

Program

**Digitalna transformacija robotiziranih tovarn
prihodnosti**

DIGITOP

Rezultat D3.5:

Oblikovanje, preskusni protokoli in rezultati
validacije mehkih prstov in rekonfigurabilnim
mehanizmom 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	2
3	Uvod	2
4	Zasnova modularnega rekonfigurabilnega prijemala z vključenim senzorjem sile v nosilcih prstov	4
5	Zasnova mehkih prstov	6
6	Eksperimentalna postavitve	7
6.1	Analiza podatkov	10
7	Rezultati	10
7.1	Test prijema po sili in po obliki	10
7.2	Preizkus sile izvleka	13
7.3	Test deformacije mehkih objektov	15
8	Zaključek	17

1 Povzetek

V okviru sklopa A3.2 smo razvoj usmerili v module varnega in rekonfigurabilnega robotskega prijemala za občutljive predmete. Varnost prijemanja temelji na možnosti regulacije sile prijema in na zmanjšani deformaciji mehkih objektov med prijemom, rekonfigurabilnost pa na modularni zasnovi prijemala in zamenljivosti prstov glede na zahteve aplikacije. Vsestranskost razvite rešitve je podprta z ovrednotenjem prijemanja na objektih različnih geometrij, medtem ko varno prijemanje omogočata mehka kontaktna plast in porazdelitev kontakta preko več prilagodljivih kontaktnih elementov. Takšna zasnova združuje natančno vodenje prijema, prilagodljivost različnim objektom ter varno manipulacijo občutljivih predmetov.

Razvili smo koncept modularnega rekonfigurabilnega prijemala z integriranim senzorjem sile, nameščenim neposredno v nosilec posameznega prsta. Senzor je vključen v prenosno pot sile med prstom in aktuatorjem, zato izmerjena vrednost natančno odraža dejansko silo na prstu, neodvisno od trenja, zračnosti ali deformacij v mehanskem prenosu. Takšna namestitvev omogoča zanesljivo merjenje sile prijema ter hkrati ohranja mehansko togost sistema.

Pomembna prednost je tudi ločitev merilnega sistema od kontaktnih elementov. Ker senzor ni integriran v same prste, so ti lahko poljubne oblike in velikosti ter jih lahko preprosto zamenjamo. Integrirani senzor sile omogoča implementacijo zaprtozankne regulacije sile prijema, kjer krmilni sistem v realnem času prilagaja delovanje aktuatorja glede na referenčno vrednost. To omogoča natančno določitev sile ter posledično stabilno manipulacijo tudi občutljivih ali krhkih predmetov.

Mehki prsti so sestavljeni iz treh polkrožnih blazinic, ki se lahko prosto gibajo v utorih v bazi prsta. Blazinice so prekrite s tanko plastjo silikona. Polkrožne blazinice omogočajo dobro prilagajanje prstov različnim oblikam objektov, medtem ko silikonska plast omogoča boljše prilagajanje manjšim nepravilnostim na površini objekta ter hkrati povečuje trenje med objektom in prstom.

Za izdelavo je uporabljen cenovno ugoden postopek, ki vključuje 3D-tiskanje in ulivanje silikona, zaradi česar so prsti primerni za širok spekter aplikacij. Eksperimentalna validacija je bila izvedena z merjenjem vlečne sile na več 3D-tiskanih predmetih z različnimi geometrijami ter z meritvami deformacije na mehkem objektu. Rezultati kažejo, da prsti, ki združujejo pasivno poravnavaajoče se blazinice z mehko silikonsko plastjo, bistveno izboljšajo tako prilagodljivost kot tudi vlečno silo pri robotskem prijemanju.

2 Aktivnosti, namen

Modularno rekonfigurabilno prijemalo z mehкими prsti (ULFE-LR)

Cilj te aktivnosti je razviti module varnega, rekonfigurabilnega robotskega prijemala za občutljive predmete. Ustvarili bomo modularno zasnovo s togim in aktivno rekonfigurabilnim mehanizmom v dlani in mehкими prsti, ki zagotavljajo vsestransko in nežno prijemanje.

3 Uvod

Robotska prijemala imajo pomembno vlogo v sodobni avtomatizaciji, saj omogočajo manipulacijo predmetov različnih oblik, velikosti in površinskih lastnosti. Za zanesljivo pri-

jemanje morajo prijemala zagotoviti ustrezno silo prijema, ki preprečuje zdrs ali poškodbe objekta, hkrati pa se morajo prilagoditi različnim geometrijam predmetov. Klasična toga prijemala omogočajo prenos velikih sil, vendar zahtevajo natančno pozicioniranje in se slabše prilagajajo geometrijskim odstopanjem. Po drugi strani mehka prijemala omogočajo dobro prilagajanje obliki objekta, vendar imajo pogosto omejeno nosilnost in slabši prenos sil pri večjih obremenitvah.

Zaradi teh omejitev se trenutno razvijajo različna prilagodljiva robotska prijemala, ki poskušajo združiti prednosti togih in mehkih sistemov. Med pogostimi pristopi so mehki prsti, podaktuirani mehanizmi in različne adaptivne strukture. Takšne rešitve izboljšujejo prilagodljivost prijema, vendar pogosto temeljijo predvsem na deformaciji materiala, kar lahko omejuje stabilnost prijema in prenos sil pri manipulaciji težjih predmetov.

Naše delo je bilo sestavljeno iz dveh delov, v prvem delu smo razvili zasnovo modularnega rekonfigurabilnega prijemala z vključenim senzorjem sile v nosilcih prstov, v drugem delu pa smo razvili in ovrednotili mehke prste, sestavljene iz treh premičnih blazinic.

Razvito modularno rekonfigurabilno robotsko prijemalo (oziroma rekonfigurabilni mehanizem v dlani) z integriranim senzorjem sile omogoča natančno in zanesljivo merjenje sile neposredno v prenosni poti prstov. V primerjavi z obstoječimi industrijskimi rešitvami se razlikuje po tem, da je senzor sile nameščen v nosilcu posameznega prsta, ne pa v samem prstu ali na njegovi površini. Takšna zasnova omogoča uporabo različnih tipov zamenljivih prstov brez vpliva na kakovost meritev. Sistem odlikujejo visoka mehanska togost, prilagodljivost konfiguracije ter možnost implementacije zaprtozankne regulacije sile prijema. Ta pristop omogoča natančno doziranje sile in stabilno manipulacijo predmetov, zaradi česar je prijemalo posebej primerno za zahtevne aplikacije, kjer sta ključni ponovljivost in varno rokovanje z občutljivimi objekti.

Razviti mehki prsti robotskega prijemala združujejo pasivno poravnavačo se toge elemente z mehko silikonsko plastjo. Prsti vključujejo polkrožne blazinice, nameščene v utorih z nizkim trenjem, ki omogočajo njihovo pasivno poravnavo glede na obliko objekta med prijemom. Mehka silikonska plast izboljšuje prilagajanje manjšim nepravilnostim na površini objekta in povečuje trenje v kontaktu. Takšna kombinacija omogoča boljše prilagajanje geometriji objekta ob hkratnem učinkovitem prenosu sil, kar prispeva k stabilnejšemu in robustnejšemu robotskemu prijemanju.

Razvita zasnova prijemala temelji na načelih rekonfigurabilnosti, modularnosti in varnega prijemanja občutljivih predmetov. Rekonfigurabilnost sistema se kaže na več ravneh. Prva je možnost prilagajanja sile prijema, kar predstavlja aktivno rekonfigurabilnost sistema, saj je mogoče prijemanje izvajati z različnimi nivoji sile glede na lastnosti objekta in zahteve naloge. Druga raven rekonfigurabilnosti je povezana z različnimi načini vodenja prijemala, pri čemer sistem omogoča vodenje po poziciji ter vodenje po sili, prilagojeno tako togim kot tudi mehkim objektom. Poleg tega je model oziroma koncept prsta zasnovan splošno, tako da ga je mogoče prilagoditi za različne geometrije objektov in različne aplikacije.

