

Program

Digitalna transformacija robotiziranih tovarn prihodnosti

DIGITOP

Rezultat D2.3

Izraba modularnosti in rekonfigurabilnosti
v pametnih tovarnah

Projekt/RRP

Vrsta dokumenta

Verzija dokumenta

Sodelujoči partnerji

Avtorji

Datum priprave

D2.3

Poročilo o rezultatih

Končna

IJS E1

Miha Deniša in Matevž Majcen

27.2.2026

Kazalo

1	Uvod	3
2	Koncept rekonfigurabilne proizvodne celice	3
3	Celica za vijačenje	4
4	Celica za vizualni pregled	6
5	Večnivojska modularnost in rekonfigurabilnost	8
6	Povezava z rezultati D2.1 in D2.2 ter zaključki	10
	Literatura	11

1 Uvod

Digitalna transformacija proizvodnih sistemov zahteva prehod od togih, namensko zasnovanih delovnih celic k prilagodljivim, modularnim in rekonfigurabilnim proizvodnim enotam. V okoljih z visoko variabilnostjo izdelkov ter krajšimi življenjskimi cikli postaja sposobnost hitre prilagoditve ključna konkurenčna prednost. Pametne tovarne zato temeljijo na sistemih, ki omogočajo mehansko, procesno in programsko rekonfiguracijo brez obsežnih posegov v osnovno infrastrukturo.

V okviru programa *Digitalna transformacija robotiziranih tovarn prihodnosti (DIGITOP)* so bile razvite metode in pristopi za podporo takšnim sistemom, ki segajo od optimizacije gibanja robotov in generacije trajektorij do optimizacije zaporedja operacij in postavitve senzorjev v rekonfigurabilnih celicah. Poročilo D2.3 predstavlja nadaljevanje teh aktivnosti s poudarkom na fizični implementaciji in eksperimentalni validaciji rekonfigurabilnih proizvodnih enot.

V poročilu sta predstavljeni dve prototipni robotski celici: celica za vijačenje in celica za vizualni pregled. Obe sta zasnovani kot modularni enoti, ki omogočata prilagoditev različnim procesnim zahtevam brez spremembe osnovne arhitekture sistema. Celica za vijačenje omogoča avtomatsko menjavo orodij, uporabo aktivnega gnezda ter podporo več tipom izdelkov, medtem ko celica za vizualni pregled vključuje prilagodljivo senzorsko konfiguracijo in digitalni model za optimizacijo zaporedja ter generacijo breztrkovnih poti.

Razvoj obeh celic neposredno temelji na rezultatih predhodnih faz projekta. V okviru D2.1 so bile razvite metode za generacijo poti in trajektorij ter njihovo časovno optimalno parametrizacijo, ki so bile integrirane v razvojno okolje RBS. V okviru D2.2 so bili razviti algoritmi za optimizacijo zaporedja operacij in postavitve kamer v rekonfigurabilnih celicah. V D2.3 so ti pristopi preneseni iz raziskovalnega okolja v fizično realizirana prototipa ter validirani v relevantnem okolju.

Poseben poudarek poročila je na večnivojski modularnosti sistema. Modularnost se ne odraža zgolj v mehanski zasnovi delovnih miz, zamenljivih gnezd in avtomatskega menjalnika orodij, temveč tudi v programski arhitekturi, ki temelji na razslojenem pristopu z jasno definiranimi vmesniki med podsistemi. Razvojno okolje RBS deluje kot robotsko neodvisna platforma za načrtovanje in orkestracijo procesov, kar je bilo demonstrirano z integracijo dveh različnih robotskih sistemov.

Obe celici dosegata raven tehnološke zrelosti TRL 5, medtem ko je bil del funkcionalnosti celice za vizualni pregled validiran tudi v industrijskem okolju in dosega TRL 6. D2.3 tako predstavlja konkretno demonstracijo prenosa raziskovalnih rezultatov v eksperimentalno validiran prototip rekonfigurabilne proizvodne celice, ki je namenjena nadaljnji integraciji v pametna proizvodna okolja.

