



# **Program**

## **Digitalna transformacija robotiziranih tovarn prihodnosti**

### **DIGITOP**

#### **Rezultat D7.1:**

**Prototip senzoričnega sistema ToF, integriranega z  
robotskim krmilnim okoljem**

|                      |                                                                                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Projekt / RRP        | RRp 7, Eksperimentalni razvoj: Napredna sodelujoča robotika za digitalni prehod |
| Vrsta dokumenta      | Prototip senzoričnega sistema ToF, integriranega z robotskim krmilnim okoljem   |
| Sodelujoči partnerji | L-TEK, ULFE-LR                                                                  |
| Avtorji              | Domen Gošek, Jakob Gimpelj, Miha Mohorčič                                       |
| Datum priprave       | 30.1.2026                                                                       |

## Kazalo

|          |                                                      |           |
|----------|------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>POVZETEK.....</b>                                 | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>AKTIVNOST, NAMEN.....</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>UVOD.....</b>                                     | <b>4</b>  |
| <b>4</b> | <b>OBLIKA PROTOTIPA .....</b>                        | <b>5</b>  |
| 4.1      | SENZORSKA TISKANINA.....                             | 5         |
| 4.2      | UPORABLJENI SENZORJI IN KOMUNIKACIJA .....           | 6         |
| 4.3      | KRMILNA TISKANINA .....                              | 6         |
| <b>5</b> | <b>IZBOLJŠAVE STROJNE OPREME.....</b>                | <b>8</b>  |
| <b>6</b> | <b>OPRAVLJENE MERITVE Z BROADCOMM SISTEMOM .....</b> | <b>9</b>  |
| 6.1      | PRIMERJAVA S PREJŠNJIM SISTEMOM L4 .....             | 9         |
| <b>7</b> | <b>PROGRAMSKA OPREMA .....</b>                       | <b>10</b> |
| 7.1      | DIAGRAM POTEKA.....                                  | 10        |
| 7.2      | ZASNOVA PROGRAMSKE OPREME .....                      | 11        |
| <b>8</b> | <b>INTEGRACIJA NA DEMONSTRATORJU .....</b>           | <b>13</b> |

## Kazalo slik

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Pogled zgoraj senz. tiskanina.....                                            | 5  |
| Slika 2: Pogled spodaj senz. tiskanina .....                                           | 5  |
| Slika 3: Pogled zgoraj na krmilno tiskanino .....                                      | 7  |
| Slika 4: Pogled spodaj na krmilno tiskanino.....                                       | 7  |
| Slika 5: Realni model prototipa.....                                                   | 8  |
| Slika 6: Integracija prototipa na demonstratorski robotski roki.....                   | 9  |
| Slika 7: Diagram poteka programske opreme.....                                         | 10 |
| Slika 8: Integracija prototipa na demonstratorju.....                                  | 13 |
| Slika 9: Primerjava realnega in simuliranega okolja.....                               | 14 |
| Slika 10: Virtualni model robota in okolice z obarvanimi vidnimi polji senzorjev. .... | 15 |
| Slika 11: Primerjava realnih in povprečnih simuliranih meritev. ....                   | 16 |
| Slika 12: Primerjava realnih in izboljšanih simuliranih meritev.....                   | 17 |
| Slika 13: Graf zaznave ovir v delavnem območju robota med izvajanjem naloge .....      | 18 |

## 1 Povzetek

V okviru predstavljene aktivnosti je bil razvit in verificiran prototip naprednega ToF senzorskega sistema za zaznavanje bližnje okolice robota, namenjen uporabi v digitalnem dvojčku robotskih dinamičnih varnostnih območij. Sistem temelji na optičnih senzorjih Broadcom AFBR-S50, ki v primerjavi s prejšnjo generacijo omogočajo bistveno višje frekvence vzorčenja, manjši šum meritev ter bolj deterministično časovno obnašanje. Senzorski del je povezan s centralno krmilno tiskanino na osnovi mikrokrmilnika STM32F7, ki zagotavlja hiter in zanesljiv prenos podatkov prek ethernet povezave.

Prototip je bil integriran na demonstratorski robotski sistem in povezan z nadrejenim računalniškim sistemom, kjer se podatki obdelujejo v okolju ROS ter primerjajo z rezultati digitalnega dvojčka v simulacijskem okolju Gazebo. Razvita strojna in programska arhitektura omogoča realnočasovno delovanje, visoko zanesljivost ter jasno ločitev funkcionalnih sklopov. Rezultati meritev potrjujejo primernost sistema za uporabo v industrijskem okolju in predstavljajo trdno osnovo za nadaljnji razvoj algoritmov za zagotavljanje robotske varnosti.

## 2 Aktivnost, namen

**Digitalni dvojček za robotska dinamična varnostna območja (LTEK, YAS, ULFE-LR)** V tej dejavnosti bo L-TEK razvil izboljšano tehnologijo ToF senzorjev na industrijskem nivoju, ki bo služila kot vhod v algoritme, razvite v A3.1. Ti algoritmi bodo opazovali bližnjo okolico robota, uporabljali tehnologijo digitalnih dvojčkov in zagotavljali varnostne informacije. Prototipni sistem bo verificiran z demonstracijo v industrijskem okolju systemskega integratorja YAS (YAS, beta prototipni nivo sistema TRL 6).

## 3 Uvod

Z naraščajočo stopnjo avtomatizacije in vse večjo uporabo industrijskih robotov v neposredni bližini ljudi postajajo zahteve po naprednih varnostnih sistemih vedno strožje. Klasični varnostni pristopi, ki temeljijo na statičnih varnostnih območjih ali zunanjih varnostnih ograjah, pogosto omejujejo fleksibilnost robotskih sistemov ter zmanjšujejo njihovo produktivnost. Zato se v sodobnih industrijskih okoljih vse bolj uveljavljajo dinamični varnostni koncepti, ki omogočajo prilagajanje varnostnih območij glede na trenutno stanje robota in njegove okolice.

