

Program

Digitalna transformacija robotiziranih tovarn prihodnosti

DIGITOP

Poročilo D6.2

Mobilni roboti v rekonfigurabilnih delovnih celicah

Projekt/RRP
Vrsta dokumenta
Verzija dokumenta
Sodelujoči partnerji
Avtorji
Datum priprave

RRp6
Poročilo o rezultatih
Končna
IJS-E1
Miha Deniša, Tadej Petrič
24.5.2026

Kazalo

1	Uvod	3
2	Mobilni manipulator kot rekonfigurabilni element delovne celice	4
3	Metodologija integracije z modularno delovno celico	5
4	Uporaba robotske roke kot elementa za relativno lokalizacijo	6
5	Prednosti uporabe mobilnih robotov v rekonfigurabilnih celicah	7
6	Ovrednotenje pristopa	8
7	Omejitve in tehnični izzivi	9
8	Zaključek	10
	Literatura	10

1 Uvod

Rekonfigurabilne robotske delovne celice predstavljajo eno od ključnih tehnologij za uvajanje agilne proizvodnje, saj omogočajo hitrejšo prilagajanje proizvodnega sistema novim izdelkom, nalogam in konfiguracijam delovnega okolja. Pri tem rekonfiguracija ni omejena samo na zamenjavo orodij ali spremembo robotskega programa, temveč vključuje tudi prostorsko preureditev elementov celice, prilagoditev senzorjev, vpenjal in drugih perifernih modulov ter povezovanje več delovnih mest v skupen proizvodni proces. Takšna zasnova je še posebej pomembna v proizvodnji z manjšimi serijami, kjer se zahteve pogosto spreminjajo in kjer klasične fiksne robotske celice pogosto niso dovolj prilagodljive.

V takšnem okolju imajo mobilni roboti pomembno vlogo, saj omogočajo, da robotski sistem ni vezan na eno fiksno delovno mesto. Mobilna platforma z robotsko roko lahko deluje kot premični manipulator, ki se premika med različnimi postajami, podpira več rekonfigurabilnih celic ali pa se začasno vključi v posamezno delovno celico kot njen dodatni robotski element. S tem se poveča izkoriščenost robotske opreme, zmanjša potreba po podvajanju fiksnih manipulatorjev in omogoči bolj prilagodljiva organizacija proizvodnje.

To poročilo obravnava metodologije za uporabo mobilnih robotov v rekonfigurabilnih robotskih delovnih celicah. Poudarek ni na splošni navigaciji mobilnih robotov, temveč na integraciji mobilnega manipulatorja z modularno delovno celico. Mobilni manipulator je pri tem obravnavan kot sklopljen sistem mobilne platforme in robotske roke, ki se lahko približa modularnemu elementu celice, se z njim mehansko poveže, določi svojo relativno lego glede na celico ter se nato funkcionalno vključi v izvedbo robotske naloge. Takšna interpretacija mobilnega robota je pomembna, ker mobilna platforma ni uporabljena samo za transport, temveč postane eden od rekonfigurabilnih elementov proizvodnega sistema.

Izhodišče za takšno integracijo predstavljajo metode koordiniranega vodenja mobilne baze in manipulatorja, metode lokalnega reaktivnega vodenja mobilne platforme ter metode izrabe kinematične redundance mobilnega manipulatorja. Te omogočajo, da se mobilna baza in robotska roka ne obravnavata kot ločena podsistema, temveč kot enoten robotski sistem, pri katerem gibanje baze vpliva na dosegljivost, manipulabilnost in konfiguracijo robotske roke [1, 2, 3]. Pomembna lastnost uporabljenih pristopov je, da se lahko vodenje mobilne baze izvaja na osnovi lokalnih kinematičnih informacij, predvsem relativnega položaja vrha robotske roke glede na mobilno platformo, brez neposredne odvisnosti od globalne lokalizacije. Na tej osnovi je mogoče mobilno platformo uporabiti ne le kot transportno sredstvo, temveč kot aktiven rekonfigurabilni element delovne celice.

