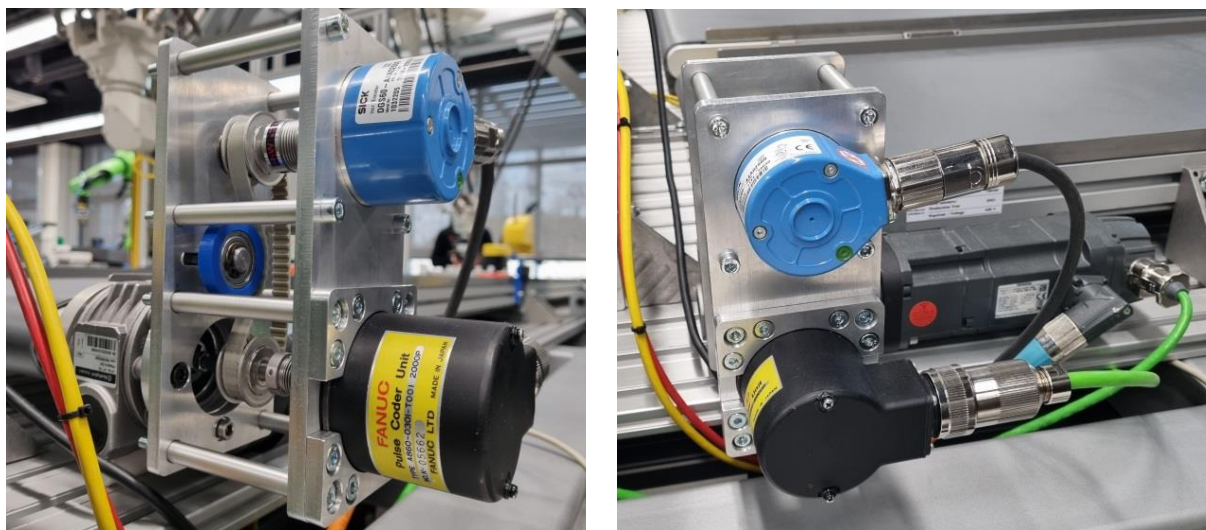


Slika 50. Allen-Bradley fotoelektrični senzor [17]

3.3. Integracija i instaliranje sastavnica

Kao što je navedeno, podaci o brzini i položaju ulazne pokretne trake ne mogu se direktno saznati. Da bi ih se prepoznalo, potrebno je u cijeli sustav dodati nove enkodere. Na slici 49 prikazana je konstrukcija za montažu enkodera na pokretnu traku, gdje se crni enkoder povezuje sa spojnom osovinom trake, uz dodatan prijenos gibanja – da bi oba enkodera imala sinkroniziran pomak osovine.

Plavi enkoder (SICK enkoder) prenosi podatak o položaju pokretne trake delta-robotu M-3iA, dok crni enkoder (Fanuc-enkoder) šalje podatke drugom delta-robotu DR-3iB, koji se nalazi na trećoj poziciji i opisan je u sljedećem poglavlju. Prijenos gibanja s jednog enkodera na drugi ostvaruje se remenskim prijenosom (s pomoću remenica i zupčastog remena). Ovakvom konfiguracijom oba delta-robotu dobivaju informacije o položaju ulazne pokretne trake.



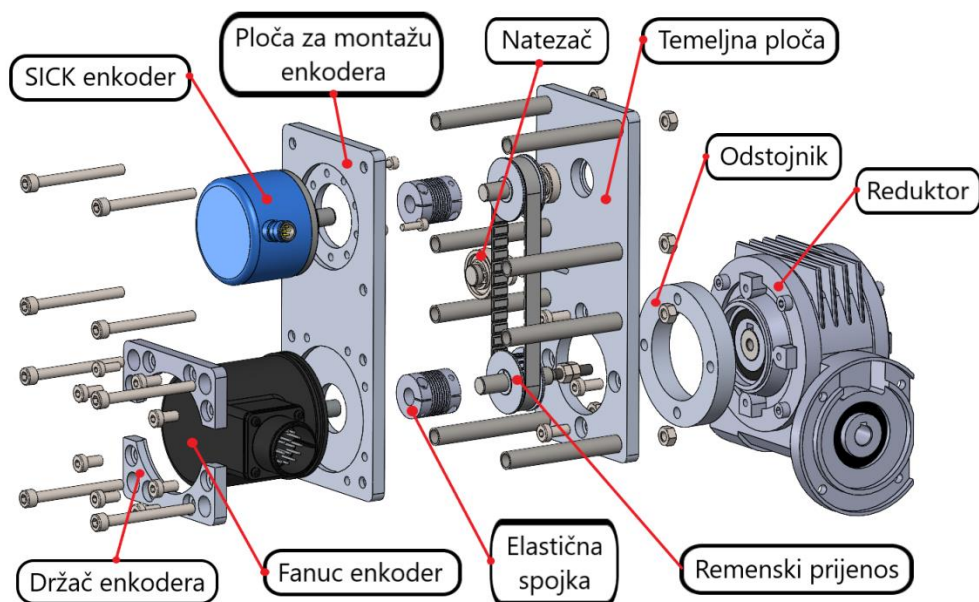
Slika 51. Prikaz instaliranja konstrukcije za montažu enkodera

Konstrukcija za montažu enkodera na ulaznu pokretnu traku modelirana je u softverskom paketu *SolidWorks*. Na sljedećoj slici može se vidjeti CAD model konstrukcije za montažu enkodera. Svi tehnički detalji o prikazanoj konstrukciji navedeni su u tehničkim crtežima koji se nalaze u prilogu ovog rada.



Slika 52. CAD model konstrukcije za montažu enkodera

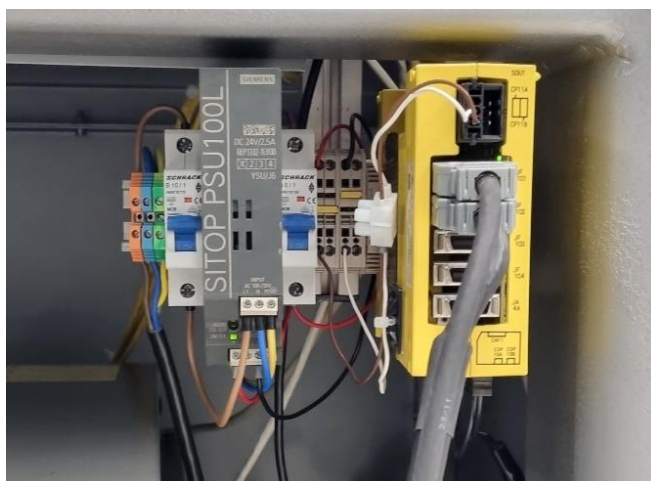
Slika 53 prikazuje glavne sastavnice nosača enkodera montiranog na reduktor servo motora koji pokreće ulaznu transportnu traku.



Slika 53. Popis sastavnica nosača enkodera

Da bi kontroler delta-robotu M-3iA mogao dobiti podatke koje mu je prosljedio enkoder, potrebno je enkodere spojiti s odvojenom jedinicom sučelja detektora. Na slici 54 prikazana je

odvojena jedinica sučelja detektora integrirana u sustav. U prvi konektor priključen je industrijski kabel za prijenos podataka povezan sa SICK enkoderom, koji prenosi podatke o položaju ulazne pokretne trake; dok je na drugi konektor priključen Fanuc-enkoder, koji daje podatak o položaju druge pokretne trake. Ovim je omogućeno da kontroler delta-robotu M-3iA dobiva podatke o položaju obje pokretne trake sustava.



Slika 54. Prikaz spajanja enkodera na odvojenoj jedinici sučelja detektora

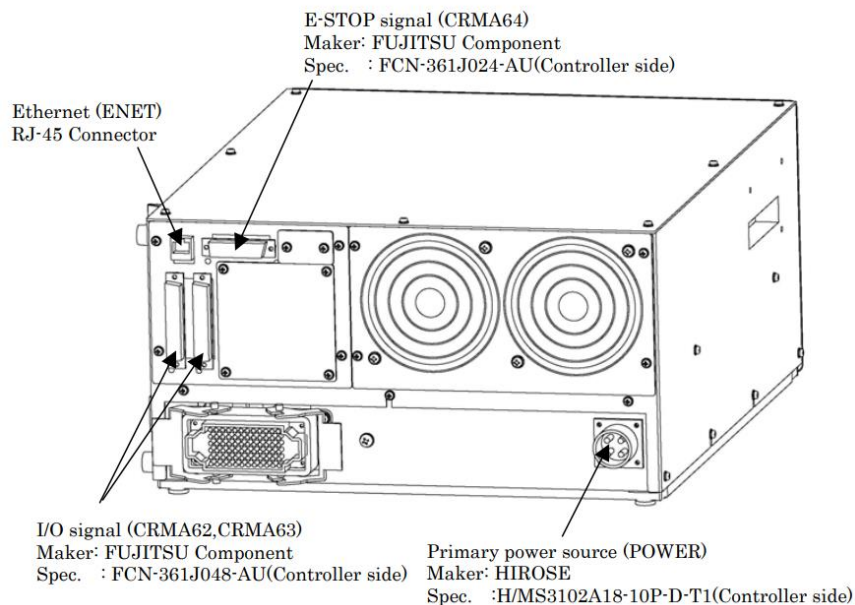
Shema spajanja enkodera s odvojenom jedinicom sučelja detektora i kontrolerom robota nalazi se u prilogu.

Fotoelektrični senzori za detekciju prisutnosti objekata instalirani su na bočne strane pokretne trake uporabom montažnih prihvatnica modeliranih u softverskom paketu *SolidWorks* te izrađenih s pomoću 3D printera *Prusa*, slika 55.



Slika 55. Prikaz instaliranog fotoelektričnog senzora

Izlazni signal koji šalje fotoelektrični senzor nije moguće direktno spojiti na stezaljke digitalnih ulaza kontrolera. Na glavnoj ploči kontrolera nalaze se pinovi za digitalne ulaze i izlaze, koji su spojeni s konektorima CRMA 62 i CRMA 63, a koji se nalaze na zadnjoj strani kućišta kontrolera, slika 56.



Slika 56. Prikaz konektora CRMA 62 i CRMA 63 na kontroleru robota [18]

Da bi se signali prenijeli u elektro-ormar napajanja robotske ćelije, potrebno se koristiti višezilnim kablovima s konektorima CRMA 62 i CRMA 63. Na slici 57 prikazan je konektor koji odgovara konektorima CRMA 62 i CRMA 63 na kućištu kontrolera i konektor povezan s višezilnim kablom.



Slika 57. CRMA konektor [19]

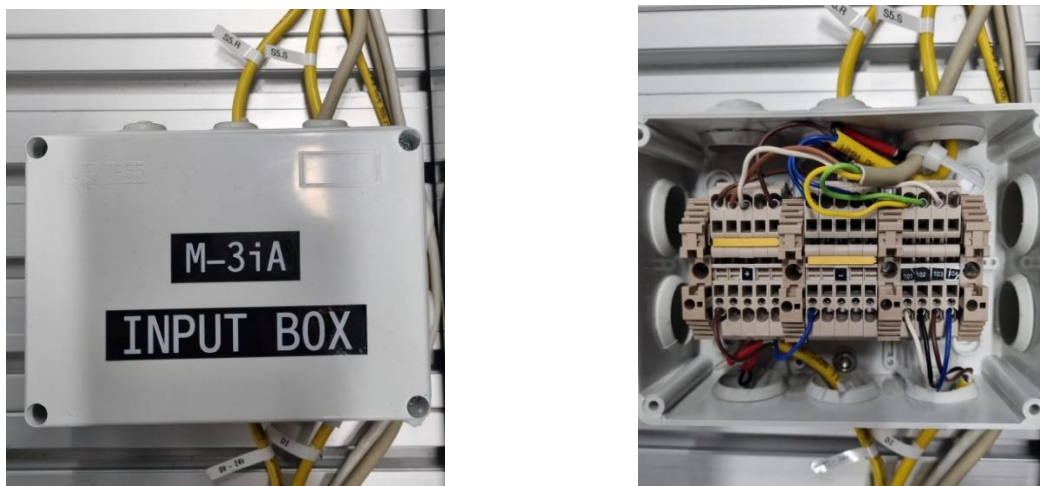
U sljedećoj tablici mogu se vidjeti značenja svakog pina na konektorima CRMA 62 i 63:

Tablica 2. Popis značenja pinova konektora [18]

| PIN | CRMA 62 | | CRMA 63 | |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| | B | A | B | A |
| 1 | DO101 | DI101 | DO109 | XHOLD |
| 2 | DO102 | DI102 | DO110 | RESET |
| 3 | DO103 | DI103 | DO111 | START |
| 4 | DO104 | DI104 | DO112 | ENBL |
| 5 | DO105 | DI105 | DO113 | PNS1 |
| 6 | DO106 | DI106 | DO114 | PNS2 |
| v7 | DO107 | DI107 | DO115 | PNS3 |
| 8 | DO108 | DI108 | DO116 | PNS4 |
| 9 | | SDICOM1 | DO117 | SDICOM3 |
| 10 | | DI109 | DO118 | |
| 11 | | DI110 | DO119 | |
| 12 | | DI111 | DO120 | |
| 13 | | DI112 | CMDENBL | |
| 14 | | DI113 | FAULT | |
| 15 | | DI114 | BATALM | |
| 16 | | DI115 | BUSY | |
| 17 | DOSRC1 | DI116 | DOSRC2 | |
| 18 | DOSRC1 | DI117 | DOSRC2 | |
| 19 | 0V | DI118 | 0V | |
| 20 | 0V | DI119 | 0V | |
| 21 | 24F | DI120 | 24F | |
| 22 | 24F | SDICOM2 | 24F | |
| 23 | 24F | 0V | 24F | 0V |
| 24 | FG | 0V | FG | 0V |

Elektroshema spajanja konektora CRMA 62 i CRMA 63 nalazi se u prilogu.

Budući da u elektroormaru napajanja robotske ćelije delta robota M-3iA nije bilo slobodnog prostora, na DIN šini za uredno (i po pravilima struke) ožičenje ulaznih signala, izrađena je kutija s rednim stezaljkama za vanjsko ožičenje digitalnih ulaza. Ovime je održana urednost elektroormara, smanjuje se opasnost od grešaka pri ožičenju te je olakšano spajanje signala.



Slika 58. Prikaz vanjske *input* kutije za delta-robot M-3iA

Iz istog razloga izrađena je kutija za digitalne izlaze – da bi se olakšalo spajanje digitalnih izlaza za aktivaciju pneumatskih ventila.

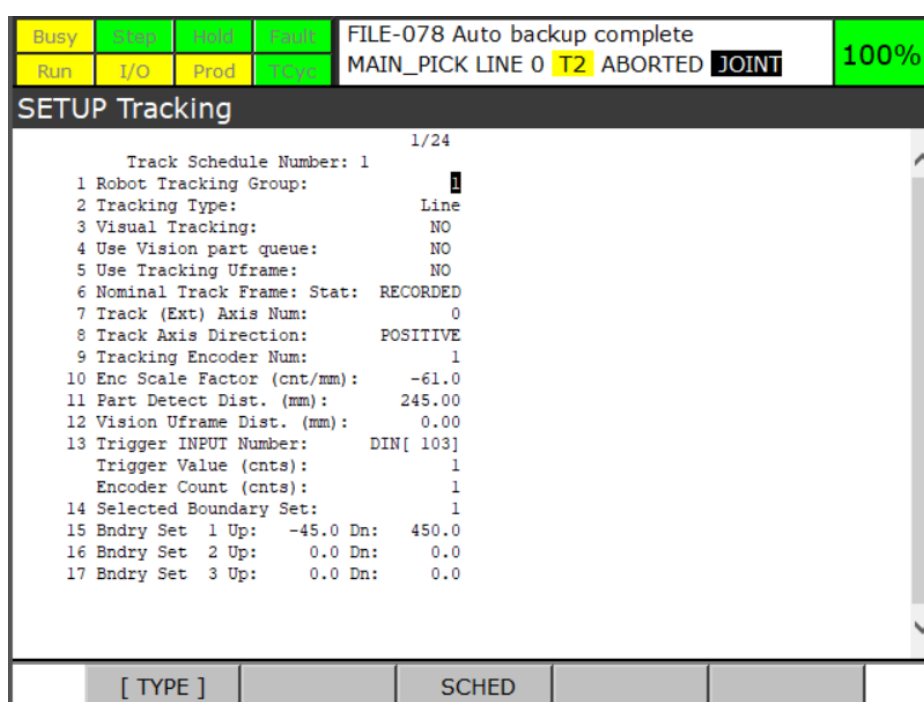


Slika 59. Prikaz vanjske *output* kutije za delta-robot M-3iA

3.4. Konfiguracija opcije za linijsko praćenje objekta

Ovaj odjeljak opisuje postavljanje parametra za praćenja objekta na ulaznoj pokretnoj traci i za praćenje linije pri ispuštanju objekta na izlaznu pokretnu traku.

Za postavljanje parametara praćenja objekta u pokretu potrebno je na privjesku za učenje otvoriti poglavlje *Tracking*, slika 60. Unutar *Tracking* izbornika nužno je prvo odabrati broj rasporeda za program praćenja. Za delta-robot M-3iA konfigurirana su dva rasporeda za praćenje – prvi za zadatak hvatanja objekta s ulazne trake, a drugi za odlaganje objekta. Na slici 60 prikazana je konfiguracija rasporeda za praćenja objekta na ulaznoj pokretnoj traci.

