

Program

**Digitalna transformacija robotiziranih tovarn
prihodnosti**

DIGITOP

Rezultat D7.3:

Prototip modularnega sodelujočega robotskega sistema, ki obsega mobilno platformo in robotski manipulator

Projekt/RRP	RRp 7, Eksperimentalni razvoj: Napredna sodelujoča robotika za digitalni prehod
Vrsta dokumenta	Poročilo o demonstratorskih posnetkih
Verzija dokumenta	V1.0
Sodelujoči partnerji	ULFE-LR, IJS-E1, YAS, LTEK, RUD
Avtorji	Aleksandar Stefanov, Jakob Gimpelj, Tilen Klemenčič, Aleš Zore, Matjaž Mihelj, Janez Podobnik, Marko Munih, Tadej Petrič, Miha Deniša, Aleš Ude, Hubert Kosler, Dominik Jezeršek, Damjana Vavtar, Klemen Zalar, Andrej Gornik, Domen Gošek, Klemen Škoda, Janez Povh, Rok Struna, Vinko Longar
Datum priprave	24. 06. 2026

Kazalo

1	Opis posameznih posnetkov	2
1.1	Demonstratorski posnetek ZAUSTAVITEV: Varnostna zaustavitev z digitalnim dvojčkom in senzorji ToF	2
1.2	Demonstratorski posnetek SKLOPITEV: Demonstracija lokalnega reaktivnega vodenja mobilnega manipulatorja	3
1.3	Demonstratorski posnetek SLAM: Zaznavanje sprememb zemljevida na podlagi senzorja 3D LiDAR	4
1.4	Demonstratorski posnetek KONČNI-DEMO: Izvedba več industrijskih nalog s pomočjo mobilnega manipulatorja	5
2	Povezava posnetkov s predlagano vsebino programa RRp 7	8
2.1	Demonstratorski posnetek ZAUSTAVITEV in vsebina programa RRp A7.1	8
2.2	Demonstratorski posnetek SKLOPITEV in vsebina programa RRp A7.3 . .	9
2.3	Demonstratorski posnetek SLAM in vsebina programa RRp A7.4	9
2.4	Demonstratorski posnetek KONČNI-DEMO in vsebina programa RRp A7.4	10
3	Predstavitev prispevkov posameznih partnerjev	11

1 Opis posameznih posnetkov

1.1 Demonstratorski posnetek ZAUSTAVITEV: Varnostna zaustavitev z digitalnim dvojčkom in senzorji ToF

Predstavljeni sistem omogoča zaznavanje nepredvidenih ovir v bližini robotskega orodja z združevanjem meritev ToF senzorjev in simulacije v digitalnem dvojčku. Namenjen je povečanju varnosti pri delu z roboti, saj ob zaznanem odstopanju med realnim in pričakovanim stanjem sproži varnostno zaustavitev.

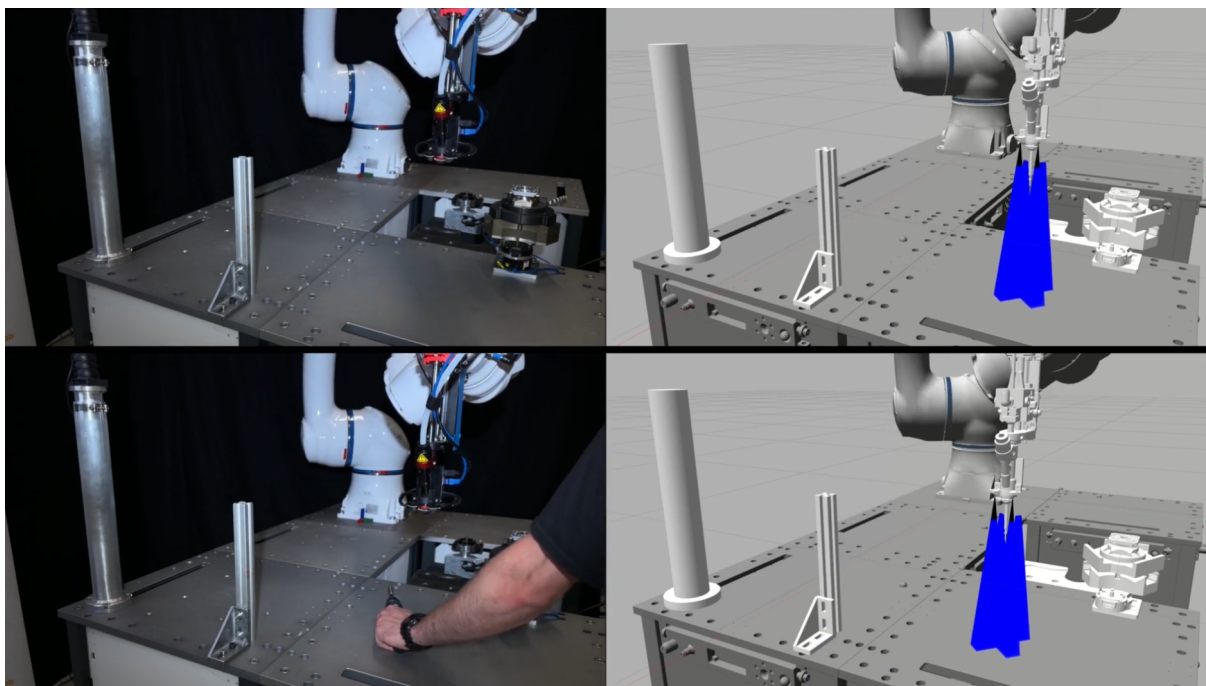
Za pravilno delovanje sistema so ToF senzorji nameščeni na konec orodja, v prikazanem primeru na vijačnik. Njihova postavitev omogoča čim boljše pokrivanje bližnje okolice konice vijačnika, pri tem pa vijačnik ne vstopa v njihovo vidno polje. Sklop sestavljajo štirje enotočkovni ToF senzorji proizvajalca Broadcom. Vsak senzor ima vidno polje velikosti $12,4^\circ \times 5,4^\circ$ in omogoča zajemanje podatkov s frekvenco do 3000 Hz. Pri razvoju sistema smo sodelovali s podjetjem L-Tek, kjer so načrtali tiskana vezja za posamezne senzorje ter mikrokrmilnik, na katerega so vsi štirje senzorji priključeni prek SPI vodil. Razvit je bil tudi namenski firmware, ki omogoča poljubno nastavljanje parametrov delovanja senzorjev, kot so merilna frekvenca, izbor zajetih podatkov in nastavitve prevzorčenja. Pri tem senzorji meritve zajemajo z višjo frekvenco, jih v določenem intervalu povprečijo in nato z nižjo frekvenco posredujejo končni napravi.