V okviru obravnavanega razvoja je bila posebna pozornost namenjena tudi mehanski sklopitvi mobilnega manipulatorja z modularnim elementom celice. Pri tem se robotska roka uporabi za vzpostavitev ponovljive mehanske reference z znano točko na delovni celici. Iz kinematike robotske roke in znane geometrije sklopitvenih elementov je mogoče določiti relativni položaj mobilne platforme glede na modularno mizo oziroma delovno celico. Takšna informacija nato omogoča natančnejšo poravnavo mobilne platforme in izvedbo končne mehanske ter pnevmatske povezave s celico preko plug-and-produce vmesnika.

2 Mobilni manipulator kot rekonfigurabilni element delovne celice

Klasična uporaba mobilnih robotov v proizvodnji je pogosto omejena na logistične naloge, kot so transport materiala, oskrba delovnih mest ali premik med skladiščem in proizvodno linijo. V rekonfigurabilnih robotskih celicah pa lahko mobilni robot prevzame širšo vlogo. Če je mobilna platforma opremljena z robotsko roko, lahko sistem deluje kot mobilni manipulator, ki se po potrebi vključi v različne delovne postaje in tam izvaja manipulacijske, montažne ali podporne naloge.

Takšen mobilni manipulator poveča rekonfigurabilnost celice na več ravneh. Prva raven je prostorska, saj se robotski sistem lahko premakne do različnih modularnih elementov celice. Druga raven je funkcionalna, saj lahko ista mobilna platforma opravlja različne naloge, od posluževanja do sestavljanja ali manipulacije z moduli. Tretja raven je kinematična, saj mobilna baza razširi delovni prostor robotske roke in omogoča izbiro ugodnejših konfiguracij manipulatorja. Četrta raven je integracijska, saj se lahko mobilni manipulator mehansko in informacijsko poveže z delovno celico. V tem smislu mobilni manipulator ni zgolj samostojen robot v okolici celice, temveč lahko začasno postane del njene konfiguracije.

Pri obravnavi mobilnega manipulatorja je zato pomembno, da se mobilna baza in robotska roka ne vodita kot popolnoma ločena sistema. Gibanje baze neposredno vpliva na položaj robotske roke glede na delovno mesto, na dosegljivost orodja in na možnosti nadaljnje manipulacije. Integrirano vodenje omogoča, da se baza in roka usklajeno premikata glede na zahteve naloge [1]. Pri tem je posebej pomemben tudi lokalni reaktivni pristop, pri katerem se gibanje mobilne baze določa iz relativnega položaja vrha robotske roke glede na bazo, kar omogoča prilagajanje gibanja brez zahteve po globalni lokalizaciji mobilne platforme [3]. S tem se zmanjša potreba po ročnem premeščanju celice ali po natančno fiksiranih postavitvah vseh komponent.

Dodatno možnost predstavlja izraba redundance mobilnega manipulatorja. Pri nalogah, kjer je pomembna predvsem lega vrha robota, ostanejo nekatere prostostne stopnje sistema razpoložljive za izboljšanje notranje konfiguracije robota. Mobilna baza se lahko v takšnih primerih uporabi za izboljšanje manipulabilnosti, izogibanje neugodnim konfiguracijam sklepov ali povečanje nadaljnje dosegljivosti [2]. Takšno razumevanje mobilnega manipulatorja je pomembno za rekonfigurabilne celice, saj omogoča, da se robotski sistem prilagaja trenutni nalogi in geometriji delovnega mesta.

