

Program

Digitalna transformacija robotiziranih tovarn prihodnosti

DIGITOP

Rezultat D7.2:

Poročilo o integraciji, testnih protokolih in rezultatih validacije prijemala z mehкими prsti in rekonfigurabilnim mehanizmom za prste v dlani

Projekt/RRP	RRp 3, Industrijske raziskave: Napredna sodelujoča robotika za digitalni prehod
Vrsta dokumenta	Poročilo
Verzija dokumenta	V1.0
Sodelujoči partnerji	ULFE–LR
Avtorji	Tilen Klemenčič, Janez Podobnik, Matjaž Mihelj, Marko Munih, Jakob Gimpelj, Aleksandar Stefanov
Datum priprave	14. 4. 2026

Kazalo

1	Povzetek	2
2	Aktivnosti, namen A7.2	2
3	Uvod	2
4	Modularno rekonfigurabilno robotsko prijemalo	3
4.1	Zasnova modularnega rekonfigurabilnega prijemala z vključenim senzorjem sile v nosilcih prstov	3
4.2	Prototip modularnega rekonfigurabilnega prijemala	4
4.3	Mehki prsti	7
4.4	Rezultati	7
4.4.1	Točnost in ponovljivost sile prijema	7
4.4.2	Preizkus sile izvleka	10
4.4.3	Ponovljivost pomika prstov	11
5	Razvoj industrijskih aplikacij v raziskovalnem okolju	12
5.1	Avtomatizirana priprava raztopin kisline	13
5.2	Mobilna manipulacija vzorcev	15
5.2.1	Zasnova sistema	15
5.2.2	Potek aplikacije	16
5.3	Obiranje jabolk z uporabo robotskega vida	17
6	Zaključek	18

1 Povzetek

V okviru projekta smo razvili, implementirali in eksperimentalno ovrednotili modularno rekonfigurabilno robotsko prijemalo (oziroma rekonfigurabilni mehanizem v dlani) z mehкими prsti, namenjeno zanesljivi manipulaciji objektov v industrijskih okoljih. Posebnost razvitega prijemala je integriran senzor sile, nameščen neposredno v nosilcu posameznega prsta, kar omogoča neposredno merjenje sile prijema in s tem učinkovito zaprtozanko regulacijo. Takšna zasnova omogoča natančno določitev sile ter varno manipulacijo občutljivih, krhkih ali deformabilnih objektov.

V poročilu so predstavljene mehanske in regulacijske značilnosti sistema ter rezultati eksperimentalnega vrednotenja. Meritve točnosti sile prijema kažejo povprečno relativno napako približno 5 % v območju od 1 N do 60 N, kar potrjuje dobro ujemanje med želeno in realizirano silo. Dodatno je bila potrjena dobra ponovljivost sistema, tako pri regulaciji sile kot tudi pri pozicioniranju prstov. Rezultati preizkusa sile izvleka kažejo, da lahko prijemalo zaradi mehkih kontaktnih površin generira visoke vlečne sile že pri relativno nizkih silah prijema, kar je ključnega pomena za stabilen prijem brez zdrsa.

Razvita rešitev omogoča bistveno širši razpon uporabnih sil prijema v primerjavi z obstoječimi industrijskimi prijemali, vključno z zelo nizkimi silami (od 1 N dalje), ki so nujne za manipulacijo občutljivih objektov. Mehki prsti s pasivno prilagodljivimi kontaktnimi elementi povečujejo kontaktno površino in omogočajo prilagajanje različnim geometrijam objektov, kar dodatno izboljša robustnost prijema.

Funkcionalnost prijemala smo validirali tudi na ravni aplikacij skozi več demonstracijskih primerov v relevantnem okolju. Obravnavane aplikacije vključujejo avtomatizirano pripravo kemičnih raztopin, mobilno manipulacijo vzorcev ter robotsko obiranje sadja. Rezultati potrjujejo, da razvito prijemalo učinkovito kompenzira netočnosti zaznave, povečuje robustnost sistema ter omogoča varno in zanesljivo izvajanje manipulacijskih nalog v realnih scenarijih uporabe.

2 Aktivnosti, namen A7.2

Modularno rekonfigurabilno prijemalo z mehкими prsti (ULFE-LR). Razviti rekonfigurabilni mehanizem bo integriran z izmenljivimi mehкими prsti. Prijemalo bo validirano s testiranjem na različnih mehkih in občutljivih predmetih, ne da bi jih poškodovali. Uporabo prijemala bomo demonstrirali v industrijskem okolju.

3 Uvod

Sodobni avtomatizirani procesi v industriji in raziskovalnem okolju zahtevajo vse večjo stopnjo prilagodljivosti in zanesljivosti, še posebej pri manipulaciji z občutljivimi, krhкими ali nepravilno oblikovanimi predmeti. Večina obstoječih industrijskih prijemal ne omogoča nastavitve točne sile prijema, temveč se ta določa zgolj kot odstotek moči stiska. Posledično s takšnimi prijemali težko dosegamo dovolj ponovljive nizke sile, ki so nujne za varno rokovanje z mehкими objekti, ne da bi jih pri tem poškodovali. Za uspešno izvajanje tovrstnih nalog je ključnega pomena uporaba naprednih prijemal, ki združujejo mehansko prilagodljivost z natančnim in odzivnim nadzorom sil prijemanja.

Pri številnih obstoječih robotskih prijemalih se sila prijema ne meri neposredno na mestu stika med prstom in predmetom, temveč se posredno ocenjuje na podlagi veličin aktuatorja, kot so tok motorja ali druge posredno ocenjene sile. Tak pristop ne omogoča

zadostne natančnosti, saj na prenos sile vplivajo trenje, zračnosti in deformacije mehanskih elementov, zaradi česar enaka željena sila ne povzroči vedno enake sile prijema.

Dodatno omejitev predstavlja tudi zasnova senzorike. Če so senzorji integrirani neposredno v prste, to pogosto vodi v zmanjšano modularnost sistema, saj menjava prstov zahteva poseg v merilni del.

Motivacija za razvoj predstavljene rešitve izhaja iz potrebe po prijemalu, ki omogoča neposredno in zanesljivo merjenje sile prijema, hkrati pa ohranja mehansko togost ter modularnost sistema. Takšna zasnova omogoča natančnejšo regulacijo sile, varnejše prijemanje občutljivih predmetov in večjo prilagodljivost za različne aplikacije.

V predhodnih fazah razvoja smo zasnovali modularno rekonfigurabilno prijemalo (oziroma rekonfigurabilni mehanizem v dlani), ki omenjene izzive rešuje z vgradnjo senzorja sile neposredno v nosilce prstov, s čimer se ohranja fleksibilnost pri zasnovi kontaktnih elementov. Razviti so bili mehki prsti, ki vsebujejo prosto gibljive polkrožne blazinice, prekrite s plastjo silikona. Takšna kombinacija zagotavlja enakomerno porazdelitev pritiska, večjo kontaktno površino in zmanjšano tveganje za poškodbe objektov.

Namen dela je predstaviti implementacijo in ovrednotenje tega razvitega sistema v praksi, in sicer preko reševanja kompleksnih nalog. Poročilo najprej povzema ključne konstrukcijske in krmilne lastnosti modularnega prijemala ter rezultate meritev točnosti sile prijema. V osrednjem delu pa podrobno opisuje razvoj treh demonstracijskih aplikacij, ki verodostojno posnemajo pogoje dejanskega industrijskega okolja. Te aplikacije – avtomatizirano prelivanje kislin z robotom UR5e, prenos vzorcev z uporabo mobilnega manipulatorja in strojnega vida ter obiranje jabolk s sodelujočimi roboti Neura LARA 8 – služijo kot celovito preverjanje funkcionalnosti, prilagodljivosti in zanesljivosti razvite tehnologije.