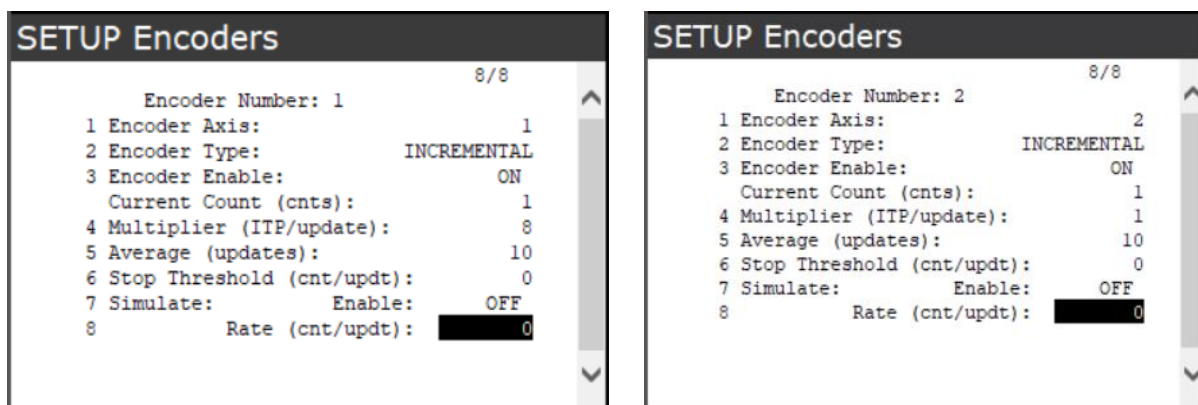


Slika 60. Izbornik za konfiguraciju sustava praćenja linije pri hvatanju objekta

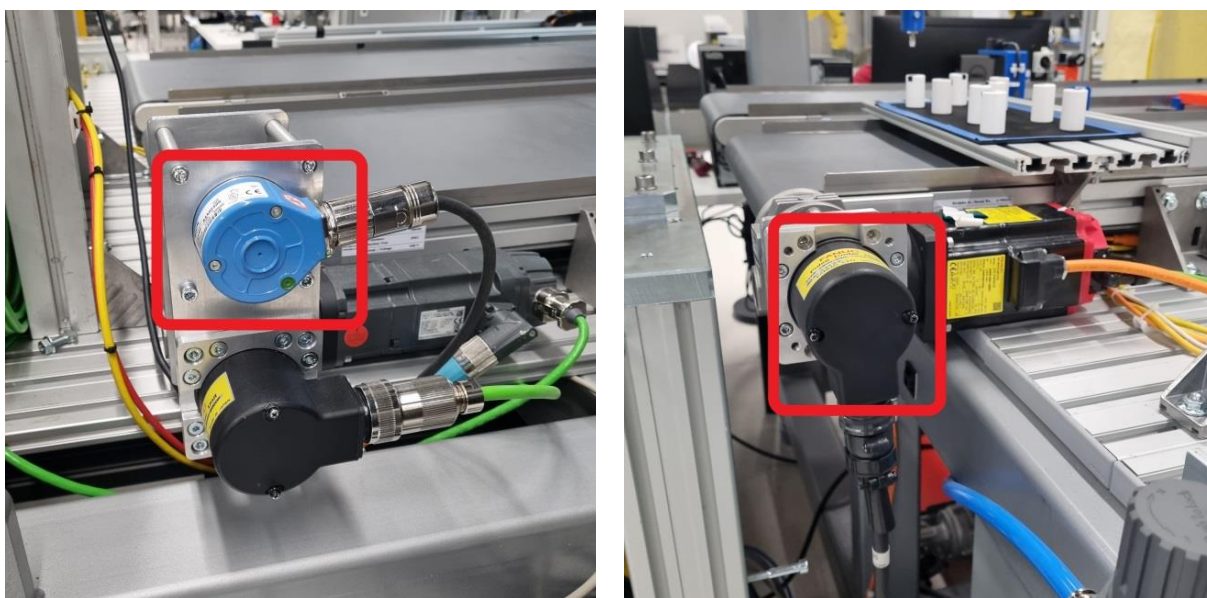
Nakon definiranja rasporeda potrebno je odabrati grupu robota koja se pridružuje trenutnom rasporedu praćenja. U ovom slučaju robot je konfiguriran na prvu grupu i stoga je upisan broj 1. Sljedeći parametar koji se treba definirati je ključan, a odnosi se na vrstu aplikacije za praćenje. Ponuđene su opcije za linijsko i kružno praćenje. Budući da se objekt nalazi na linijskoj pokretnoj traci, odabrana je opcija *Line*.

Stavka *Tracking Encoder Num* navodi odabir enkodera koji se upotrebljava za sve programe praćenja koji se koriste trenutnim brojem rasporeda praćenja. Kako je već opisano u

prijašnjem poglavlju, upotrebom odvojene jedinice sučelja na kontroler robota, konfigurirana su dva enkodera. Prvi enkoder odnosi se na ulaznu pokretnu traku s koje SCARA robot hvata objekte, slika 62 – lijevo. Drugi konfigurirani enkoder daje informacije o izlaznoj pokretnoj traci na koju M-3iA robot treba odložiti objekte, slika 62 – desno. Konfiguracije oba enkodera spojena na odvojenu jedinicu sučelja, mogu se vidjeti na slici 61.



Slika 61. Izbornik za konfiguraciju prvog enkodera (lijevo) i izbornik za konfiguraciju drugog enkodera (desno)

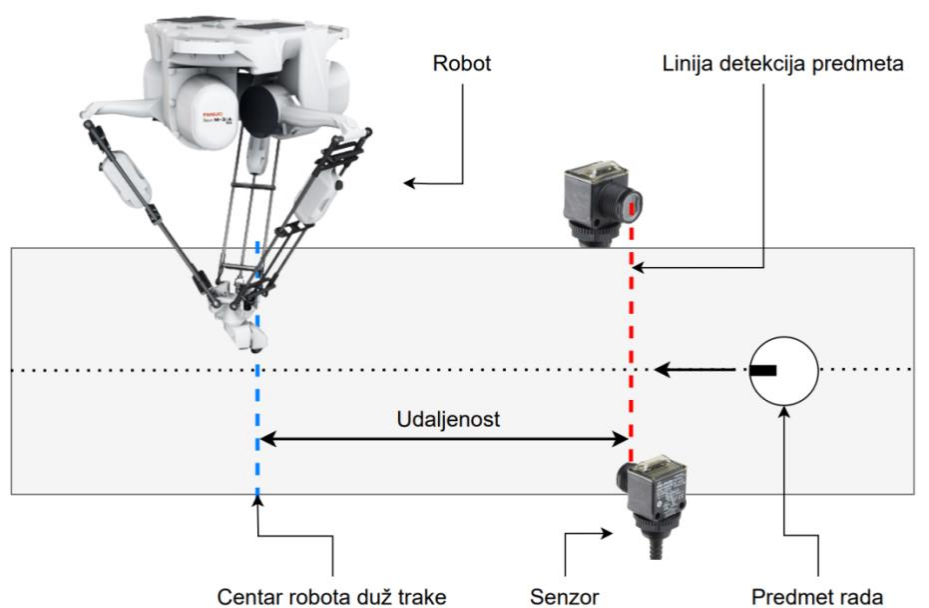


Slika 62. Prikaz instaliranog prvog enkodera (lijevo) i drugog enkodera (desno)

Prema tome, za definiciju prvog rasporeda praćenja, pod stavkom *Tracking Encoder Num* odabran je prvi konfigurirani enkoder.

Za izvršavanje opcije *Line Tracking* tijekom rada sustava upotrebljava se ulazni signal, kao okidač koji se definira pod stavkom *Trigger INPUT Number*. Postavljeni fotoelektrični senzor spojen je na stezaljku digitalnog ulaza 103. Popis svih digitalnih ulaza i izlaza može se pronaći u prilogu.

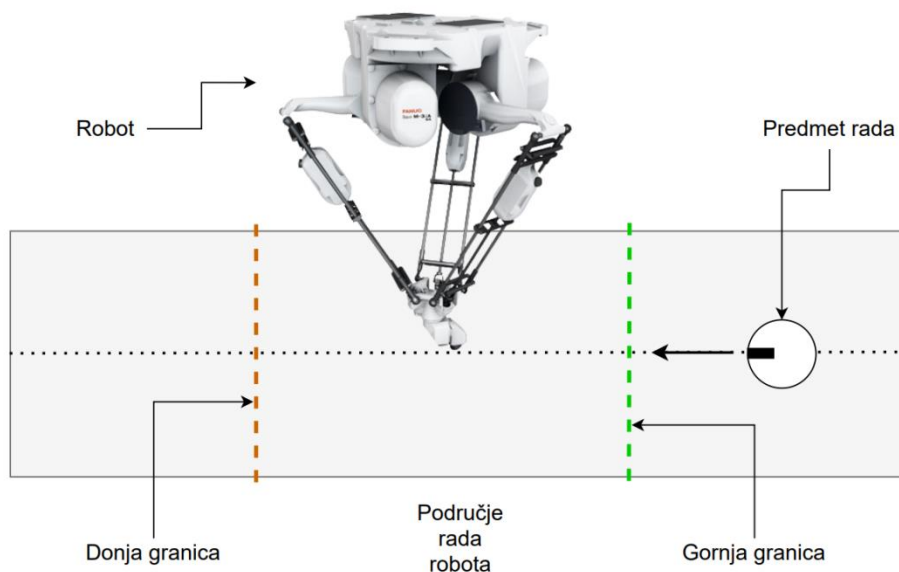
Nakon definiranja digitalnog ulaza koji aktivira *Line Tracking* opcije, potrebno je izmjeriti udaljenost između senzora i centra robota, kao što je prikazano na slici 63.



Slika 63. Shematski prikaz udaljenosti između senzora i centra robota

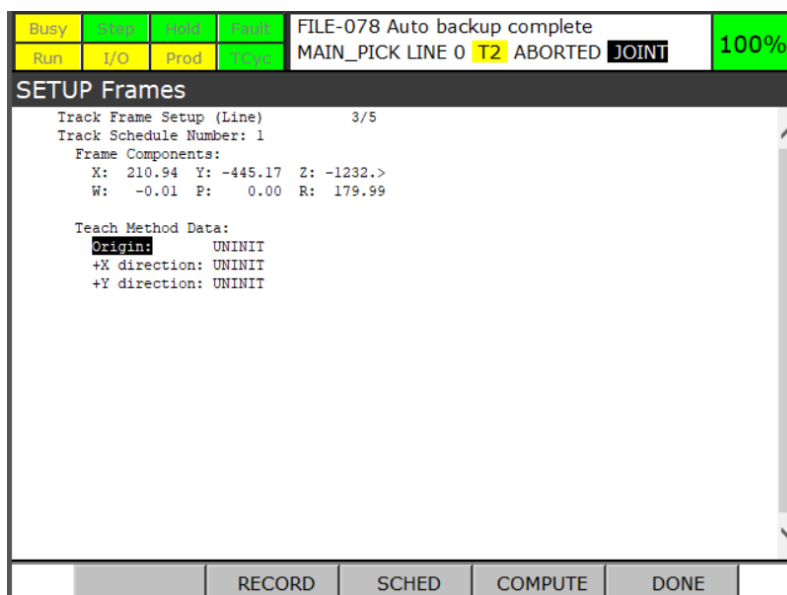
U posljednjem koraku konfiguracije rasporeda praćenja definira se granični prostor rada robota tijekom procesa praćenja objekta, slika 64. Robot ne može dohvatiti objekte koji se ne nalaze unutar navedenog prostora. To znači da objekti koji nisu prešli gornju granicu, ili objekti koji su prošli donju granicu, nisu predmeti rada robota te ih on neće pratiti ni uhvatiti.

Preporučljivo je da se definira što veća razlika između gornje i donje granice, tako da robot ima više vremena za manipulaciju objektom, ali treba biti oprezan da se granice ne definiraju izvan dosega robota.



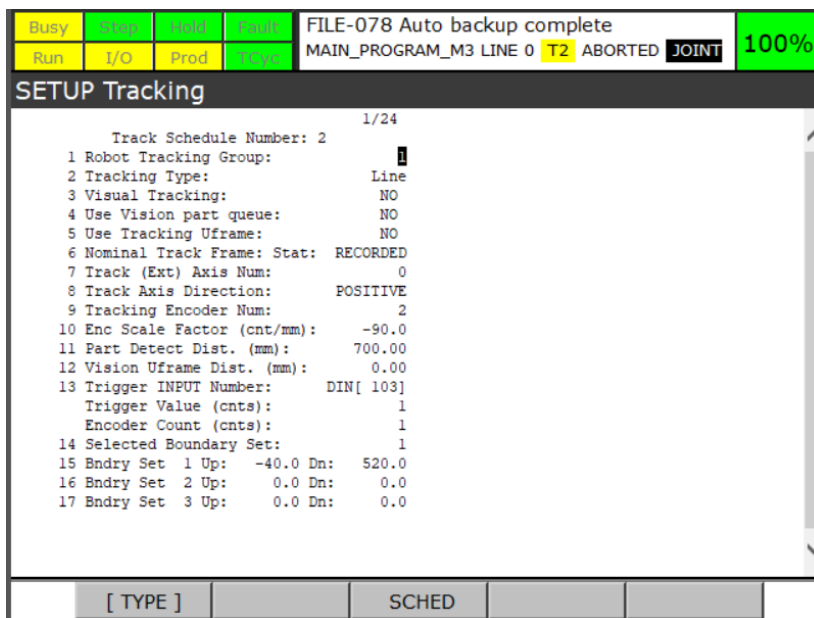
Slika 64. Shematski prikaz granica gibanja robota

U navedenom opisu konfiguracije rasporeda izostavljeno je određivanje nominalnog okvira praćenja. Pri definiranju nominalnog okvira ključno je pratiti proceduru dokumentacije [20], u kojoj je detaljno opisana svaka značajka okvira, kao i ispravan način učenja robota. Podaci o tome kako se definira nominalni okvir praćenja nalaze se u Završnom radu „Robotsko rukovanje dijelovima u pokretu“ [21]. Slika 65 prikazuje parametre definiranog nominalnog okvira za praćenje objekta na ulaznoj traci.



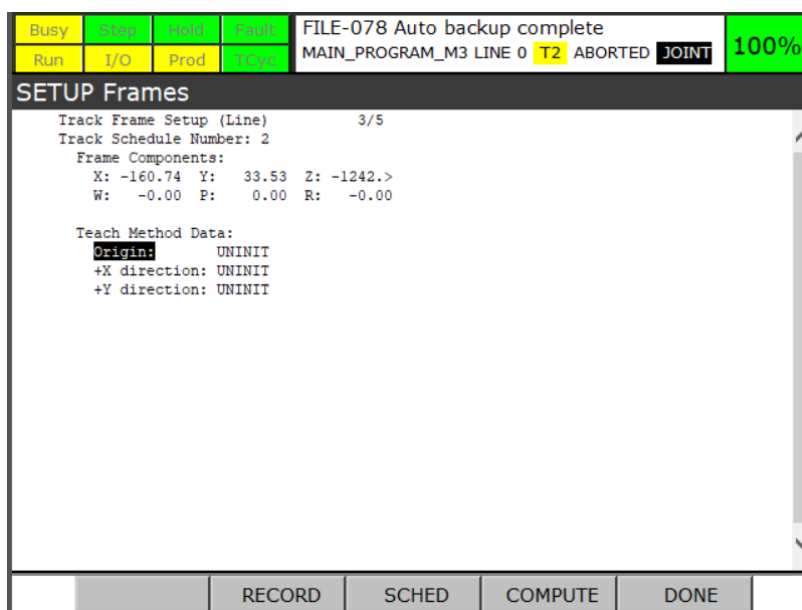
Slika 65. Izbornik za definiranje nominalnog okvira za prvi raspored praćenja

U nastavku je prikazana slika konfiguracije parametara drugog rasporeda, slika 66, koji se upotrebljava pri odlaganju objekta na izlaznu traku. Ovakvom se konfiguracijom robot i objekt kreću sinkronizirano s izlaznom pokretnom trakom tijekom zadatka odlaganja.



Slika 66. Izbornik za konfiguraciju sustava praćenja linije pri odlaganju objekta

Detalji o nominalnom okviru praćenja za drugi raspored mogu se vidjeti na slici 67.



Slika 67. Izbornik za definiranje nominalnog okvira za drugi raspored praćenja

Prije same konfiguracije potrebno je ispravno konfigurirati enkodere, čime se ostvaruje ispravna veza između kontrolera robota i enkodera, odnosno pokretne trake. Detaljan opis procedure i provjere konfiguracije enkodera može se pronaći u dokumentaciji [21].

3.5. Opis programskog koda robota M-3iA

U ovom potpoglavlju pisan je programski kôd delta-robota M-3iA. Prema slici 68, programski je kôd podijeljen u tri faze. Analogno tome, opis programa strukturiran je prema prikazanim fazama programa.

U pripreмноj fazi programa:

1. Resetiraju se brojači koji određuju registar za upis položaja objekta. Uz to, registri koji se rabe za upis podataka dobivenih s enkodera, odnosno položaja objekta na traci, postavljaju se u 0.
2. Zatim se pokreće ulazna transportna traka, slanjem digitalnog izlaznog signala *Siemens_Conveyor* prema PLC-u, te se aktiviraju enkoderi naredbama *LINE[1]* i *LINE[2]*.
3. Na kraju ove faze poziva se potprogram naredbom *RUN*, što omogućava paralelno izvršavanje glavnog programa i potprograma.