Eden izmed ključnih gradnikov takšnih sistemov je zanesljivo in hitro zaznavanje bližnje okolice robota. Optični ToF (Time-of-Flight) senzorji predstavljajo primerno tehnologijo za ta namen, saj omogočajo brezkontaktno merjenje razdalj z visoko časovno ločljivostjo in relativno majhnimi dimenzijami. V kombinaciji z digitalnimi dvojčki omogočajo primerjavo realnega in simuliranega sveta ter s tem zgodnje zaznavanje nevarnih situacij.

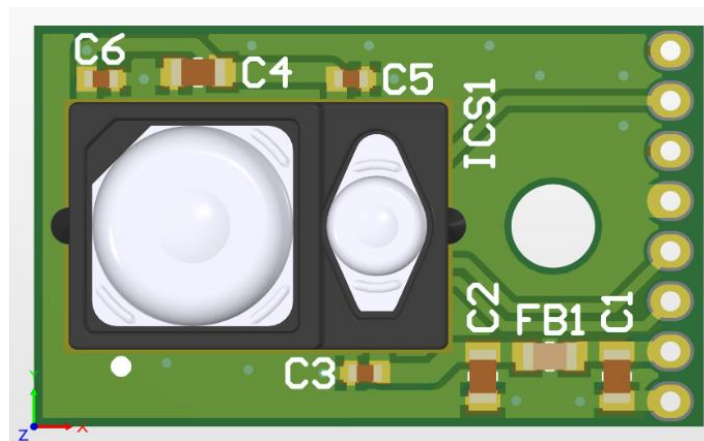
V tem dokumentu je predstavljen razvoj prototipnega ToF senzorskega sistema, namenjenega integraciji v digitalni dvojček robotskih dinamičnih varnostnih območij. Opisana je zasnova strojne in programske opreme, opravljene meritve ter integracija sistema na demonstratorskem robotskem okolju. Poseben poudarek je namenjen primerjavi z obstoječo rešitvijo ter doseženim izboljšavam, ki potrjujejo primernost novega sistema za uporabo v realnem industrijskem okolju.

## 4 Oblika prototipa

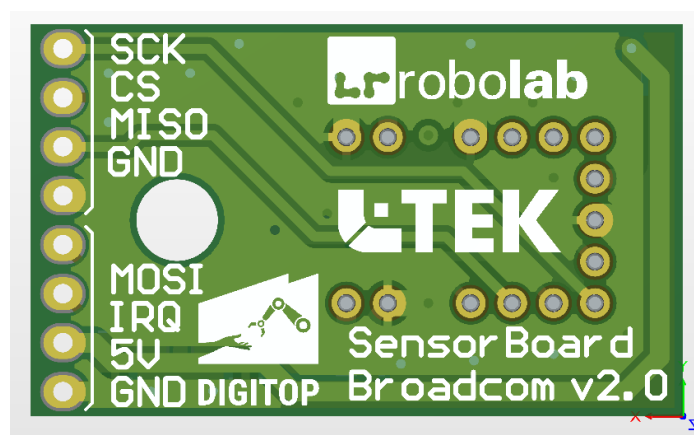
### 4.1 Senzorska tiskanina

Prototip je sestavljen iz petdelnega sklopa senzorske in krmilne tiskanine. Uporablja napredni optični senzor proizvajalca Broadcom, model AFBR-S50, kot ga vidimo na Sliki 1, ki omogoča hitro in zanesljivo zaznavanje razdalje. Sistem sestavljajo štiri enake senzorske tiskanine s pripadajočimi senzorji, ki so povezane na skupno glavno krmilno tiskolino.

Senzorska tiskanina je namensko prilagojena in zasnovana z visoko stopnjo prostorske optimizacije. Pri tem so bile ohranjene odprte možnosti za integracijo v različne vrste in oblike ohišij, kar je ključno za uporabo v industrijskih in robotskih aplikacijah. Posebna pozornost je bila namenjena razporeditvi komponent, kratkim signalnim potem in mehanski prilagodljivosti (Slika 2).



Slika 1: Pogled zgoraj senz. tiskanina



Slika 2: Pogled spodaj senz. tiskanina

#### **4.2 Uporabljeni senzorji in komunikacija**

V prejšnji različici sistema je bil uporabljen senzor VL53L4, ki je z enakim krmilnikom STM32F7 komuniciral prek periferno ločenega vodila I<sup>2</sup>C. Ta pristop je sicer enostaven za implementacijo, vendar predstavlja omejitev pri višjih frekvencah vzorčenja in večjih količinah podatkov.

V novi izvedbi je uporabljen optični senzor Broadcom AFBR-S50 (Slika 3), ki s krmilno tiskanino komunicira prek vodila SPI. SPI omogoča bistveno višje prenosne hitrosti, deterministično časovno obnašanje in boljšo skalabilnost pri več senzorjih. To neposredno omogoča višje frekvence vzorčenja ter hitrejši odziv celotnega sistema, kar je ključno pri zaznavanju hitro približujočih se ovir. Senzor uporablja svojo knjižnico pripravljeno s strani proizvajalca in je zaprta za optimizacije. Protokol komunikacije SPI je skrit in ni dostopen, vendar je postopek integracije knjižnice v programsko opremo dobro dokumentiran.

#### **4.3 Krmilna tiskanina**

Krmilna tiskanina predstavlja osrednji del sistema in je zasnovana kot prostorsko optimiziran sklop elektronike. Vključuje visoko zmogljiv mikrokrmilnik STM32F7, največji čip na Sliki 4, ki omogoča neposredno ethernet komunikacijo s strežniško aplikacijo na osnovi lastne periferije. Največja hitrost prenosa znaša 100 Mbit/s, kar v celoti zadostuje za hitro in zanesljivo posredovanje meritev senzorjev na nadrejeni sistem.

Za povezavo senzorike so uporabljeni posebej kompaktni konektorji proizvajalca Molex, ki sodijo med najmanjše konektorje, dostopne na trgu. V robotskih aplikacijah je kompaktnost izjemno pomembna, zato je bila pri načrtovanju tudi te tiskanine zahtevi namenjena posebna pozornost.