4 Modularno rekonfigurabilno robotsko prijemalo

4.1 Zasnova modularnega rekonfigurabilnega prijemala z vključenim senzorjem sile v nosilcih prstov

Osnovna ideja razvitega prijemala temelji na integraciji senzorja sile neposredno v nosilec prsta. Senzor pri tem ni zgolj merilni element, temveč tudi funkcionalni del mehanske strukture. Nosilec prsta je zasnovan kot dvodelna struktura, pri kateri je senzor sile umeščen med prvi in drugi del nosilca ter oba dela mehansko povezuje v enoten sklop.

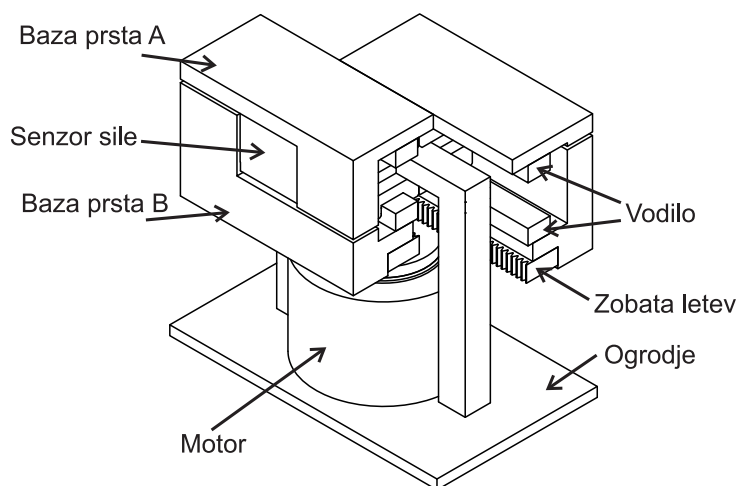
Takšna zasnova omogoča, da se celotna sila prijema prenaša neposredno preko senzorja. Posledično izhodni signal senzorja predstavlja dejansko silo, ki deluje na prst prijemala, brez bistvenega vpliva mehanskih izgub, kot so trenje, zračnosti ali deformacije drugih elementov v prenosu. S tem se izboljša natančnost merjenja sile in zanesljivost informacij, ki so na voljo za vodenje prijemala.

Pomembna prednost takšne rešitve je, da senzor ni nameščen v sam prst, temveč v njegov nosilec. Na ta način ostane zasnova prstov ločena od merilnega dela sistema, kar omogoča večjo prilagodljivost pri oblikovanju kontaktnih elementov in enostavnejšo menjavo prstov brez vpliva na merjenje sile. Prste je tako mogoče prilagoditi različnim objektom in aplikacijam, ne da bi bilo treba posegati v senzoriko ali ponovno spreminjati merilni del prijemala.

Razvito prijemalo sestavljajo ogrodje, aktuator ter modularni nosilci prstov, pri čemer je vsak nosilec razdeljen na dva dela, med katera je vgrajen senzor sile, ki hkrati opravlja merilno in nosilno funkcijo. Nosilci prstov so vodeni preko sistema vodil, ki omogoča

vzporedno gibanje prstov, visoko togost konstrukcije in zmanjšanje stranskih obremenitev na senzor. Takšna mehanska zasnova zagotavlja stabilno delovanje prijemala in natančen prenos sile v smeri prijetanja.

Integracija mehanske zasnove in senzorike v enotno zgradbo prijemala omogoča tudi učinkovito uporabo izmerjene sile v povratni zanki za regulacijo prijema. S tem je omogočeno natančno doziranje sile, bolj stabilna manipulacija predmetov ter varnejše rokovanje z občutljivimi ali krhkimi objekti.



Slika 1: Konceptualni prikaz zasnove modularno rekonfigurabilnega robotskega prijemala z integriranim senzorjem sile. Prikazana je struktura dvoprstnega prijemala z označenimi posameznimi komponentami.

4.2 Prototip modularnega rekonfigurabilnega prijemala

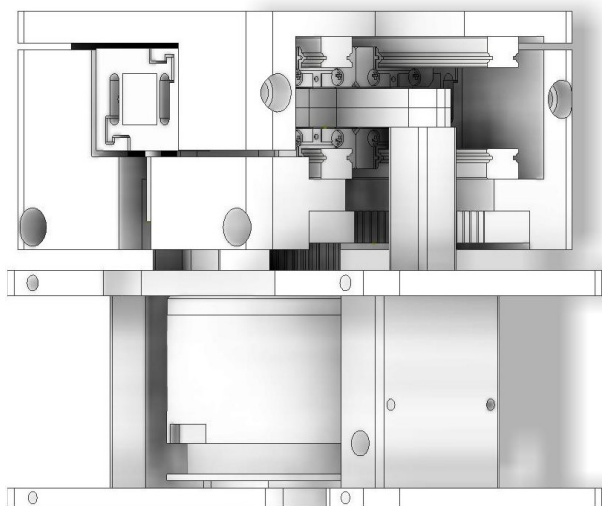
Prototip robotskega prijemala je izdelan iz aluminija, obdelanega z rezkanjem na CNC-napravi, kar zagotavlja visoko natančnost in trdnost konstrukcije. Zobata letev, izdelana iz jekla z modulom 0,5, je vodena preko zobnika, nameščenega na izhodu motorja, pri čemer so za gladko in natančno gibanje uporabljeni miniaturni vozički in vodila HiWin. Za pogon prijemala smo uporabili kompakten servo motor GIM3505 proizvajalca SteadyWin, ki ima integriran gonilnik, planetarni prenos z razmerjem 1:8 in enkoder. Motor zagotavlja nominalni navor 0,68 Nm ter maksimalno hitrost vrtenja 230 RPM. Izbran je bil zaradi kompaktne velikosti, visoke zmogljivosti in enostavne uporabe, saj je krmilnik motorja vgrajen neposredno v ohišje.

Za merjenje sile v nosilcu prsta smo uporabili TAS2 Mini S-Type Load Cell z AD ojačevalcem ojačitve 1:50000. Merilna celica meri maksimalno silo do 100 N in se odlikuje z zelo nizko napako merjenja. Vse senzorce smo umerili z referenčnim merilnikom sile JR3, kar zagotavlja zanesljive in ponovljive meritve.

Krmiljenje prijemala poteka preko Raspberry Pi 4 s Waveshare RS485 CAN HAT razširitveno ploščico, ki omogoča komunikacijo po CAN protokolu z motorjem in RS485 protokolu z ojačevalci merilne celice. Vodenje prijemala je izvedeno v dveh načinih: po poziciji in po sili. Za odpiranje prijemala uporabljamo vodenje po poziciji, kar zagotavlja natančno določene končne lege prstov. Vodenje po sili temelji na zaprtizankni regulaciji, kjer se za regulacijsko zanko uporabi povprečna sila iz dveh merilnih celic, po ena na vsakem prstu.

Tabela 1: Sestavni deli modularnega rekonfigurabilnega prijemala

Sestavni del	Kratek opis / lastnosti
Motor	GIM3505 servo motor z integriranim gonilnikom in enkoderjem
Krmilnik	Raspberry Pi 4
CAN hat	Waveshare RS485 CAN HAT
Vozički	MGN07C-Z0-HM mini linearni vozički
Vodila	100 mm MGNR 07 RHM linearna vodila
Zobata letev	0.5M 5x10x300 mm nerjaveče jeklo
Zobnik	0.5M 20T motorni zobnik premer 6 mm
Load cell	TAS2 Mini S-Type do 100 N
Load cell ojačevalec	1/50000 RS485 MODBUS RTU
Ogrodje	CNC rezkan aluminij osnova prijemala



Slika 2: 3D model dvoprstnega prijemala.