Sistem prek okolja ROS 2 spremlja trenutno stanje sklepov robota, ti podatki pa se nato preslikajo v digitalnega dvojčka. Digitalni dvojček predstavlja virtualno simulacijo robota, senzorjev in okolice, ki se izvaja v programu Gazebo. Signali senzorjev iz simulacije se sproti primerjajo z realnimi senzorskimi signali. Če se v delovnem območju robota nepredvideno pojavi ovira ali predmet in vstopi v vidno polje enega izmed senzorjev, nastane razlika med realnim in simuliranim signalom. Detektor pri tem poskrbi, da se manjša odstopanja, ki niso posledica dejanskih vdorov v delovni prostor, temveč izvirajo iz nenatančnosti simulacije, modeliranja senzorjev ali odbojev svetlobe, ne obravnavajo kot zaznava ovire.

V prvem delu videa je prikazana primerjava delovanja robota HC20 v realnem in virtualnem okolju, testirana na Inštitutu Jožef Stefan. Zgornji posnetek prikazuje gibanje robota brez prisotnih ovir. V spodnjem posnetku pa v delovno območje robota v določenem trenutku vstopi človeška roka. Ko roka vstopi v vidno polje senzorjev, sistem zazna odstopanje med realnim in simuliranim signalom ter sproži varnostno zaustavitev robota.

Drugi del videa prikazuje podobno postavitev senzorjev, tokrat na robotu UR5e. Ponovno sta prikazana realni posnetek robota in pripadajoča scena v digitalnem dvojčku. Ob vstopu človeške roke v vidno polje senzorjev sistem zazna oviro in robot se varnostno ustavi. Ko se roka odstrani, robot nadaljuje gibanje. Video prikazuje več zaporednih vdorov človeške roke v bližino robota, pri čemer se robot ob vsakem vdoru ustavi in počaka, da se ovira odstrani.

Tretji del videa prikazuje testiranje sistema v realnem industrijskem okolju v podjetju Yaskawa med dejansko nalogo vijačenja. Senzorji so, tako kot v prvem primeru, nameščeni na koncu vijačnika. Med izvajanjem vijačenja je pod senzorje postavljena človeška roka, kar povzroči zaznavo odstopanja med realnim in simuliranim stanjem ter posledično varnostno zaustavitev robota. Reprezentativni izsek iz demonstratorskega posnetka, ki prikazuje zaznavanje vdora v bližino robotskega orodja in posledično varnostno zaustavitev robota, je prikazan na sliki 1.



Slika 1: Izsek iz demonstratorskega posnetka ZAUSTAVITEV, ki prikazuje delovanje varnostnega sistema na osnovi ToF senzorjev.

1.2 Demonstratorski posnetek SKLOPITEV: Demonstracija lokalnega reaktivnega vodenja mobilnega manipulatorja

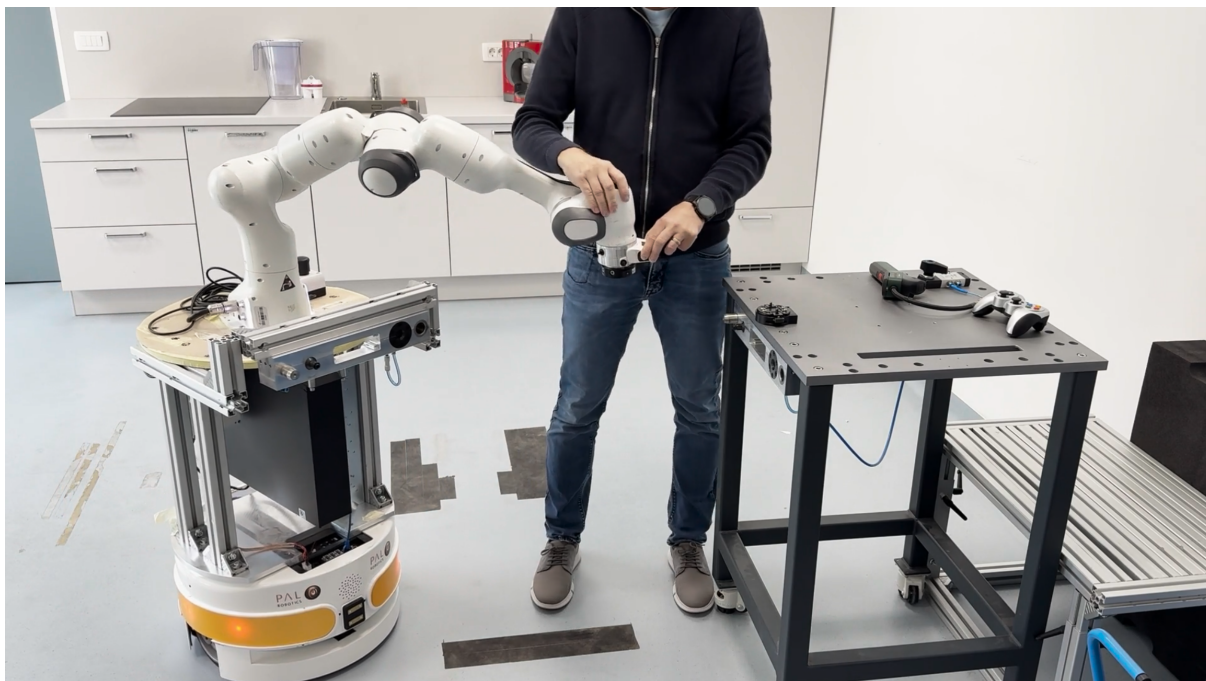
Videoposnetek prikazuje delovanje mobilnega manipulatorja, sestavljenega iz mobilne platforme in robotske roke, pri približevanju modularni delovni celici. Glavni poudarek demonstracije je na vodenju celotnega sistema: uporabnik vodi robotsko roko, mobilna platforma pa se na gibanje roke odziva samodejno. Mobilna baza in manipulator zato ne delujeta kot ločena podsistema, temveč kot koordiniran mobilni robotski sistem, pri katerem se gibanje baze sproti prilagaja relativnemu položaju vrha robotske roke.