Modularnost prijemala izhaja iz zasnove, pri kateri je mogoče prste enostavno menjati brez potrebe po ponovni kalibraciji prijemala. To omogoča dejstvo, da je senzor sile integriran v prijemalo oziroma v dlan, ne pa v sam prst, zato menjava prstov ne vpliva na merjenje sile prijema. Modularna je tudi sama zasnova prstov, kar omogoča prilagajanje njihove oblike, kontaktnih elementov in mehanskih lastnosti glede na zahteve konkretne naloge.

Pomemben vidik razvite rešitve je tudi varnost prijemanja. Ta temelji na neposrednem merjenju sile prijemanja, ki omogoča nadzor nad silo prijema, ter na uporabi meh-

kih prstov, ki zmanjšujejo lokalne obremenitve in možnosti za poškodbe občutljivih ali deformabilnih predmetov. Takšna kombinacija omogoča bolj varno, nežno in prilagodljivo manipulacijo širokega spektra objektov.

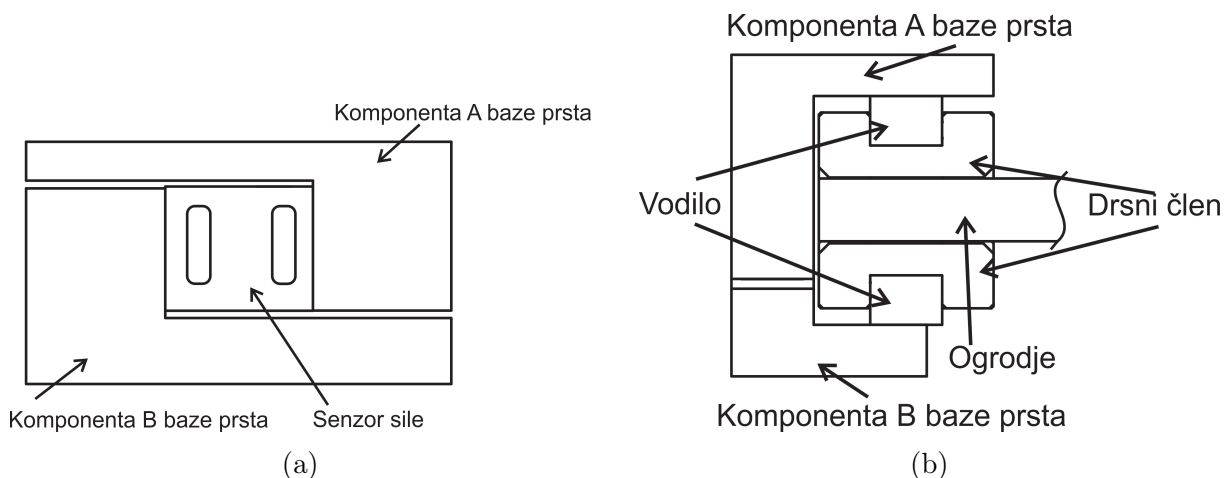
4 Zasnova modularnega rekonfigurabilnega prijemala z vključenim senzorjem sile v nosilcih prstov

V okviru projekta smo razvili modularno rekonfigurabilno robotsko prijemalo (oziroma rekonfigurabilni mehanizem v dlani) z integriranim senzorjem sile v bazi prstov. Senzor sile je umeščen v notranjost prijemala, neposredno v nosilec posameznega prsta, kar omogoča natančno in zanesljivo merjenje sile prijema. Takšna zasnova hkrati zagotavlja enostavno menjavo prstov ter uporabo različnih tipov prstov glede na zahteve aplikacije.

Osnovo prijemala sestavljajo ogrodje, aktuator za generiranje sile prijema ter vsaj dva nosilca prstov. Vsak nosilec prsta je razdeljen na dva funkcionalna dela: prvi del, ki prenaša silo iz prsta, in drugi del, ki je mehansko povezan z aktuatorjem. Med obema deloma je nameščen senzor sile, ki hkrati opravlja nosilno in merilno funkcijo. Ker je senzor vključen neposredno v prenosno pot sile, izmerjena vrednost ustreza dejanski sili na prstu, ne glede na vplive trenja, zračnosti ali deformacij v mehanskem prenosu.

Nosilci prstov so drsno vodeni glede na ogrodje preko sistema vodil in ležišč, ki zagotavljajo vzporedno gibanje prstov ter visoko lateralno togost. Takšna zasnova preprečuje prenos stranskih obremenitev na senzor sile in omogoča natančno ter ponovljivo pozicioniranje predmeta. Za zmanjšanje trenja so lahko uporabljeni materiali z nizkim koeficientom trenja ali kotalni elementi.

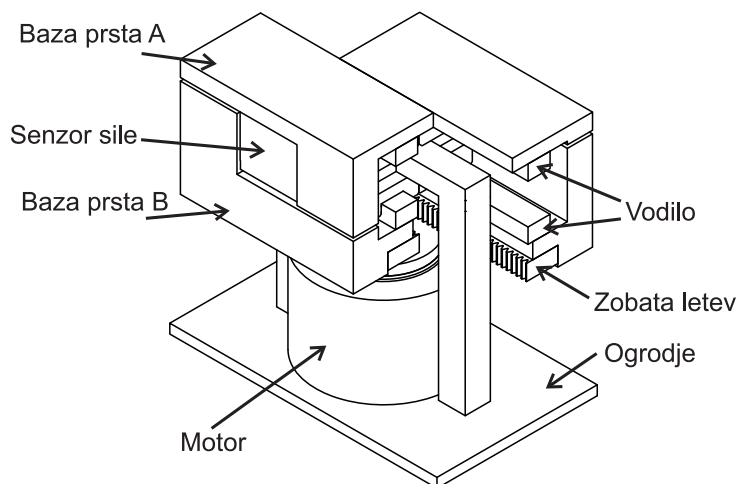
Modularnost sistema omogoča uporabo različnih konfiguracij prijemala, od dvoprstnih do večprstnih izvedb. Nosilci prstov predstavljajo samostojne enote, ki jih je mogoče poljubno razporejati glede na zahteve aplikacije (npr. simetrične ali radialne postavitve). Vsak nosilec lahko vključuje lasten senzor sile, kar omogoča zaznavanje nesimetričnih obremenitev, večjo robustnost sistema ter redundanco meritev. V enostavnejših, simetričnih primerih zadostuje tudi uporaba enega samega senzorja.



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

Pomembna prednost obravnavane zasnove je ločitev merilnega sistema od kontaktnih

elementov. Ker senzor ni integriran v prste, ti ohranjajo geometrijsko svobodo, visoko togost in majhne dimenzije. Prsti so lahko izvedeni kot zamenljivi elementi, kar omogoča hitro prilagoditev prijemale različnim oblikam in lastnostim predmetov brez vpliva na merjenje sile.



Slika 2: Konceptualni prikaz zasnove modularno rekonfigurabilnega robotskega prijemale z integriranim senzorjem sile. Prikazana je struktura dvoprstnega prijemale z označenimi posameznimi komponentami.

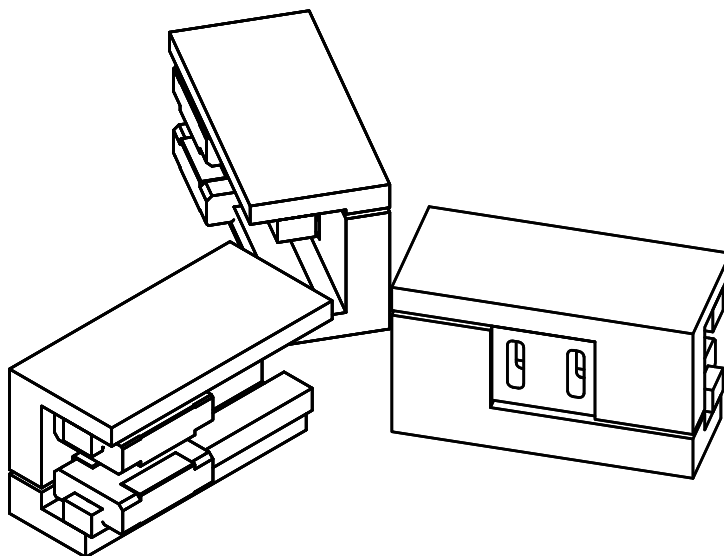
Integrirani senzor sile omogoča implementacijo zaprtozančne regulacije sile prijema. Krmilna enota na osnovi meritev v realnem času prilagaja delovanje aktuatorja glede na referenčno vrednost sile. Tak pristop omogoča natančno doziranje sile, omejevanje maksimalnih obremenitev ter stabilno držanje predmetov tudi ob prisotnosti motenj ali variacij v kontaktnih pogojih. Po potrebi je sistem mogoče nadgraditi z merjenjem pomika, kar omogoča kombinirano regulacijo sile in položaja.