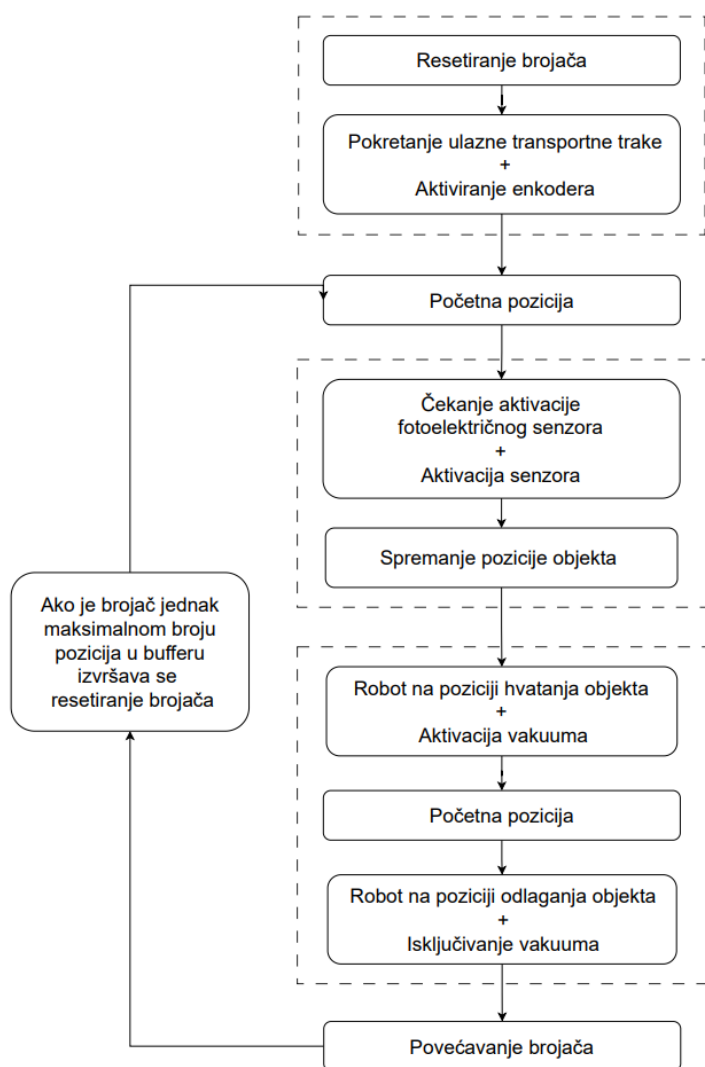
Tijekom srednje faze programa:

4. Robot se prvo šalje na početni položaj, u kojem čeka ulazni signal koji šalje fotosenzor pri prepoznavanju prisutnosti objekta na digitalnom ulazu *DI[103]*.
5. Kada se senzor aktivira, tada potprogram naredbom *LINECOUNT* sprema položaj objekta u jedan definirani registar. Tada se spremljena vrijednost položaja kopira u drugi registar, koji je određen vrijednošću brojača. Ovime je stvoren *Buffer*, koji omogućuje spremanje položaja više objekata, dok robot manipulira s trenutnim objektom.

Kretnje robota događaju se u krajnjoj fazi programa, u kojoj se:

6. Poziva program za hvatanje objekta u pokretu „MAIN_PICK“. Robot je u fazi pripremljenosti. Kada objekt uđe u područje rada robota, tada robot kreće prema objektu, sinkronizira se s kretnjom objekta i spušta pneumatsku hvataljku na gornju plohu. Za hvatanje objekta poziva se program „VACUUM_ON“.

7. Nakon toga robot kreće prema početnom položaju i poziva se program za odlaganje objekta u pokretu „MAIN_PLACE“. Prvo se unutar programa poziva dodatni program „RANDOM_NUMBER“ za definiranje nasumičnog položaja i orijentacije objekta, nakon čega se dobivene vrijednosti dodaju referentnoj poziciji odlaganja naredbom *Offset*. Analognom procedurom, kao i za hvatanje objekta, robot prati liniju izlazne pokretne trake i otpušta objekt pozivom programa „VACUUM_OFF“.
8. Ovime je završen jedan ciklus rada delta-robotu M-3Ia. Brojač se povećava i provjerava se njegova vrijednost. Ako je vrijednost brojača manja od broja mjesta u *Bufferu*, tada se iz *Buffera* odabire informacija, ovisno o vrijednosti brojača.



Slika 68. Dijagram toka programa delta-robotu M-3iA

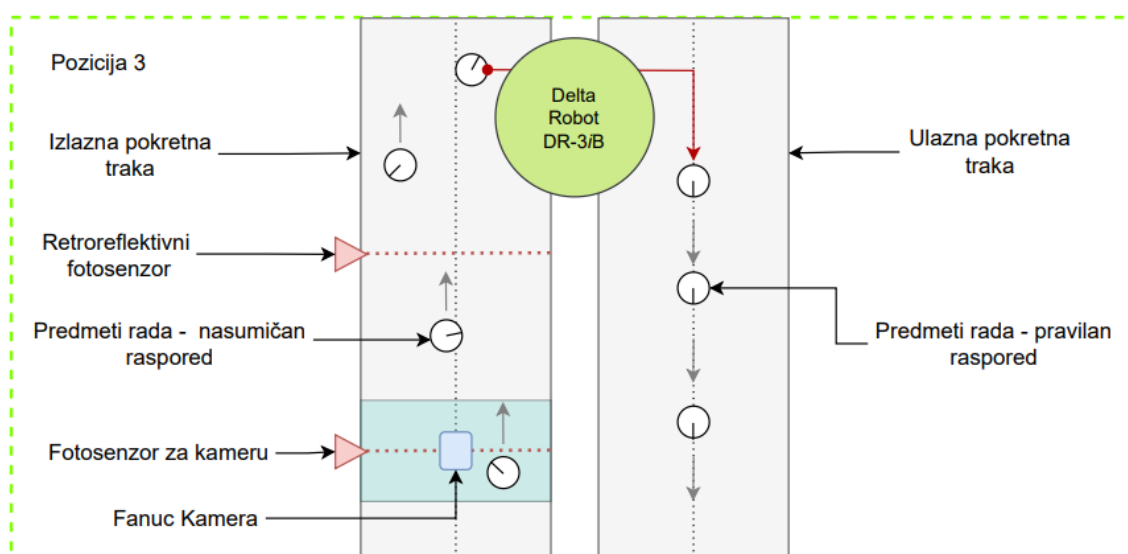
Detaljan programski kôd prikazan je u prilogu „Programski kod SCARA robota M-3iA“

4. UPRAVLJANJE DELTA-ROBOTOM DR-3iB UPORABOM OPCIJE ZA VIZUALNO PRAĆENJE OBJEKTA

Delta-robot DR-3iB ima ključnu ulogu u sustavu za manipulaciju predmetima rada u pokretu. O tome kako je konfiguriran *pick and place* zadatak koji izvršava navedeni delta-robot, može se pročitati u nastavku.

4.1. Opis položaja

Na posljednjem položaju sustava, delta-robot DR-3iB treba uhvatiti objekt u pokretu, koji se nalazi u nasumičnom položaju na izlaznoj pokretnoj traci. Uporabom podataka o koordinatama i rotaciji objekta, dobivenima analizom slike u softverskom paketu *iRVision*, program izrađen na privjesku za učenje odlučuje u kojem će se položaju objekt nalaziti kada dođe u područje rada robota. Kada objekt prođe gornju granicu definiranu u *Line Tracking* opciji, tada robot počinje s praćenjem objekta i hvatanjem. Nakon toga slijedi prebacivanje objekta na ulaznu pokretnu traku, na isti položaj gdje je SCARA robot SR-6iA postavljao predmete tijekom punjenja ulazne trake. Tako prebačen objekt postaje sljedeći predmet rada delta-robotu M-3iA koji se nalazi na drugom položaju. Tada počinje završni zadatak sustava, u kojem oba delta-robotu rade sinkronizirano na kružnom prebacivanju objekta s jedne trake na drugu.

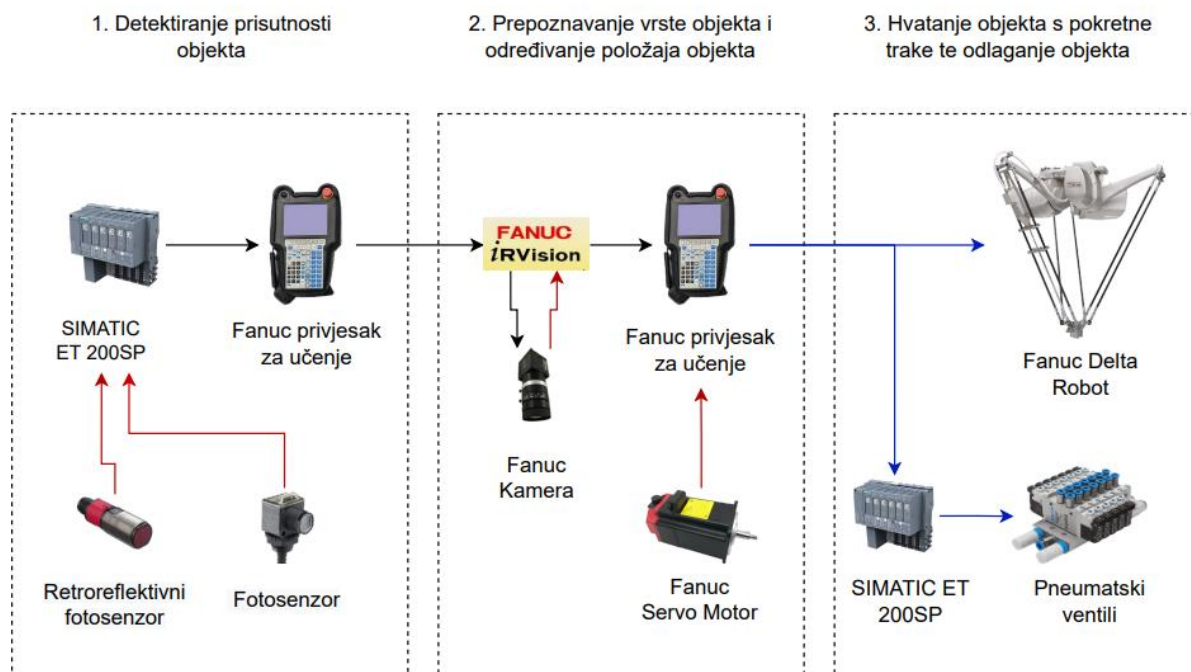


Slika 69. Shematski prikaz treće pozicije

Ciklus rada delta robota DR-3iB započinje kada objekt dođe u vidno područje kamere, te ga očitava fotosenzor za aktivaciju snimanja. Tada distributivni I/O sustav ET200 SP na svojem modulu za digitalne ulaze dobiva pozitivan signal. Glavni modul distributivnog sustava primljeni signal putem PROFINET-a šalje kontroleru robota, koji okida kameru i u tom trenutku započinje program za prepoznavanje karakteristika objekta.

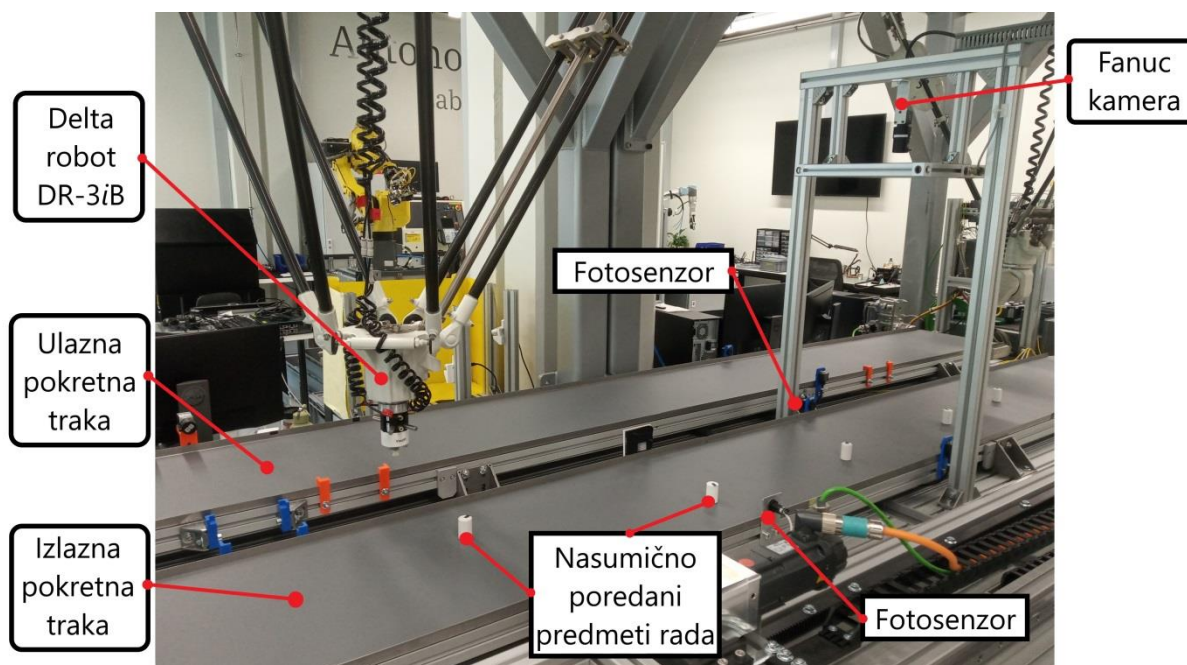
Unutar konfiguriranog *iRVision* programa određuju se položaj i orijentacija objekta na traci, te se ti podaci spremaju u bazu podataka. Kada objekt aktivira retroreflektivni fotosenzor, tada program za *Visual Line Tracking* kombinira podatke prikupljene od *Machine Vision* i *Line tracking* opcija i određuje putanju za obavljanje zadatka hvatanja robota. Za to vrijeme robot je u fazi čekanja, sve dok objekt ne uđe u njegovo radno područje. Pri ulasku objekta u radno područje, robot započinje sa sinkroniziranim praćenjem objekta. Tada se šalje signal za aktivaciju pneumatskog ventila, robot hvata objekt, prebacuje ga na ulaznu pokretnu traku te ga u trenutku prestanka slanja signala za dotok zraka ispušta.

Shematski prikazana izmjena signala tijekom jednog ciklusa rada, opisana u prethodnom tekstu, može se vidjeti na sljedećoj slici.



Slika 70. Transfer ključnih signala na trećoj poziciji

Na sljedećoj slici mogu se vidjeti komponente druge pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave u CRTA-i.



Slika 71. Prikaz druge pozicije u Laboratoriju za autonomne sustave

4.2. Popis sastavnica

Opis sastavnica upotrijebljenih za izvršavanje zadatka *pick and place* s pomoću podataka dobivenih *Visual Line Tracking* opcijom, mogu se pronaći u nastavku rada.

4.2.1. Fanuc delta-robot DR-3iB

Budući da je u poglavlju „Popis komponenti“ za drugu poziciju opisan dizajn i rad delta-robot, ovdje su navedene samo značajke koje nisu kao kod delta-robot M-3iA.

Za razliku od opisanog delta-robot, delta-robot DR-3iB prikazan na slici 72 nema zglob s trima osima na krajnjem efektoru, čime je manipulacija radnim alatom ograničena samo na horizontalnu XY-ravninu, s mogućnošću pomicanja radne plohe po Z-osi.



Slika 72. Fanuc delta-robot DR-3iB [22]

4.2.2. Fanuc-kamera

Za prepoznavanje objekata nasumično poredanih na pokretnoj traci upotrijebljena je ista kamera kao i na prvoj poziciji – Fanuc-kamera SC130FE2 proizvođača Kowa, slika 73. Za razliku od hardverske konfiguracije na prvoj poziciji, ovdje se rabila leća s promjenjivom žarišnom duljinom. Ta promjena čini razliku i kod procesa konfiguriranja *iRVision* softverske opcije, a što je opisano u nastavku.

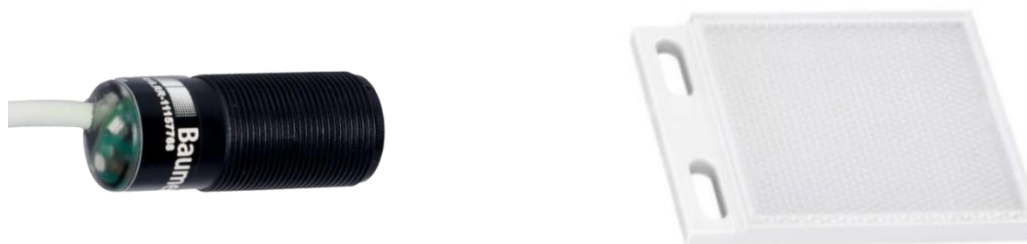


Slika 73. Fanuc-kamera SC130EF2 – treća pozicija

4.2.3. Retroreflektivni fotosenzor

Senzor rabljen za pronalaženje prisutnosti objekta ispod kamere i aktivaciju procesa prepoznavanja objekta je retroreflektivni fotosenzor, prikazan na slici 74 – lijevo. Za razliku

od Allen-Bradley fotosenzora, opisanog u prethodnom poglavlju; ovaj senzor ima odašiljač i prijemnik u jednom kućištu. Iako se upotrebljava samo jedan uređaj, i dalje je potrebno instalirati dva elementa, senzor i reflektor. Princip rada je takav da odašiljač senzora odašilje snop svjetlosti u reflektor, koji snop šalje natrag u prijemnik senzora. Pri prekidanju snopa, senzor na izlazu daje pozitivan električni signal. Ovakvi senzori obično imaju manju preciznost i osjetljivost, te nisu prikladni za aplikacije pronalaženja prizornih i sjajnih predmeta, poput plastične boce ili metalnih limenki.