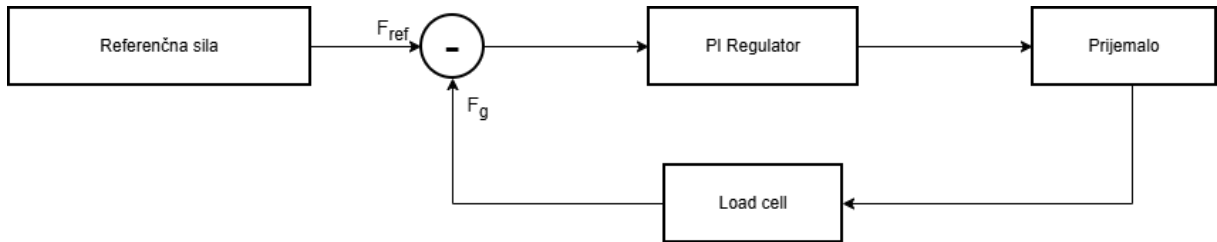
Izdelali smo dva različna regulatorja, prilagojena tipom prstov. Mehki prsti uporabljajo drugačne parametre kot trdi prsti, kar omogoča optimalno prilagajanje glede na mehanske lastnosti prijemala. Pri prijemanju občutljivih objektov je ključno, da sila prijema nikoli ne preseže nastavljene vrednosti (vidno na grafu 6). Zaradi hitrosti skoka sile ob prvem stiku prstov z objektom smo razvili regulator, ki zazna skok sile in takoj prilagodi silo prijema, tako da zelena vrednost nikoli ni presežena. Tak pristop zagotavlja varno, natančno in ponovljivo rokovanje tudi z občutljivimi ali krhkimi predmeti.

Prijemalo omogoča tudi nastavitev položaja prstov, kar pomeni, da lahko omejimo, koliko se prijemalo zapre. Položaj prstov določamo z uporabo enkoderja na motorju, ki meri kot vrtenja izhoda motorja. Ta kot se nato pretvori v linearni položaj prstov s pomočjo prestavnega razmerja med zobnikom in zobato letvijo. Pri uporabljenem paru zobnika in zobate letve z modulom 0,5 velja, da en obrat 20-zobega zobnika povzroči približno 31,4 mm linearnega pomika zobate letve.

Za regulacijo sile prijema uporabljamo zaprtozančno vodenje s PI regulatorjem, shema



Slika 3: Realna izvedba prijemala z mehкими prsti.



Slika 4: Bločni diagram zaprtozančnega vodenja po sili.

je prikazana na sliki 4. Referenčna sila prejema $F_{\text{ref}}(t)$ se primerja z izmerjeno silo prejema $F_g(t)$, pri čemer je regulacijska napaka definirana kot

$$e(t) = F_{\text{ref}}(t) - F_g(t). \quad (1)$$

Izmerjena sila prejema je določena kot povprečna vrednost sil, izmerjenih z merilnima celicama na obeh prstih,

$$F_g(t) = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2}. \quad (2)$$

Krmilni signal za pogon prijemala je določen s PI regulatorjem

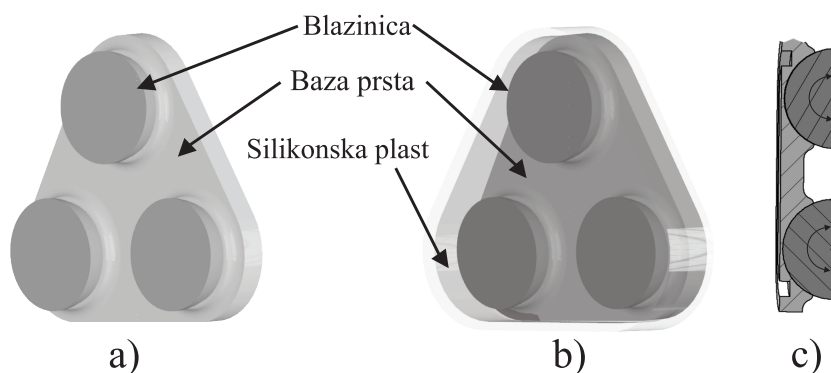
$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (3)$$

kjer K_P predstavlja proporcionalno ojačenje, K_I pa integralno ojačenje regulatorja. Takšna zasnova omogoča natančno sledenje referenčni sili prejema in odpravo stacionarne napake regulacije. Pri tem proporcionalni člen zagotavlja hiter odziv sistema, integralni člen pa kompenzira počasnejša odstopanja.

Na Raspberry Pi 4 pošiljamo ukaze preko TCP komunikacije. Ukazi so podani v obliki nizov (npr. "Home", "Open", "Close"). Ko Raspberry Pi prejme ukaz, začne z vodenjem prijemala. Nastavljati je mogoče silo prejema v območju od 1 N do 50 N, omejitev pomika prstov od 0 mm do 50 mm ter način vodenja (mehki ali trdi prsti).

4.3 Mehki prsti

Mehki prsti robotskega prijemala so zasnovani tako, da se prilagajajo različnim oblikam objektov in hkrati omogočajo visok prenos vlečnih sil ob nizkih silah prijema, kar je ključno pri manipulaciji mehkih ali krhkih predmetov. Vsak prst vsebuje tri pasivno poravnavaajoče se polkrožne blazinice, nameščene v konfiguraciji enakostraničnega trikotnika. Neodvisna rotacija blazinic zagotavlja dober stik s površino objekta, enakomerno porazdelitev pritiska in večjo kontaktno površino, kar zmanjšuje tveganje za poškodbe ter povečuje robustnost in vsestranskost pri rokovanju z objekti različnih oblik. Blazinice so dodatno prekrite s tanko mehko silikonsko plastjo, ki povečuje trenje in še dodatno varuje občutljive predmete.



Slika 5: (a) Prilagodljiv prst robotskega prijemala s tremi pasivno poravnavaajočimi se polkrožnimi blazinicami. (b) Enaka konfiguracija prsta z dodano mehko silikonsko plastjo, ki prekriva vse tri blazinice. (c) Prerez s stranske strani, ki prikazuje pasivno rotacijo polkrožnih blazinic.

4.4 Rezultati

V tem poglavju so predstavljeni eksperimentalni rezultati, s katerimi ovrednotimo delovanje razvitega dvoprstnega prijemala. Osredotočili smo se na ključne lastnosti sistema, kot so točnost in ponovljivost sile prijema, sposobnost generiranja vlečnih sil ter ponovljivost pomika prstov.

Rezultati temeljijo na sistematično izvedenih meritvah z uporabo referenčnih senzorjev in kontroliranih eksperimentalnih pogojev. Na ta način smo zagotovili zanesljivo primerjavo med želenimi in dejanskimi vrednostmi ter ocenili učinkovitost uporabljenega vodenja po sili.

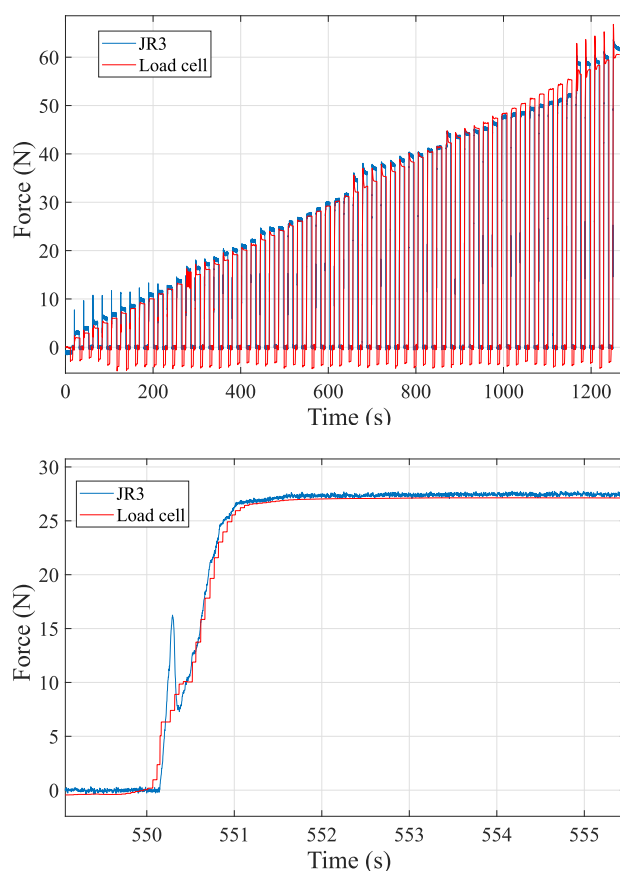
4.4.1 Točnost in ponovljivost sile prijema

Da bi ovrednotili uspešnost vodenja prijema po sili, smo izvedli meritve točnosti in ponovljivosti sile prijema.