V okviru razvoja je bilo integrirano tudi kinestetično vodenje celotnega mobilnega manipulatorja. Operater lahko preko premikanja vrha robotske roke vodi sklopljen sistem, ki ga sestavljata mobilna platforma in manipulator. Pri tem se gibanje mobilne baze generira reaktivno glede na položaj vrha roke v koordinatnem sistemu baze, zato operaterju ni treba ločeno voditi platforme in manipulatorja [3]. Takšen način vodenja je posebej uporaben pri vzpostavljanju referenc, približevanju modularnim elementom celice in pri pripravi postopka sklopitve. Namesto ločenega ukazovanja mobilni platformi in robotski roki lahko operater sistem vodi preko intuitivne interakcije z vrhom robota, pri čemer se gibanje mobilne baze in manipulatorja usklajuje na ravni celotnega sistema. Prvi del postopka je prikazan na sliki 1, kjer je prikazano približevanje mobilnega manipulatorja modularni mizi in mehanska sklopitev robotske roke z referenčno točko.



(a) Začetna konfiguracija mobilnega manipulatorja pred približevanjem modularni mizi.



(b) Kinestetično vodenje celotne mobilne platforme preko vrha robotske roke.



(c) Mehanska sklopitev robotske roke z referenčno točko na modularni mizi.

Slika 1: Prvi del postopka integracije mobilnega manipulatorja z modularno delovno celico. Mobilni manipulator se s kinestetičnim vodenjem celotnega sistema približa modularni mizi, nato pa se robotska roka mehansko sklopi z referenčno točko na mizi.

3 Metodologija integracije z modularno delovno celico

Metodologija integracije mobilnega manipulatorja z rekonfigurabilno delovno celico temelji na postopnem prehodu iz mobilne enote v mehansko in funkcionalno sklopljen del celice. Postopek lahko razdelimo na več faz: približevanje celici, vzpostavitev mehanske reference, določitev relativne lege mobilne platforme, poravnava s priklopnim mestom in končna sklopitev z modularnim elementom celice. Te faze ne predstavljajo samo zaporedja gibov, temveč metodologijo za vzpostavitev ponovljivega geometrijskega odnosa med mobilno platformo in modularno celico.

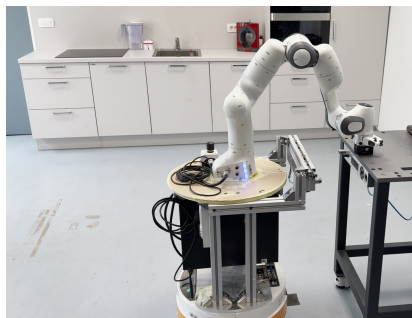
V prvi fazi se mobilna platforma približa modularni mizi oziroma delovni celici z uporabo obstoječih navigacijskih metod ali z uporabo integriranega kinestetičnega vodenja celotnega mobilnega manipulatorja. Ta faza ne zahteva zelo visoke natančnosti, saj je njen cilj predvsem pripeljati mobilni manipulator v območje, kjer robotska roka doseže referenčno sklopko na modularnem elementu celice. Pri kinestetičnem vodenju se lahko za premikanje celotnega sistema uporabi lokalni reaktivni regulator mobilne baze, ki se odziva na položaj vrha robotske roke in s tem omogoča intuitivno premikanje platforme v željeno območje [3]. Pri tem se končna natančnost poravnave ne prepušča zgolj odometriji, zunanji lokalizaciji ali zaznavanju okolice. Prva faza je prikazana na sliki 1, kjer je poudarek na vodenju celotnega sistema preko vrha robotske roke in sklopitvi roke z referenčno točko na modularni mizi.

V drugi fazi se za natančnejšo vzpostavitev geometrijskega odnosa uporabi robotska roka. Referenčna točka na modularni mizi je lahko določena oziroma naučena s kinestetičnim vodenjem robotske roke. Pri tem se vrh robota vodi do referenčne sklopke na celici, sistem pa shrani potrebne podatke za ponovno uporabo te reference. Tak pristop omogoča, da se znana referenca vzpostavi na način, ki je prilagojen dejanski postavitvi modularnega elementa in ne zahteva dodatne visokonatančne zunanje merilne infrastrukture. To je posebej pomembno pri rekonfigurabilnih celicah, kjer se lahko postavitve elementov spreminja in kjer ni smiselno predpostaviti popolnoma fiksnega okolja.