Slika 74. Odabrani retroreflektivni fotosenzor (lijevo) [23] i reflektor (desno) [24]

4.2.4. SIMATIC ET200SP

SIMATIC ET 200SP je distribuirani I/O sustav za povezivanje procesnih signala sa središnjim kontrolerom putem PROFINETA-a. Zbog svoje skalabilnosti i fleksibilnosti, jedan je od najpopularnijih distributivnih I/O jedinica koje se danas upotrebljavaju na tržištu. Svojim dizajnom omogućava prilagodbu konfiguracije, ovisno o lokalnim zahtjevima sustava.



Slika 75. Distributivni I/O sustav ET200 SP [25]

Obično se sastoji od dvaju glavnih dijelova:

1. glavnog modula, koji povezuje ET 200SP distribuirani I/O sustav sa sabirnicom polja i razmjenjuje podatke između kontrolera više razine i I/O modula.
2. ulaznih i izlaznih modula, koji se dijele na digitalne ili analogne ulazne i izlazne module u standardnom ili sigurnosnom dizajnu, komunikacijske module za različite sustave sabirnica; pokretača motora i tehnoloških modula za širok raspon.

U sljedećoj tablici mogu se pronaći sastavnice distributivnog I/O sustava, primijenjenog za izmjenu signala između senzora i kontrolera robota.

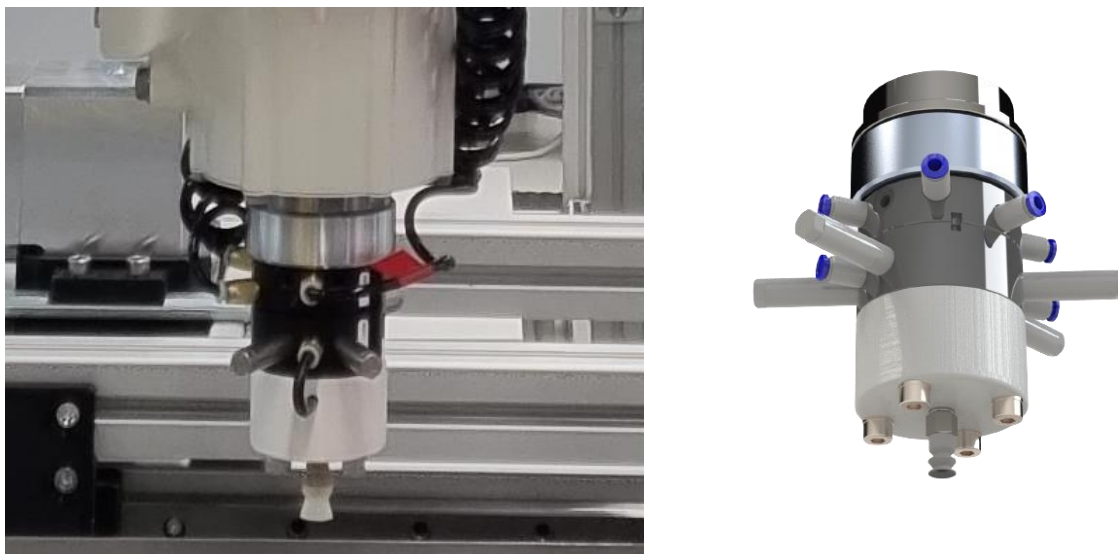
Tablica 3. Popis sastavnica distributivnog I/O sustava

| Naziv artikla | Količina | Proizvođač | Oznaka artikla |
|--|----------|------------|--------------------|
| <i>Profinet interface module,</i> IM 155-6PN, <i>Max. 12 modules, 2xRJ45</i> | 1 | Siemens | 6ES7155-6AR00-0AN0 |
| <i>Digital input module,</i> 8DI, DV 24V | 2 | Siemens | 6ES7131-6BF01-0AA0 |
| <i>Digital output module,</i> 8DO, DC 24V/0,5A HF | 2 | Siemens | 6ES7132-6BF00-0CA0 |

4.3. Integracija i instaliranje sastavnica

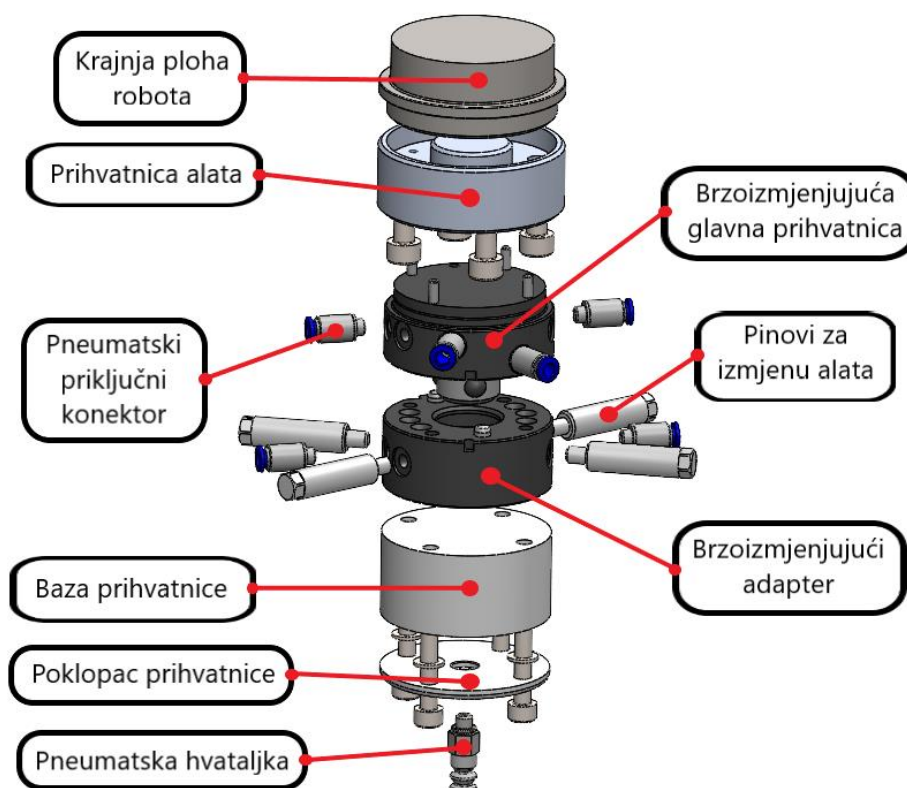
Da bi robot mogao uhvatiti objekt, potrebno je prije svega napraviti prikladnu pneumatsku hvataljku i instalirati je na krajnju plohu za montažu radnog alata robota.

Na slici 76 – lijevo prikazan je radni alat s pneumatskom hvataljkom instaliran na krajnju plohu robota, dok se na istoj slici desno može vidjeti CAD model alata, modeliran u softverskom paketu *SolidWorks*. Ovaj CAD model izrađen je da bi se što točnije sastavila prihvatnica koja povezuje pneumatsku hvataljku s robotom. Prihvatnica je izrađena tehnologijom 3D printanja s pomoću *Prusa* 3D pisača.



Slika 76. Prikaz instalirane prihvatnice pneumatske hvataljke (lijevo) i dizajniranog CAD modela (desno)

Detaljan popis sastavnica radnog alata delta-robotu DR-3iB mogu se vidjeti na slici 77.



Slika 77. Sastavnice radnog alata delta-robotu DR-3iB

Prednost ovako izvedenog radnog alata je to što je, primjenom sustava za izmjenu krajnjeg efektora proizvođača Schunk (model SWS 011), omogućena automatska izmjena alata, bez potrebe za ručnim rastavljanjem alata. Na slici 78 mogu se vidjeti sastavnice sustava za automatsku izmjenu alata robota.



Slika 78. Prikaz sustava za automatsku izmjenu alata robota [26]

Sustav za automatsku izmjenu sastoji se od brzo izmjenjujuće glavne prihvatnice i brzo izmjenjujućeg adaptera. Glavna prihvatnica montira se na robota i spaja s brzo izmjenjujućim adapterom montiranim na alat robota. Pneumatski pokretan klip, koji se nalazi na glavnoj prihvatnici, zaključava i osigurava vezu između navedenih dvaju elemenata. Uz to, nakon spajanja sustava, pneumatski i električni dodaci automatski opskrbljuju robotski alat. Tehnički podaci o Schunk sustavu za brzu izmjenu alata mogu se pronaći u navedenoj dokumentaciji [27].

Sustav za vizualnu inspekciju objekata na pokretnoj traci montiran je između delta-robota, na konstrukciju izrađenu od aluminijskih profila 30 x 30, kao što je prikazano na slici 79.

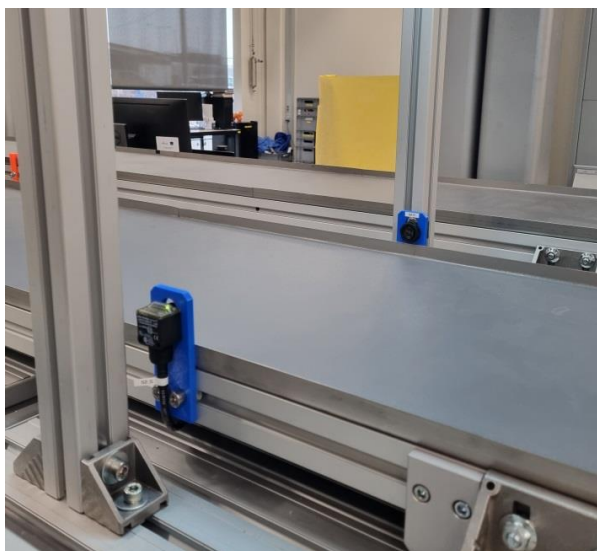


Slika 79. Prikaz instalirane *Machine Vision* rasvjete i Fanuc-kamere

Uz kameru, montirana je prednja *Machine Vision* rasvjeta, DLP difuzni rasvjetni panel proizvođača *Smart Vision Lights* – kako bi se osiguralo intenzivno osvjetljenje objekta i njegovo lakše prepoznavanje dok je u pokretu. S većim intenzitetom rasvjete, na kameri se može konfigurirati manja vrijednost vremena ekspozicije, što sprječava pojavu efekta *Blur* pri snimanju objekta u pokretu.

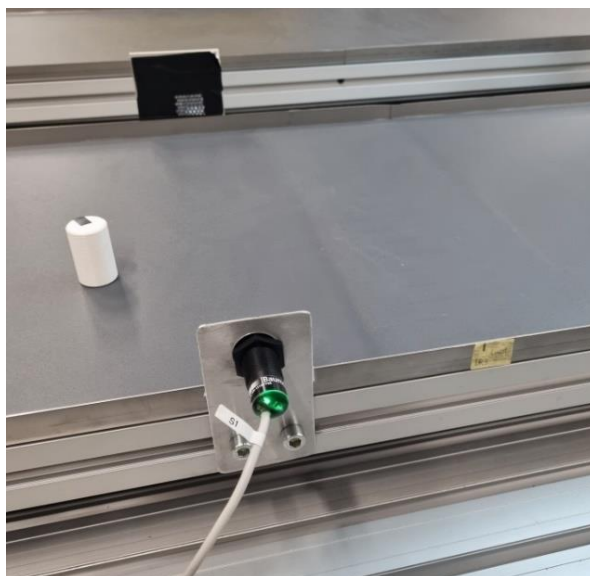
Prikazani difuzni rasvjetni panel dimenzija je 300 x 300 mm i ima otvor za gledanje od 78 mm, kroz koji kamera može snimati objekte. Tehnička dokumentacija DLP difuznog rasvjetnog panela može se pronaći u prilogu.

Na sljedećoj slici prikazan je Allen-Bradley senzor za pronalaženje prisutnosti objekta, koji se nalazi ispod kamere. Ovaj senzor pri aktivaciji šalje signal ET 200 SP distributivnom I/O sustavu, na njegov digitalni ulazni modul. Ovaj fotoelektrični senzor služi za pokretanje *iRVision* programa za pronalaženje i spremanje podataka o položaju i orijentaciji objekta na izlaznoj pokretnoj traci.



Slika 80. Prikaz instaliranog fotosenzora za okidanje kamere

Prethodno opisani retroreflektivni fotosenzor i reflektor montirani su ispred kamere u smjeru gibanja trake. Njihova je funkcija aktivacija *Line Tracking* opcije za praćenje objekta u pokretu na delta-robotu DR-3iB. U trenutku prekidanja svjetlosnog snopa odašiljača, senzor, jednako kao i fotosenzor za okidanje kamere, šalje električni signal na digitalni ulazni modul distributivnog I/O sustava. Montirani retroreflektivni fotosenzor i reflektor mogu se vidjeti na sljedećoj slici.



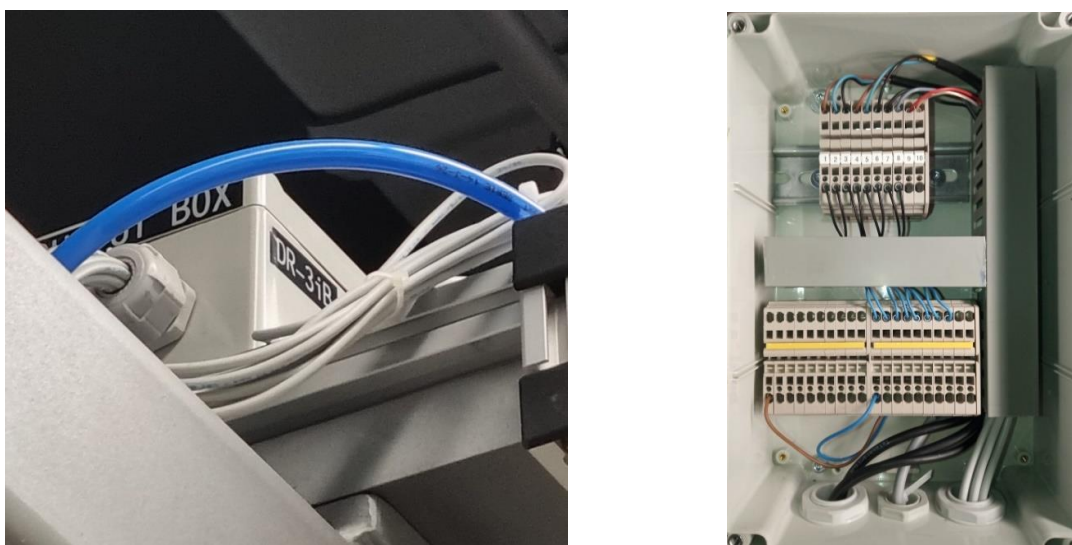
Slika 81. Prikaz instaliranog retroreflektivnog senzora

Da bi se izbjeglo nagomilavanje kabela, neurednost i greške pri ožičenju u glavnom ormaru napajanja robotske ćelije delta-robotu DR-3iB, kao i u slučaju kod delta-robotu M3-iA, izrađene su kutije za vanjsko spajanje ulaznih i izlaznih signala. Na slici 82 prikazana je *Input* kutija, na čije su redne stezaljke spojeni svi senzori koji se upotrebljavaju za kontrolu delta-robotu DR-3iB.



Slika 82. Prikaz vanjske *input* kutije za delta-robot DR-3iB

Pored baze robota postavljena je *Output* kutija, koja služi za jednostavnije ožičenje pneumatskih ventila, slika 83. Budući da su kablovi ventila prekratki da se direktno priključe na redne stezaljke modula za digitalne izlaze, bilo je ključno *output* kutiju postaviti što bliže pneumatskim ventilima.



Slika 83. Prikaz vanjske *output* kutije za delta-robot DR-3iB

Pneumatski blok s 5/2 razvodnicima, koji se može vidjeti na slici 84, montiran je na nosivu konstrukciju baze robota. Tehničke specifikacije o pneumatskom razvodniku nalaze se u prilogu rada.



Slika 84. Prikaz instaliranog pneumatskog bloka s razvodnicima

Ravne cijevi, prikazane na prethodnoj slici, s jedne su strane priključene na izlazne konektore pneumatskih ventila, dok su na drugom kraju povezane sa spiralnim pneumatskim cijevima. Spiralne cijevi provučene su kroz otvor na bazi robota i priključene na ulazne konektore glavne prihvatnice izmjenjivača alata, slika 85.



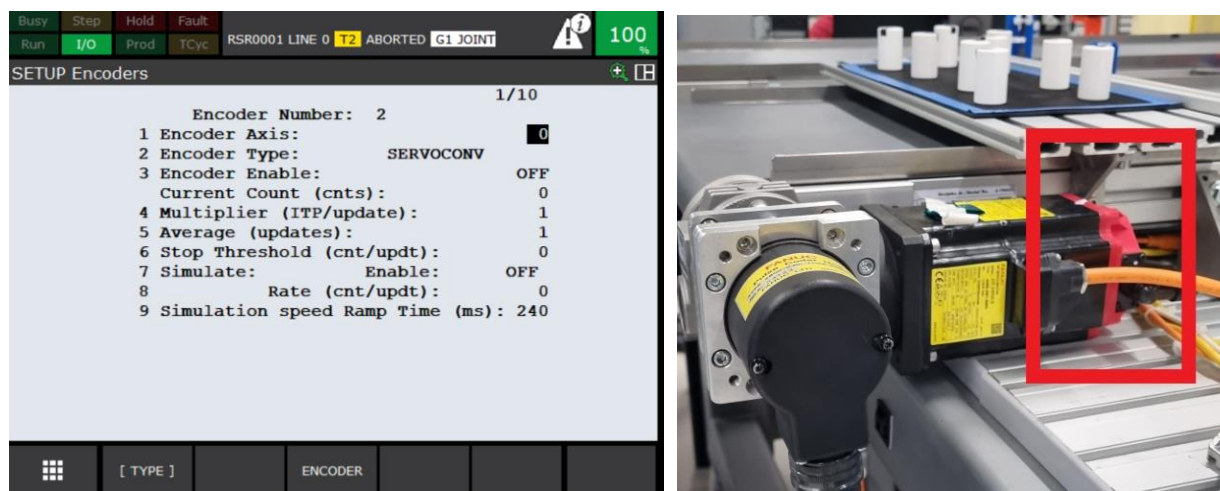
Slika 85. Prikaz spiralnih pneumatskih cijevi

Ovime je omogućeno sigurno i nesmetano pokretanje robota; bez opasnosti od presijecanja, zaglavlivanja ili zapetljavanja pneumatskih cijevi. Za ostvarivanje vakuuma pri protoku zraka kroz cijevi, upotrebljavali su se SMC generatori vakuuma modela ZU, slika 26.