Prikazano vodenje temelji na metodah, razvitih v okviru D3.2 – Prilagoditev trajektorije na podlagi podatkov okolice. Teoretična osnova je lokalno reaktivno vodenje mobilne baze s prostorsko moduliranim vektorskim poljem hitrosti. Ukazi linearne in kotne hitrosti mobilne platforme se izračunajo iz položaja vrha robotske roke v koordinatnem sistemu mobilne baze. Tak pristop omogoča, da se baza aktivira samo takrat, ko je to potrebno za ohranjanje dosegljivosti, ugodne konfiguracije ali razširjenega delovnega prostora, pri tem pa ni potrebna neposredna odvisnost od globalne lokalizacije ali vnaprej določene globalne trajektorije.

V kontekstu D7.3 video prikazuje praktično uporabo razvite metode kot ene od ključnih funkcionalnosti modularnega sodelujočega robotskega sistema z mobilno platformo in robotskim manipulatorjem. Sistem omogoča intuitivno premikanje mobilnega robota v sodelovalnem oziroma modularnem proizvodnem okolju, saj uporabnik z vodenjem robotske roke posredno vodi celoten mobilni manipulator, baza pa se reaktivno prilagaja trenutni konfiguraciji sistema.

V zaključnem delu videa je prikazana še uporaba istega sistema pri približevanju modularni celici in vzpostavitvi referenčnega stika z modularno mizo. Ta del demonstracije se navezuje tudi na metodologijo iz D6.2 – Mobilni roboti v rekonfigurabilnih delovnih celicah, kjer je mobilni manipulator obravnavan kot rekonfigurabilni element delovne celice.

V okviru D7.3 pa je ta zaključni del pomemben predvsem kot prikaz uporabnosti razvitega vodenja v realističnem modularnem okolju, ne kot glavni poudarek demonstracije. Izsek demonstracije lokalnega reaktivnega vodenja mobilnega manipulatorja je prikazan na sliki 2.



Slika 2: Izsek iz demonstratorskega posnetka SKLOPITEV, ki prikazuje reaktivno vodenje mobilnega manipulatorja s strani človeka.

1.3 Demonstratorski posnetek SLAM: Zaznavanje sprememb zemljevida na podlagi senzorja 3D LiDAR

Priloženi videoposnetek prikazuje eksperimentalno validacijo predlagane metodologije za nadzor veljavnosti zemljevida industrijskega okolja na podlagi 3D LiDAR senzorja. Na začetku posnetka je predstavljen uporabljeni robotski sistem. Sistem sestavlja mobilni manipulator, na katerega je nameščen 3D LiDAR senzor Ouster OS0-SR-128. Senzor je uporabljen kot dodatni zaznavni modul za opazovanje okolice industrijskega AMR-ja. Namen tega sistema ni zamenjava osnovne lokalizacije AMR-ja, ki temelji na senzorju 2D LiDAR, temveč vzpostavitev dodatnega nadzornega sloja, s katerim je mogoče oceniti, ali obstoječi lokalizacijski zemljevid še vedno ustreza dejanskemu stanju okolja.

V prvem delu posnetka sta prikazana zajem podatkov in sprotna gradnja 3D zemljevida. Med premikanjem mobilnega manipulatorja po industrijskem prostoru 3D LiDAR neprekinjeno zajema prostorske meritve okolice. Na podlagi teh meritev sistem ocenjuje gibanje robota in hkrati postopno gradi 3D predstavitev delovnega prostora. V posnetku je razvidno, kako se oblak točk oziroma 3D zemljevid gradi sproti med gibanjem robota, pri čemer se rekonstruirajo geometrijske strukture industrijske hale, kot so stene, stroji, transportne poti, skladiščna območja in druge statične strukture. Ta del prikaza ustreza fazi kartiranja v predlagani metodologiji, kjer se z uporabo LiDAR-inercialne odometrije in optimizacije zemljevida pridobi konsistenten 3D zemljevid, ki se lahko kasneje uporabi kot referenca za spremljanje sprememb v okolju. Primer prikaza sprotne gradnje 3D zemljevida industrijskega okolja je prikazan na sliki 3.

Osrednji del posnetka prikazuje filtriranje dinamičnih objektov iz rekonstruiranega 3D zemljevida. Industrijska okolja pogosto vsebujejo premikajoče se delavce, viličarje, transportna vozila in drugečasne objekte, ki ne smejo postati del referenčnega zemljevida. Če se takšni objekti vključijo v zemljevid, lahko povzročijo navidezne strukture in kasneje vodijo do napačne interpretacije sprememb. V posnetku so zato prikazani primeri, pri katerih sistem zazna in odstrani dinamične objekte iz akumuliranega oblaka točk. S tem je prikazana vloga faze rekonstrukcije statičnega zemljevida, pri kateri se prehodna opazovanja ločijo od trajnih struktur okolja. Rezultat je čistejši in bolj reprezentativen 3D zemljevid, ki bolje opisuje stabilno geometrijo delovnega prostora.