Da bi ovrednotili točnost in ponovljivost sile prijema, smo uporabili referenčni merilnik sile JR3. Željeno silo smo podali kot vhodno referenco regulatorju sile. Izmerjeno silo prijema smo določali z referenčnim merilnikom sile JR3, ki ima merilno območje do 150 N in ločljivost 0,05 N. Senzor sile je bil nameščen neposredno med prsta prijemala na premičnem vozičku, ki omogoča pasivno poravnavo senzorja in s tem zmanjšuje vpliv

neporavnosti na meritev. Med posameznimi ponovitvami se je prijemalo vedno popolnoma odprlo in nato ponovno zaprlo. Pred vsako meritvijo smo referenčni senzor JR3 umerili na ničelno vrednost, s čimer smo zagotovili konsistentnost meritev.

Na grafih 6 je prikazana primerjava med integriranim merjenjem sile z uporabo merilne celice in zunanjim merilnikom JR3. Meritve smo izvedli v območju od 1 N do 60 N sile prijema s korakom 1 N. Na zgornjem grafu so prikazane vse meritve, na spodnjem pa je približana ena ponovitev pri 27 N sile prijema. Na grafu 7 je prikazano razmerje med željeno (nastavljeno) silo prijema in dejansko izmerjeno silo z merilcem JR3.



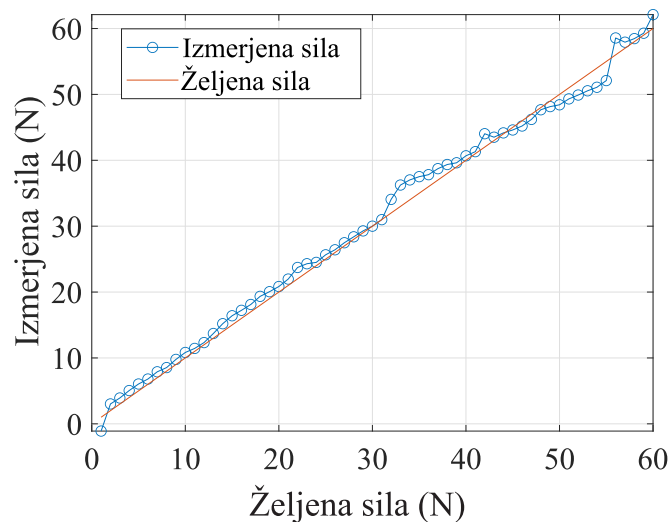
Slika 6: Primerjava izmerjene sile z referenčnim senzorjem JR3 in merilno celico (load cell) v nosilcu prstov. Na zgornjem grafu je prikazan potek meritev v območju od 1 N do 60 N sile prijema, na spodnjem grafu pa ena reprezentativna ponovitev pri sili prijema 27 N.

Povprečna relativna napaka sile prijema znaša 5 %, kar potrjuje dobro ujemanje med želeno in realizirano silo.

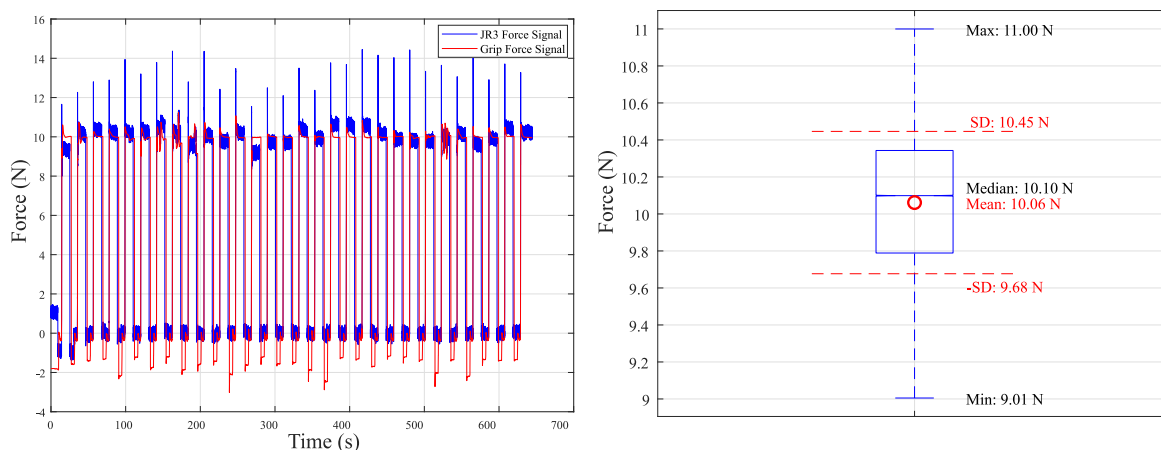
Za boljšo oceno ponovljivosti sile prijema smo izvedli dodatne meritve pri ciljni sili 10 N. Izvedli smo 30 zaporednih ponovitev prijema, rezultati pa so prikazani na sliki 8.

Standardna deviacija sile prijema pri 10 N znaša 0,45 N, kar ustreza relativni vrednosti 4,5 %. Povprečna izmerjena sila prijema, določena z referenčnim senzorjem JR3, znaša 10,1 N. Ti rezultati kažejo na dobro ponovljivost sistema in stabilno delovanje regulatorja sile.

Na podlagi meritev točnosti in ponovljivosti lahko zaključimo, da razvito prijemalo omogoča zanesljivo in natančno vodenje sile prijema.



Slika 7: Razmerje med željeno silo (os x) in izmerjeno silo (os y). Idealno ujemanje bi ustrezalo premici $y = x$.



Slika 8: Rezultati 30 ponovitev prijema pri sili 10 N: časovni potek posameznih meritev (levo) in škatlični diagram porazdelitve izmerjenih sil (desno).

Naše modularno rekonfigurabilno prijemalo omogoča doseganje bistveno nižjih sil prijema v primerjavi z obstoječimi industrijskimi rešitvami. Nizke sile prijema so ključnega pomena pri manipulaciji občutljivih ali mehkih objektov, kjer lahko prekomerna sila povzroči poškodbe. Hkrati širok razpon nastavljive sile prijema omogoča uporabo prijemala v različnih aplikacijah – od prijemanja togih in težjih predmetov pri višjih silah (npr. do 50 N) do manipulacije občutljivih objektov pri nizkih silah (npr. okoli 5 N), na primer pri obiranju sadežev brez povzročanja poškodb.

Majhna relativna napaka sile prijema dodatno povečuje zanesljivost sistema, saj omogoča natančno doziranje sile tudi v območju nizkih vrednosti.

Večina industrijskih prijemal ne omogoča neposredne nastavitve absolutne sile prijema, temveč se sila običajno določa posredno kot odstotek maksimalne moči. Pri 100 % prijemalo deluje z maksimalno silo, pri 0 % pa z minimalno, kar omejuje natančnost in ponovljivost pri manipulaciji občutljivih predmetov. Za primerjavo smo eksperimentalno ovrednotili prijemala Robotiq Hand-E, Robotiq 2F-85 in Weiss CRG 30-050. Rezultati

primerjave so podani v tabeli 2.

V primerjavi z obstoječimi prijemali naše razvito prijemalo prinaša več ključnih prednosti, ki izhajajo iz njegove zasnove in integracije senzorike. Ena izmed bistvenih prednosti je neposredno merjenje sile prijema z integriranim senzorjem v nosilcih prstov, kar omogoča natančno regulacijo sile brez vpliva trenja ali mehanskih izgub. Posledično je mogoče dosegati bistveno nižje in bolj nadzorovane sile prijema, kar je ključno pri manipulaciji občutljivih predmetov.