Opisana zasnova združuje kompaktnost, mehansko togost, natančno merjenje sile in visoko stopnjo prilagodljivosti, kar jo naredi posebej primerno za manipulacijo občutljivih ali krhkih predmetov ter za aplikacije, kjer je zahtevana visoka ponovljivost in natančnost prijemanja.

Razvita zasnova prijemale omogoča tudi razširitev iz osnovne dvoprstne konfiguracije v večprstne izvedbe, kot je na primer triprstno prijemalo prikazano na sliki 3. Takšna razširitev temelji na modularni arhitekturi sistema, kjer so posamezni funkcionalni sklopi – baza prsta A, senzor sile in baza prsta B – zasnovani kot ponovljivi gradniki. Z zaporedno uporabo teh modulov je mogoče oblikovati konfiguracijo z več prsti, pri čemer vsak prst ohranja svojo mehansko funkcionalnost, medtem ko je merjenje sile še vedno centralizirano v strukturi prijemale.

V primeru triprstne konfiguracije so moduli razporejeni tako, da se osnovni sklop (baza prsta A – senzor sile – baza prsta B) smiselno ponovi in razširi, kar omogoča prilagojeno razporeditev treh prstov. Takšna zasnova omogoča ohranjanje ključnih lastnosti sistema, kot so merjenje sile, modularnost ter enostavna zamenljivost posameznih komponent, hkrati pa povečuje stabilnost prijema in razširja nabor možnih manipulacijskih nalog.

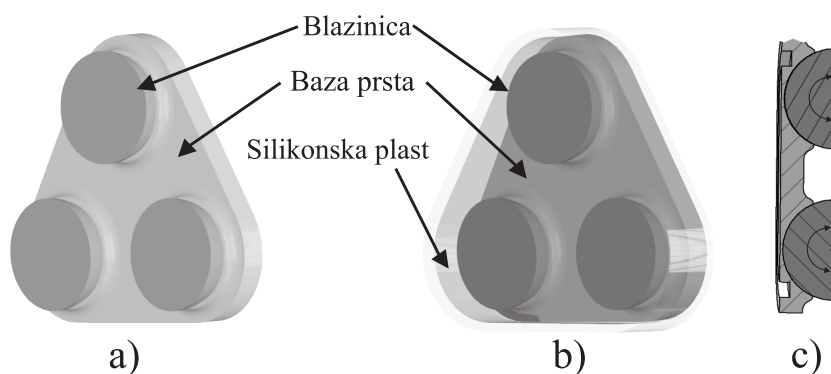
Prednost takšnega pristopa je v tem, da razširitev na večprstne konfiguracije ne zahteva bistvenih sprememb osnovne zasnove, temveč temelji na ponovni uporabi obstoječih modulov. To omogoča učinkovito prilagajanje prijemale različnim aplikacijam, kjer je za stabilen prijem potrebna večja kontaktna površina ali bolj kompleksna porazdelitev sil.



Slika 3: Konceptualni prikaz razporeditve treh nosilcev prstov v trikotni konfiguraciji.

5 Zasnova mehkih prstov

Za namene projekta smo razvili prste robotskega prijemala, ki se lahko prilagajajo objektom različnih oblik, hkrati pa omogočajo doseganje velikih vlečnih sil pri relativno majhnih silah prijema. Takšna zahteva je posebej pomembna pri manipulaciji mehkih, deformabilnih ali krhkih objektov, kjer lahko prevelika normalna sila povzroči poškodbe. Hkrati pa je pomembna tudi pri aplikacijah, kjer je potreben zanesljiv prenos sil med prsti in objektom. Predhodne analize klasičnih mehkih prstov so pokazale nezadostno strukturno togost pri večjih obremenitvah, kar je vodilo k razvoju togih, vendar prilagodljivih prstov, ki ohranjajo dobro prilagajanje obliki objekta in hkrati omogočajo večjo nosilnost.

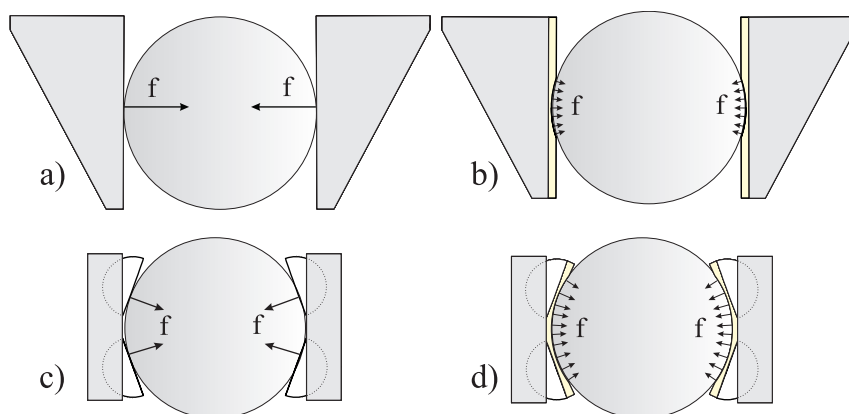


Slika 4: (a) Prilagodljiv prst robotskega prijemala s tremi pasivno poravnavačimi se polkrožnimi blazinicami. (b) Enaka konfiguracija prsta z dodano mehko silikonsko plastjo, ki prekriva vse tri blazinice. (c) Prerez s stranske strani, ki prikazuje pasivno rotacijo polkrožnih blazinic.

Za odpravo teh omejitev smo razvili prilagodljivo kontaktno površino, sestavljeno iz več pasivno poravnavačih se polkrožnih blazinic. Vsaka blazinica je nameščena v utoru z nizkim trenjem, ki omogoča njeno prosto rotacijo okoli središča. Vsak prst vsebuje tri polkrožne blazinice, razporejene v konfiguraciji enakostraničnega trikotnika (prikazano na sliki 4), kar se je izkazalo kot zelo vsestranska rešitev za manipulacijo objektov različnih

oblik. Razporeditev blazinic pa ni omejena le na to konfiguracijo, saj je mogoče glede na zahteve aplikacije uporabiti tudi drugačno število ali razporeditev blazinic. Neodvisna rotacija posamezne blazinice zagotavlja dober stik s površino objekta ter enakomernejšo porazdelitev pritiska tudi pri neenakomernih ali kompleksnih geometrijah.