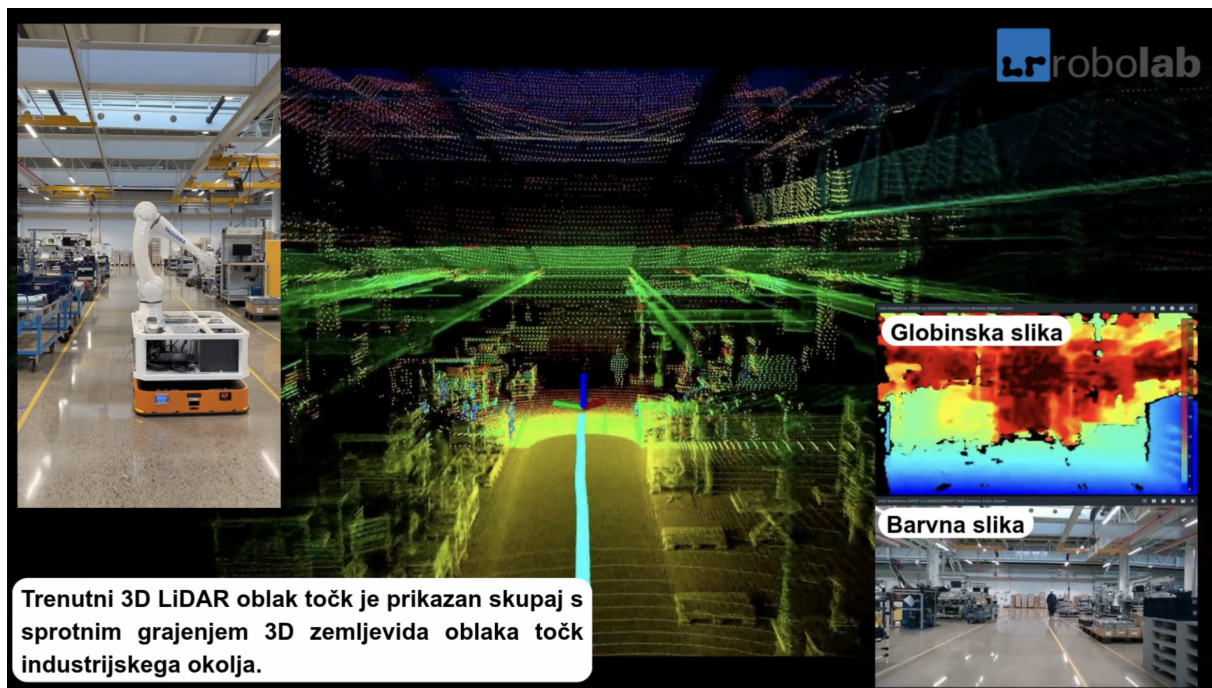
V nadaljevanju posnetek prikazuje primerjavo rezultatov kartiranja brez filtriranja dinamičnih objektov in z njihovim filtriranjem. V nefiltriranem zemljevidu so vidni ostanki premikajočih se delavcev, viličarjev in drugih začasnih objektov, ki jih sistem lahko napačno obravnava kot stalne dele okolja. Nasprotno pa filtriran zemljevid vsebuje bistveno manj takšnih artefaktov in zato predstavlja zanesljivejšo osnovo za nadaljnje zaznavanje sprememb. Ta primerjava jasno pokaže, zakaj je odstranjevanje dinamičnih objektov pomemben del predlagane metodologije: zmanjša število lažnih sprememb, izboljša kakovost referenčnega zemljevida in poveča robustnost končnega odločitvenega postopka.

V zadnjem delu posnetka je prikazan postopek zaznavanja sprememb. Referenčni 3D zemljevid se primerja s trenutnim 3D zemljevidom, zajetim v kasnejši fazi oziroma ob drugem prehodu skozi okolje. Sistem na ta način zazna strukturne razlike med predhodno kartiranim stanjem in trenutnim stanjem okolja. Posnetek prikazuje zaznane spremembe v oblaku točk, pri čemer so ločene na novo nastale strukture ter odstranjene oziroma manjkajoče strukture. Spremembe niso prikazane samo vizualno, temveč so tudi kvantificirane z metrikami, ki opisujejo njihov prostorski obseg. Sistem oceni površino zaznanih sprememb, delež sprememb glede na referenčni zemljevid in njihovo prostorsko porazdelitev. Te metrike se nato uporabijo kot vhod v odločitveni proces, ki določi, ali so spremembe v okolju dovolj izrazite, da je potrebno ponovno kartiranje.

Posnetek tako povzema celoten potek predlaganega nadzornega sistema: predstavitev senzorske konfiguracije, zajem 3D podatkov, sprotno gradnjo zemljevida, filtriranje dinamičnih objektov, primerjavo rezultatov z njihovim filtriranjem in brez njega ter končno zaznavanje sprememb z izračunom kvantitativnih kazalnikov za odločanje o potrebi po ponovnem kartiranju. Prikazani rezultati kažejo, da metodologija omogoča tako vizualno kot numerično oceno sprememb v industrijskem okolju. S tem predstavlja uporaben podporni sistem za vzdrževanje veljavnosti lokalizacijskega zemljevida AMR-ja in za odločanje o tem, kdaj je treba sprožiti nov postopek kartiranja.

1.4 Demonstratorski posnetek KONČNI-DEMO: Izvedba več industrijskih nalog s pomočjo mobilnega manipulatorja

Priloženi demonstratorski posnetek prikazuje delovanje razvitega mobilnega sodelujočega robotskega sistema za izvajanje prilagodljivih industrijskih montažnih nalog (razvit sistem je prikazan na sliki 4). V posnetku je predstavljen celoten potek procesa, ki se začne z ročno pripravo obdelovanca, nadaljuje z avtonomnim pozicioniranjem mobilnega robota, preverjanjem s pomočjo strojnega vida, rokovanjem s procesnimi orodji, nanosom tesnilne mase, vijačenjem in menjavo obdelovanca. Posnetek tako prikazuje ključne funkcionalnosti razvitega demonstratorja: mobilnost, modularnost, rekonfigurabilnost, izvajanje procesov s podporo strojnega vida ter integracijo več tehnoloških modulov na skupni robotski platformi.