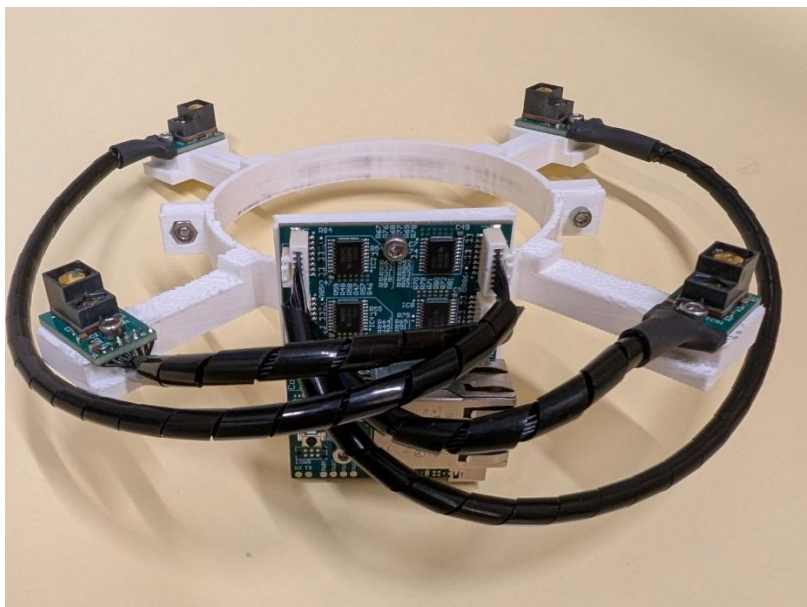
Zaradi visokih frekvenc komunikacije in daljših signalnih vodnikov smo odkrili omejitev pri zgornji meji zanesljivega prenosa. Težavo smo odpravili z implementacijo SNx4AHC245 osemkanalnega oddajno-sprejemnega čipa, ki je zasnovan za asinhrono dvosmerno komunikacijo med podatkovnimi vodili. Njegov glavni namen je ojačanje in oblikovanje signalov v čim bolj pravokotno obliko, kar bistveno izboljša integriteto signalov pri visokih hitrostih.



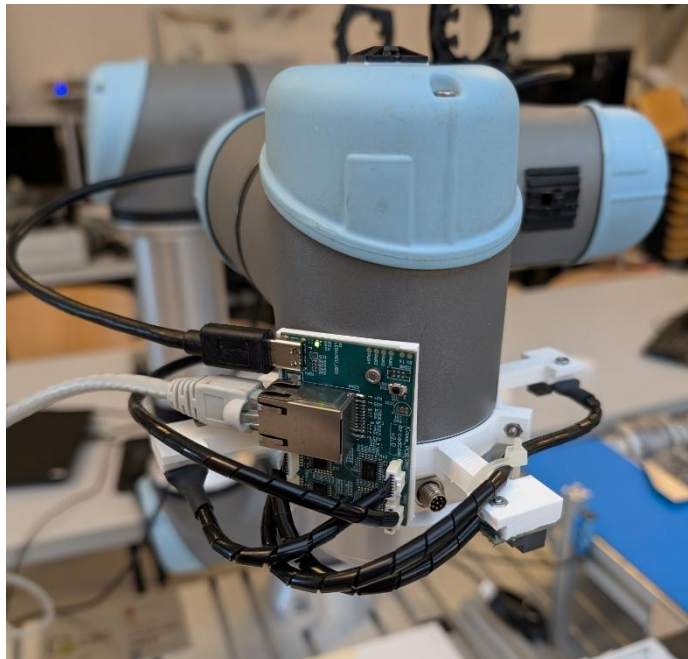
## 5 Izboljšave strojne opreme

Na začetku aktivnosti je bil razvit podoben merilni sistem, ki je temeljil na istem krmilniku, vendar brez ethernet komunikacije. Testiranja so pokazala izrazito ozko grlo pri prenosu podatkov prek prvotno predvidenega UART protokola. To omejitev smo uspešno odpravili z uvedbo ethernet komunikacije.

Zamenjan je bil tudi senzor. Prvotna rešitev s senzorjem VL53L4 je omogočala največjo frekvenco vzorčenja približno 100 Hz. Nova senzorska konfiguracija omogoča pri uporabi štirih senzorjev frekvenco vzorčenja okoli 700 Hz, pri enem samem senzorju pa do 3 kHz. Posledično sistem deluje zanesljiveje, omogoča hitrejše vzorčenje ter bistveno zgodnejše zaznavanje ovir. Okviren fizični demo model in razporeditev vidna na Sliki 5 in pritrditev na orodju robota na Sliki 6.



**Slika 5: Realni model prototipa**



**Slika 6: Integracija prototipa na demonstratorski robotski roki**

## **6 Opravljene meritve z Broadcomm sistemom**

### ***6.1 Primerjava s prejšnjim sistemom L4***

Primerjava z dosedanjim sistemom, ki je temeljil na senzorju VL53L4, je pokazala več ključnih izboljšav. Meritve prejšnjega sistema so bile obremenjene z večjim šumom, hkrati pa je bila zaradi omejitev komunikacijskega vodila I<sup>2</sup>C dosegljiva bistveno nižja frekvenca vzorčenja. To je omejevalo odzivnost sistema in njegovo uporabnost pri hitrih robotskih gibanjih.