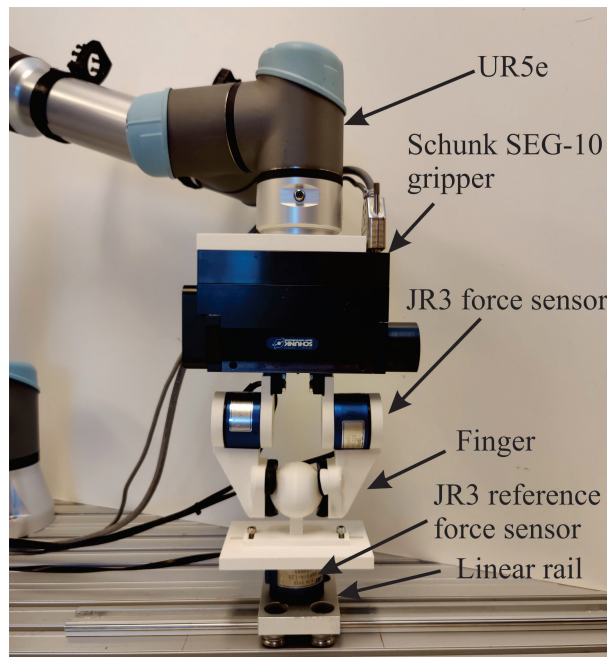
Pri manipulaciji mehkih ali krhkih objektov je povečanje kontaktne površine ključnega pomena, saj zmanjšuje lokalne pritiske in s tem tveganje za poškodbe objekta. Večja kontaktna površina omogoča enakomernejšo porazdelitev sil po površini objekta. Kot je prikazano na sliki 5, pasivno poravnavaajoče se blazinice povečajo število kontaktnih točk z dveh na štiri v primerjavi s klasičnimi ravnimi prsti. Dodajanje mehke plasti na ravne prste dodatno poveča kontaktno površino, saj se točkovni kontakti spremenijo v manjše površinske kontakte, odvisno od lastnosti materiala in debeline plasti. Kombinacija blazinic in mehke plasti bistveno poveča skupno kontaktno površino. Na sliki 5 so prikazane štiri različne konfiguracije prstov: ravni prsti, ravni prsti z mehko plastjo, prilagodljivi prsti ter prilagodljivi prsti z mehko plastjo, kar ponazarja razlike v kontaktnih površinah med posameznimi prsti.



Slika 5: Porazdelitev sil na sferičnem objektu pri različnih tipih prstov: (a) ravni prsti, (b) ravni prsti z mehko plastjo, (c) prilagodljivi prsti, (d) prilagodljivi prsti z mehko plastjo.

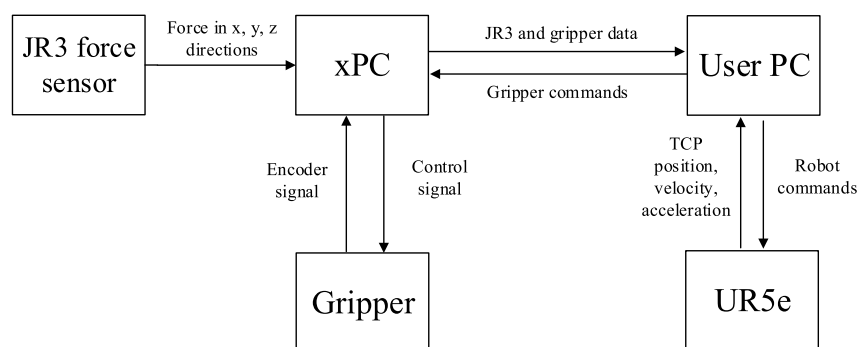
6 Eksperimentalna postavitve

Za ovrednotenje različnih zasnov prstov smo uporabili električno prijemalo Schunk SEG-10 z maksimalno silo prijema 170 N in hodom prstov 60 mm. Prijemalo je bilo krmiljeno preko analognega vhoda. Med prste prijemala in osnovno čeljust sta bila nameščena dva šestosna senzorja sile in navora JR3 z merilnim območjem do 150 N in ločljivostjo 0,05 N, ki sta merila silo prijema ter zagotavljala povratno informacijo za regulacijo sile v zaprti zanki. Eksperimentalna postavitve je prikazana na sliki 6. Krmilni sistem je deloval v dveh načinih. Ko prsti niso bili v stiku z objektom, je bil uporabljen regulator položaja, ob stiku z objektom pa je sistem preklopil na regulator sile. Pri testih prijema po obliki je bil regulator sile dve sekundi po začetnem stiku izklopljen, nato pa je regulator položaja ohranjal konstanten položaj prstov. Regulacijska zanka je bila implementirana v okolju MATLAB Simulink na platformi xPC Target s frekvenco osveževanja 500 Hz. Višjenivojsko krmiljenje in izvajanje eksperimentov sta potekala na ločenem računalniku z uporabo MATLAB in Python skript, pri čemer je komunikacija potekala preko protokola UDP.



Slika 6: Eksperimentalna postavitve z uporabo robota UR5e in Schunk SEG-10 prijemale.

Učinkovitost različnih zasnov prstov smo ovrednotili z meritvami vlečne sile. Navpično vlečno silo je zagotavljal industrijski robot UR5e, na katerega je bilo prijemalo pritrjeno s 3D-natisnjenim adapterjem. Testni objekti so bili pritrjeni na senzor sile JR3, nameščen na vozičku na linearnem vodilu, kar je omogočalo pasivno poravnavo objekta med zapiranjem prijemale. Robot se je pomikal navpično s konstantno hitrostjo, dokler ni prišlo do zdrsa, senzor JR3 pa je meril nastalo vlečno silo. Pred vsakim testom so bili senzorji umerjeni na ničelno vrednost. Za vsak par objekt–prst je bila z začetnimi poskusi določena optimalna kontaktna točka, ki je zagotavljala največjo kontaktno površino. Za vsako konfiguracijo smo izvedli 30 meritev (10 različnih sil prijema $\times$ 3 ponovitve).



Slika 7: Bločni diagram eksperimentalne postavitve, ki prikazuje pretok podatkov in krmilne signale med senzorjem sile JR3, platformo xPC Target, prijemalom, robotom UR5e in uporabniškim računalnikom.

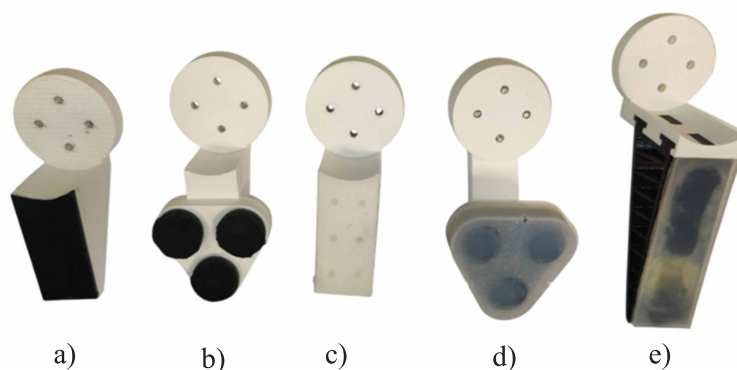
Preizkusili smo več različnih zasnov prstov (slika 8) pri silah prijema od 2 N do 20 N. Prsti so se razlikovali po materialu kontaktne površine (guma, mehki silikon) ter po mehanski strukturi (ravni togi prsti ali prilagodljivi prsti). Skupno smo analizirali štiri kombinacije teh lastnosti ter dodatno primerjavo s prsti tipa Fin Ray.

Prilagodljivi prsti (d) temeljijo na polkrožnih blazinicah, ki omogočajo pasivno pri-

lagajanje obliki objekta. Ključni konstrukcijski parametri so povzeti v tabeli 1. Premer blazinic določa kontaktno površino in dovoljeno rotacijo, toga struktura iz PLA plastike zmanjšuje deformacije, 2-mm debela plast silikona pa zagotavlja mehko kontaktno površino brez omejevanja rotacije. Majhno trenje v utorih, doseženo z uporabo silikonske masti, omogoča pasivno poravnavo blazinic že pri majhnih silah, maksimalna rotacija blazinic pa znaša približno 25° .

Tabela 1: Ključni strukturni parametri prilagodljivih prstov.

Parameter	Value
Premer blazinice	20 mm
Material blazinice	PLA plastika
Debelina silikona	2 mm
Velikost utora	0,1 mm
Koeficient trenja v utoru	$\sim 0,2$
Maksimalna rotacija blazinice	25°



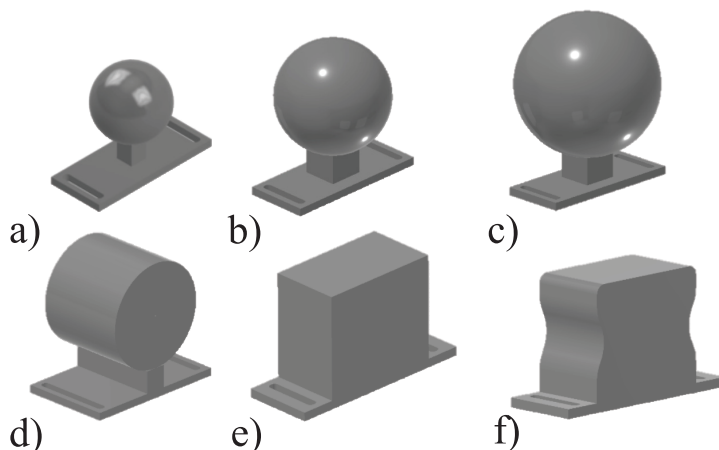
Slika 8: Zasnova prstov: (a) ravni prsti, (b) prilagodljivi prsti, (c) ravni prsti z mehko plastjo, (d) prilagodljivi prsti z mehko plastjo, (e) prsti tipa Fin Ray.