Slika 3: Izsek iz demonstratorskega posnetka SLAM, ki prikazuje gradnjo 3D zemljevida industrijskega okolja za namen detekcije sprememb v okolici.

Na začetku posnetka operater pripravi montažni proces tako, da namesti obdelovanec v rekonfigurabilno vpenjalo in izvede vstavitve reduktorja v predvideno montažno mesto. Ta začetni korak prikazuje predvideni način sodelovanja med operaterjem in robotskim sistemom, pri katerem operater izvede pripravo sestavnih delov, robotski sistem pa nato prevzame avtomatizirano izvajanje nadaljnjih procesnih korakov. Uporaba rekonfigurabilnega vpenjala je pomemben del demonstratorja, saj omogoča prilagajanje delovnega mesta različnim obdelovancem in izvedbam montažnega procesa brez potrebe po popolnoma novi fiksni namenski opreми.

Po pripravi obdelovanca se mobilni robot avtonomno pripelje do delovne postaje. V posnetku je prikazano, da se mobilna platforma lahko premakne do zahtevane procesne lokacije in izvede natančno pozicioniranje na delovnem mestu pred začetkom montažnih operacij. Ta del prikaza potrjuje mobilni značaj sistema in njegov potencial za uporabo v fleksibilnih proizvodnih okoljih, kjer lahko en robotski sistem podpira več različnih procesnih mest, namesto da bi bil trajno nameščen samo na eni lokaciji. S tem je prikazan koncept boljše izkoriščenosti robotske opreme in postopnega uvajanja avtomatizacije na različna delovna mesta.

Ko je mobilni sodelujoči robot pozicioniran na delovni postaji, se proces nadaljuje s preverjanjem s pomočjo strojnega vida. Sistem strojnega vida najprej preveri pravilnost vpetja obdelovanca na podlagi zaznanega položaja vpenjalne ročice. Ta korak zagotavlja, da se avtomatizirani proces izvede samo v primeru, ko je obdelovanec pravilno nameščen in ustrezno fiksiran. Sistem strojnega vida tako predstavlja dodatni nadzorni sloj, ki povečuje zanesljivost izvajanja montažnega postopka.

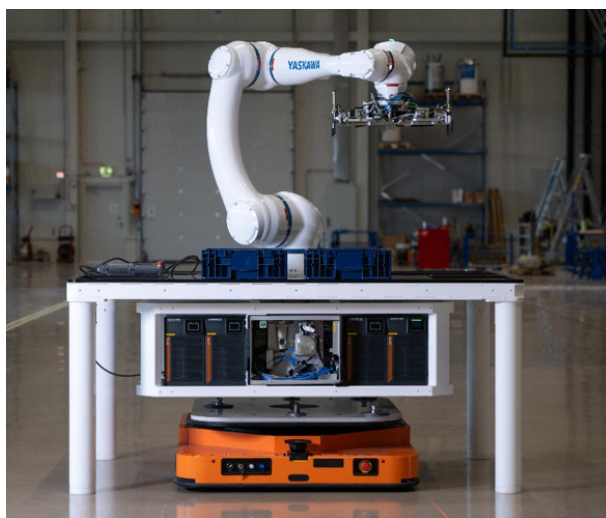
V nadaljevanju posnetek prikazuje avtomatizirano rokovanje z orodjem za nanos tesnilne mase. Robot s pomočjo strojnega vida določi mesto pobiranja sistema za nanos tesnilne mase in nato izvede pobiranje orodja. Nato se s kamero preveri ustreznost medsebojne pozicije sestavnih delov ter določi mesto, kjer je treba nanesti tesnilno maso.

Na podlagi teh informacij robot izvede trajektorijo nanosa tesnilne mase. Po zaključku procesa robot odloži sistem za nanos tesnilne mase, nato pa se s kamero ponovno preveri uspešnost izvedenega nanosa. Ta del prikaza demonstrira povezavo med zaznavanjem, rokovanjem z orodjem, izvajanjem procesa in naknadnim preverjanjem kakovosti izvedene operacije.

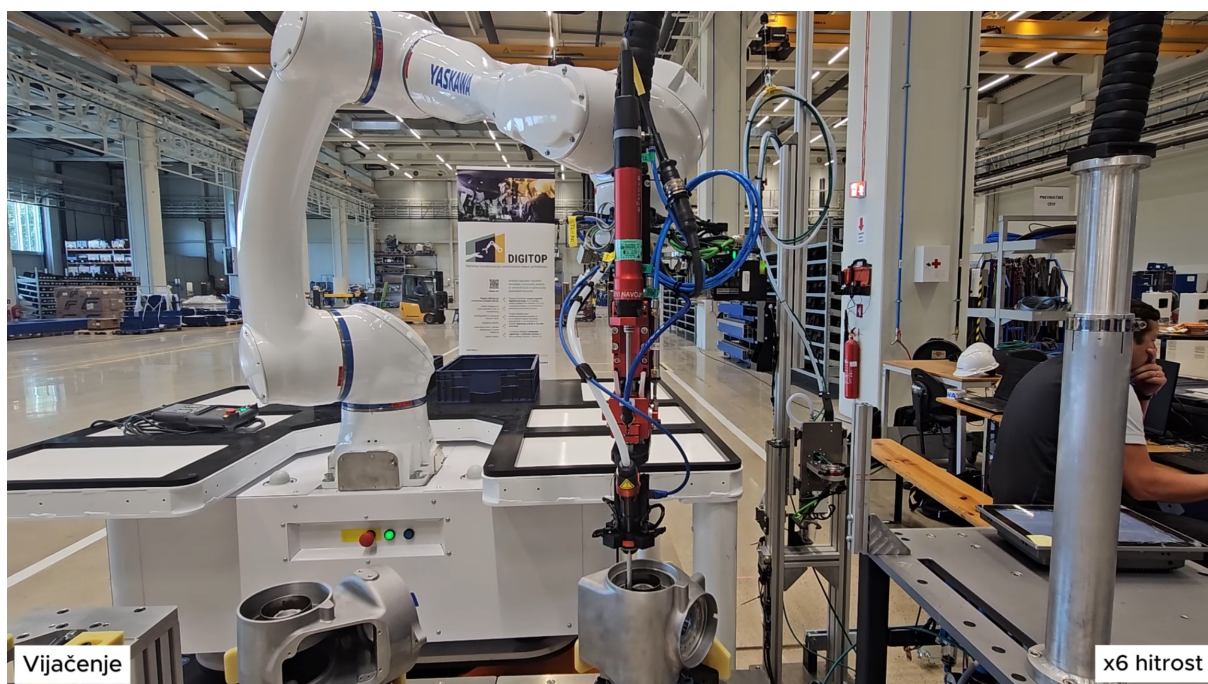
V naslednjem koraku je prikazana avtomatizirana operacija vijačenja. Robot pobere vijačnik s podajalnikom vijakov, nato pa sistem strojnega vida določi mesta vijačenja na obdelovancu. Na podlagi zaznanih položajev robot izvede vijačenje posameznih mest. Po zaključku naloge sledi odlaganje vijačnika na predvideno mesto. Ta del demonstracije potrjuje, da sistem poleg nalog nanosa materiala podpira tudi natančne montažne operacije, pri katerih je potrebno usklajeno delovanje procesnega orodja, zaznavnega sistema in robotskega gibanja.