4.4. Konfiguracija opcije za vizualno praćenje objekta

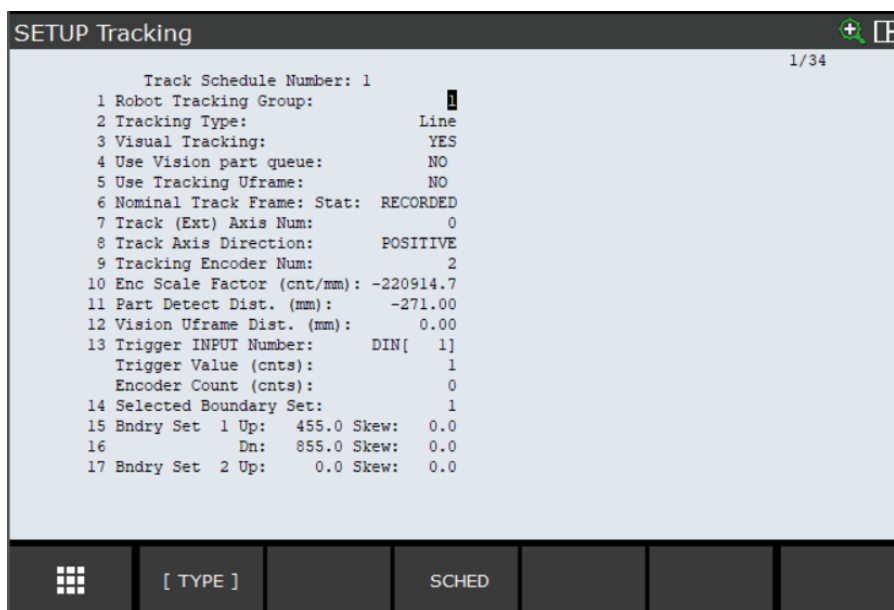
Kao što je već opisano u uvodnom poglavlju, *Vision Line Tracking* temelji se na opcijama *Line Tracking* i *Machine Vision*. Budući da su obje opcije opisane u prethodnim poglavljima, ovdje se neće detaljno objašnjavati postupak kalibracije kamere, izrade programa za prepoznavanje objekta ili konfiguracija programa za praćenje. Za više detalja o postupku kalibracije kamere i izradi programa za pronalaženje predmeta, pogledajte dokumentaciju [28], a detaljan se proces konfiguracije *Line Tracking* opcije može pronaći u priručniku [20].

U ovom su potpoglavlju prikazani i komentirani pojedini parametri obje opcije, koji se razlikuju od prethodno opisanih. Na slici 86 može se vidjeti konfiguracija enkodera Fanuc-servomotora koji pokreće izlaznu pokretnu traku. Može se primijetiti da je za značajku *Encoder Type* odabrana opcija *SERVOCONV*.



Slika 86. Konfiguracija enkodera servomotora (lijevo), prikaz enkodera servomotora koji pokreće izlaznu pokretnu traku (desno)

Ova opcija odabire se kada se upotrebljava funkcija *Servo Conveyor Line Tracking*, kojom se omogućuje upravljanje pokretnom trakom čiji je servomotor postavljen kao neovisna proširena os. Servomotor izlazne pokretne trake postavljen je tijekom kontroliranog pokretanja u izborniku za održavanje, kao prva os grupe 2. Time je definiran kao neovisna proširena os robota. Na slici 87 mogu se vidjeti odabrani parametri pojedinih značajki konfiguracije opcije *Tracking*.



Slika 87. Prozor za konfiguraciju parametara opcije *Tracking*

S druge strane, unutar *iRVision* softvera, analogno su stvoreni podaci kamere te je kalibrirana Fanuc-kamera i izrađen program za prepoznavanje jednakog predmeta rada, slika 88.

| iRVision Vision Setup | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|-------|
| Name | Comment | Type | Created | Modified | Size |
| Camera Data (1) | | | | | |
| IR210178 | Calibration for MP | 2D Camera | 12-DEC-2022 09:01:48 | 29-JAN-2023 08:37:12 | 2156 |
| Vision Process Tools (1) | | | | | |
| FINDTHEOBJECT_210178 | | 2-D Single-View Vision Process | 12-DEC-2022 09:41:14 | 27-JAN-2023 10:10:04 | 25812 |

CREATE

EDIT

FILTER

COPY

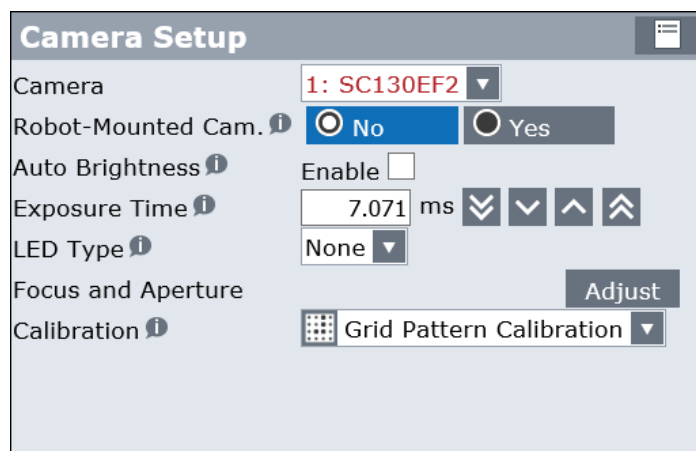
DETAIL

DELETE

Slika 88. Početni *iRVision* prozor - robot DR-3iB

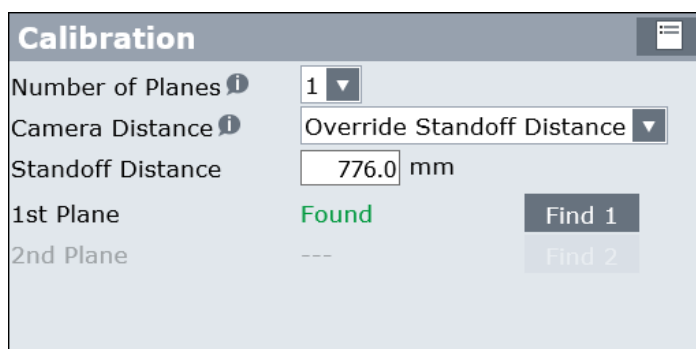
U prozoru za odabir vrste kamere odabrana je ista Fanuc-kamera SC130EF2. Na slici 89 može se primijetiti da je vrijednost vremena ekspozicije manja nego kod kamere konfigurirane za SCARA robot SR-6iA, iako je jednaka svjetlina okolnog okruženja. Razlog

tomu je postavljena *Machine Vision* rasvjeta, kojom je intenzitet osvjetljenja na područja gledanja kamere značajno povećan.



Slika 89. Prozor za odabir kamere - robot DR-3iB

Kao što je već spomenuto, na kameru je instaliran objektiv s promjenjivom žarišnom duljinom. Koristeći se takvom vrstom objektiva, tijekom podešavanja oštine slike mijenja se žarišna duljina i jedini poznat podatak je udaljenost kamere od kalibracijske mreže. Zbog toga je u prozoru za kalibraciju pod parametrom *Camera Distance* odabrana opcija *Override Standoff Distance*.



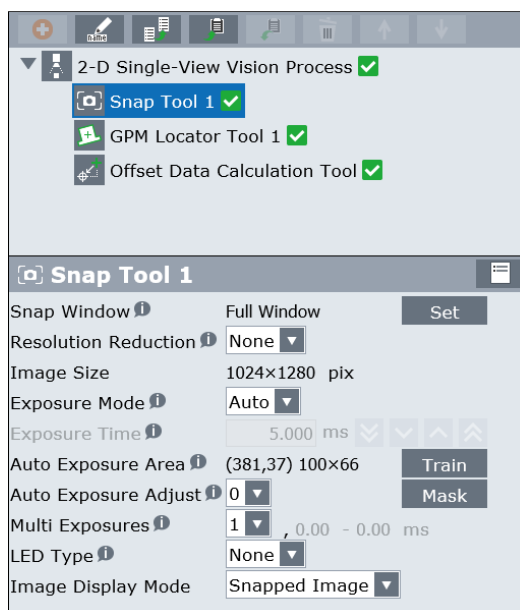
Slika 90. Prozor za definiranje udaljenosti između kalibracijske mreže i kamere - robot DR-3iB

Na sljedećoj slici prikazan je prozor s rezultatima kalibracije kamere. Može se primijetiti da je softverski izračunata žarišna duljina približno jednaka 14 mm.

| Calibration Result | | | | | |
|---|-------|---|------|---|--------------|
| Make sure that the focal distance is roughly accurate, and that the mean error value and the maximum error value are not too large. | | | | | |
| Focal Distance | | | | | 13.87 mm |
| Standoff Distance | | | | | 776.0 mm |
| Scale | | | | | 0.297 mm/pix |
| Mean error value | | | | | 0.429 pix |
| Maximum error value | | | | | 1.056 pix |
| Position of Camera Relative to Cal. Grid | | | | | |
| X | -6.1 | Y | 23.0 | Z | 776.3 |
| W | -0.5 | P | 1.5 | R | -179.4 |
| Position of Cal. Grid Relative to App. UFrame | | | | | |
| X | -44.3 | Y | 26.4 | Z | -1515.6 |
| W | -0.0 | P | 0.0 | R | 0.0 |

Slika 91. Zaslonski prikaz rezultata kalibracije kamere - robot DR-3iB

Unutar programa za prepoznavanje objekta gotovo su svi parametri jednaki onima prikazanim u vizijskom programu za SCARA robota SR-6iA na prvoj poziciji. Na slici 92 prikazan je prozor *Snap Tool 1*, unutar kojeg se konfiguriraju parametri za prepoznavanje jednog željenog predmeta rada. Iz istog razloga kao i na prvoj poziciji, odabrana je opcija *Auto* za parametar *Exposure Mode*. Tom opcijom omogućen je automatski odabir vrijednosti *Exposure Timea*, ovisno o svjetlini okolnog okruženja koja se s vremenom mijenja. Time je osigurano da snimljena slika ima istu svjetlinu kao referentna slika.



Slika 92. Odabir opcije automatskog podešavanja ekspozicije kamere - robot DR-3iB

Kao što se može vidjeti na slici 93, program za prepoznavanje naučen je jednakim karakteristikama objekta kao i onaj prethodno opisan za SCARA robota.



Slika 93. Prozor za učenje karakteristika predmeta rada - robot DR-3iB

Prethodno opisane opcije, *Line Tracking* i *Machine Vision* konfigurirane za delta-robot DR-3iB, pružaju sve potrebne podatke za izradu *Visual Line Trackinga* unutar programa koji je opisan u nastavku.

4.5. Opis programskog kôda delta-robota DR-3iA

Buduće da je *Visual Line Tracking* kombinacija *Machine Vision* i *Line Tracking* opcija, ovdje se neće opisivati dijelovi programskog kôda jednaki onima robota SR-6iA i M-3iA.

Početna faza programa:

1. Servomotor izlazne pokretne trake konfiguriran je kao dodatna neovisna os robota. Zbog toga se za pokretanje izlazne pokretne trake upotrebljava naredba *RUN*.
2. Zatim slijedi uključivanje *Machine Vision* rasvjete, slanjem digitalnog izlaznog signala *DO[11]*.
3. Svi pozicijski registri *Buffera* za spremanje pozicija hvatanja izjednačavaju se s pozicijskim registrom *Clear_Position*, čije su vrijednosti svih parametara jednake 0.
4. Nakon toga, resetiraju se brojači obje opcije za prepoznavanje objekta, aktivira se enkoder servomotora izlazne pokretne trake i robot se šalje u početni položaj, *Home_Position*.

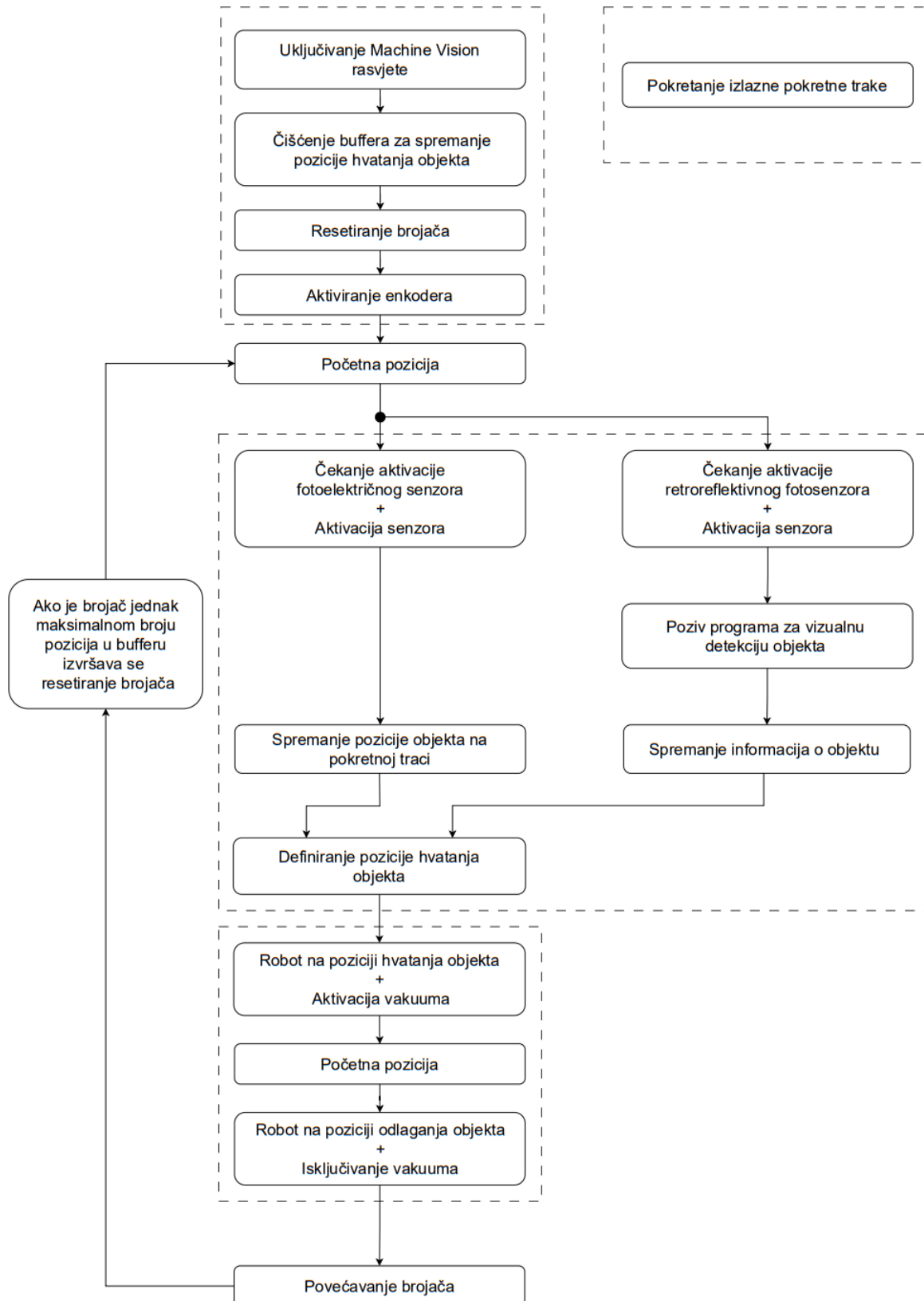
Središnja faza programa:

Kao što se može vidjeti na slici 94, programski kôd središnje faze jednak je kombinaciji programa opcija *Machine Vision* i *Line Tacking*.

5. Nakon spremanja informacija o objektu u dva zasebna *Buffera*, poziva se program za hvatanje objekta „MAIN_VIS_PICK“.
6. Unutar ovog programa, naredbom *Offset* referentnoj se poziciji za praćenje linije dodaju obavijesti o rotaciji objekta i otklonu od središta trake.

Završna faza programa:

7. Kada objekt prijeđe gornju granicu, tada se robot počinje približavati objektu i sinkronizirano ga pratiti, spušta pneumatsku hvataljku te poziva program za aktivaciju vakuuma.
8. Tada delta-robot analognim postupkom, kao i SCARA robot SR-6iA, odlaže objekt na ulaznu pokretnu traku.