Prsti (a) so preprosti ravni togi prsti s plastjo trde gume, ki povečuje trenje. Prsti (b) so prilagodljivi prsti s tremi blazinicami, pri čemer so blazinice prekrte z enako gumijasto plastjo in dodatno pritrjene z magneti, ki preprečujejo njihovo izpadanje iz baze prsta.

Prsti (c) so ravni togi prsti s 3-mm debelo plastjo mehkega silikona, pri čemer so bile na površini dodane majhne vdolbine za boljši oprijem silikona na bazo prsta. Prsti (d) so mehki prilagodljivi prsti, v celoti prekriti z mehkim silikonom, ki obdaja vse tri blazinice. Ta plast poveča vzdržljivost, stabilizira blazinice v utorih ter ščiti mehanizem pred prahom in nečistočami. Uporabljen je bil silikon Dragon Skin 20.

Prsti (e) temeljijo na strukturi Fin Ray in so bili 3D-natisnjeni iz fleksibilnega materiala TPU (Shore 90A). Površina prstov je bila dodatno prevlečena s 3-mm debelo plastjo silikona Dragon Skin 20, kar omogoča primerljivost z ostalimi prsti.

Za testiranje smo uporabili šest 3D-natisnjenih objektov iz PLA plastike (slika 9): tri krogle s premeri 50 mm, 70 mm in 90 mm, valj premera 70 mm, kvader širine 70 mm ter kvader z vdolbino enake širine. Izbrane geometrije omogočajo oceno zmogljivosti prijema tudi za kompleksnejše oblike objektov.



Slika 9: Vseh šest objektov, ki so bili uporabljeni za testiranje.

6.1 Analiza podatkov

Surovi podatki so bili obdelani v programu MATLAB 2023a. Uporabljen je bil nizkoprepustni Butterworthov filter 4. reda z mejno frekvenco 5 Hz, izveden z uporabo funkcije `filtfilt`. Na sliki 10a so prikazani filtrirani podatki sile prijema in vlečne sile. Maksimalne vlečne sile f_p za posamezne poskuse so bile določene s funkcijo `findpeaks` in označene z rdečimi točkami na slikah 10a in 10b. Za sile prijema od 2 N do 20 N smo izračunali povprečno vrednost in standardno deviacijo treh maksimalnih vrednosti za vsako silo. Dobljeni rezultati so prikazani v grafu, kjer je na osi x sila prijema, na osi y pa vlečna sila.

Slika 10b prikazuje primer posameznega testa izvleka pri sili prijema 10 N, kjer predlagani prilagodljivi prsti prijemajo kroglo premera 70 mm. Na grafu sta prikazani vlečna sila (modra) in sila prijema (rdeča). Sila prijema na začetku nekoliko preseže 10 N, nato pa se stabilizira blizu te vrednosti. Na grafu lahko jasno opazimo različne faze postopka vlečenja.

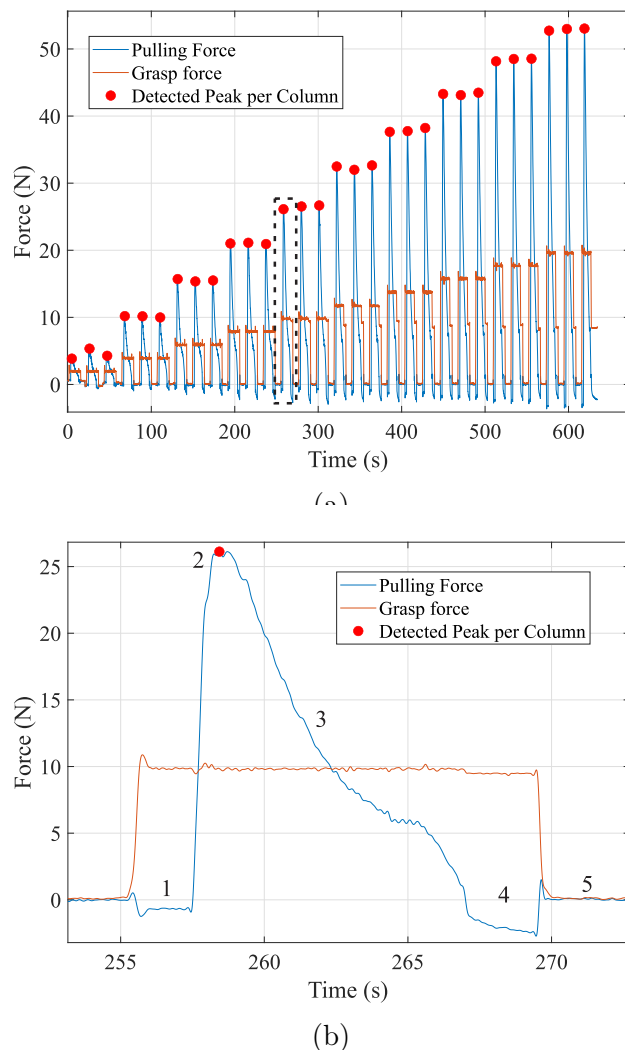
Najprej, ko prsti prijemala pridejo v stik z objektom, ga nekoliko potisnejo navzdol, kar se na grafu vidi kot negativna vlečna sila (faza 1 na sliki 10b). V tej fazi robot miruje. Ko se robot začne pomikati navzgor, vlečna sila hitro naraste do svoje maksimalne vrednosti (faza 2 na sliki 10b), ki je označena z rdečo točko. Nato začne sila postopno upadati, saj objekt začne drseti iz optimalnega položaja prijema (faza 3 na sliki 10b). Ko robot doseže zgornjo mejo pomika, se ustavi (faza 4 na sliki 10b). Po zaustavitvi robota se prijemalo odpre, pri čemer vlečna sila pade na 0 N (faza 5 na sliki 10b). Robot se nato vrne v začetni položaj in eksperiment se ponovi. Celoten postopek traja približno 15 sekund. Zajete sile se razlikujejo glede na tip prstov in geometrijo testnega objekta.

7 Rezultati

Za validacijo mehkih prstov smo izvedli tri različne teste: test prijema po sili in po obliki, preizkus sile izvleka ter test deformacije mehkih objektov.