Na koncu posnetka je prikazana menjava obdelovanca, pri čemer je ponovno izpostavljena uporaba rekonfigurabilnih vpenjal. S tem je pokazano, da zasnova delovnega mesta ni omejena le na en tip obdelovanca, temveč omogoča prilagoditev različnim sestavnim delom in različnim montažnim nalogam. Kombinacija mobilne manipulacije, rekonfigurabilnih vpenjal, strojnega vida in modularnih procesnih orodij tako predstavlja osnovo za prilagodljivo industrijsko avtomatizacijo.

Celoten posnetek prikazuje razviti demonstrator kot integriran mobilni sodelujoči robotski sistem, ki je sposoben izvajati več reprezentativnih industrijskih operacij. Prikazani potek vključuje pripravo obdelovanca, avtonomni prihod in pozicioniranje na delovni postaji, preverjanje procesa s strojnim vidom, nanos tesnilne mase, vijačenje, menjava orodij in prilagoditev različnim obdelovancem. Rezultati potrjujejo doseženo stopnjo integracije mobilne platforme, sodelujočega manipulatorja, procesnih orodij, senzorskega sistema in krmilne arhitekture. Demonstrator zato predstavlja funkcionalno validacijo razvite rešitve v relevantnem industrijskem oziroma demonstracijskem okolju ter osnovo za nadaljnji razvoj fleksibilnih, modularnih in rekonfigurabilnih robotskih proizvodnih sistemov. Izsek iz končnega demonstratorskega posnetka, ki prikazuje izvajanje industrijskih montažnih nalog z uporabo mobilnega sodelujočega robotskega sistema, je prikazan na sliki 5.



Slika 4: Modularni mobilni sodelujoč robotski sistem razvit v sklopu programa RRp 7.



Slika 5: Izsek iz demonstratorskega posnetka KONČNI-DEMO, ki prikazuje izvedno montažnih nalog v industrijskem okolju.

2 Povezava posnetkov s predlagano vsebino programa RRp 7

V nadaljevanju tega poglavja je za vsak demonstratorski posnetek posebej predstavljeno, kako se vključuje v vsebinsko gradivo programa RRp 7 ter kako prispeva k reševanju posameznih problemov v okviru programa.

2.1 Demonstratorski posnetek ZAUSTAVITEV in vsebina programa RRp A7.1

Predstavljeni demonstratorski posnetek potrjuje realizacijo načrtovanih aktivnosti v okviru sklopa A7.1, ki je bil usmerjen v razvoj digitalnega dvojčka za robotska dinamična varnostna območja ter uporabo izboljšane tehnologije ToF senzorjev za zaznavanje bližnje okolice robota. Razviti sistem združuje industrijsko zasnovan senzorski sklop, nameščen v neposredni bližini robotskega orodja, z algoritmi za primerjavo realnega stanja in pričakovanega stanja v virtualnem okolju. S tem je bila vzpostavljena povezava med fizičnim robotskim sistemom in njegovim digitalnim dvojčkom, kar omogoča sprotno spremljanje delovnega območja robota ter zaznavanje nepredvidenih vdorov v bližino orodja. Ključni prispevek demonstriranega sistema je, da varnostna informacija ni pridobljena zgolj iz posamezne senzorske meritve, temveč iz odstopanja med realnim senzorskim odzivom in simuliranim odzivom v digitalnem dvojčku. Na ta način sistem upošteva trenutno konfiguracijo robota, geometrijo orodja, položaj senzorjev in pričakovano stanje okolice, kar predstavlja osnovo za oblikovanje dinamičnih varnostnih območij.

V demonstratorju je bila prikazana uporaba razvite rešitve na različnih robotskih platformah in v različnih testnih pogojih, od laboratorijske validacije do preverjanja v realnem industrijskem okolju. Prikazi na robotih HC20 in UR5e potrjujejo, da sistem zanesljivo zazna prisotnost nepredvidene ovire v bližini orodja ter ob zaznanem odstopanju sproži varnostno zaustavitev robota. Pomembno je tudi, da detekcijski algoritem ne obrav-

nava vsake manjše razlike med simulacijo in realnostjo kot nevarnega dogodka, temveč je zasnovan tako, da upošteva negotovosti modeliranja, simulacije in senzorskih meritev. Končna demonstracija v industrijskem okolju podjetja Yaskawa, izvedena med dejansko nalogo vijačenja, neposredno potrjuje uporabnost prototipnega sistema na prototipnem nivoju oziroma TRL 6. S tem demonstratorski posnetek izkazuje, da je bila razvita tehnologija ToF senzorjev uspešno uporabljena kot vhod v algoritme za opazovanje bližnje okolice robota, digitalni dvojček pa kot podpora za zagotavljanje varnostnih informacij pri industrijsko relevantnih robotskih aplikacijah.