Slika 94. Dijagram toka programa delta-robotu DR-3iB

Detaljan programski kôd prikazan je u prologu „Programski kod SCARA robota DR-3iB“

5. SIGURNOSNE FUNKCIJE

Danas se roboti sve više rabe u modernim industrijskim proizvodnim sustavima, što je dovelo do razvoja aplikacija u kojima je bliski kontakt ili suradnja između čovjeka i robota ključna i neizbježna. U situacijama kada ljudi i roboti izvršavaju svoje zadatke u zajedničkom radnom prostoru, gdje je interakcija između njih nužna za uspješno obavljanje zadataka, sigurnost operatera postaje jedan od najvažnijih čimbenika pri projektiranju robotskih ćelija. Prema tome, jasno je da se roboti ne mogu pustiti u rad u neposrednoj blizini ljudi bez konkretnih sigurnosnih sustava koji štite operatere od potencijalno opasnih radnih okruženja.

U nastavku je prikazano kako je ostvaren sigurnosni sustav za zaštitu robotskog radnog prostora opisanih robota.

5.1. Opis funkcije za osiguranje robotskog radnog prostora

Iako opisani sustav ne zahtijeva izravnu interakciju čovjeka i robota, bilo je nužno osigurati radni prostor robota da ne bi došlo do neželjenih posljedica, odnosno ozljeda koje bi čovjek mogao zadobiti u slučaju sudara s robotom.

Glavna je funkcija sigurnosnog sustava tijekom automatskog rada sustava za manipulaciju objektima u pokretu zaustavljanje svih robotskih zadataka ako se čovjek približi robotu i aktivira sigurnosni senzor.

Neovisno o tome koji je sigurnosni senzor aktiviran, u tom trenutku svi roboti prestaju s obavljanjem svojih zadataka, sve dok operater ne provjeri status robota, ne osigura okolinu i ponovno ne pokrene sustav.

5.2. Opis primijenjenih sigurnosnih senzora

Sigurnosni senzori koji upotrijebljeni za osiguranje radnog prostora su kompaktne sigurnosne zavjese serije EOS4, uz module sučelja proizvođača ReeR. Svjetlosna zavjesa serije EOS4 je optoelektronički sigurnosni uređaj, koji se sastoji od odašiljača i prijemnika s automatskim resetiranjem i služi za zaštitu osoblja pri radu u rizičnim okruženjima.

U tablici 4 nalaze se nazivi, vrsta i proizvođač upotrijebljenih sigurnosnih sastavnica.

Tablica 4. Popis sastavnica sigurnosnog senzora

| Vrsta uređaja | Naziv uređaja | Proizvođač |
|------------------------------|---------------|------------|
| Odašiljač sigurnosne zavjese | EOS4E 1505 A | ReeR |
| Prijemnik sigurnosne zavjese | EOS4R 1505 A | ReeR |
| Modul sučelja | AD SR1 | ReeR |

Na sljedećoj slici prikazana je svjetlosna zavjesa, kao i modul sučelja, koji su instalirani za zaštitu robotskih ćelija robota M-3iA i DR-6iB.



Slika 95. ReeR sigurnosna zavjesa (lijevo) [29] i model sučelja (desno) [30]

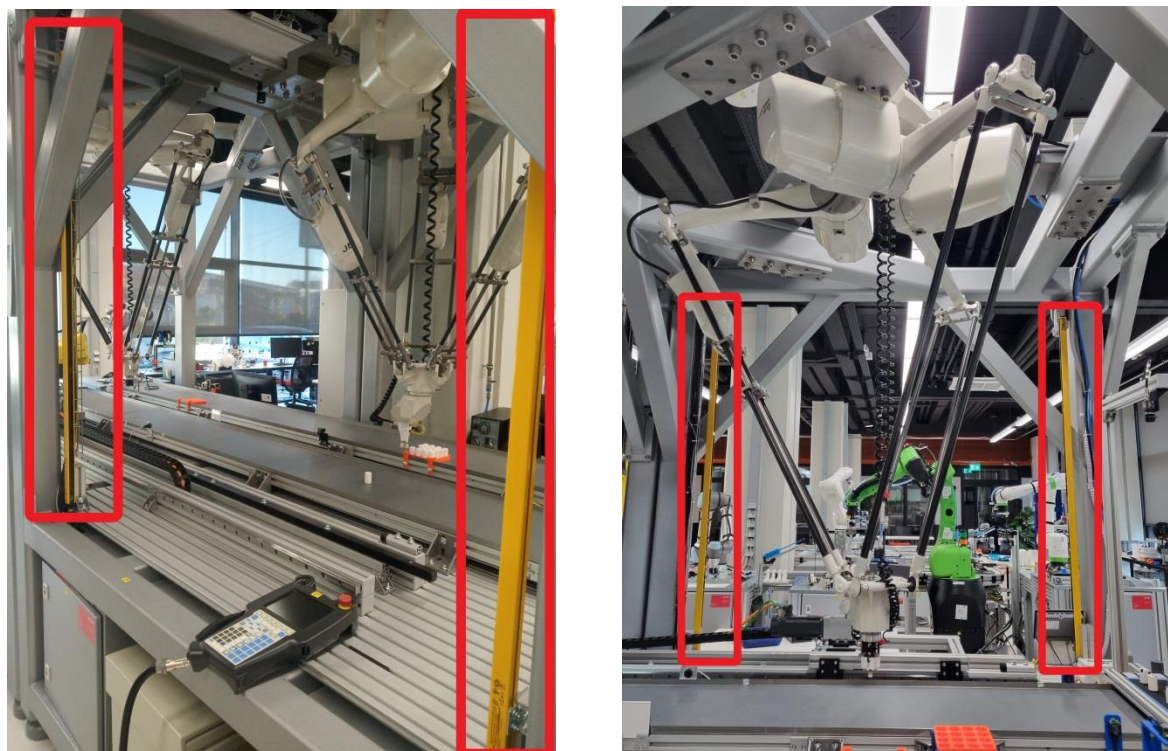
Za više podataka o navedenim svjetlosnim zavjesama, pogledajte katalog ReeR proizvoda [31], dok se podaci o modulu sučelja mogu pronaći u dokumentu [32].

5.3. Integracija sigurnosnih senzora u robotski sustav

U nastavku je opisano kako se obavilo povezivanje signala modula sučelja sigurnosnih senzora s opisanim robotima.

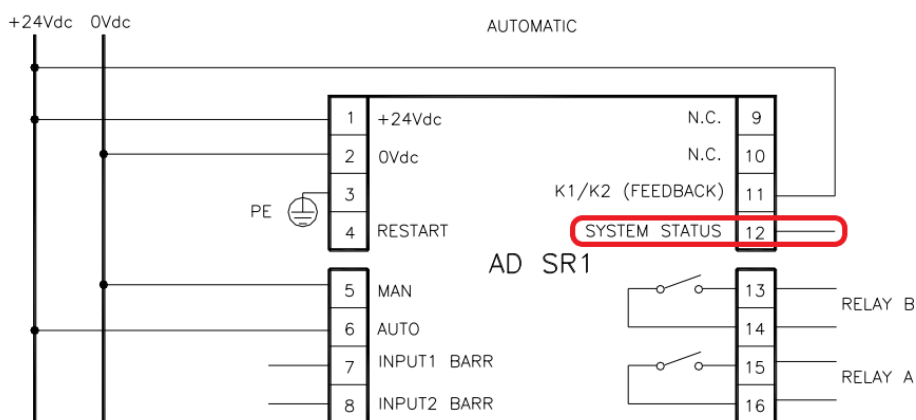
Detaljan opis montaže senzora, izrade nosača za senzor i spajanja modela sučelja na *E-stop* priključnice kontrolera robota može se pronaći u završnom radu „Oblikovanje sigurnosnog radnog prostora robota“ [33].

Na slici 96 prikazani su položaji na kojima se nalaze montirani odašiljači i prijemnici sigurnosnih senzora na robotskim ćelijama robota M-3iA i DR-3iB.



Slika 96. Prikaz montiranih sigurnosnih senzora – robotska ćelija delta-robotu M-3iA (lijevo) i robotska ćelija delta-robotu DR-3iB (desno)

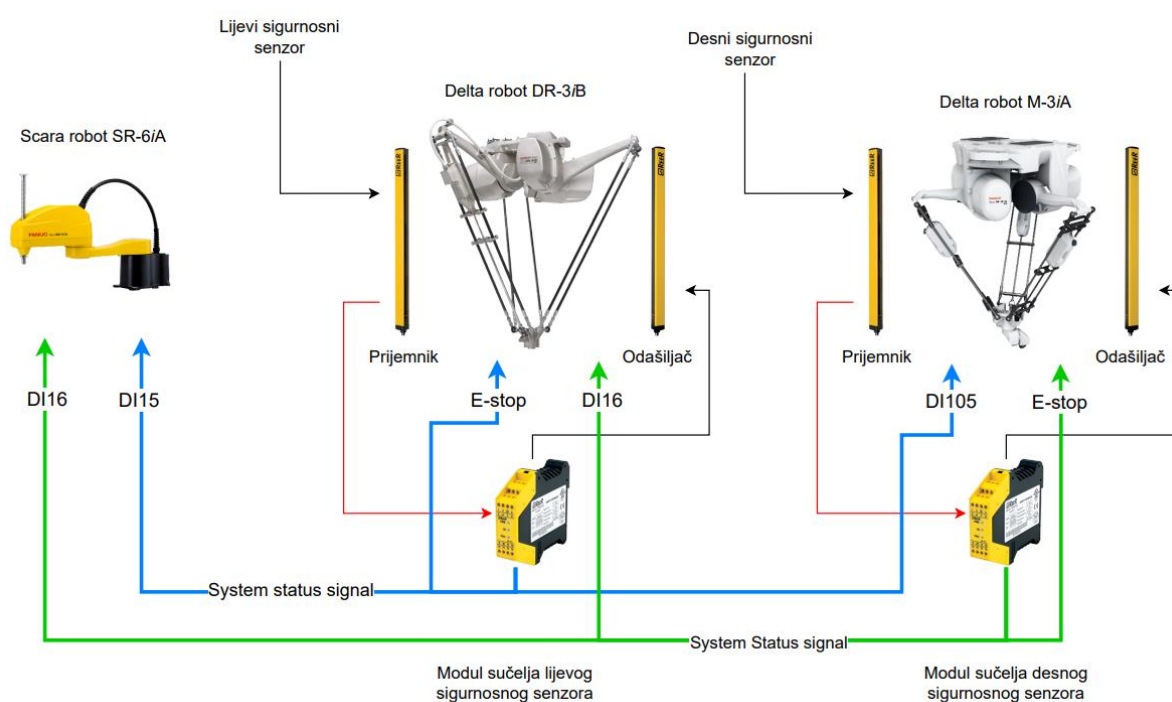
Signal koji se upotrebljava za aktivaciju sigurnosnog programa za zaustavljanja robota je *System Status* signal na modulu sučelja, koji pokazuje točno stanje izlaznih sigurnosnih releja, slika 97.



Slika 97. Elektroshema spajanja modula sučelja za automatski način rada [32]

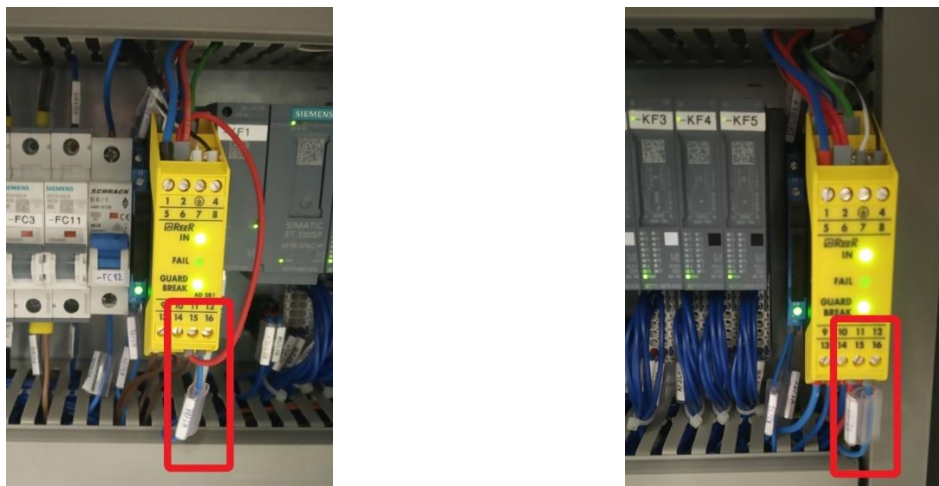
Ako je zaštićeno područje rada robota slobodno, tada su dva izlaza prijemnika aktivna, što aktivira izlazni signal *System Status*. Kada objekt veći ili jednak rezoluciji sigurnosnog senzora prekine optičku zavjesu, prijemnik deaktivira izlaze te je izlaz *System status* signala također deaktiviran.

Na slici 98 shematski je prikazan koncept povezivanja izlaznog signala *System Status* s robotima. Može se primijetiti da svi roboti dobivaju statusni signal ili relejni signal na *E-stop* priključnice, s oba modula sučelja sigurnosnih senzora.



Slika 98. Koncept povezivanja *System status* signala s robotima

Na slici 99 može se vidjeti ožičenje modula sučelja obaju sigurnosnih senzora.



Slika 99. Ožičenje *System status* signala u ormaru napajanja robota DR-3iB (lijevo) i robota M-3iA (desno)

5.4. Opis sigurnosnog programskog kôda

Funkcija sigurnosnog programa je automatsko zaustavljanje svih robotskih radnji ako sigurnosni senzori prepoznaju ulazak vanjskog tijela u zaštićeni radni prostor robota.

U tu svrhu, na privjesku za učenje na svakom robotu izrađen je program *Open Fence*, koji se pod uvjetom da se dogodi pogrešna situacija, koristi naredbom korisničkog alarma *UALM* – za zaustavljanje robota, slika 100. Korisnički alarm stavlja program u stanje alarma, ovisno o definiranim postavkama njegove ozbiljnosti, zaustavlja kretanje robota, pauzira program i generira poruku o uzroku pogreške.

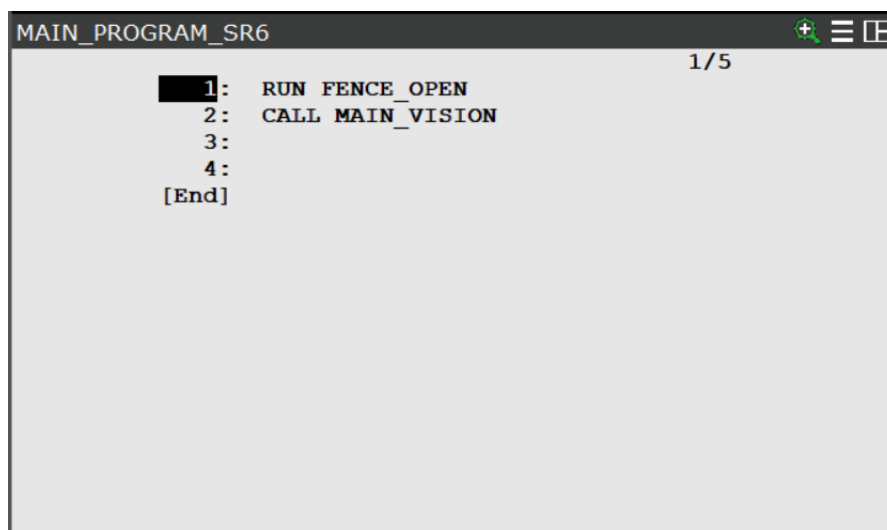
```

FENCE_OPEN
1:
2: LBL[1]
3:
4: IF DI[105]=ON, JMP LBL[2]
5: JMP LBL[1]
6:
7: LBL[2]
8: UALM[10]
9:
[End]

```

Slika 100. Sigurnosni program *Open Fence*

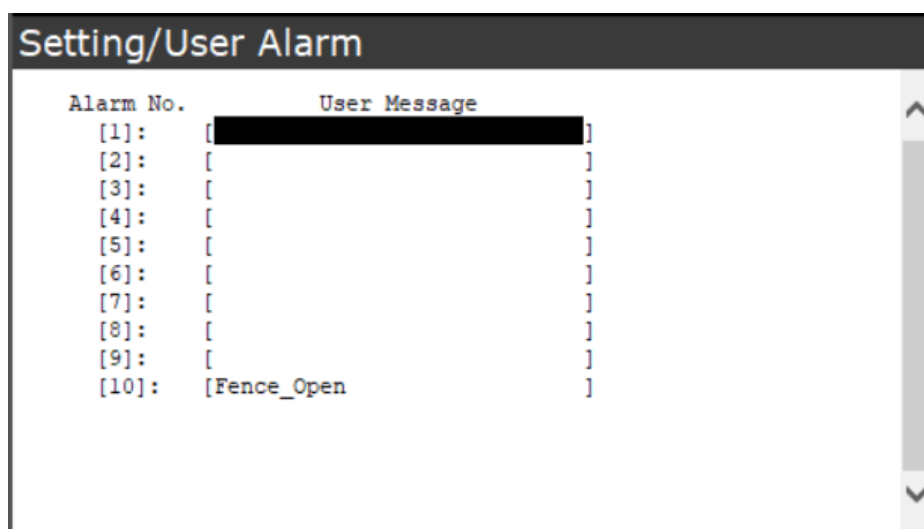
Sigurnosni program poziva se naredbom *RUN*, što omogućuje paralelno izvršavanje programa za rad robota i provjeravanje sigurnosnih signala.



Slika 101. Pozivanje programa *Open Fence* naredbom *RUN* – SCARA robot SR-6iA

Time se kontinuirano provjerava status ulaznih sigurnosnih signala na svim robotima, pa ako se samo jedan aktivira, zaustavlja se radni ciklus cijelog robotskog sustava.

Unutar opcije *User Alarm* na privjesku za učenje odabran je korisnički alarm pod brojem 10 te je upisana poruka *Open Fence*, koja se prikazuje na statusnom prozoru privjeska za učenje pri aktivaciji alarma.