Poleg tega razvito prijemalo omogoča različne načine vodenja, vključno z vodenjem po sili za toge in mehke objekte, kar povečuje njegovo vsestranskost v primerjavi s sistemi, ki temeljijo izključno na vodenju po poziciji. Skupaj te lastnosti predstavljajo pomemben korak k varnemu, prilagodljivemu in robustnemu robotskemu prijemanju v realnih aplikacijah.

Tabela 2: Primerjava minimalne in maksimalne sile prijema ter relativne napake za različna prijemala

Parameter / Prijemalo	Robotiq Hand E	Robotiq 2F-85	Weiss CRG 30-050	Naše dvoprstno prijemalo
Minimalna sila [N]	25	25	15	1
Maksimalna sila [N]	100	100	30	50
Relativna napaka [%]	20	10	25	5

4.4.2 Preizkus sile izvleka

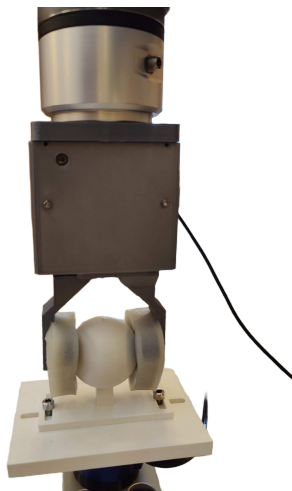
Da bi ocenili obnašanje prijemala z mehкими prsti med vlečenjem objektov, smo izvedli preizkus sile izvleka na trdi plastični krogli premera 70 mm. Eksperiment je bil zasnovan tako, da ovrednoti sposobnost prijemala za generiranje vlečnih sil glede na nastavljeno silo prijema.

Uporabili smo vodenje po sili, pri čemer smo silo prijema nastavljali v območju med 2 N in 20 N s korakom 2 N. Za vsak nivo sile smo izvedli tri ponovitve, kar je omogočilo oceno ponovljivosti meritev. Silo vlečenja smo merili z referenčnim senzorjem JR3, nameščenim v bazi objekta. Objekt skupaj s senzorjem sile je bil pritrjen na voziček, ki se lahko prosto giblje po linearnem vodilu. Takšna zasnova omogoča pasivno centriranje objekta med prijemom ter zmanjšuje vpliv morebitnih bočnih obremenitev in nepravilnosti na rezultate meritev. Na sliki 9 je prikazana eksperimentalna postavitev.

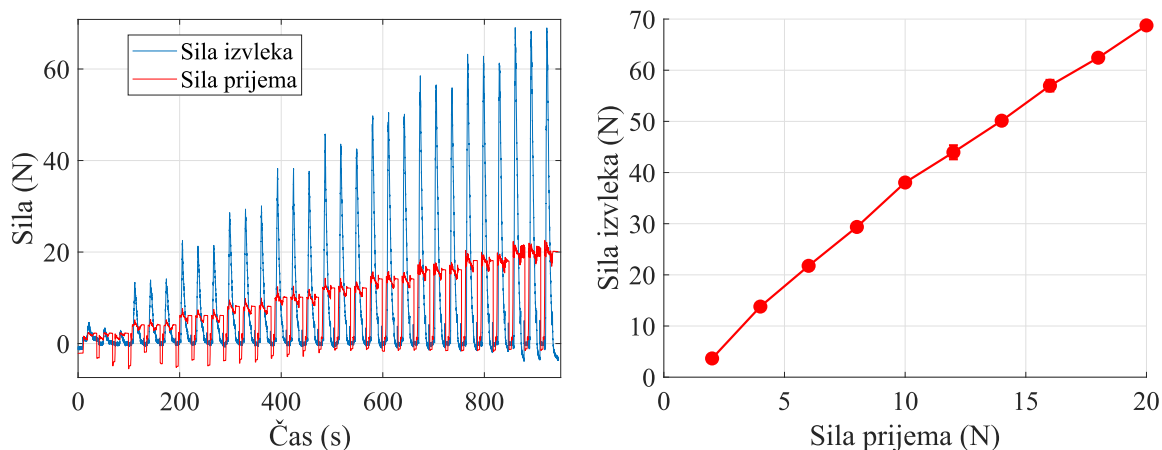
Na grafih 10 so prikazani rezultati preizkusa sile izvleka. Na levem grafu sta prikazana časovna poteka sile prijema in sile izvleka. Na desnem grafu je prikazana odvisnost maksimalne sile izvleka od sile prijema. Opazimo lahko, da sila izvleka približno linearno narašča z večanjem sile prijema, kar je v skladu s pričakovanim modelom trenja med prsti in objektom.

Rezultati kažejo, da prijemalo z mehкими prsti omogoča generiranje relativno velikih vlečnih sil že pri nizkih silah prijema, kar je posledica povečane kontaktne površine in ugodnih trenjskih lastnosti mehkih materialov. Pri sili prijema 20 N dosežemo silo izvleka približno 70 N, kar predstavlja več kot trikratnik aplicirane normalne sile. Takšno razmerje potrjuje učinkovitost mehkih prstov pri zagotavljanju stabilnega prijema tudi v primerih, kjer je potrebna manipulacija z večjimi vlečnimi silami.

Dobljeni rezultati potrjujejo, da je obravnavano prijemalo primerno za aplikacije, kjer je poleg nadzora sile prijema ključnega pomena tudi zanesljivo prenašanje vlečnih sil brez



Slika 9: Eksperimentalna postavitev za preizkus sile izvleka.



Slika 10: Rezultati preizkusa sile izvleka: časovni potek sile prijema in sile izvleka (levo) ter odvisnost maksimalne sile izvleka od sile prijema (desno).

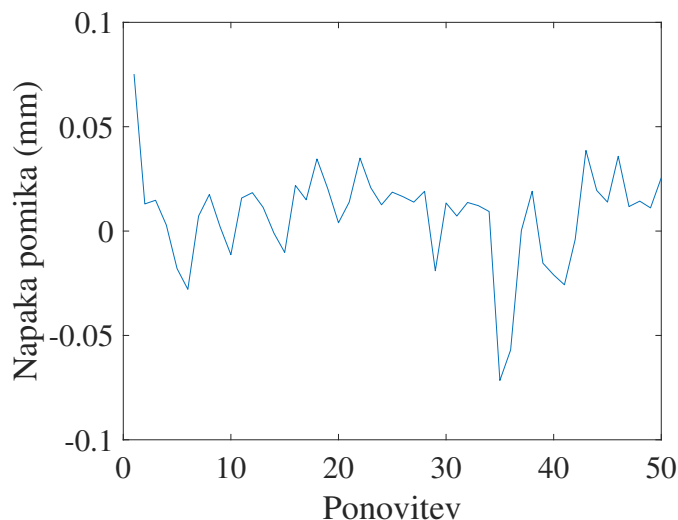
zdrsa objekta.

4.4.3 Ponovljivost pomika prstov

Da bi ovrednotili ponovljivost pomika prstov prijemala, smo izvedli eksperiment s 50 zaporednimi ponovitvami odpiranja in zapiranja prijemala. Namen preizkusa je bil oceniti natančnost in stabilnost pozicioniranja prstov ter vpliv regulacije na ponovljivost gibanja. Med zapiranjem v prijemalu ni bilo prisotnega nobenega objekta. Na ta način smo analizirali izključno lastnosti mehanizma, pogona in regulacijskega sistema. Maksimalni pomik prstov med zapiranjem je bil omejen na 10 mm, uporabljena je bila regulacija položaja. Uporabljena je bila zaprta zanka, kjer je bila vhodna veličina želena pozicija prstov, za regulacijo pa se je uporabljala trenutna pozicija prstov.

Pomik prstov smo določali na podlagi meritev iz enkoderja motorja, ki zagotavlja visoko ločljivost in ponovljivost merjenja položaja. Za vsako ponovitev smo izračunali odstopanje dejanskega pomika glede na referenčno vrednost, s čimer smo dobili napako pomika.