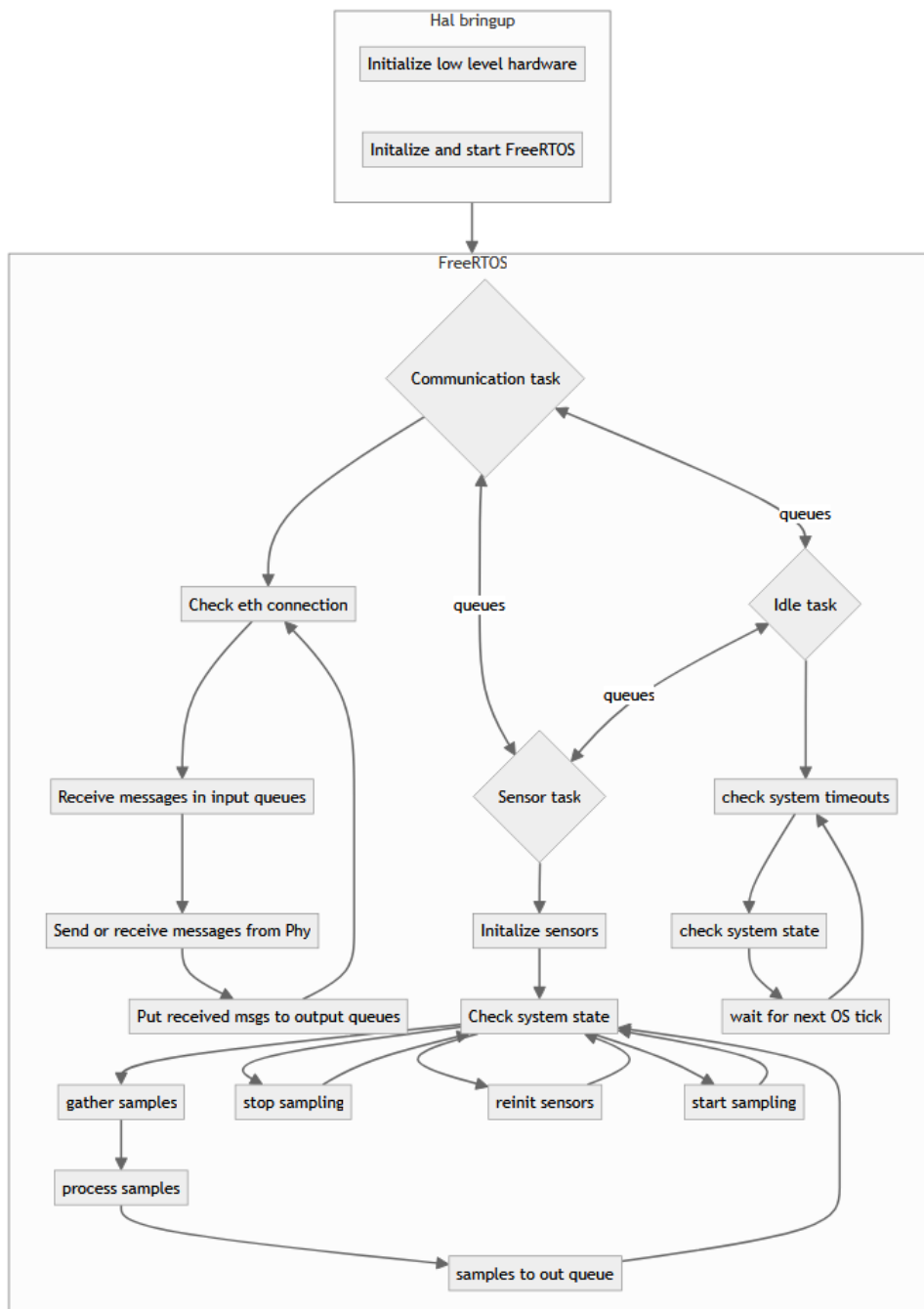
Sistem na osnovi senzorjev Broadcom AFBR-S50 omogoča bistveno višje frekvence zajema, stabilnejše meritve ter uporabo tehnik, kot sta oversampling in prilagodljivo biniranje. Medtem ko je bil pri sistemu L4 postopek biniranja izveden samodejno in brez možnosti vpliva na končni izhod, nova rešitev omogoča uporabniško nastavljivo biniranje. To omogoča optimizacijo razmerja med količino prenesenih podatkov in informativno vrednostjo meritve, saj se namesto celotne merilne matrike na nadrejeni sistem pošilja ena sama reprezentativna razdalja.

Posledično nova rešitev ne prinaša zgolj višje zmogljivosti, temveč tudi večjo fleksibilnost pri prilagajanju sistema zahtevam konkretne aplikacije ter učinkovitejšo rabo komunikacijskih in procesnih virov.

## 7 Programska oprema

### 7.1 Diagram poteka

Slika 7 prikazuje diagram poteka programske opreme.



Slika 7: Diagram poteka programske opreme

## 7.2 Zasnova programske opreme

Zasnova programske opreme je modularna in hierarhično strukturirana, pri čemer posamezni segmenti tvorijo medsebojno odvisno celoto. Takšna arhitektura omogoča visoko stopnjo razširljivosti, lažje vzdrževanje kode ter zanesljivo delovanje sistema tudi pri visokih frekvencah zajema podatkov. Programska oprema je zasnovana z mislijo na realnočasovne zahteve, deterministično obnašanje ter učinkovito rabo strojnih virov.

### Operacijski sistem FreeRTOS

Osnovni gradnik programske opreme predstavlja realnočasovni operacijski sistem FreeRTOS, ki skrbi za razporejanje opravil, časovno sinhronizacijo ter upravljanje sistemskih virov. FreeRTOS omogoča izvajanje več opravil navidezno vzporedno, pri čemer se prioritete posameznih opravil prilagajajo njihovemu pomenu in časovni kritičnosti.

Z uporabo FreeRTOS-a je zagotovljeno:

- deterministično izvajanje časovno kritičnih nalog,
- učinkovito preklapljanje med opravili,
- nadzor nad porabo procesorskega časa,
- stabilno delovanje sistema tudi pri visokih obremenitvah.

Operacijski sistem predstavlja hrbtenico celotne programske arhitekture in omogoča jasno ločitev funkcionalnih sklopov.

### Senzorska knjižnica libafbrs50\_m4\_os

Za komunikacijo z optičnimi senzorji Broadcom AFBR-S50 je uporabljena namensko prilagojena senzorska knjižnica **libafbrs50\_m4\_os**, ki je optimizirana za delovanje v realnočasovnem okolju. Knjižnica abstrahira nizkonivojsko komunikacijo prek vodila SPI ter omogoča enostavno inicializacijo, konfiguracijo in zajem meritev.