2.2 Demonstratorski posnetek SKLOPITEV in vsebina programa RRp A7.3

Predstavljeni demonstratorski posnetek prikazuje praktično realizacijo načrtovanih aktivnosti v okviru sklopa A7.3, ki je bil usmerjen v razvoj in prikaz prilagodljivih trajektorij za sodelovalno sestavljanje v modularnih delovnih okoljih. V posnetku je prikazan mobilni manipulator, pri katerem mobilna platforma in robotska roka ne delujeta kot ločena sistema, temveč kot usklajena celota. Razvito vodenje omogoča, da se gibanje mobilne baze sprti prilagaja trenutnemu položaju in konfiguraciji robotske roke, s čimer se razširi delovni prostor manipulatorja in ohranja ugodna konfiguracija sistema med približevanjem modularni delovni celici. Takšen pristop neposredno naslavlja potrebo po prostorskem in časovnem prilagajanju trajektorij, saj se robot ne zanaša izključno na vnaprej določeno globalno trajektorijo, temveč se odziva na trenutno stanje sistema in lokalne pogoje v okolju. To je posebej pomembno v sodelovalnih in rekonfigurabilnih proizvodnih okoljih, kjer se lahko razporeditev delovnih mest, položaj delovnih celic ali začetna konfiguracija robota spreminjajo med posameznimi izvedbami naloge.

Demonstracija zato izkazuje uporabnost prilagodljivega načrtovanja oziroma vodenja trajektorij v realističnem primeru uporabe, kjer mora mobilni manipulator varno in intuitivno pristopiti k modularni celici ter vzpostaviti ustrezno delovno konfiguracijo za nadaljnje sestavljalne ali manipulacijske naloge. S tem demonstratorski posnetek potrjuje, da razvite metode omogočajo bolj fleksibilno uporabo mobilnega manipulatorja v industrijsko relevantnih okoljih, kjer so zahteve po prilagajanju poti, položaja in časovnega poteka gibanja ključne za zanesljivo sodelovalno sestavljanje.

2.3 Demonstratorski posnetek SLAM in vsebina programa RRp A7.4

Demonstratorski posnetek pokriva del vsebine v okviru sklopa programa A7.4. Na posnetku je predstavljena praktična uporaba razvitega nadzornega sistema za spremljanje veljavnosti lokalizacijskega zemljevida industrijskega okolja na podlagi dodatnega zaznavnega modula s 3D LiDAR senzorjem. V okviru prikaza so zajeti sprotne gradnje 3D zemljevida, filtriranje dinamičnih objektov iz okolice ter zaznavanje sprememb med referenčnim in trenutnim stanjem industrijskega prostora.

Vsebinsko prikazuje eno izmed ključnih lastnosti oziroma sposobnosti razvitega mobilnega manipulatorja, ki je potrebna za izboljšanje stopnje avtonomije celotnega sistema. Industrijska okolja so namreč dinamična in se lahko hitro spreminjajo, kar lahko komercialnim mobilnim robotom povzroča težave pri lokalizaciji. Posledično lahko takšne težave vplivajo tudi na izvajanje drugih nalog, ki so odvisne od natančnega določanja položaja mobilne platforme. S podobnimi izzivi se pogosto srečujejo komercialne mobilne platforme, kakršna je bila uporabljena tudi pri razvoju mobilne platforme s sodelujočim robotom v okviru RRp A7.4, namenjene izvajanju različnih nalog industrijskega sestavljanja. V tem delu razvite in v posnetku predstavljene metode naslavlja omenjeni problem

tako, da s pomočjo napredne senzorike spremljajo spremembe v okolici. V primeru zaznane večjega števila oziroma večjega obsega sprememb sistem obvesti vzdrževalca celotne aplikacije v okviru RRp A7.4, da je prišlo do pomembnih sprememb v okolju, ter predlaga ponovno kartiranje za namen zanesljive lokalizacije avtonomnega mobilnega robota.

2.4 Demonstratorski posnetek KONČNI-DEMO in vsebina programa RRp A7.4

Predstavljeni demonstratorski posnetek potrjuje realizacijo načrtovanih aktivnosti v okviru sklopa A7.4, ki je bil usmerjen v razvoj modularnega mobilnega sodelujočega robotskega sistema za izvajanje prilagodljivih industrijskih nalog sestavljanja. V posnetku je prikazan integriran sistem, ki združuje mobilno platformo, sodelujoči robotski manipulator, rekonfigurabilno delovno mesto, strojni vid ter več procesnih orodij, med drugim sistem za nanos tesnilne mase in vijačnik s podajalnikom vijakov. Takšna zasnova neposredno naslavlja predvideni scenarij uporabe mobilne platforme s sodelujočim robotom, kjer je cilj zagotoviti avtonomno mobilnost robota, učinkovito izrabo delovnega prostora ter varno in prilagodljivo izvajanje industrijskih montažnih postopkov.

Demonstrator prikazuje, da se lahko mobilni robot samostojno premakne do delovne postaje, se ustrezno pozicionira in nato izvede zaporedje različnih procesnih operacij, pri čemer sistem strojnega vida omogoča preverjanje pravilnosti vpetja, določanje položajev procesnih elementov ter nadzor uspešnosti izvedenih korakov. S tem je prikazana pomembna stopnja avtonomije, saj robotski sistem ne izvaja zgolj vnaprej določenega gibanja, temveč uporablja zaznavne informacije za podporo odločanju in prilagajanje izvedbe naloge trenutnemu stanju delovnega mesta. Uporaba rekonfigurabilnih vpenjal in modularnih procesnih orodij dodatno potrjuje prilagodljivost razvite rešitve, saj omogoča prehod med različnimi obdelovanci in montažnimi postopki brez potrebe po namenski fiksni avtomatizaciji za vsako posamezno nalogo.