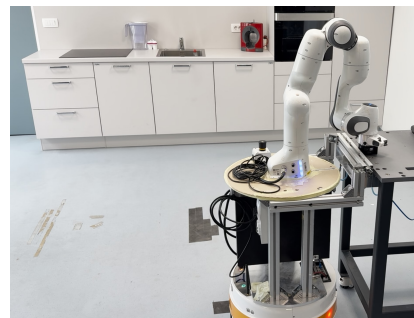
V tretji fazi se sklopka na vrhu robotske roke mehansko poveže z referenčno sklopko na modularni mizi. V obravnavani izvedbi je ta sklopitev realizirana preko izmenjevalca orodij oziroma tool changerja. Sklopitev vzpostavi ponovljivo mehansko zvezo med modularnim elementom celice, robotsko roko in mobilno platformo. Ker so znani kinematični model robotske roke, sklepne koordinate in geometrijski odnosi med robotsko roko, mobilno platformo ter referenčno sklopko,



(a) Mobilna platforma po določitvi relativne lege glede na modularno mizo.



(b) Končna poravnava priklopnega vmesnika mobilne platforme s priklopnim mestom na mizi.



(c) Mobilna platforma po sklopitvi z modularno mizo preko PnP vmesnika.

Slika 2: Drugi del postopka integracije mobilnega manipulatorja z modularno delovno celico. Po mehanski sklopitvi robotske roke z referenčno točko se izračunana relativna lega uporabi za poravnavo mobilne platforme, ki se nato preko PnP vmesnika mehansko in pnevmatsko sklopi z modularno mizo.

lahko robotska roka v tej fazi deluje tudi kot merilni element za določitev relativnega položaja in orientacije mobilne platforme glede na modularno mizo. Ta faza zaključuje prvi del postopka, prikazan na sliki 1.

V četrti fazi se izračunani relativni položaj uporabi za krmiljenje mobilne platforme proti priklopnemu položaju. Cilj ni več samo približati se celici, temveč poravnati sklopko na mobilni platformi s sklopko na modularni mizi. Pri neholonomskih platformah je ta faza posebej pomembna, saj platforma ne more neposredno izvesti bočnega popravka položaja. Zato mora krmiljenje upoštevati omejitve gibanja mobilne baze in izvesti poravnavo z izvedljivimi premiki platforme. Na ta način se lokalizacijska informacija, pridobljena preko robotske roke, neposredno uporabi za izboljšanje končne mehanske poravnave. Potek poravnave in končne sklopitve je prikazan na sliki 2.

V zadnji fazi se mobilna platforma mehansko priklupi na modularno mizo oziroma delovno celico. S tem se vzpostavi rigidnejša fizična povezava, ki omogoča stabilnejše izvajanje nadaljnjih nalog in bolj ponovljivo geometrijsko razmerje med mobilnim manipulatorjem in celico. V obravnavani izvedbi plug-and-produce povezava poleg mehanske sklopitve vključuje tudi pnevmatsko povezavo. Na ta način se mobilni manipulator ne uporablja več zgolj kot samostojna mobilna enota, temveč kot del rekonfigurabilne delovne celice. Končna sklopitev je prikazana na sliki 2c, celotna druga faza postopka pa na sliki 2.

4 Uporaba robotske roke kot elementa za relativno lokalizacijo

Ena od ključnih posebnosti predlaganega pristopa je uporaba robotske roke kot elementa za relativno lokalizacijo mobilne platforme glede na modularno delovno celico. Običajna navigacija mobilnega robota omogoča približevanje delovnemu mestu, vendar pogosto ne zagotavlja zadostne natančnosti za končno mehansko sklopitev. To je posebej izrazito pri neholonomskih mobilnih platformah, kjer zaradi kinematičnih omejitev ni mogoče neposredno izvesti bočnega popravka položaja.