7.1 Test prijema po sili in po obliki

Prijemalo lahko deluje v dveh načinih: regulacija sile in regulacija položaja. Pri regulaciji sile prijemalo ohranja konstantno silo prijema z prilagajanjem položaja prstov na podlagi

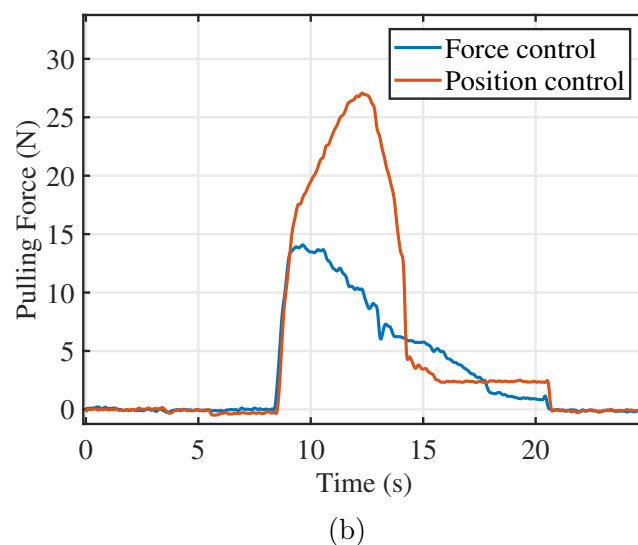
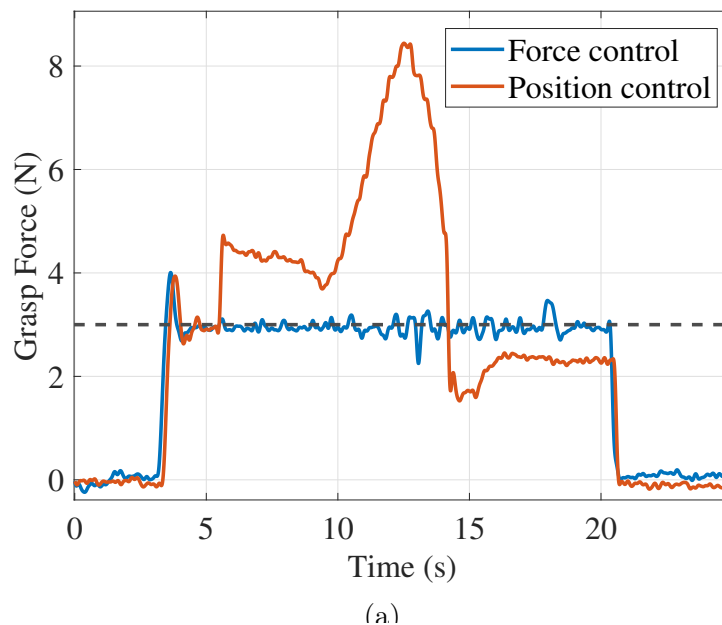


Slika 10: (a) Surovi podatki vlečne sile in sile prijema pri testih izvleka z uporabo mehkih prstov na krogli s polmerom 70 mm, pri silah prijema od 2 N do 20 N. (b) Podroben prikaz posameznega testa izvleka pri sili prijema 10 N, ki ustreza območju, označenemu s črtkano črto na sliki (a). Številke od 1 do 5 predstavljajo različne faze prijema.

povratne informacije senzorjev sile. Na ta način ostanejo kontaktne sile znotraj stožca trenja, določenega s koeficientom trenja μ , kar preprečuje zdrs objekta. Ta način je posebej primeren za manipulacijo krhkih objektov, saj omogoča natančno omejevanje sile prijema.

Pri regulaciji položaja prijemalo doseže prijem po obliki, kjer se prsti pomaknejo v vnaprej določen položaj. Stabilnost objekta je v tem primeru zagotovljena predvsem z geometrijskimi omejitvami med prsti in objektom, kar omogoča prenos večjih sil. Tak način je primeren za naloge, kjer je potrebna večja stabilnost prijema. Način vodenja z regulacijo sile pa je bolj primeren za dinamično manipulacijo, saj omogoča prilagajanje zunanjim motnjam brez popolnega zanašanja na geometrijske omejitve.

Za primerjavo obeh načinov krmiljenja smo izvedli teste vlečne sile na deformabilnem sferičnem objektu s polmerom 70 mm z uporabo prilagodljivih prstov. Deformabilen objekt je bil izbran zato, da bi preprečili nastanek prevelikih sil, saj bi pri togem oblikovanem prijemu lahko presegle zmogljivosti robotskega sistema. Hkrati je tak objekt služil



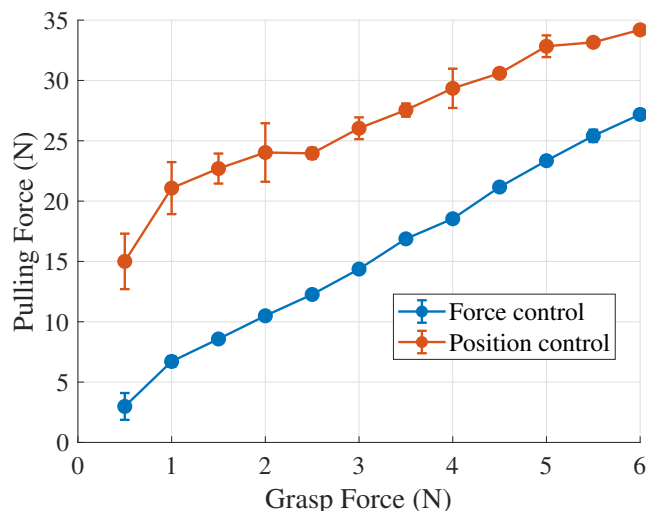
Slika 11: Primerjava sile prijema (a) in vlečne sile (b) za predlagane prilagodljive prste pri regulaciji sile (modra črta) in regulaciji položaja (rdeča črta) med testom vlečne sile pri prijemanju mehke kroglice premera 70 mm pri nastavljeni sili prijema 3 N.

kot dodatni varnostni element, saj se lahko deformira brez nevarnosti poškodbe opreme. Testi so bili izvedeni pri silah prijema od 0,5 N do 6 N s korakom 0,5 N.

Oba načina krmiljenja smo preizkusili z uporabo prilagodljivih prstov. Pri regulaciji sile prijemalo neprekinjeno prilagaja položaj prstov, da ohranja nastavljeno silo prijema. Če se med testom vlečne sile sila prijema poveča, se prsti nekoliko razprejo, da preprečijo presežanje nastavljene vrednosti.

Pri regulaciji položaja se prsti zapirajo, dokler ne dosežejo vnaprej določenega položaja, s čimer se vzpostavi prijem po obliki, ki preprečuje zdrs objekta zaradi geometrijske zagotovitve. Tak pristop omogoča doseganje večjih vlečnih sil. Rezultati kažejo, da je maksimalna vlečna sila pri regulaciji položaja približno dva- do trikrat večja kot pri regulaciji sile. Ta razlika bi bila še večja, če testni objekt ne bi bil deformabilen. Rezultati

tako kažejo, da prilagodljivi prsti omogočajo zanesljivo doseganje tako prijema po sili kot prijema po obliki.



Slika 12: Maksimalna vlečna sila prilagodljivih prstov s silikonsko plastjo pri prijemanju mehke kroglice premera 70 mm v odvisnosti od sile prijema. Modra črta predstavlja regulacijo sile, rdeča črta pa regulacijo položaja.