Slika 102. Poruka korisničkog alarma

Prema zadanim postavkama, ozbiljnost svakog korisničkog alarma postavljena je na vrijednost 6, što pauzira program i zaustavlja kretanje robota. Za promjenu ozbiljnosti korisničkog alarma potrebno je postaviti odgovarajuću sistemsku varijablu $\$UALRM_SEV$ na vrijednost koja odgovara ozbiljnosti zadanoj pri definiranju sigurnosnih akcija sustava. U tablici 5 prikazane su vrijednosti i objašnjene akcije sistemskih varijabli. Više podataka o konfiguraciji korisničkog alarma *User Alarm* može se pronaći u priručniku [34].

Tablica 5. Opis akcija sistemski varijabli korisničkog alarma [34]

| Vrijednost | Akcija |
|----------------------------|--|
| 0 | Nema akcija |
| 2 | Pauziranje programa |
| 3 | Prekidanje programa s greškom |
| 4 | Zaustavljanje kretanje programa |
| 6 | Pauziranje programa i zaustavljanje kretanje |
| 8 | Otkazivanje kretanje programa |
| 10 | Pauziranje programa i poništavanje njegovog kretanja |
| 11 | Prekidanje programa i otkazivanje njegovog kretanja |
| 16 + bilo koja vrijednosti | Uzrokuje isključivanje servomotora |
| 32 + bilo koja vrijednosti | Uzrokuje da se radnja primijeni na sve programe i sva kretanja |
| 64 + bilo koja vrijednosti | Zahtijeva hladni start za resetiranje regulatora |

Za prekidanje svih programa i poništavanje svih pokreta robota u trenutku aktivacije odabranog korisničkog alarma, upotrebljava se kombinacija akcija vrijednosti 11 i 32.

Na slici 103 može se vidjeti da je odabrana vrijednost 43 za sistemsku varijablu korisničkog alarma 10.

| SYSTEM Variables | | |
|------------------|------|------|
| \$QUALRM_SEV | | 1/10 |
| 1 | [1] | 6 |
| 2 | [2] | 6 |
| 3 | [3] | 6 |
| 4 | [4] | 6 |
| 5 | [5] | 6 |
| 6 | [6] | 6 |
| 7 | [7] | 6 |
| 8 | [8] | 6 |
| 9 | [9] | 6 |
| 10 | [10] | 43 |

Slika 103. Vrijednost sistemske varijable korisničkog alarma

Prema slici 101, relejni izlazi modula sučelja lijevog sigurnosnog senzora spojeni su na *E-stop* ulaze delta-robotu DR-3iB. To znači da robot DR-3iB zaustavlja *E-stop* opcija ako dođe do prekidanja lijeve sigurnosne optičke zavjese. S druge strane, radni prostor robota M-3iA štiti desna sigurnosna zavjesa te se prekidanjem desne sigurnosne optičke zavjese, robot DR-3iB zaustavlja s pomoću korisničkog alarma. Kao što je prikazano na slici 98, *System signal* modula sučelja desnog sigurnosnog senzora spojen je na digitalni ulaz koji aktivira korisnički alarm robota DR-3iB. U tablici 6 može se vidjeti kako signali lijevog i desnog modula sučelja zaustavljaju programe i kretanje pojedinih robota.

Tablica 6. Način zaustavljanja robota s pomoću signala lijevog i desnog modula sučelja sigurnosnih senzora

| Robot | Lijevi modul sučelja | Desni modul sučelja |
|--------|--|--|
| DR-3iB | <i>E-stop</i> | <i>Open Fence program – User Alarm</i> |
| M-3iA | <i>Open Fence program – User Alarm</i> | <i>E-stop</i> |
| SR-6iA | <i>Open Fence program – User Alarm</i> | <i>Open Fence program – User Alarm</i> |

Detaljni opisi sigurnosnih programa *Fence Open* za svakog robota, mogu se pronaći u prilogu.

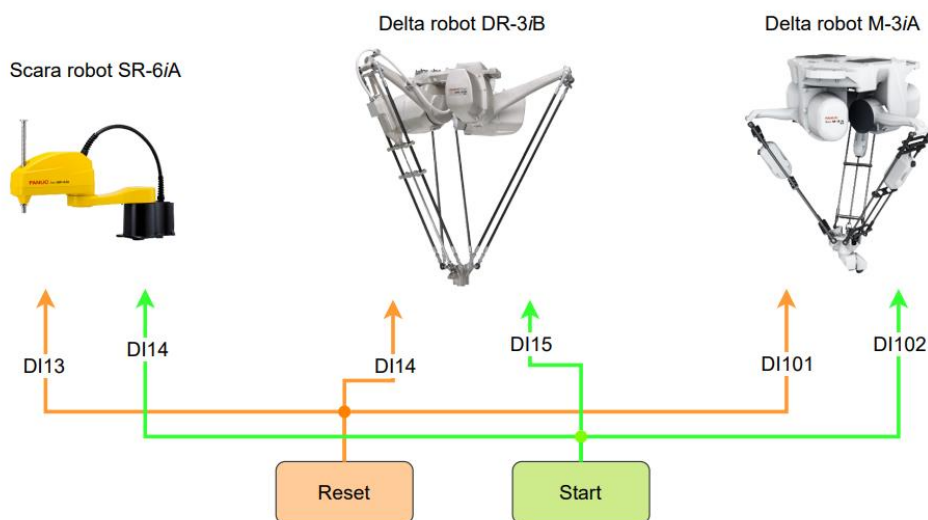
6. AUTOMATSKO POKRETANJE

Budući da se za aktivaciju sustava zahtijeva pokretanje triju robota i dviju pokretnih traka, bilo bi nespretno i teško pokretati sve navedene sastavnice pojedinačno. Zbog toga je projektnim zadatkom odlučeno da se sve sastavnice sustava pokreću automatski.

6.1. Opis funkcije automatskog pokretanja

Osnovni zahtjev za automatsko pokretanje je upravljanje sustavom s lako pristupačnog centralnog mjesta. Za centralno mjesto odabran je HMI za ručno mijenjanje brzine ulazne transportne trake, slika 107. Za pokretanje programa kada je robot postavljen u automatski način rada, potrebna su dva signala: signal za resetiranje statusa robota i signal za aktivaciju. Za ovu primjenu HMI je odličan odabir jer se jednostavno i fleksibilno mogu dodati tipke za resetiranje i pokretanje sustava na zaslon ekrana.

Na slici 104 može se vidjeti shematski prikazano idejno rješenje automatskog pokretanja cijelog sustava.

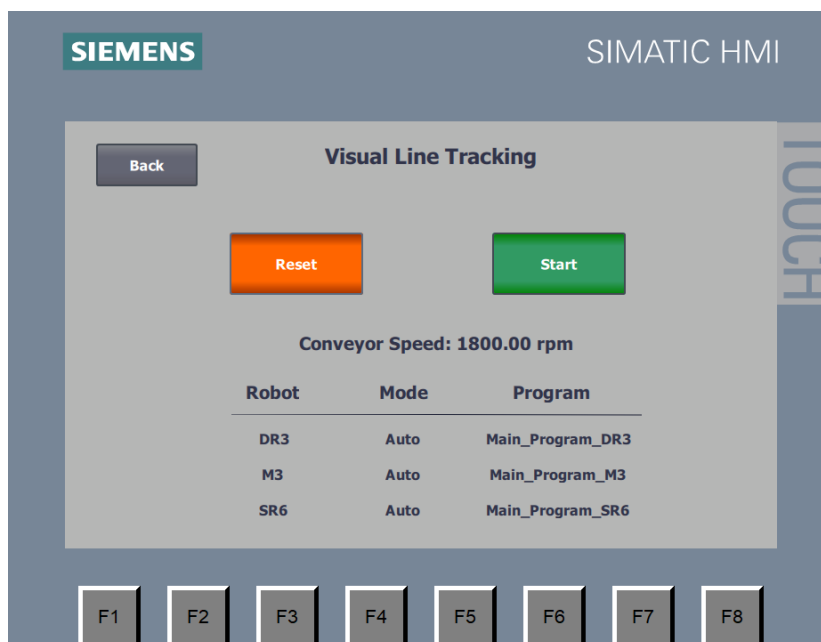


Slika 104. Idejno rješenje automatskog pokretanja sustava

Pritiskom na tipku *Reset* resetiraju se svi statusi robota, nakon čega se pritiskom na gumb *Start* pokreću programi na svim robotima u istom trenutku. U nastavku je opisan način oblikovanja zaslona HMI-a, slanje signala prema robotima i konfiguracija programa za automatsko pokretanje na privjesku za učenje.

6.2. Oblikovanje upravljačkog HMI zaslona

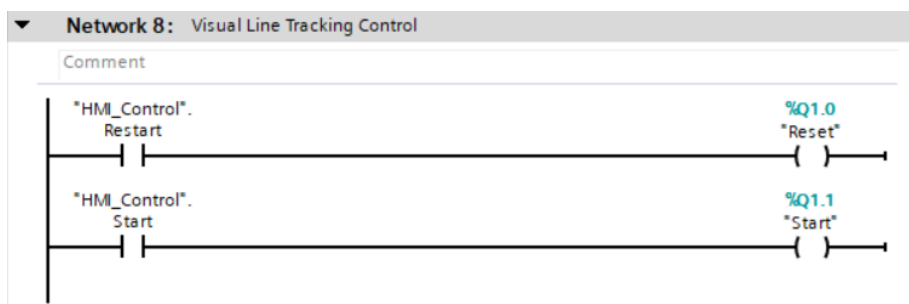
U prvom koraku izrađen je novi zaslon s tipkama *Reset* i *Start* unutar HMI konfiguracije, primjenom softverskog paketa TIA Portal, slika 105. Na zaslon za aktivaciju sustava dolazi se pritiskom na gumb *Visual Line Tracking*, koji je dodan na početni zaslon HMI-ja.



Slika 105. Zaslon za aktivaciju sustava na HMI-ju

Varijable pridružene stvorenim gumbima povezane su s varijablama glavnog programa PLC-a, putem zadane tablice oznaka koja se nalazi unutar konfiguracijske datoteke HMI-ja u TIA Portalu.

Unutar glavnog programa PLC-a implementiran je dio programa za aktivaciju izlaznih signala PLC-a pritiskom na gumb *Reset* i *Start*, slika 106.

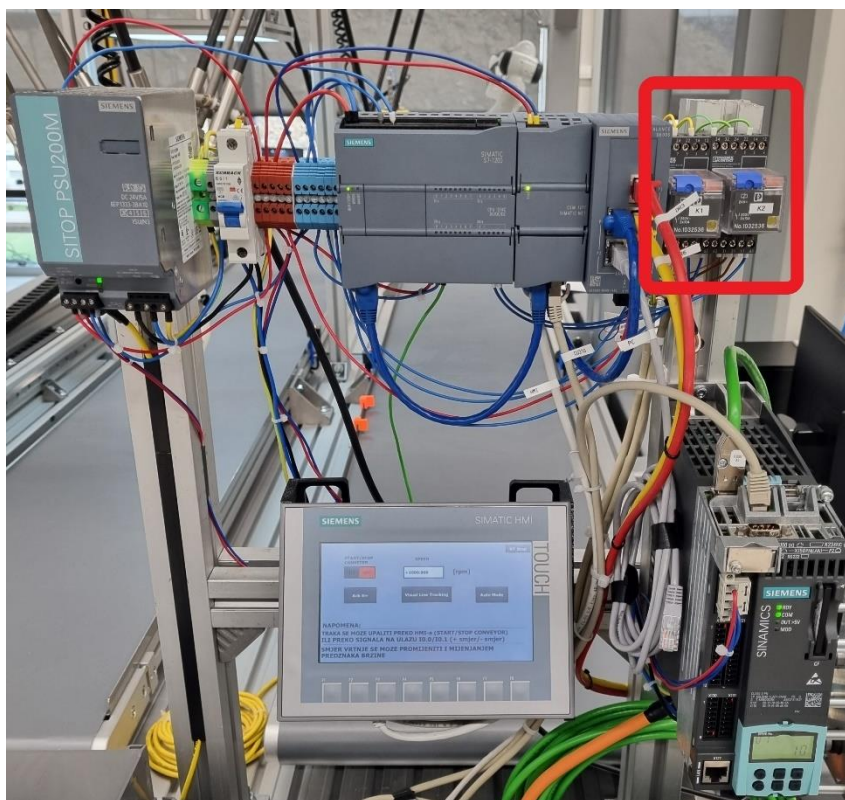


Slika 106. Dio PLC kôda za aktivaciju sustava

Detaljan opis PLC programa i konfiguracije zaslona HMI-ja za ručno pokretanje i mijenjanje brzine ulazne pokretne trake nalazi se u diplomskom radu „Automatizirana stanica za dobavu i sortiranje dijelova s pokretne trake“ [35].

6.3. Povezivanje signala PLC-a s digitalnim ulazima robota

Nakon uspješne aktivacije digitalnih izlaznih signala PLC-a, potrebno je signale za aktivaciju sustava poslati na pinove digitalnih ulaza svakog robota. Za dijeljenje signala, resetiranje i aktivaciju na trima robotima, upotrebljavao se industrijski utični oktalni relej s trima radnim preklopnim kontaktima, prikazano na slici 107.



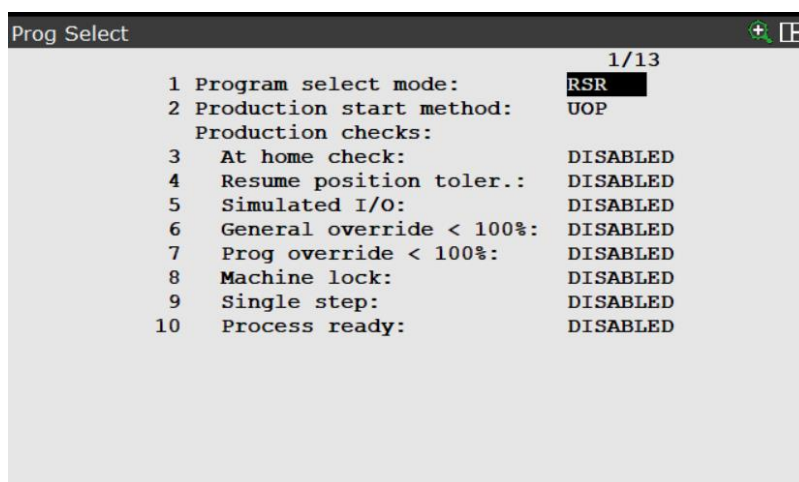
Slika 107. Prikaz releja s trima radnim kontaktima

Izlazni signali PLC-a spojeni su na kontakte za napon zavojnice releja. Takvim se pristupom, pritiskom gumba na zaslonu, aktiviraju releji koji dijele signal na sve robote.

6.4. Opis konfiguracije zahtjeva za uslugu robota

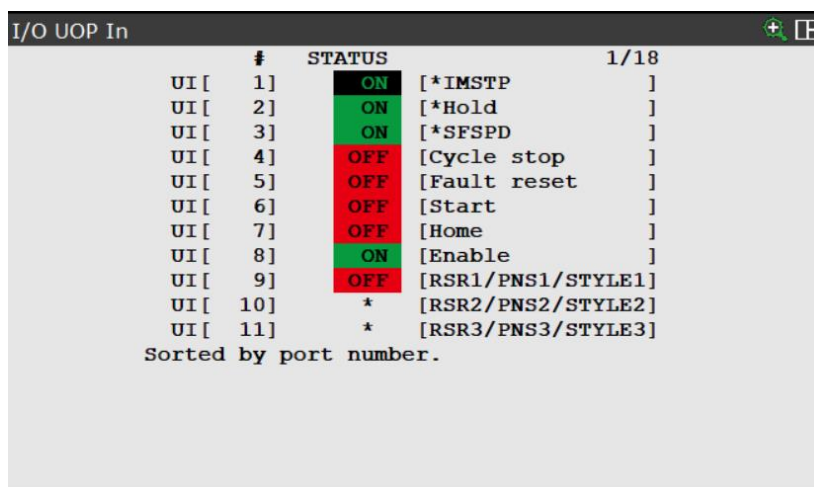
Da bi se glavni program svakog robota pokrenuo na digitalni ulazni signal, konfigurira se opcija zahtjeva za uslugu robota (RSR - *Robot Service Request*). Zahtjev za uslugu robota je zahtjev za uslugom aktivacije programa s pomoću vanjskog uređaja. Vanjski zahtjev dolazi od digitalnog ulaznog signala, koji se mapira kao signal za aktivaciju RSR zahtjeva.

Za konfiguracije zahtjeva prvo je potrebno unutar zaslona *Prog Select* izabrati opciju RSR, kao način odabira programa, kao što je prikazano na slici 108.