Na ta način demonstrator rešuje ključne izzive iz sklopa A7.4, kot so optimizacija delovnega prostora, prilagajanje v realnem času ter zagotavljanje varnega sodelovanja med operaterjem, obdelovanci in robotskim sistemom. Prikazana rešitev zato predstavlja funkcionalno validacijo modularnega mobilnega sodelujočega robotskega sistema v industrijsko relevantnem okolju in izkazuje potencial za fleksibilno avtomatizacijo proizvodnih procesov, kjer mora en robotski sistem podpirati več delovnih mest, različne procesne naloge in spreminjajoče se proizvodne zahteve.

3 Predstavitev prispevkov posameznih partnerjev

V nadaljevanju tega poglavja je za vsak demonstratorski posnetek posebej predstavljeno, kako so bili partnerji vključeni v razvoj pri posameznih sklopih RRP7 programa.

- **Prispevki pri demonstratorskem posnetku ZAUSTAVITEV**

Pri pripravi demonstratorja so sodelovali partnerji ULFE-LR, LTEK in YAS. LTEK je razvil senzorski sklop, vključno s tiskanimi vezji, integracijo ToF senzorjev in namenskim firmware-om za upravljanje senzorjev ter zajem podatkov. ULFE-LR je izdelal zasnovo postavitve in pritrditve senzorjev na robotsko orodje, razvil programski del sistema, integracijo z ROS 2, simulacijo senzorja, digitalnega dvojčka ter detektor za primerjavo realnih in simuliranih senzorskih signalov. V sodelovanju z YAS je ULFE-LR sistem integriral na robotsko aplikacijo. YAS je zagotovila industrijski primer uporabe, robotsko platformo in robotsko celico za testiranje v realnem industrijskem okolju.

- **Prispevki pri demonstratorskem posnetku SKLOPITEV**

Pri pripravi in izvedbi demonstratorja so sodelovali partnerji IJS-E1, ULFE-LR in YAS, pri čemer je osrednjo raziskovalno, razvojno in izvedbeno vlogo prevzel partner IJS-E1. IJS-E1 je razvil metodologijo za koordinirano vodenje mobilnega manipulatorja, izdelal integracijo sistema ter opravil testiranje in validacijo prikazane rešitve. Njihov prispevek je obsegal razvoj pristopa, pri katerem se gibanje mobilne platforme reaktivno prilagaja položaju vrha robotske roke, s čimer mobilna baza in manipulator delujeta kot usklajen robotski sistem. ULFE-LR in YAS sta prispevala predvsem s strokovnim svetovanjem ter sodelovanjem pri oblikovanju industrijsko relevantnih scenarijev uporabe. Njuna vloga je bila usmerjena v presojo uporabnosti razvite metode v proizvodnem okolju, prepoznavanje praktičnih zahtev modularnih delovnih celic ter oblikovanje izhodišč za čim bolj neposreden prenos razvite funkcionalnosti v industrijsko prakso.

- **Prispevki pri demonstratorskem posnetku SLAM**

Pri pripravi in izvedbi demonstratorja sta sodelovala partnerja ULFE-LR in YAS, pri čemer sta se njuni vlogi vsebinsko dopolnjevali. ULFE-LR je prispevala predvsem raziskovalni in razvojni del, ki je obsegal zasnovo metodologije za obdelavo podatkov 3D LiDAR senzorja, sprotno gradnjo 3D zemljevida, filtriranje dinamičnih objektov ter zaznavanje in kvantitativno vrednotenje sprememb v industrijskem okolju. Partner YAS je prispeval k mehanski in električni zasnovi mobilnega manipulatorja ter omogočil uporabo realnega industrijskega okolja za testiranje razvite metodologije. Končna integracija, testiranje in demonstracija sistema so bili izvedeni s skupnim sodelovanjem obeh partnerjev, pri čemer je bil celoten sistem preverjen na dejanski robotski platformi in ovrednoten v industrijskem okolju podjetja Yaskawa. S tem je bila omogočena validacija razvite rešitve v realnih pogojih, ki vključujejo tipične izzive industrijskih prostorov, kot so dinamični objekti, spremembe postavitve in potreba po vzdrževanju veljavnosti lokalizacijskega zemljevida AMR-ja.

- **Prispevki pri demonstratorskem posnetku KONČNI-DEMO**

Pri pripravi in izvedbi demonstratorja so sodelovali partnerji YAS, ULFE-LR, IJS-E1 in RUD, pri čemer je osrednjo izvedbeno in integracijsko vlogo prevzel partner

YAS. YAS je prispeval glavni del demonstratorske rešitve, vključno z zasnovo in izvedbo industrijskega primera uporabe, integracijo mobilne platforme s sodelujočim robotom, pripravo procesnih modulov za nanos tesnilne mase in vijačenje, izvedbo delovne postaje z rekonfigurabilnimi vpenjali ter celotno demonstracijo poteka industrijskega sestavljanja. ULFE-LR je prispevala metodološko podporo in integracijo varnostnih sistemov ter dodatnih logik, povezanih z mobilno robotiko, hkrati pa je sodelovala pri testiranju razvitih pristopov in širši integraciji sodelujočega robotskega sistema z drugimi tehnologijami sodelovalne robotike. Partner IJS-E1 je prispeval znanje in programsko osnovo s področja prilagodljivega oziroma reaktivnega vodenja mobilnega manipulatorja, zlasti v povezavi s prilagajanjem gibanja mobilne baze glede na trenutno konfiguracijo robotske roke in zahteve delovnega prostora. Partner RUD je sodeloval predvsem pri usmerjanju razvoja proti industrijsko relevantnim scenarijem ter pri vsebinski presoji uporabnosti razvite rešitve v proizvodnem okolju.