Na grafu 11 so prikazani rezultati vseh 50 ponovitev zapiranja prijemala v obliki napake



Slika 11: Napaka pomika prstov prijemala pri 50 zaporednih ponovitvah zapiranja.

pomika. Opazimo lahko zelo majhno razpršenost meritev, kar kaže na visoko ponovljivost sistema. Standardna deviacija napake pomika znaša 0,03 mm, kar predstavlja zelo nizko odstopanje.

Dobljeni rezultati potrjujejo, da je mehanizem prijemala skupaj z regulacijskim sistemom sposoben zagotavljati natančno in ponovljivo pozicioniranje prstov. Visoka ponovljivost pomika je ključnega pomena za zanesljivo izvajanje nalog, kjer je potrebna natančna kontrola prijema. Rezultati tako dodatno validirajo učinkovitost uporabljenega pristopa vodenja in mehanske zasnove prijemala.

5 Razvoj industrijskih aplikacij v raziskovalnem okolju

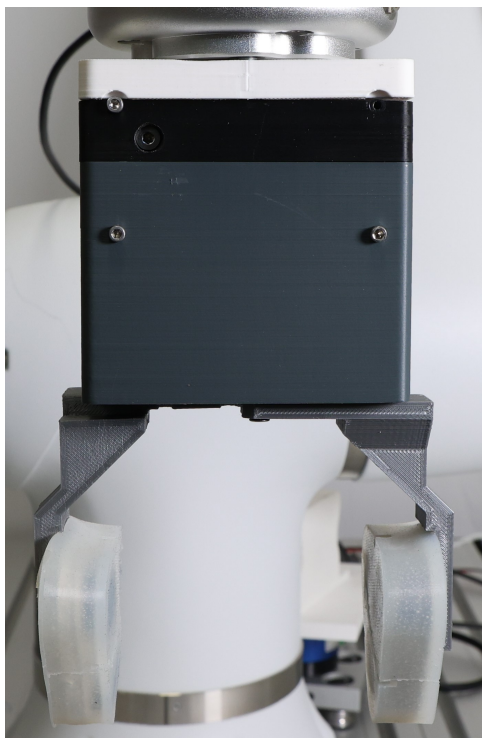
Z namenom demonstracije uporabnosti razvitega modularnega rekonfigurabilnega robotskega prijemala z mehкими prsti (slika 12) pri doseganju cilja naloge A7.2 smo razvili in ovrednotili tri demonstracijske aplikacije v relevantnem okolju. Izbrane aplikacije predstavljajo realistične scenarije uporabe, značilne za industrijska okolja, ter omogočajo celovito preverjanje funkcionalnosti in prilagodljivosti razvitega sistema.

Za potrebe raziskave so bile aplikacije implementirane in preizkušene v relevantnem okolju, pri čemer je bila posebna pozornost namenjena zasnovi eksperimentalnega sistema, ki čim bolj verodostojno posnema pogoje dejanskega industrijskega okolja. S tem smo zagotovili relevantnost rezultatov ter prenosljivost pristopa v prakso.

Obravnavane demonstracijske aplikacije so:

- avtomatizirana priprava raztopin kisline,
- mobilna manipulacija vzorcev tekočin,
- obiranje jabolk z uporabo robotskega vida.

Za vsako izmed aplikacij je bil pripravljen tudi video prikaz delovanja sistema. Podrobnejši opis postopkov in delovanja posameznih aplikacij je podan v nadaljevanju.



Slika 12: Modularno rekonfigurabilno prijemalo z mehкими prsti.

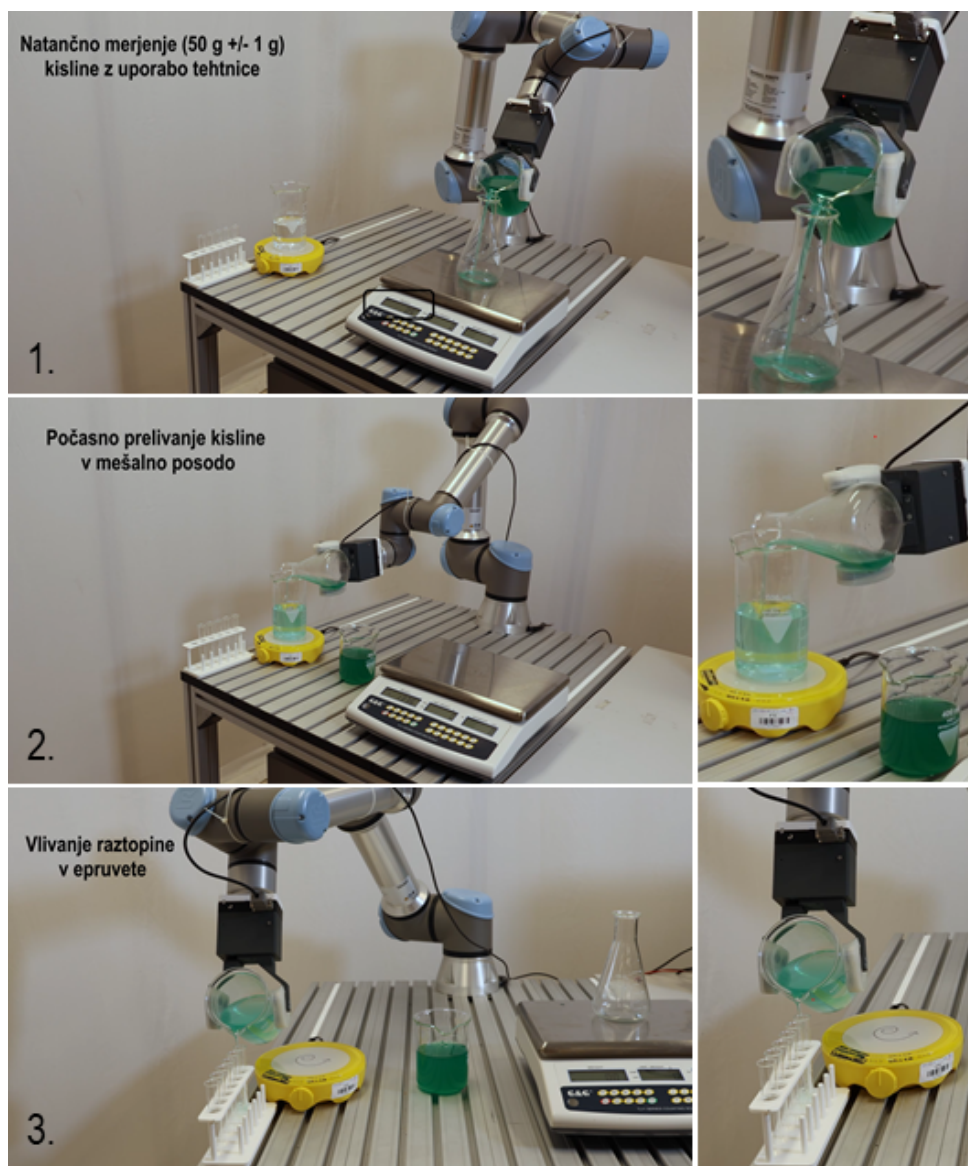
5.1 Avtomatizirana priprava raztopin kisline

Aplikacija omogoča varno in natančno pripravo raztopin kisline z uporabo 6-osnega robota UR5e opremljenega z modularnim rekonfigurabilnim prijemalom z mehкими prsti. Priprava raztopin kisline je standardni postopek v kemijskih laboratorijih, ki je pogosto zamuden. Avtomatizacija postopka omogoča znatno povečanje varnosti, natančnosti in ponovljivosti. Robot z uporabo tehtnice in nadzorovanega prelivanja zagotavlja natančno doziranje in mešanje, medtem ko prijemalo z mehкими prsti omogoča skrbno rokovanje s krhkimi steklenimi predmeti, s čimer se preprečijo poškodbe in razlitja.