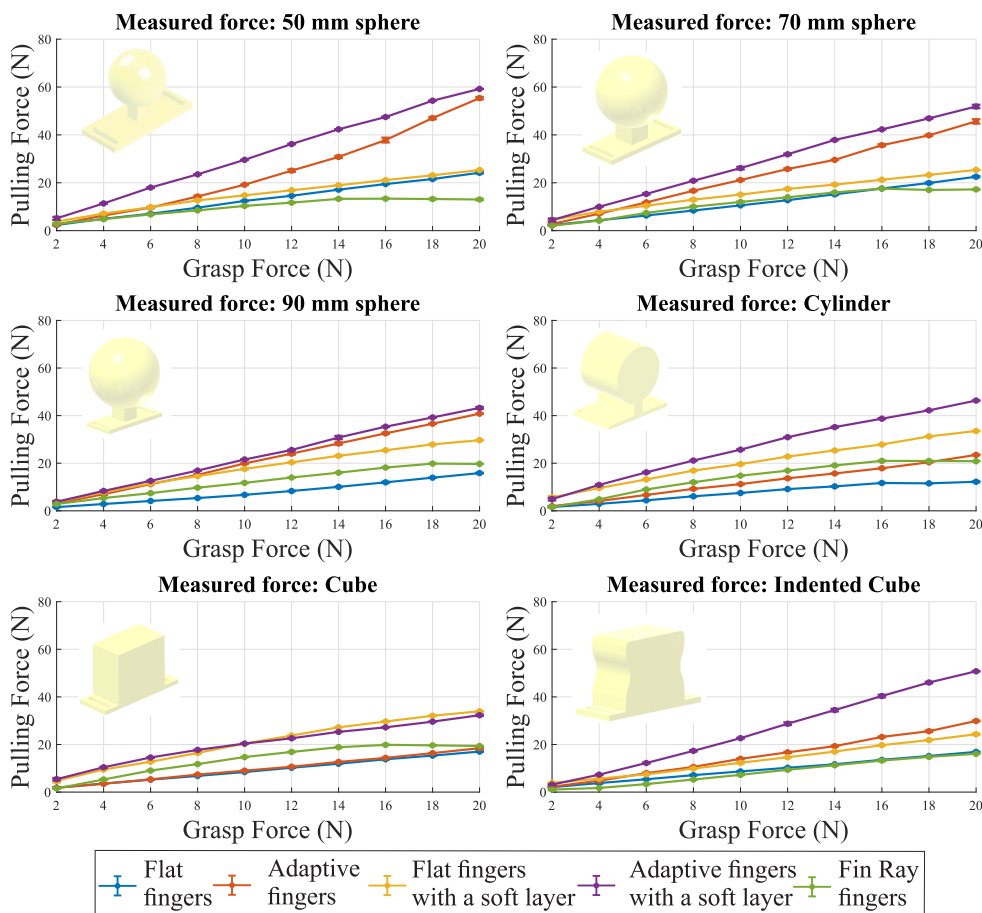
7.2 Preizkus sile izvleka

Da bi ocenili, kako se mehki prsti primerjajo z ostalimi, smo izvedli preizkuse sile izvleka na šestih objektih različnih oblik in velikosti. Rezultati so prikazani na sliki 13. Vsi poizkusi so bili izvedeni z vodenjem sile. Vodoravna os predstavlja silo prijema (2 N do 20 N, 10 različnih vrednosti s korakom 2 N), navpična os pa vlečno silo, izmerjeno s senzorjem sile, nameščenim v bazi objekta. Vsaka točka predstavlja povprečje treh maksimalnih vlečnih sil iz ponovljenih poskusov. Večina rezultatov kaže linearno povezavo med silo prijema in maksimalno vlečno silo. Opazna izjema so prsti Fin Ray, ki pri nizkih silah prijema kažejo linearno obnašanje, pri večjih silah prijema pa se rast vlečne sile upočasni; maksimalno vlečno silo običajno dosežejo pri sili prijema 14–16 N. Grafi kažejo majhne standardne odklone (< 5%) za večino podatkovnih točk.

Za jasnejšo primerjavo smo za vsak tip prstov izračunali indeks učinkovitosti izvleka. Indeks dobimo tako, da za vsako točko delimo vlečno silo s silo prijema, nato pa te vrednosti povprečimo. Hkrati smo izračunali tudi standardni odklon. Rezultati so prikazani na sliki 14.

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_{p,i}}{f_{gr,i}}, \quad (1)$$

kjer je $f_{p,i}$ vlečna sila, $f_{gr,i}$ pripadajoča sila prijema pri i -tem preizkusu, N pa število nivojev sile prijema. Stolpčni diagram (Slika 14) kaže, da so mehki prsti dosegli najboljši indeks učinkovitosti izvleka pri vseh testiranih objektih. Največje prednosti so bile opažene pri treh sferah z različnimi polmeri ter pri valju. Pri vlečenju kocke je bila njihova učinkovitost primerljiva z ravnimi prsti s silikonsko plastjo, saj se blazinice poravnajo z ravnimi površinami in tako posnemajo ravne prste. Prsti Fin Ray, ki predstavljajo



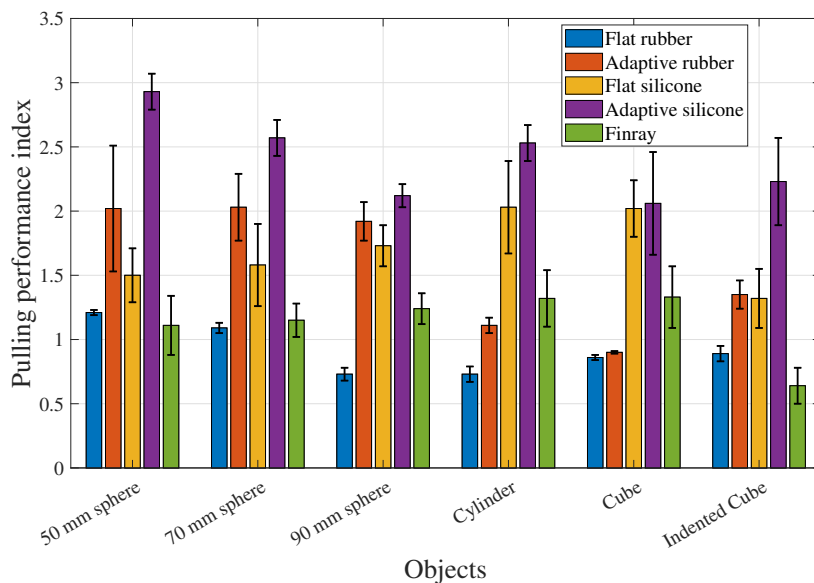
Slika 13: Rezultati preizkusa sile izvleka za šest različnih testnih objektov. Vodoravna os predstavlja silo prijema, ki jo izvaja prijemalo, navpična os pa vlečno silo.

trenutni industrijski standard za mehko prijetanje, so pri vseh testiranih objektih dosegali slabše rezultate kot naši mehki prsti. Pri prstih Fin Ray pri večjih silah pride do strukturne deformacije, kar omejuje maksimalno vlečno silo f_p .

Indeks učinkovitosti izvleka pove, kako učinkovito posamezni prsti pretvarjajo silo prijema v silo izvleka; višje vrednosti pomenijo večjo učinkovitost prijema. Med vsemi testiranimi konfiguracijami so prilagodljivi prsti z mehko silikonsko plastjo dosegli najvišji povprečni indeks 2.4, kar je bistveno več kot pri drugih prstih. Prilagodljivi prsti z gumijastimi blazinicami so sledili s povprečnim indeksom 1.6, medtem ko so ravni prsti s silikonsko prevleko dosegli vrednost 1.7. Nasprotno so ravni prsti z gumijasto površino dosegli nižji povprečni indeks 0.9. Široko uporabljeni prsti Fin Ray so dosegli indeks 1.1, kar je slabše od obeh prstov z blazinicami.

Pri ravnih prstih lahko efektivni koeficient trenja μ ocenimo iz razmerja med izmerjeno vlečno silo in uporabljeno silo prijema pri prijemanju kocke (Slika 13). S tem pristopom smo dobili reprezentativni vrednosti $\mu = 0.83$ za ravne prste z gumijasto prevleko in $\mu = 2.5$ za ravne prste z mehko silikonsko plastjo. Te vrednosti ponazarjajo, kako material površine neposredno vpliva na stabilnost prijema, saj večji koeficient trenja omogoča večje vlečne sile. Opozoriti je treba, da na μ vplivajo tudi dejavniki, kot so hrapavost površine, lastnosti materiala in okoljski pogoji.

Preizkus sile izvleka predstavlja uporabno osnovo za primerjavo relativne učinkovitosti različnih prstov robotskih prijemal. Slika 13 prikazuje maksimalne vlečne sile za sile



Slika 14: Skupinski stolpčni diagram indeksov učinkovitosti izvleka z označenimi standardnimi deviacijami. Vodoravna os predstavlja različne testne objekte, navpična os pa indeks učinkovitosti izvleka.

prijema med 2 N in 20 N. Mehki prsti dosledno dosegajo višje vlečne sile kot ostali prsti v celotnem območju sil stiska, pri čemer je prednost izrazitejša pri večjih silah (nad 16 N). Pri teh obremenitvah mehki Fin Ray prsti kažejo znatne deformacije, ki omejujejo prenos sil. Posledično mehki prsti dosegajo bistveno višji indeks učinkovitosti izvleka.