Glavne naloge knjižnice vključujejo:

- inicializacijo in nastavitve senzorjev,
- nadzor nad časovnim zaporedjem meritev,
- obdelavo surovih podatkov senzorja,
- zagotavljanje stabilne komunikacije tudi pri visokih hitrostih prenosa.

Integracija knjižnice v FreeRTOS okolje omogoča nemoteno delovanje senzorjev brez blokiranja drugih sistemskih opravil, kar je ključno za sočasno izvajanje meritev in omrežne komunikacije.

## **Podatkovne strukture in medopravilna komunikacija**

Za prenos podatkov med posameznimi opravili so uporabljene namensko definirane podatkovne strukture (vrste). Te so zasnovane tako, da omogočajo učinkovit in varen prenos meritev med senzorskim in komunikacijskim delom sistema.

Programska oprema operira z eno glavno podatkovno vrsto, ki se v opravilu za zajem podatkov iz senzorjev napolni nato pa se v omrežnem opravilu v zanki preverja ali je vrsta pripravljena za prevzem in posredovanje podatkov na omrežno povezavo.

### **Opravilo za zajem senzornih meritev**

Prvo glavno opravilo je namenjeno kontinuiranemu zajemanju meritev iz senzorjev. To opravilo deluje s prioriteto 1 (priorityAboveNormal), saj je neposredno vezano na časovno kritične zahteve zaznavanja okolice. Njegova glavna naloga je periodično sprožanje meritev, pridobivanje podatkov iz senzorske knjižnice ter njihova priprava za nadaljnjo obdelavo ali prenos.

Zajeti podatki se po obdelavi shranijo v ustrezno podatkovno strukturo in posredujejo komunikacijskemu opravilu.

### **Opravilo za omrežno komunikacijo**

Drugo glavno opravilo skrbi za vzdrževanje omrežne povezave in prenos izmerjenih podatkov na nadrejeni sistem. Opravilo je odgovorno za inicializacijo ethernet vmesnika, nadzor povezave ter pošiljanje podatkov prek omrežja.

Njegove naloge vključujejo:

- preverjanje stanja omrežne povezave,
- ponovno vzpostavitev povezave ob morebitnih prekinitvah,
- serializacijo senzorskih podatkov,
- optimiziran prenos podatkov prek ethernet povezave.

Zaradi ločitve od senzorskega opravila morebitne težave v omrežju ne vplivajo na zajem meritev, kar bistveno povečuje robustnost celotnega sistema.

## **Sinhronizacija in zanesljivost sistema**

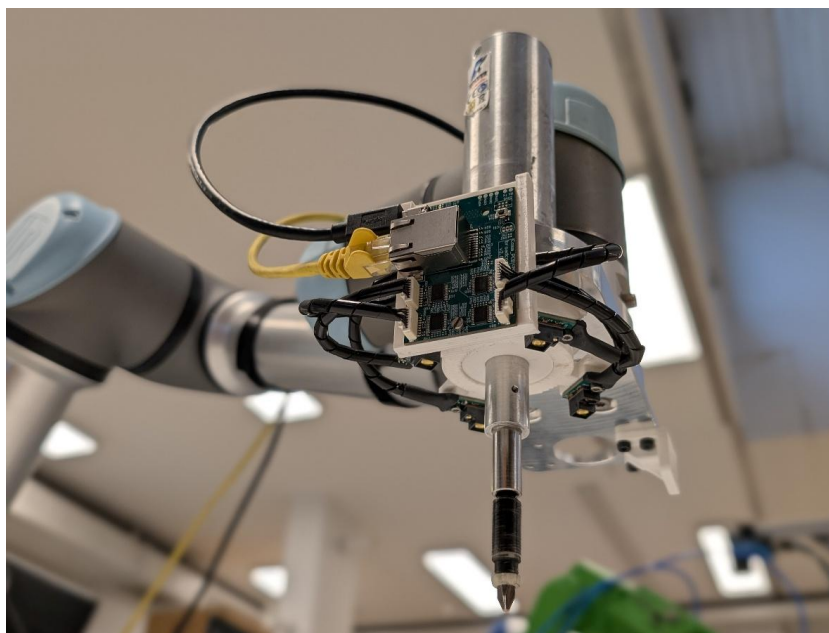
Posebna pozornost je bila namenjena sinhronizaciji med posameznimi opravili ter obvladovanju napak. Sistem je zasnovan tako, da morebitne motnje ali zakasnitve v enem delu programske opreme ne vplivajo na delovanje celotnega sistema.

Takšna zasnova omogoča:

- visoko zanesljivost delovanja,
- jasno ločitev odgovornosti posameznih modulov,
- enostavno nadgradnjo in dodajanje novih funkcionalnosti v prihodnosti.