Postopek priprave raztopin vključuje naslednje korake:

1. **Merjenje natančne količine kisline:** Robot s pomočjo tehtnice natančno prelije 50 g kisline v erlenmajerico, pri čemer znaša negotovost prelivanja ± 1 g. Natančno merjenje je ključno za zagotavljanje ponovljivosti in varnosti postopka.
2. **Počasno prelivanje kisline v vodo:** Robot iz erlenmajerice zelo počasi prelija kislino v čašo, ki vsebuje 300 ml destilirane vode. Počasno prelivanje preprečuje prekomerno lokalno segrevanje raztopine in morebitne nepredvidene reakcije. Med prelivanjem magnetno mešalo stalno deluje, kar zagotavlja homogeno porazdelitev kisline v vodi.
3. **Prelivanje raztopine iz čaše v epruvete:** Ko je raztopina homogena, robot previdno prelije raztopino iz čaše v manjše epruvete. Postopek vključuje natančno pozicioniranje epruvet in čaše, da se prepreči razlitje ali poškodba posod.

Uporabljena sila stiska za vse steklene objekte je bila 10 N. Sila je bila izbrana na podlagi predhodnega testiranja, kjer smo opazovali manipuliranje različnih vsebnikov napolnjenih z vodo. Pri silah manjših od 5 N se je čaša, prijeta v prijemalu, pri večjih



Slika 13: Postopek aplikacije avtomatizirane priprave raztopin kisline.

nagibih rahlo premaknila znotraj prijema. Pri silah nad 5 N so stekleni vsebniki vedno ostali togo prijeti znotraj mehkih prstov. Večja odstopanja lege prijetega predmeta znotraj prijemala lahko predstavljajo problem pri nadaljnjem prelivanju in prelaganju. Težava pri pretakanju tekočin je tudi v tem, da se masa prijetega objekta nenehno spreminja kar predstavlja težave za zanesljiv prijem. Mehki prsti s silikonsko plastjo in premičnimi blazinicami zagotavljajo, da objekt ostane zanesljivo prijet tudi med prelivanjem tekočin.

Izvedena aplikacija potrjuje, da razvito prijemalo omogoča natančno in zanesljivo rokovanje s krhkimi predmeti pri nizkih silah prijema. Integracija senzorja sile v nosilcih prstov omogoča neposredno regulacijo sile, kar preprečuje poškodbe steklovine pri nalogah, kot je prelivanje tekočin. Mehki prsti s pasivno prilagodljivimi blazinicami dodatno izboljšajo stabilnost prijema in zmanjšujejo občutljivost na manjša odstopanja položaja objekta.

5.2 Mobilna manipulacija vzorcev

Prenašanje kemijskih vzorcev med laboratoriji je pogosto opravilo v kemijski in farmacevtski industriji. Tradicionalno se vzorce večinoma prenaša ročno ali z uporabo vozičkov, ki jih potiskajo zaposleni. Avtomatizacija prenosa vzorcev s pomočjo mobilnih robotskih sistemov omogoča razbremenitev zaposlenih ter hkratno izboljšanje učinkovitosti, varnosti in sledljivosti vzorcev.

5.2.1 Zasnova sistema

Modularni mobilni robotski sistem je sestavljen iz mobilne platforme MIR100 in sodelujočega robota UR5e. Skupna masa mobilnega manipulatorja je 150 kg. Nadgradnja platforme MIR100 omogoča namestitvev manipulatorjev z maso do 50 kg, kar zagotavlja združljivost z različnimi robotskimi manipulatorji. Na nepremični robotski postaji je nameščen robot UR7e.

- **Robotski prijemali**

Na mobilni platformi je nameščen robot UR5e z industrijskim triprstnim prijemalom Tesollo DG-3F-B (slika 14). Prijemalo omogoča nastavljivo silo prijema in različne konfiguracije prijema. Za aplikacijo smo izbrali vzporedni prijem, kjer sta dva prsta postavljena vzporedno drug ob drugem, tretji prst pa na nasprotni strani. Prijemalo komunicira z robotom preko TCP protokola in URCaps aplikacije. Na nepremični robotski postaji je nameščen robot UR7e z razvitim dvoprstnim modularnim rekonfigurabilnim prijemalom z mehкими prsti. Mehki prsti omogočajo varno rokovanje s krhкими steklenimi posodami, preprečujejo poškodbe in zagotavljajo natančno pozicioniranje vzorcev.

- **Robotski vid**

Za analizo barve in količine vzorcev je bila uporabljena RGB kamera z ločljivostjo 1080p. Za zaznavanje nivoja in barve tekočin je bil uporabljen model YOLO V9, ki je bil predhodno naučen na različnih steklenih posodah z različno količino in barvo tekočin. Sistem natančno določi napolnjenost posode in barvo vsebine, na podlagi česar odloči, kam je treba vzorec odložiti ali usmeriti za nadaljnjo obdelavo ali skladiščenje.

- **Mobilna platforma**

Za prevoz vzorcev smo uporabili mobilno platformo MiR100. Platforma lahko prevaža do 100 kg tovora in doseže hitrost do 1,5 m/s. Opremljena je z zunanjiimi senzorji, kot so dva SICK S300 LiDAR sistema, Intel RealSense 3D kamera ter štiri ultrazvočni senzorji. Poleg tega vključuje tudi notranje senzorje, kot so IMU enota, enkoderji motorjev in koles ter pospeškometer. Vsi senzorji so povezani s krmilnim sistemom, ki temelji na ogrodju ROS in deluje na vgrajenem računalniku. To omogoča popolnoma avtonomno delovanje in navigacijo tako okoli statičnih kot dinamičnih ovir.

- **Komunikacija med komponentami**

Celotno aplikacijo je upravljala enotna nadzorna aplikacija na prenosnem računalniku, implementirana v Pythonu. Ta je skrbela za usklajevanje vseh korakov sistema, vključno s komunikacijo z mobilno platformo MiR100 preko vmesnika MiR

REST API, krmiljenjem robota UR5e na mobilni platformi preko RTDE ter po potrebi tudi krmiljenjem robota UR7e. Na istem računalniku je potekala tudi obdelava slike in detekcija vzorcev z uporabo RGB kamere.



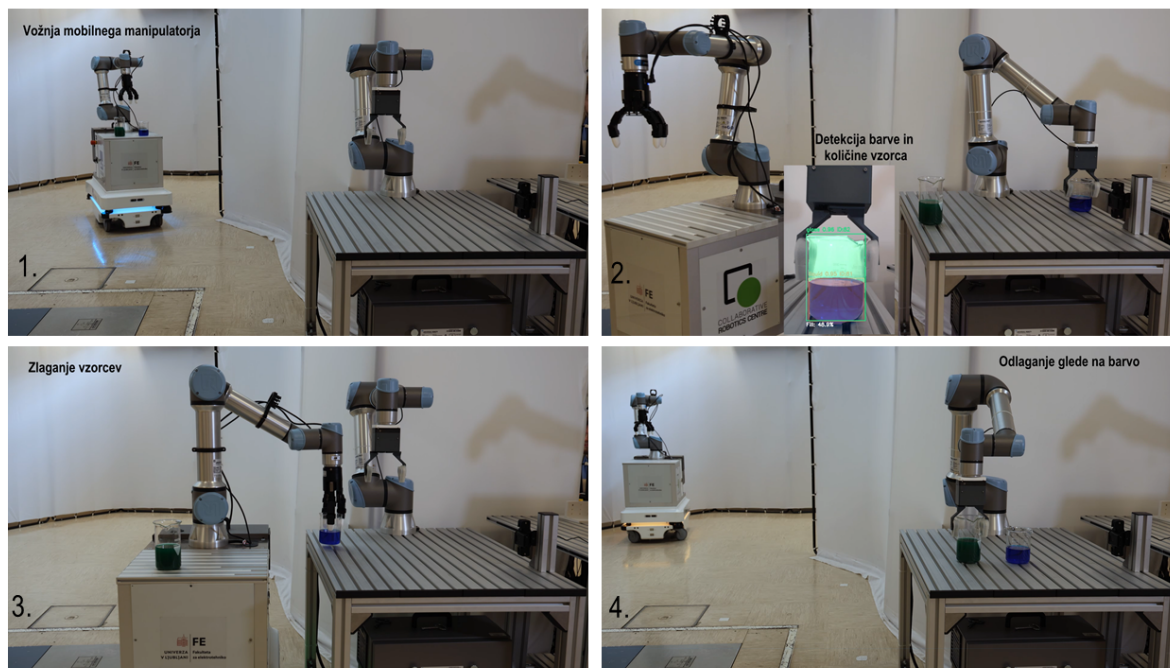
Slika 14: Triprstno robotsko prijemalo Tesollo DG-3F-B.