Robotska roka mobilnega manipulatorja ima znan kinematični model in omogoča natančno

merjenje sklepnih položajev. Če se vrh robotske roke mehansko sklopi z znano referenčno točko na modularni mizi, se med mizo, robotsko roko in mobilno platformo vzpostavi določena kinematična zveza. Iz znanih geometrijskih odnosov in izmerjenih sklepni koordinat robotske roke je mogoče izračunati relativni položaj in orientacijo mobilne platforme glede na modularno mizo. V tem smislu robotska roka ne deluje samo kot aktuator oziroma manipulator, ampak tudi kot proprioceptivni merilni element.

Tak pristop zmanjšuje odvisnost od zunanjih merilnih sistemov, vizualnih markerjev ali posebej natančne talne infrastrukture. Mobilna platforma se lahko najprej približa delovni celici z običajno natančnostjo, nato pa se natančnejša relativna informacija pridobi preko mehanske sklopitve robotske roke z referenco. S tem robotska roka poleg manipulacijske funkcije prevzame tudi vlogo merilnega elementa, ki omogoči ponovljivo določitev relativne lege sistema. Ta koncept je skladen z idejo lokalnega vodenja, kjer se za vodenje mobilne baze uporablja relativna geometrija med bazo in vrhom robota, ter z idejo lokalne izrabe redundance, kjer ni nujno, da je celoten sistem voden izključno preko globalne lokalizacije [3, 2].

Ker sta referenčna sklopka na modularni mizi in sklopka za priklop mobilne platforme v znanim geometrijskem odnosu, se informacija o relativni legi lahko neposredno uporabi za poravnavo priklopnega vmesnika mobilne platforme. Po poravnavi se mobilna platforma preko sklopke priklopi na modularno mizo. S tem je vzpostavljeno stabilno in ponovljivo razmerje med mobilnim manipulatorjem in delovno celico, kar je pomembno za nadaljnje izvajanje robotskih nalog.

Takšna uporaba robotske roke je posebej uporabna v primerih, kjer končna naloga zahteva večjo natančnost, kot jo zagotavlja običajna navigacija mobilne platforme. Namesto da bi bilo treba celotno okolje opremiti z dodatnimi visokonatančnimi merilnimi sistemi, se izkoristi že obstoječa kinematika manipulatorja in mehanska ponovljivost sklopitve. To je pomembno tudi z vidika rekonfigurabilnosti, saj modularni elementi celice lahko vsebujejo referenčne sklopke, ki omogočajo ponovljivo vzpostavitev lokalnega koordinatnega sistema za mobilni manipulator.

5 Prednosti uporabe mobilnih robotov v rekonfigurabilnih celicah

Uporaba mobilnih manipulatorjev v rekonfigurabilnih robotskih celicah prinaša več pomembnih prednosti. Prva je večja fleksibilnost postavitve proizvodnega sistema. Mobilni manipulator se lahko premika med različnimi delovnimi mesti in se po potrebi vključi v posamezno modularno celico, zato ni potrebno, da ima vsaka celica svoj fiksni manipulator za vse možne naloge. To omogoča bolj ekonomično uporabo robotske opreme, predvsem v okoljih, kjer posamezna naloga ne zahteva stalne prisotnosti robota.

Druga prednost je boljša izraba robotske opreme. Mobilna platforma z manipulatorjem lahko podpira več proizvodnih postaj, kar je posebej pomembno pri maloserijski in pogosto spreminjajoči se proizvodnji. Namesto da so robotski sistemi trajno vezani na eno nalogo, se lahko mobilni manipulator uporablja tam, kjer je trenutno potreben. Takšen pristop podpira fleksibilno organizacijo proizvodnje, kjer se oprema prilagaja trenutnim potrebam procesa.