## 8 Integracija na demonstratorju

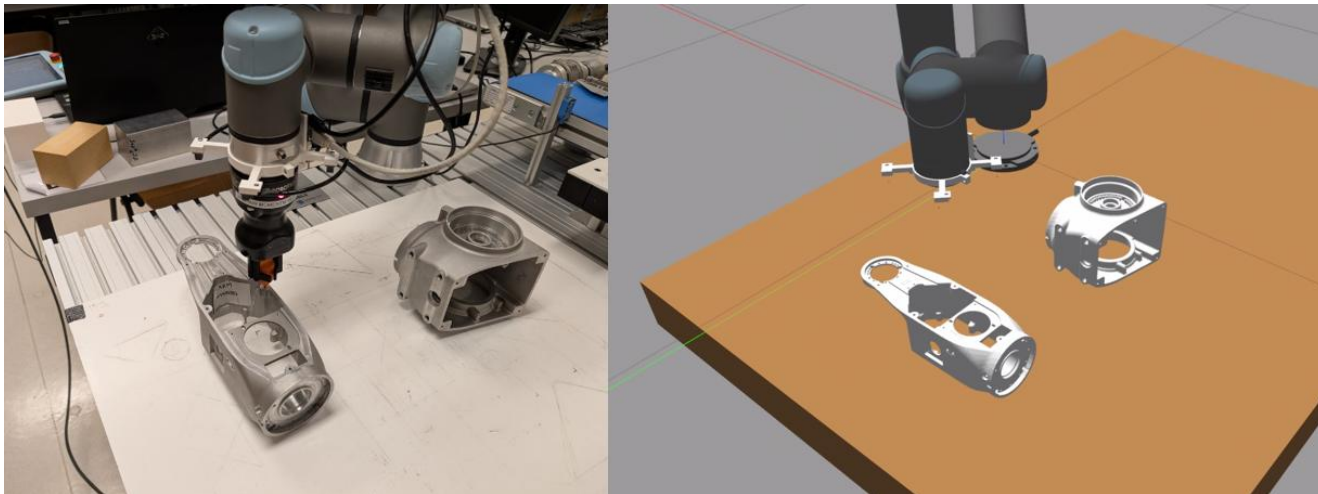
ToF senzorji so na demonstratorju nameščeni na robotsko roko in so usmerjeni v območje delovanja orodja. Senzorji so pritrjeni na namenski nosilni obroč ki omogoča natančno in ponovljivo pozicioniranje senzorjev glede na koordinatni sistem robota. Postavitev senzorskega obroča je prilagojena glede na vrsto naloge, ki jo robot izvaja. Pri nalogah prelaganja objektov (pick-and-place) je senzorski obroč nameščen na zadnji segment robotske roke, neposredno nad prijemalom, tako da senzorji spremljajo prostor v neposredni bližini orodja. Pri nalogah vijačenja pa je uporabljen prilagojen senzorski obroč, ki je nameščen v osi z vijačnikom, kar omogoča učinkovito zaznavanje okolice vrha orodja, kot je prikazano na Sliki 8.



**Slika 8: Integracija prototipa na demonstratorju**

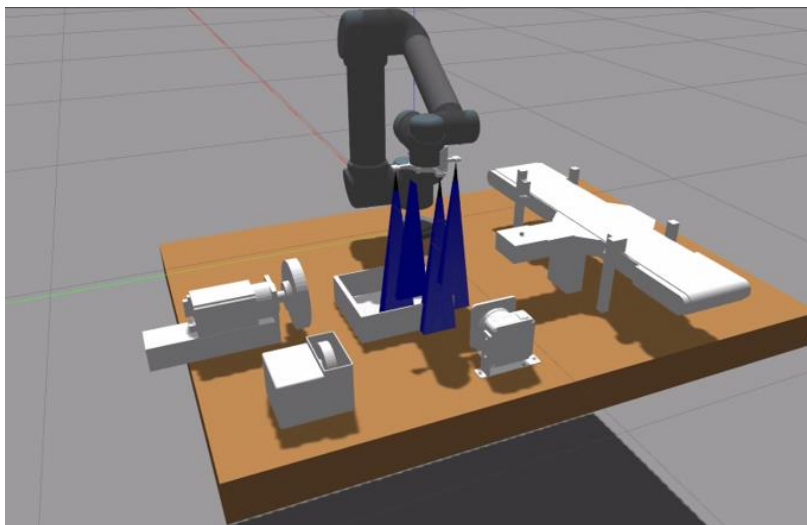
Senzorski sistem je preko Ethernet povezave povezan na računalnik, ki predstavlja osrednjo procesno enoto demonstratorja. Programska oprema na računalniku je zasnovana v okolju ROS in služi kot točka za zbiranje, časovno usklajevanje in obdelavo podatkov iz realnega sistema ter digitalnega dvojčka.

Poleg meritev ToF senzorjev računalnik v realnem času prejema tudi sklepne podatke robota v obliki ROS tem, ki opisujejo trenutno konfiguracijo robotske roke. Istočasno z zajemom senzorskih meritev se na računalniku izvaja tudi posnemanje gibanja robota v 3D simulacijskem okolju Gazebo. Na podlagi prejetih sklepnih vrednosti se virtualni robot giblje enako kot realni robot, demonstrirano na Sliki 9. S tem je zagotovljena časovna in kinematična usklajenost med obema sistemoma.



**Slika 9: Primerjava realnega in simuliranega okolja**

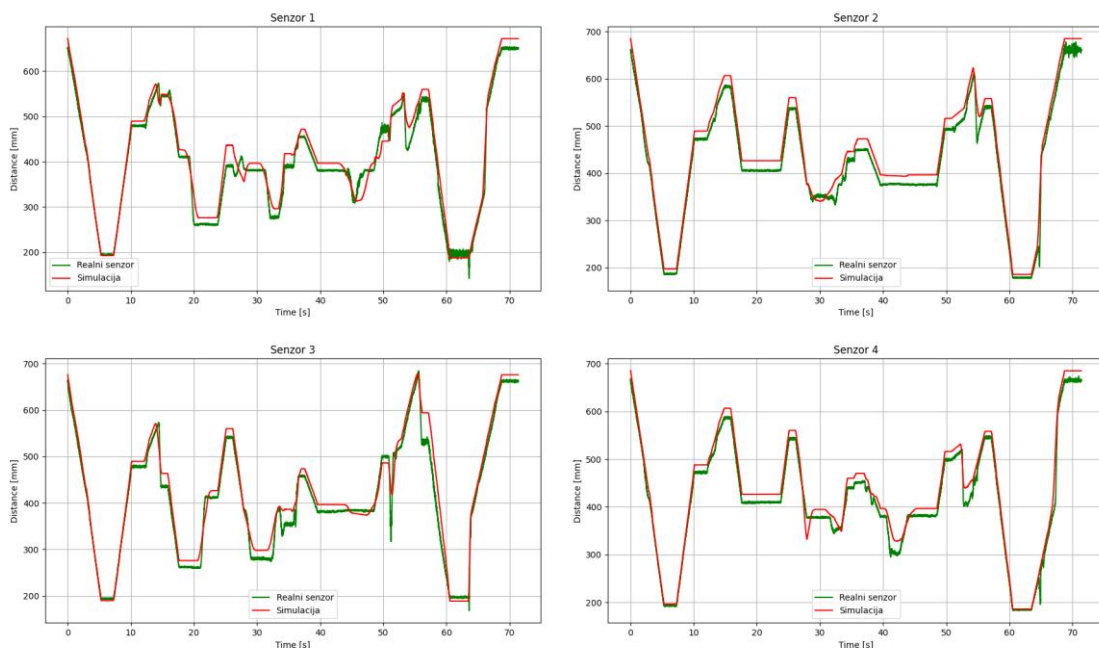
Na virtualnem modelu robota so nameščeni ToF senzorji v enaki konfiguraciji kot na realnem robotu. Simulacija za vsak senzor generira matriko razdalj, ki pokriva celotno vidno polje senzorja. Tudi okolica robota je modelirana v virtualnem okolju, kar omogoča simulacijo interakcije senzorjev z objekti v okolju. Slika 10 prikazuje primer iz okolja Gazebo, kjer so vidni model UR5e robota, vidna polja senzorjev in objekti, postavljeni v delovnem območju robota.