5.2.2 Potek aplikacije

1. Vožnja mobilnega manipulatorja do odlagalnega mesta. Pri odlagalnem mestu je nameščen 3D marker za mobilno platformo, ki omogoča natančno pozicioniranje platforme ob delovno postajo.
2. Mobilni manipulator odloži vzorce na delovno mesto.
3. Robot UR7e na delovni postaji premakne vzorec do kamere, ga odloži in se nato umakne iz vidnega polja. Zatem se z uporabo RGB kamere izvede detekcija barve in količine vzorca.
4. Robot odloži vzorec na izbrano mesto glede na barvo in količino tekočine.

Takšen pristop omogoča popolnoma avtomatizirano, natančno in varno manipulacijo vzorcev, hkrati pa zmanjšuje možnost človeških napak, tveganja razlitij in fizične obremenitve zaposlenih.

Rezultati aplikacije mobilne manipulacije potrjujejo, da kombinacija natančnega vodenja sile in mehanske prilagodljivosti omogoča zanesljivo delovanje tudi v kompleksnih in dinamičnih sistemih. Modularnost prijemale omogoča enostavno integracijo v različne robotske platforme, medtem ko mehki prsti kompenzirajo napake pri pobiranju objektov. Mobilna platforma MiR100 ima majhno napako pri pozicioniranju v prostoru. Ta napaka se prenese na postavitve objektov med zlaganjem iz platforme na delovno postajo. Majhne napake pri pozicijah objektov lahko predstavljajo probleme pri pobiranju. Naši mehki prsti omogočajo stabilen in zanesljiv prijem tudi, če objekt ni točno pozicioniran na sredini prstov.



Slika 15: Postopek mobilne manipulacije vzorcev.

5.3 Obiranje jabolk z uporabo robotskega vida

Razvita je bila aplikacija obiranja jabolk z uporabo robotskega vida. V sistem sta bila vključena dva sodelujoča robota Neura LARA 8 z nosilnostjo 8 kg. Na desnem robotu je bila nameščena globinska kamera Intel RealSense D435, ki omogoča zajem RGB in globinske slike v ločljivosti 1280×720 ter z globinskim vidnim poljem $85,2 \times 58$ cm. Na levem robotu je bilo nameščeno modularno rekonfigurabilno robotsko prijemalo z integriranim senzorjem sile in mehkiimi prsti.

Sila prijema je bila nastavljena na 5 N, kar je omogočalo nežen in varen prijem jabolka brez poškodb. Za potrebe aplikacije je bilo jabolko pritrjeno na drevo z magnetom, kar je omogočilo ponovljive in kontrolirane pogoje testiranja. Celoten sistem je bil krmiljen z uporabo ROS (Robot Operating System), ki je omogočal sinhronizacijo zaznavanja, načrtovanja gibanja in vodenja robotov ter prijemala.

Postopek obiranja jabolka je potekal v naslednjih korakih:

1. Desni robot z RGB-D kamero zazna položaj jabolka na drevesu in določi njegovo prostorsko lego.
2. Na podlagi zaznave robot sproti prilagaja svojo pozicijo, tako da jabolko ohranja v središču vidnega polja, pri čemer se hkrati izogiba morebitnim trkom z levim robotom.
3. Levi robot se nato približa jabolku ter ga z uporabo prijemala z mehkiimi prsti prime in odtrga z drevesa.

Med testiranjem je občasno prišlo do manjših napak pri detekciji jabolka, kar je povzročilo nekoliko nenatančen prijem. Kljub temu so mehki prsti s premičnimi blazinicami v vseh ponovitvah uspešno prijeli in odrgali jabolko z drevesa, tudi v primerih, ko jabolko ni bilo optimalno poravnano s središčem prijemala. Takšna zasnova mehkih prstov



Slika 16: Postopek obiranja jabolk z uporabo robotskega vida.

bistveno poveča robustnost celotne aplikacije, saj kompenzira neizogibne netočnosti pri zaznavi položaja objekta v prostoru.

6 Zaključek

Razvito modularno rekonfigurabilno robotsko prijemalo predstavlja celovito rešitev, ki združuje napredno mehansko zasnovo, integrirano senzoriko in učinkovite pristope vodenja za natančno manipulacijo objektov. Ključna inovacija sistema je integracija senzorja sile neposredno v nosilce prstov, kar omogoča neposreden prenos sile skozi merilni element in s tem bistveno izboljša točnost ter zanesljivost meritev. Takšna zasnova zmanjšuje vplive mehanskih izgub, kot so trenje, zračnosti in deformacije drugih elementov, ter omogoča kakovostne povratne informacije za zaprtozanko regulacijo sile prijema.

Eksperimentalni rezultati potrjujejo visoko zmogljivost sistema. Dosežena povprečna relativna napaka sile prijema okoli 5 % ter nizka standardna deviacija pri ponovljenih meritvah kažeta na dobro ujemanje med želeno in dejansko silo ter na stabilno delovanje regulatorja. Poleg tega visoka ponovljivost pomika prstov potrjuje natančnost mehanske zasnove in uporabljenega pogonskega sistema. Preizkusi sile izvleka dodatno izkazujejo učinkovitost mehkih prstov, saj omogočajo generiranje velikih vlečnih sil že pri relativno nizkih silah prijema.

Pomembna prednost razvitega sistema je tudi njegova modularnost. Ločitev nosilcev prstov od kontaktnih elementov omogoča enostavno prilagajanje prstov različnim aplikacijam brez posegov v senzoriko ali krmilni sistem. Mehki prsti s pasivno prilagodljivimi blazinicami in silikonsko plastjo dodatno povečujejo kontaktno površino, izboljšujejo trenje ter zmanjšujejo občutljivost na netočnosti pri pozicioniranju objektov. S tem se poveča robustnost sistema v realnih pogojih, kjer popolna natančnost zaznave ali postavitve objektov pogosto ni zagotovljena.

Razvite demonstracijske aplikacije dodatno potrjujejo praktično uporabnost sistema. Pri avtomatizirani pripravi raztopin se je izkazala prednost natančnega nadzora sile pri rokovanju s krhkimi steklenimi objekti, kar povečuje varnost in zanesljivost postopka. V primeru mobilne manipulacije vzorcev je kombinacija mobilne platforme, robotskega vida in prilagodljivega prijemala omogočila učinkovito in avtonomno izvajanje kompleksnih nalog. Pri aplikaciji obiranja jabolk pa se je pokazala ključna prednost mehkih prstov, ki omogočajo uspešno manipulacijo tudi ob prisotnosti napak v zaznavi položaja objekta.

Na podlagi predstavljenih rezultatov lahko zaključimo, da razvito prijemalo predstavlja pomemben napredek na področju robotskega prijemanja, saj omogoča natančno, prilagodljivo in robustno manipulacijo v širokem spektru aplikacij. Kombinacija neposrednega merjenja sile, naprednega vodenja in mehanske prilagodljivosti odpira nove možnosti za uporabo v industrijskih, laboratorijskih in kmetijskih okoljih, kjer so zahteve po varnosti, natančnosti in zanesljivosti ključnega pomena.