Tretja prednost je razširitev delovnega prostora. Mobilna baza omogoča, da robotska roka dostopa do večjega območja kot pri fiksni postavitvi. Poleg tega se lahko položaj baze izbere tako, da izboljša konfiguracijo robotske roke, zmanjša približevanje sklepni omejitvam in omogoči ugodnejše izvajanje manipulacijskih nalog. V kombinaciji z metodami posturalne optimizacije se

lahko mobilna baza uporabi kot dodatna stopnja rekonfigurabilnosti sistema.

Četrta prednost je možnost fizične rekonfiguracije celice. Ko se mobilni manipulator mehansko sklopi z modularno mizo, postane nalogi prilagojen del delovne celice. Takšna sklopitev omogoča bolj ponovljivo izvajanje nalog, pri katerih je pomembno natančno razmerje med robotom in delovnim mestom. Poleg tega mehanska sklopitev omogoča, da se po priklopu razmerje med mobilnim manipulatorjem in modularno celico obravnava kot stabilnejše in bolj določeno kot pri prostostoječi mobilni platformi.

Peta prednost je zmanjšanje odvisnosti od zunanjih merilnih sistemov pri končni poravnavi. Običajna navigacija mobilnega robota lahko zadostuje za približanje delovnemu mestu, medtem ko se natančna relativna lokalizacija izvede preko mehanske sklopitve robotske roke z znano referenčno točko. S tem se lahko izboljša ponovljivost priklopa brez potrebe po zelo natančnih talnih vodilih ali kompleksnih zunanjih merilnih sistemih.

Dodatna prednost je modularnost samega postopka integracije. Postopek se lahko prilagodi različnim tipom modularnih miz, priklopnih mest ali delovnih postaj, če so na njih zagotovljene ustrezne referenčne in priklopne točke. Pri tem ni nujno, da je mobilna platforma ves čas mehansko povezana s celico. Povezava se vzpostavi takrat, ko jo zahteva naloga, po zaključku naloge pa se lahko mobilni manipulator odklopi in premakne na drugo delovno mesto.

6 Ovrednotenje pristopa

Obravnavani pristop je bil ovrednoten z vidika uporabe mobilnega manipulatorja kot rekonfigurabilnega elementa delovne celice. Pri tem sta bila posebej pomembna dva sklopa funkcionalnosti. Prvi sklop predstavlja integrirano kinestetično vodenje celotnega sistema, pri katerem se mobilna platforma in robotska roka obravnavata kot sklopljen mobilni manipulator. Takšno vodenje omogoča intuitivno premikanje sistema preko vrha robotske roke in je uporabno tako za približevanje modularnemu elementu celice kot za učenje referenčne točke. Lokalni regulator mobilne baze pri tem uporablja položaj vrha robotske roke glede na bazo in omogoča, da se platforma aktivira samo takrat, ko je to potrebno za ohranjanje dosegljivosti oziroma varne konfiguracije sistema [3].

Drugi sklop predstavlja mehanska sklopitev vrha robotske roke z referenčno sklopko na modularni mizi. Po sklopitvi se robotska roka uporabi kot element za relativno lokalizacijo mobilne platforme glede na modularno mizo. Iz znanega kinematičnega modela robotske roke, izmerjenih sklepniških koordinat in znanih geometrijskih odnosov med sklopitvenimi elementi je mogoče določiti položaj in orientacijo mobilne platforme glede na celico. Ta informacija se nato uporabi za poravnavo platforme s priklopnim mestom.

Ovrednotenje je pokazalo, da takšna uporaba mobilnega manipulatorja omogoča drugačno obliko rekonfigurabilnosti, kot jo zagotavljajo samo fiksni moduli celice. Mobilna platforma se lahko premakne do modularnega elementa, vzpostavi lokalno mehansko referenco, določi svojo relativno lego in se nato preko priklopnega vmesnika poveže z delovno celico. S tem se mobilni manipulator iz samostojne mobilne enote spremeni v integriran element rekonfigurabilne robotske celice.