Med testiranjem smo opazili obrabo prstov. Silikonska plast ni kazala obrabe pri gladkih objektih, poškodbe so se pojavile predvsem pri objektih z ostrimi robovi. Zgodnji prototipi, izdelani iz mehkejšega silikona, so se hitro poškodovali, zato smo prešli na uporabo materiala Dragon Skin 20 z višjo trdoto, kar je bistveno izboljšalo odpornost proti poškodbam. Za industrijske aplikacije se lahko silikon nadomesti z gumo ali poliuretanom za večjo obstojnost.

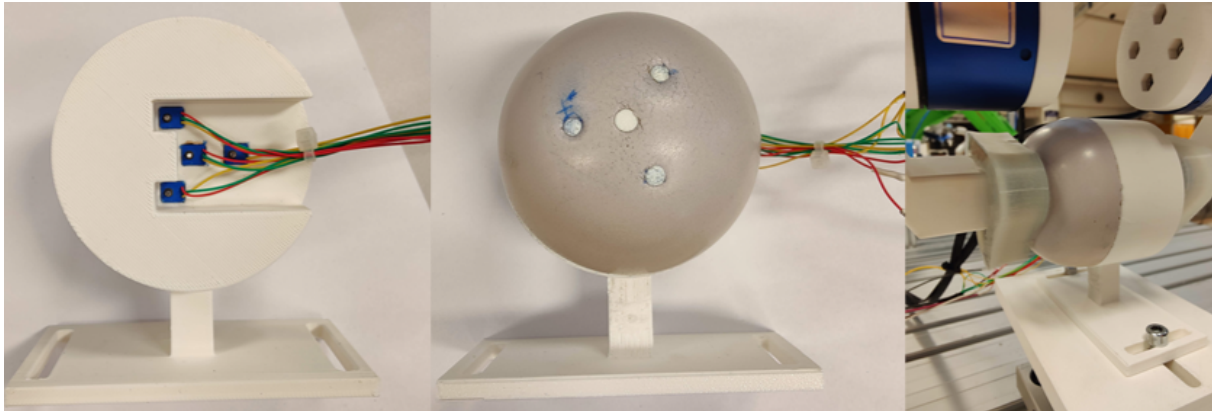
Mehka plast je modularna in enostavno zamenljiva brez orodja. Izdelana je bila z ulivanjem silikona v kalupe, pri čemer so bile PLA blazinice vstavljene pred ulivanjem.

Z vidika integracije so mehki prsti združljivi z različnimi prijemali in delujejo tako pri pozicijskem kot vodenju po sili. Primerni so za večino industrijskih prijemal. Za občutljive objekte priporočamo uporabo natančnega vodenja po sili. Mehke prste je mogoče uporabiti tudi z večprstnimi sistemi. Enostavna izdelava omogoča hitro prototipiranje, za večje sile prijema pa je možna uporaba kovinskih materialov.

7.3 Test deformacije mehkih objektov

Za oceno vpliva različnih tipov prstov na strukturno deformacijo mehkih objektov smo izvedli meritve deformacije na mehki penasti krogli premera 70 mm. V material testnega objekta so bili vgrajeni majhni linearni potenciometri, ki so merili lokalne deformacije. Premične palice potenciometrov so bile mehansko povezane s površino krogle, kar je omogočilo neposredno merjenje deformacije površine med prijemom.

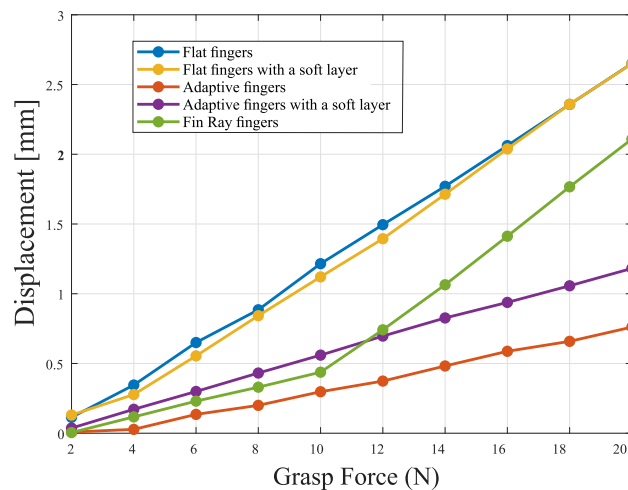
Uporabljeni so bili štirje potenciometri. En potenciometer je bil nameščen v središču krogle in poravnan s centrom kontaktne površine med objektom in prstom. Preostali trije potenciometri so bili nameščeni na razdalji 12 mm od centralnega senzorja in enakomerno



Slika 15: Polovica mehke krogle z vgrajenimi štirimi linearnimi potenciometri.

razporejeni na kotnih intervalih 120° . Analogni izhodni signali vseh potenciometrov so bili zajeti z A/D pretvornikom. Te meritve so omogočile natančno določitev premika posamezne merilne točke med prijemom.

Izvedli smo pet ponovitev pri silah prijema od 2 N do 20 N s korakom 2 N. Za vsako raven sile prijema smo izračunali povprečne vrednosti petih ponovitev. Nato smo izbrali senzor z največjo deformacijo (običajno senzor v središču objekta) in prikazali njegove povprečne vrednosti (slika 16). Ta pristop poudarja lokalno deformacijo v najslabšem primeru, kar je najpomembnejše za oceno morebitne poškodbe objekta.



Slika 16: Rezultati testa deformacije mehkih objektov za različne tipe prstov. Na vodoravni osi je prikazana sila prijema, ki jo izvaja prijemalo, na navpični osi pa maksimalni premik senzorjev, vgrajenih v mehko kroglo.

Pri prijemanju mehkih in občutljivih objektov je ključni pokazatelj potencialnih poškodb maksimalna površinska deformacija. Rezultati (slika 16) kažejo, da predlagani prsti povzročajo bistveno manjše deformacije kot ravni prsti, približno dvakrat manjše. Namesto deformacije objekta se deformira površina prsta, ki je mehkejša od objekta.

8 Zaključek

V okviru aktivnosti A3.2 smo razvili ključne module varnega in rekonfigurabilnega robotskega prijemala za manipulacijo občutljivih predmetov. Obravnavani rezultat združuje dva medsebojno povezana prispevka: zasnovo modularnega rekonfigurabilnega prijemala z integriranim senzorjem sile v nosilcih prstov ter razvoj mehkih prilagodljivih prstov, namenjenih varnemu in zanesljivemu prijemanju objektov različnih geometrij.

Predlagana zasnova prijemala temelji na modularnem konceptu, ki omogoča uporabo različnih izvedb prstov brez vpliva na merjenje sile prijema. Umestitev senzorja sile neposredno v nosilec prsta omogoča natančnejše spremljanje dejanske sile prijemanja, hkrati pa ohranja mehansko togost sistema in predstavlja ustrezno osnovo za zaprtozanko regulacijo sile. Takšna zasnova je pomembna z vidika varnega rokovanja z občutljivimi objekti, saj omogoča boljši nadzor sil prijemanja ter večjo prilagodljivost prijemala različnim nalogam. V okviru aktivnosti so bili razviti tudi mehki prsti. Eksperimentalni rezultati kažejo, da takšna zasnova v primerjavi z referenčnimi izvedbami prstov omogoča večje sile vlečenja pri enaki sili prijema ter hkrati manjšo deformacijo mehkih objektov. S tem je bilo potrjeno, da razviti prsti učinkovito prispevajo k varnemu, a stabilnemu prijemu, kar je bistveno za manipulacijo občutljivih predmetov.

Rezultati tega poročila tako potrjujejo, da razvita rešitev sledi osnovnemu cilju aktivnosti A3.2: vzpostaviti modularno osnovo za varno in vsestransko robotsko prijemanje, pri katerem se združujeta mehanska prilagodljivost prstov in možnost nadzora sile prijema. Trenutni rezultat predstavlja pomemben razvojni korak k celovitemu varnemu rekonfigurabilnemu prijemalu, pri čemer je bil v tem poročilu poudarek predvsem na zasnovi sistema in eksperimentalni validaciji mehkih prstov. Nadaljnja validacija prijemala kot celote, vključno z aplikacijo in sistemsko evalvacijo, bo obravnavana v naslednjem poročilu.