**Slika 10: Virtualni model robota in okolice z obarvanimi vidnimi polji senzorjev.**

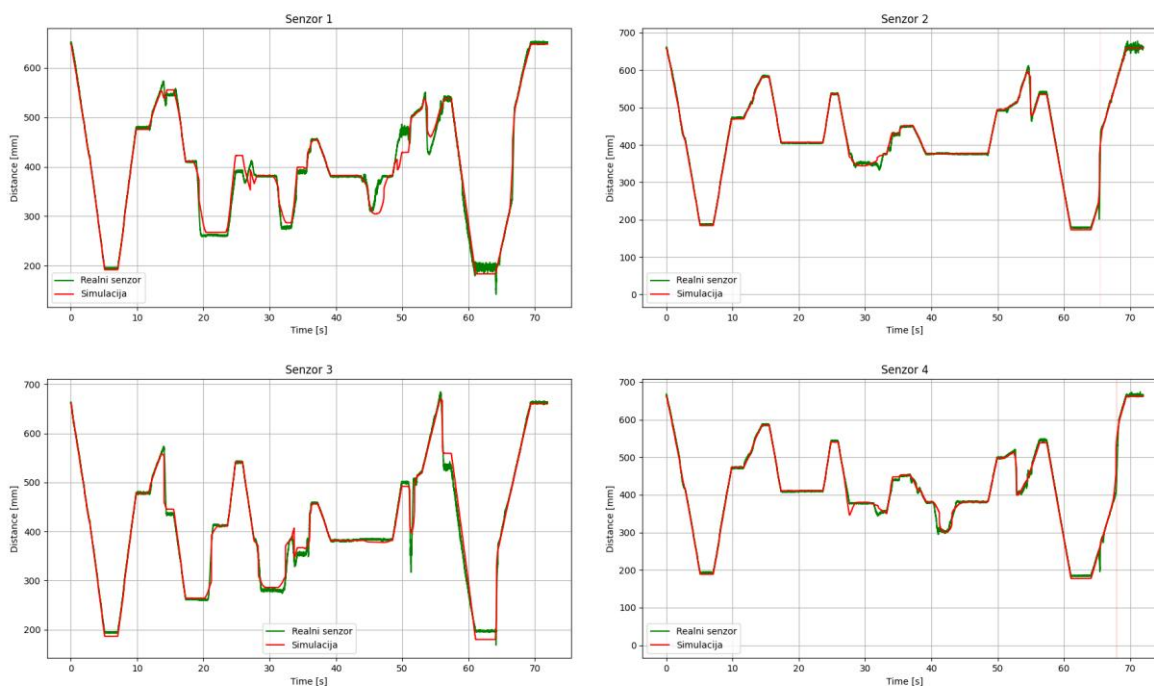
Realni ToF senzorji v vsakem merilnem ciklu vrnejo eno samo razdaljo (binnirano), ki predstavlja združeno vrednost znotraj njihovega vidnega polja. Nasprotno pa simulirani senzorji vračajo polno prostorsko informacijo v obliki matrike razdalj velikosti 32 x 32, ki vsebuje meritve posameznih žarkov znotraj istega vidnega polja. Zaradi te razlike je v programski opremi implementiran dodaten postopek obdelave simuliranih podatkov, s katerim se simulirane meritve pretvorijo v obliko, primerljivo z izhodom realnih senzorjev.

V prvi implementaciji je bila ta pretvorba izvedena s preprostim povprečenjem (aritmetična sredina) vseh veljavnih meritev v matriki. Tak pristop je računsko nezahteven in stabilen, vendar se je v praksi pokazalo, da ne zagotavlja vedno najboljše skladnosti z realnimi meritvami, zlasti v primerih, ko so v vidnem polju prisotni objekti različnih razdalj. To je razvidno na Sliki 11, kjer simulirana vrednost (rdeča krivulja) v določenih časovnih intervalih odstopa od realnih meritev (zelena krivulja), predvsem pri hitrih prehodih in delnih zakritjih vidnega polja. Prav tako je v simulaciji je vidno polje modelirano kot enakomerno in idealno porazdeljeno, brez vpliva šuma, robnih efektov in odbojnih lastnosti površin, medtem ko realni senzor zaznava kompleksno porazdelitev povratnih signalov, ki je odvisna od materiala, geometrije in kota vpadanja. Posledično se pri nehomogenih ali delno zakritih scenah odziv simuliranega senzorja lahko časovno ali amplitudno razlikuje od realnih meritev.



**Slika 11: Primerjava realnih in povprečnih simuliranih meritev.**

Zato je bila uvedena bolj natančna obdelava simulirane matrike, kjer se za vsak senzor izračuna vektor značilk (npr. aritmetična sredina, mediana in standardni odklon). Na podlagi teh značilk in realnih meritev se za vsak senzor izračunajo ter shranijo korekcijske uteži. Med delovanjem se nato za vsak simuliran vzorec izračunajo enake značilke, nato pa se izvede linearna kombinacija z naučenimi utežmi (uteženo seštevanje). Rezultat te operacije je popravljena simulirana razdalja, ki je po vrednosti in obnašanju bližje izhodu realnega ToF senzorja, vidno na Sliki 12. Na grafu je vidno, da popravljena simulacija (rdeča krivulja) v večini časovnih intervalov dobro sledi realnim meritvam (zelena krivulja), tako v stacionarnih delih kot tudi pri počasnejših prehodih med različnimi razdaljami. Kljub temu se pri hitrih spremembah geometrije okolja in pri bolj kompleksnih površinskih strukturah še vedno pojavijo lokalna odstopanja med simulacijo in realnimi meritvami.