Pomemben rezultat ovrednotenja je tudi praktična uporabnost kinestetičnega vodenja. Operater lahko preko fizične interakcije z vrhom robotske roke vodi celoten sistem, pri čemer mobilna baza reaktivno sledi spremembam položaja vrha roke. Takšen način vodenja poenostavi približe-

vanje, učenje referenc in pripravo sklopitve. Primeren je za razvojne in demonstracijske faze, kjer je potrebno hitro določiti nove reference ali prilagoditi postopek trenutni postavitvi celice. Hkrati omogoča prehod proti bolj avtomatiziranim postopkom, saj se naučene reference lahko ponovno uporabijo pri kasnejših izvedbah, lokalni regulator mobilne baze pa ostane združljiv tudi z drugimi načini vodenja roke, kot so teleoperacija ali avtonomno planiranje [3].

Sliki 1 in 2 povzemata ključne korake ovrednotenega pristopa. Najprej se mobilni manipulator vodi preko vrha robotske roke do modularne mize, kjer se roka mehansko sklopi z referenčno točko. Nato se iz tako vzpostavljene kinematične zveze določi relativna lega mobilne platforme glede na modularno mizo, v zadnjem koraku pa se mobilna platforma preko priklopnega vmesnika poveže z modularno mizo. Takšno zaporedje omogoča postopno povečevanje natančnosti: od grobega približevanja do mehansko določene relativne lokalizacije in končne sklopitve.

7 Omejitve in tehnični izzivi

Kljub prednostim takšna integracija odpira tudi več tehničnih izzivov. Prvi izziv je zanesljivost začetnega približevanja. Mobilna platforma mora priti dovolj blizu modularni mizi, da robotska roka doseže referenčno sklopko. To pomeni, da osnovna navigacija ne potrebuje končne visoke natančnosti, mora pa biti dovolj robustna, da omogoči vzpostavitev prve mehanske reference. Pri tem je treba upoštevati tudi omejitve delovnega prostora manipulatorja na mobilni platformi.

Drugi izziv je ponovljivost mehanske sklopitve med vrhom robotske roke in referenčno sklopko. Ker se ta sklopitev uporablja kot osnova za izračun relativne lege mobilne platforme, mora biti dovolj ponovljiva in mehansko določena. Morebitna zračnost ali neponovljivost sklopke neposredno vpliva na natančnost lokalizacije. Zato je izbira sklopitvenega mehanizma pomembna tako z vidika mehanske togosti kot z vidika ponovljivosti priklopa.

Tretji izziv je kalibracija geometrijskih odnosov med mobilno platformo, robotsko roko, sklopko na vrhu roke, referenčno sklopko in priklopno sklopko na modularni mizi. Predlagani pristop temelji na znanih geometrijskih odnosih, zato je kakovost kalibracije pomembna za končno natančnost poravnave. Poleg začetne kalibracije je pomembno tudi zagotavljanje, da se geometrijski odnosi med uporabo bistveno ne spreminjajo zaradi mehanskih obremenitev ali premikov modularnih elementov.

Četrty izziv je krmiljenje neholonomske mobilne platforme med končno poravnavo. Ker platforma ne more neposredno izvesti bočnega premika, mora krmilnik določiti izvedljivo trajektorijo, ki platformo pripelje v priklopni položaj brez prekomernih mehanskih obremenitev sklopk ali modularnega elementa. To zahteva usklajevanje med geometrijo priklopnega mesta, omejitvami mobilne platforme in dovoljenimi območji gibanja.