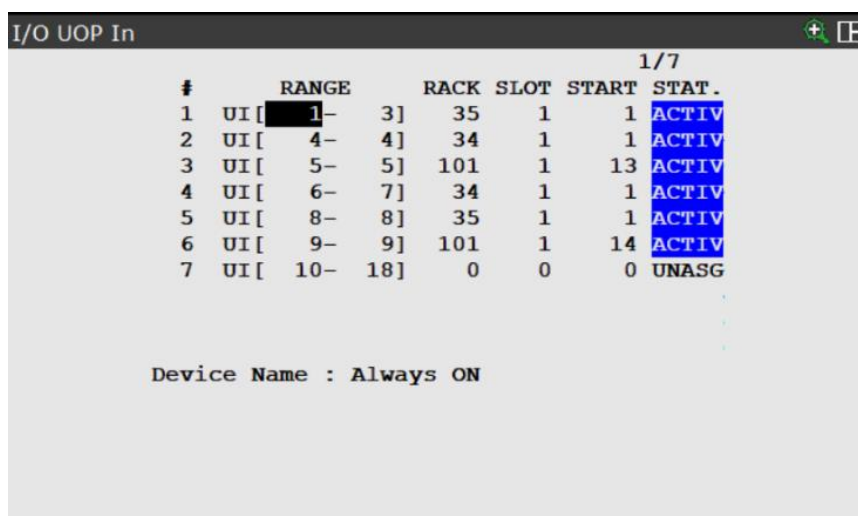
Slika 108. Postavljanje RSR opcije za način odabira programa

Zatim je potrebno ulazne signale *IMSTP*, *Hold*, *SFSPD* i *Enable* unutar prozora za konfiguraciju signala korisničke upravljačke ploče (UOP - *User Operator Panel*) postaviti da su uvijek aktivni, slika 109.



Slika 109. Aktivni ulazni signali kod RSR konfiguracije

U posljednjem se koraku digitalni ulazni signal za pokretanje sustava pridružuje signalu za aktivaciju prvog RSR zahtjeva, kao što je prikazano na sljedećoj slici.



| # | RANGE | RACK | SLOT | START | STAT. |
|---|-------------|------|------|-------|-------|
| 1 | UI[1- 3] | 35 | 1 | 1 | ACTIV |
| 2 | UI[4- 4] | 34 | 1 | 1 | ACTIV |
| 3 | UI[5- 5] | 101 | 1 | 13 | ACTIV |
| 4 | UI[6- 7] | 34 | 1 | 1 | ACTIV |
| 5 | UI[8- 8] | 35 | 1 | 1 | ACTIV |
| 6 | UI[9- 9] | 101 | 1 | 14 | ACTIV |
| 7 | UI[10- 18] | 0 | 0 | 0 | UNASG |

Device Name : Always ON

Slika 110. Mapiranje ulaznog signala za aktivaciju RSR zahtjeva

Na sučelju *Rack 101* i poziciji *Slot 1* nalaze se signali uneseni preko distributivni I/O sustava. Prema slikama 109 i 110, ulazni signal s distributivnog I/O sustava koji je mapiran na 14. poziciji ulaznih signala robota, aktivira 9. signala korisničke upravljačke ploče, odnosno RSR1 zahtjev. Kod delta-robota M-3iA, koji se koristi CRMA konektorima za primanje digitalnih ulaznih signala, 9. signal korisničke upravljačke ploče kojim se aktivira RSR1 zahtjev, mapiran je na sučelje *Rack 48*, pozicija *Slot 1*, drugi digitalni ulaz. Za više informacija o konfiguraciji RSR zahtjeva, pogledajte priručnik [34].

6.5. Pokretanje sustava

U nastavku je u nekoliko koraka opisan postupak pokretanja sustava u automatskom načinu rada.

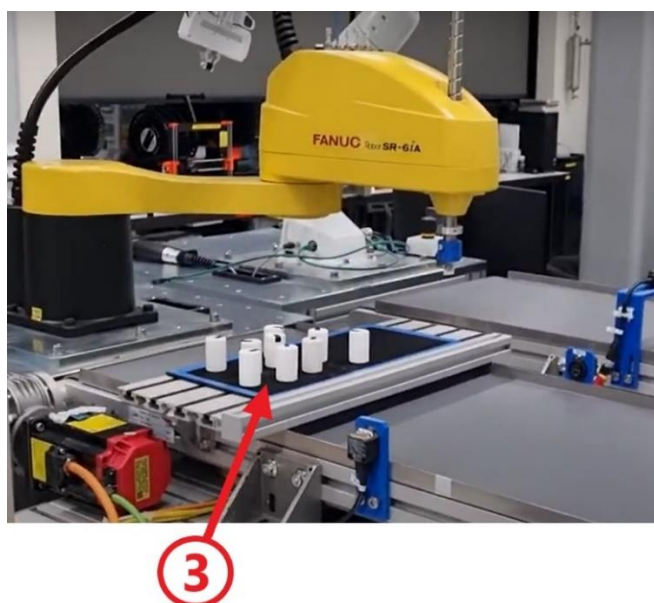
1. Potrebno je s pomoću sigurnosnog ključa sve robote postaviti u automatski način rada.
2. Nakon toga, potrebno je pritisnuti tipku *Cyclic Start* na svim robotima.



Slika 111. Postavljanje robota u automatski način rada

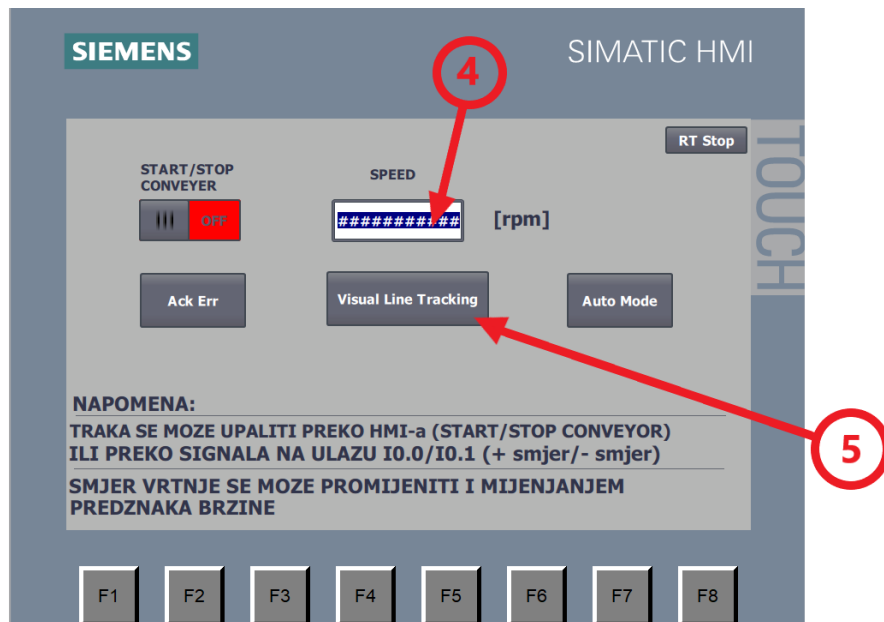
Nakon postavljanja robota u automatski način rada te pritiskom tipke *Cycle Start*, svi su roboti spremni za početak rada.

3. Postavljanje predmeta rada na nasumičan položaj u označeno područje na horizontalnoj ravnini.



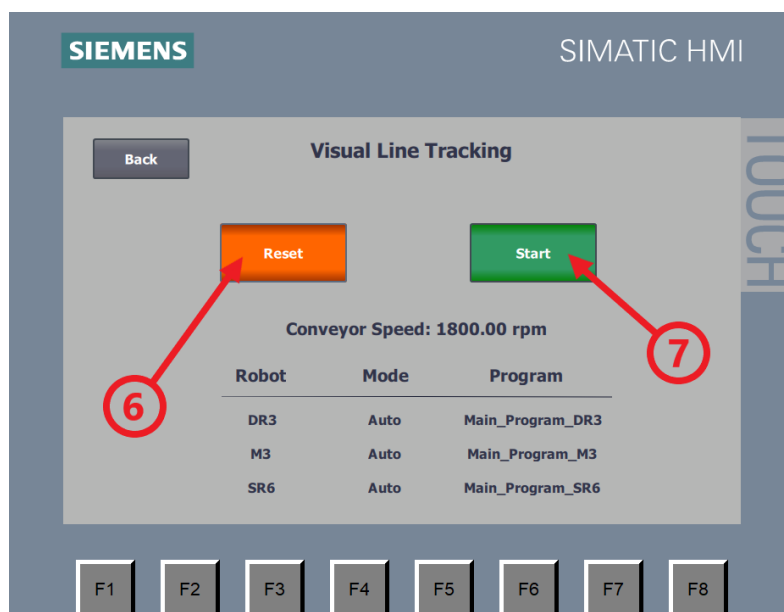
Slika 112. Postavljanje predmeta rada na horizontalnu ravninu

4. Odabir opcije za unos brzine pokretne trake te upis vrijednosti 1800.
5. Otvaranje zaslona za pokretanje sustava pritiskom na gumb *Visual Line Tracking*



Slika 113. Unos brzine ulazne pokretne trake te otvaranje zaslona za pokretanje sustava

6. Resetiranje statusa na robotima pritiskom na gumb *Reset*.
7. Pokretanje sustava pritiskom na gumb *Start*.



Slika 114. Resetiranje statusa na robotima i pokretanje sustava

7. ZAKLJUČAK

U ovom je radu opisan sustav za manipulaciju objektima u pokretu, podijeljen na tri pozicije. Prikazano je kako roboti na svakom položaju pronalaze objekte i s njima manipuliraju. Detaljno su opisane i objašnjene konfiguracije opcija *Line Tracking* i *Machine Vision* te kako se kombinacijom podataka dviju navedenih softverskih opcija izrađuje program *Visual Line Tracking*. Nadalje, prikazan je način implementacije sigurnosnog sustava za zaštitu operatera tijekom rada robota u automatskom načinu rada. Pokazano je kako je prethodno konfiguriran HMI za pokretanje i definiranje brzine ulazne pokretne trake, programiran kao centralno mjesto za aktivaciju svih robota u istom trenutku. Na kraju je u koracima objašnjen jednostavan postupak pokretanja sustava.

Ovaj je sustav konfiguriran da radi 15 *pick and place* operacija u minuti, pri brzini pokretnih traka od 100 milimetara u sekundi. Delta-roboti u neprekidnom kružnom radu hvatanja i odlaganja manipuliraju s deset predmeta rada. Iako se SCARA i delta-roboti upotrebljavaju kod aplikacija koje zahtijevaju veliku brzinu operacija, u ovom je radu zbog sigurnosti smanjena brzina.

Ukoliko se želi povećati broj *pick and place* operacija tijekom rada, utoliko je potrebno povećati i uskladiti brzine pokretnih traka tako da se objekti na obje pokretne trake gibaju jednakom brzinom. Uz to, ključno je da se u programskom kodu tijekom pomicanja na položaje hvatanja i odlaganja objekta povećaju brzine kretanja robota.

Glavna karakteristika ovog sustava je robusnost pri prepoznavanju objekta. Pri postavljanju predmeta rada na horizontalnu ravninu nije potrebno paziti na položaj ili orijentaciju objekata, već se oni mogu postaviti nasumično. Također, delta-robot DR-3iB može uhvatiti predmet rada s pokretne trake, neovisno o tome na kojem se položaju nalazi.

Bitno je istaknuti da roboti uspješno manipuliraju u pokretu s cilindričnim predmetima rada promjera 25 mm, koristeći se fiksnim pneumatskim hvataljkama bez vertikalne kompenzacije. Iz toga se može zaključiti da Fanuc-roboti obavljaju zadatke s visokom preciznošću, točnošću i ponovljivosti.

Ovaj se rad može proširiti primjenom Fanuc *iRPickTool* softverskog paketa, kojim se može na jednostavan i intuitivan način programirati sinkronizirani rad više robota na zadacima vizualnog pronalaženja objekata i manipuliranjima njima. Time bi se omogućilo manipuliranje višestrukim različitim objektima u jednom sustavu. Robot bi klasificirao objekte i dijelio ih u određene spremnike, ovisno o njihovim karakteristikama. Uz to, moglo bi ih se slagati prema posebnom rasporedu i odlagati ih u *Buffer* – ako je pokretna traka za odlaganje zaustavljena ili je paleta puna.

S druge strane, ako se želi napraviti još robusniji sustav za vizualno pronalaženje objekata, moguće je robote povezati sa sustavima umjetne inteligencije. Ovakvim rješenjem omogućuje se opažanje objekata u okruženjima koja nisu strogo definirana ili pronalaženje željenih objekata koji nemaju jednake geometrijske karakteristike kao i referentni objekt, ali imaju jednaka svojstva.

LITERATURA

- [1] <https://www.iqsdirectory.com/articles/machine-vision-system.html>, Pristupano: 10. lipnja 2023.
- [2] <https://photographylife.com/what-is-focal-length-in-photography>, Pristupano: 6. lipnja 2023.
- [3] https://www.photonics.com/Articles/CCD_Sensors_Remain_Competitive_with_Broadening/a57535, Pristupano: 12. lipnja 2023.
- [4] <https://aminekorichi.com/blog/components-of-a-machine-vision-system/>, Pristupano: 12. lipnja 2023.
- [5] <https://blogmech.com/vision-gauge-digital-optical-comparator/>, Pristupano: 13. lipnja 2023.
- [6] <https://www.instructables.com/DIY-3D-scanner-based-on-structured-light-and-stere/>, Pristupano: 4. lipnja 2023.
- [7] <https://www.youelectricalguide.com/2022/01/incremental-encoder-working-principle.html>, Pristupano: 22. lipnja 2023.
- [8] <https://www.omch.co/absolute-rotary-encoder/>, Pristupano: 22. lipnja 2023.
- [9] Fanuc Robot series R-30iB/R-30iB Mate/R-30iB Plus/R-30iB Mate Plus/R-30iB Compact Plus/R-30iB Mini Plus controller, Line Tracking, Operators manual, B-83474EN/03, Edition 03, Date Jun., 2022
- [10] Ajit Sharma, Philip Zanotti i Laxmi P. Musunur, Enabling the Electric Future of Mobility: Robotic Automation for Electric Vehicle Battery Assembly, IEEE Access, Sept. 10, 2019.
- [11] <https://www.ebay.com/p/2235315437?iid=334674212952>, Pristupano: 30. lipnja 2023.
- [12] <https://www.emicorp.com/item/GSV%2BVG%2BZU07LA/5237-SMC-ZU-Series-Lightweight-Vacuum-Generator/>, Pristupano: 30. lipnja 2023.
- [13] <https://www.fanuc.eu/cz/en/robots/robot-filter-page/delta-robots/m3-series/m-3ia-6a>, Pristupano: 30. lipnja 2023.
- [14] <https://www.mroelectric.com/product/A02B-0323-C205>, Pristupano: 28. lipnja 2023.
- [15] <https://www.sick.com/cl/en/encoders/absolute-encoders/ars60/c/g244410>, Pristupano: 28. lipnja 2023.
- [16] <https://fanucworld.com/products/a860-0301-t001/>, Pristupano: 28. lipnja 2023.

- [17] <https://www.rexelusa.com/p/97318/allen-bradley/sensor-photoelectric-polarized-retroreflective-rightsight/662468956123/42ef-p2mpb-y4>, Pristupano: 17. lipnja 2023.
- [18] Fanuc Robot series R-30iA Mate controller, Open Air, maintenance manual, B-82965EN-1/05, Edition 05, Date May., 2010
- [19] <https://www.ebay.com/itm/313958246755>, Pristupano: 17. lipnja 2023.
- [20] FANUC Robot series R-30iB controller, dual channel profinet (molex hardware), setup and operations manual, MAROBDCPN01141E REV. B
- [21] D. Filar, "Robotsko rukovanje dijelovima u pokretu", Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2022.
- [22] <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/dr-3ib-series-delta-robots/dr-3ib-8l>, Pristupano: 28. lipnja 2023.
- [23] <https://www.indiamart.com/proddetail/baumer-retro-reflective-sensor-or18-rr-pw1z-716v-25680665073.html>, Pristupano: 12. lipnja 2023.
- [24] <https://www.leuze.com/en-uk/mtks-50x50.1/50117583>, Pristupano: 12. lipnja 2023.
- [25] <https://www.awc-inc.com/category/programmable-logic-controllers-plcs/page/3/>, Pristupano: 14. lipnja 2023.
- [26] <https://schunk.com/gb/en/automation-technology/change-systems/sws/swk-011-000-000/p/000000000000302316>, Pristupano: 21. lipnja 2023.
- [27] SCHUNK, Assembly and Operating Manual, SWS Quick-Change System, 389456, 01-2022
- [28] Fanuc Robot series R-30iB Plus controller, iRVision 2D Camera Application, operator's manual, B-83914EN-2/01, Edition 01, Date Jun., 2017
- [29] <https://www.reersafety.com/en/product/eos4-1201-a-1310007/>, Pristupano: 24. lipnja 2023.
- [30] <https://www.directindustry.com/prod/reer/product-9295-1528261.html>, Pristupano: 24. lipnja 2023.
- [31] ReeR, EOS type 4 and type 2 safety light curtains, Product catalogue, 8946223 - April 2023, Issue 2 - Rev 1.6,
- [32] ReeR, Safety Modules AD SR Series, Installation Use And Maintenance, 8540644 - 07/12/2016 Rev.13
- [33] A. Lozić, "Oblikovanje sigurnosnog radnog prostora robota", Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2022.
- [34] Fanuc Robotics, system R-J2 Controller, HandlingTool Setup and Operations Manual, Version 4.4-1, MARO2HT4405801E REV. B

-
- [35] L. Baričić, "Automatizirana stanica za dobavu i sortiranje dijelova", Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2022.
- [36] Fanuc Robot series R-30iB/R-30iB Mate/R-30iB Plus/R-30iB Mate Plus/R-30iB Compact Plus/R-30iB Mini Plus CONTROLLER Operators manual (Basic Function) B-83284EN/09 Edition 09, Date Jun., 2020
- [37] TIA Portal Module 041-101 WinCC Basic with KTP700 and SIMATIC S7-1200

PRILOZI

Cjelokupni programski kodovi robota i specifikacije implementiranih uređaja dostupni su na
git-u: <https://github.com/IvanRadic97/MasterThesis>