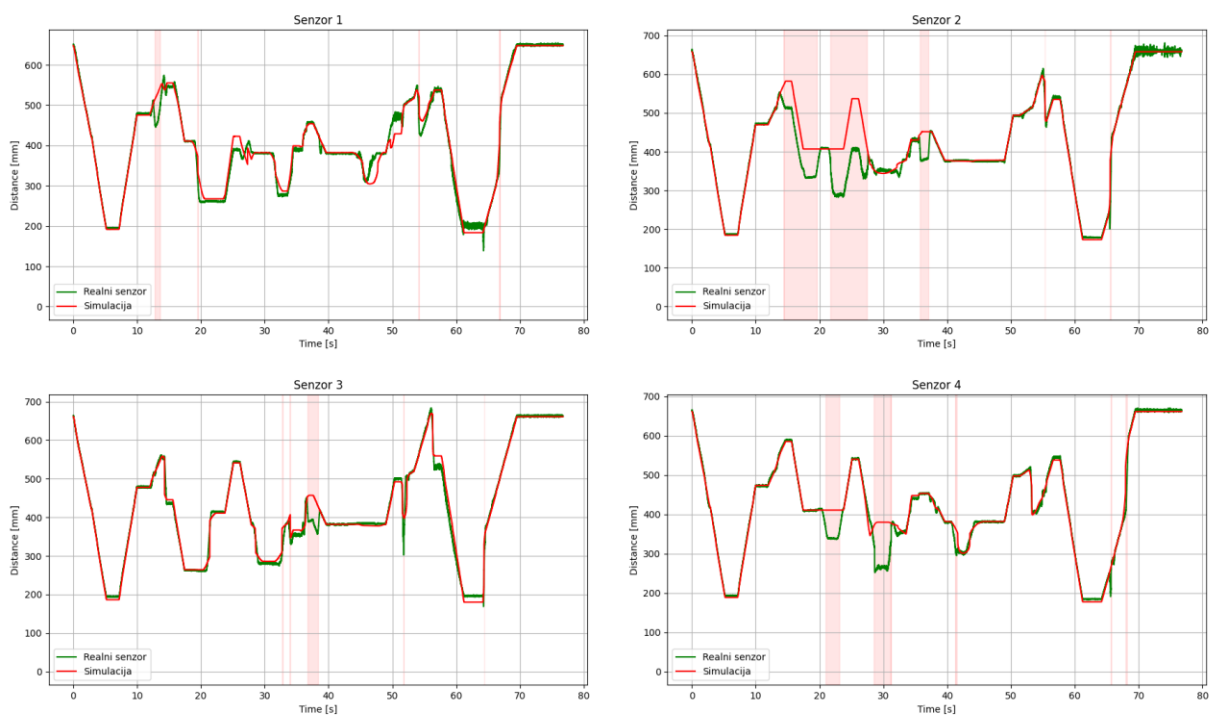


**Slika 12: Primerjava realnih in izboljšanih simuliranih meritev**

Celoten sistem deluje v realnem času in omogoča sočasno spremljanje realnih meritev ToF senzorjev ter simuliranih odzivov v digitalnem dvojčku. Zajem in obdelava podatkov potekata s frekvenco približno 200 Hz, kar pomeni, da sistem v idealnem primeru vsakih 5 ms pridobi nove realne senzorske informacije in posodobi stanje zaznavanja. Tako visoka frekvenca omogoča uporabo potrditvene logike, ki zahteva, da je zaznano odstopanje prisotno v več zaporednih meritvah, s čimer se učinkovito filtrirajo kratkotrajni odkloni in merilni šum. Zaradi razpršenosti časovnega razmika simuliranih podatkov v določenih intervalih sistem v praksi deluje z različnimi efektivnimi osveževalnimi frekvencami, kar vpliva na skupni čas zaznave, vendar ne na stabilnost delovanja.

Čeprav je sama računska obdelava posameznega cikla hitra in znaša le nekaj milisekund, skupni čas od prve zaznave potencialne ovire do programske potrditve prekoračitve ni določen z računsko zakasnitvijo, temveč predvsem s frekvenco vzorčenja in številom zaporednih ciklov, potrebnih za potrditev. V uporabljeni konfiguraciji to pomeni tipičen čas zaznave reda velikosti nekaj deset milisekund, v manj ugodnih primerih pa lahko doseže tudi sto milisekund. Po programski potrditvi se ukaz za zaustavitev robota izda takoj, pri čemer je treba upoštevati še dodatno zakasnitev samega robota, ki je povezana z obdelavo ukaza v krmilniku in z mehanskim pojmom robota do dejanske zaustavitve.

Na Sliki 13 je prikazan primer delovanja sistema v scenariju, kjer so bile v delovni prostor robota namerno postavljene ovire. Zelena krivulja predstavlja meritve realnih ToF senzorjev, rdeča krivulja pa simulirane vrednosti iz digitalnega dvojčka. Na mestih, kjer realne meritve izrazito odstopajo od simuliranih vrednosti in presežejo vnaprej določen prag, so z rdečimi območji označeni časovni intervali zaznane prekoračitve. V teh intervalih sistem prepozna prisotnost ovire v delovnem prostoru robota in sproži ukaz za zaustavitev robota. Prikazani rezultati potrjujejo, da sistem deluje stabilno, pravočasno zaznava relevantna odstopanja in je sposoben zanesljivega delovanja v realnem času tudi v prisotnosti dinamičnih sprememb v okolju robota.



**Slika 13: Graf zaznave ovir v delavnem območju robota med izvajanjem naloge**