Peti izziv je varnost pri približevanju in sklapljanju. Ker postopek vključuje stik robotske roke z modularnim elementom ter kasnejšo mehansko povezavo mobilne platforme s celico, je treba zagotoviti nadzor sil, hitrosti in dovoljenih območij gibanja. To je posebej pomembno v okoljih, kjer mobilni manipulator deluje v bližini ljudi ali druge opreme. Pri nadaljnji uporabi v industrijskem okolju bo zato pomembno zagotoviti ustrezne varnostne funkcije in nadzor stanja sklopitve.

Dodatni izziv predstavlja prehod med različnimi režimi delovanja. Sistem lahko deluje v kinestetičnem režimu, v režimu relativne lokalizacije po mehanski sklopitvi ali v režimu končnega priklopa mobilne platforme na modularno mizo. Za zanesljivo uporabo mora biti prehod med temi režimi jasno definiran, da ne pride do nepredvidenih gibov ali mehanskih obremenitev. To je po-

membno predvsem pri združevanju ročnega oziroma kinestetičnega vodenja z avtomatiziranim krmiljenjem mobilne platforme.

8 Zaključek

Mobilni roboti v rekonfigurabilnih delovnih celicah ne predstavljajo zgolj sredstva za transport med delovnimi mesti, temveč lahko prevzamejo vlogo aktivnega rekonfigurabilnega elementa celice. Ko je mobilna platforma opremljena z robotsko roko in ustreznimi sklopitvenimi vmesniki, jo je mogoče uporabiti za prilagodljivo posluževanje, manipulacijo in vključitev v modularno delovno celico.

Obravnavani pristop temelji na povezavi integriranega vodenja mobilne baze in manipulatorja [1], lokalnega reaktivnega vodenja mobilne platforme [3], izrabe kinematične redundance [2] ter mehanske sklopitve z znano referenčno točko v okolici. Takšna kombinacija omogoča, da se mobilni manipulator najprej približa modularni celici, nato preko robotske roke določi svojo relativno lego glede na celico in se zatem mehansko ter pnevmatsko sklopi z modularnim elementom. S tem se poveča ponovljivost končne poravnave in zmanjša odvisnost od zunanjih merilnih sistemov.

Pristop je bil ovrednoten kot metodologija za uporabo mobilnega manipulatorja kot dela rekonfigurabilne robotske celice. Posebej pomembna je možnost, da robotska roka poleg manipulacijske vloge prevzame tudi vlogo elementa za relativno lokalizacijo, mobilna platforma pa se po poravnavi preko plug-and-produce vmesnika fizično poveže z modularno mizo. Postopek je shematsko prikazan na slikah 1 in 2, kjer sta prikazana prvi del postopka od kinestetičnega vodenja do sklopitve z referenčno točko ter drugi del postopka od končne poravnave do priklopa mobilne platforme z modularno mizo.

Takšna rešitev omogoča bolj fleksibilno zasnovo robotskih celic in predstavlja osnovo za nadaljnjo uporabo mobilnih manipulatorjev pri nalogah sestavljanja in drugih proizvodnih operacijah. Ključna prednost pred klasično uporabo mobilnih robotov je v tem, da mobilna platforma ni uporabljena samo za premik med postajami, ampak lahko po sklopitvi prevzame vlogo funkcionalnega dela rekonfigurabilne celice.

Literatura

- [1] T. Petrič, T. Brecelj, and L. Žlajpah. Integrated control strategy for nonholonomic mobile robots with anthropomorphic manipulators. In K. Jovanović, A. Rodić, and M. Raković, editors, *Advances in Service and Industrial Robotics*, pages 486–494, Cham, 2025. Springer Nature Switzerland.
- [2] T. Petrič and L. Žlajpah. Postural optimization of mobile manipulators under end-effector constraints through local redundancy exploitation. In *35th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2026)*, 2026. Accepted for presentation.
- [3] T. Petrič and L. Žlajpah. Reactive and decoupled control of mobile manipulators via spatially modulated velocity fields. *IEEE Access*, 14:80737–80751, 2026.