2 Koncept rekonfigurabilne proizvodne celice

Rekonfigurabilna proizvodna celica v okviru projekta DIGITOP ni razumljena zgolj kot fizična preureditev delovnih elementov, temveč kot sistem, ki omogoča prilagoditev na več medsebojno povezanih ravneh. Ključni cilj zasnove je bil razviti celico, ki se lahko prilagodi spremembam izdelka, procesa ali senzorske konfiguracije brez potrebe po temeljiti mehanski predelavi ali ponovni implementaciji programske logike.

Osnovni koncept temelji na ločitvi sistema na funkcionalne module z jasno definiranimi vmesniki. Ta princip je dosledno uporabljen tako na mehanski kot na programski ravni. Mehansko celico sestavljajo samostojne enote, kot so modularne delovne mize, aktivna gnezda, nosilci orodij in senzorski moduli. Vsak element ima jasno določeno funkcijo in standardizirane priključne točke, kar omogoča zamenjavo ali nadgradnjo posameznega modula brez posega v preostali sistem.

Na procesni ravni rekonfigurabilnost pomeni, da se lahko ista celica uporablja za različne izdelke ali variante izdelkov z minimalnimi spremembami nastavitvev. To vključuje parametrično prilagoditev zaporedja operacij, spremembo vijačnega cikla, prilagoditev preglednih točk ali spremembo trajektorij robota. Namesto mehanske prilagoditve celotne linije se spremembe izvajajo na ravni konfiguracije sistema.

Pomemben element koncepta je tudi senzorska prilagodljivost. V celici za vizualni pregled je mogoče uporabiti različne konfiguracije kamer – kamero na robotu, eno ali dve fiksni kameri – pri čemer digitalni model celice omogoča optimizacijo postavitve in zaporedja zajema slik. S tem je zagotovljena prilagoditev zahtevam posameznega izdelka brez spremembe osnovne strukture sistema.

Programsko rekonfigurabilnost zagotavlja razslojena arhitektura, v kateri razvojno okolje RBS deluje kot visok nivo planiranja in orkestracije, medtem ko komunikacijski sloji omogočajo povezavo z različnimi robotskimi krmilniki. Tak pristop omogoča ločitev planiranja od izvajanja in s tem zmanjšuje odvisnost od posamezne robotske platforme. Integracija dveh različnih robotov v okviru D2.3 potrjuje, da je koncept zasnovan kot robotsko neodvisen sistem.

Digitalni model predstavlja vezni člen med mehansko in programsko ravno sistema. Omogoča simulacijo, preverjanje kolizij, optimizacijo zaporedja ter generacijo poti pred dejansko izvedbo. Rekonfiguracija tako ni zgolj fizična sprememba, temveč je podprta z digitalno validacijo, kar zmanjšuje tveganje in povečuje robustnost sistema.

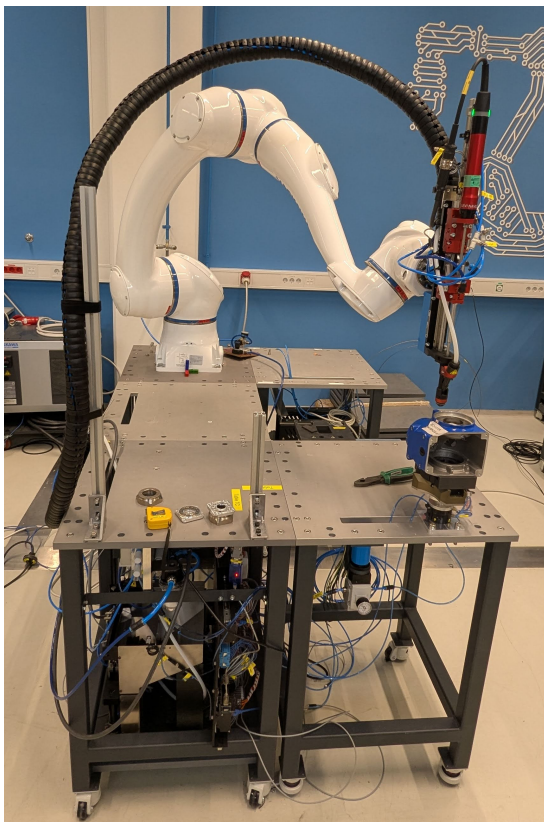
Takšna večnivojska zasnova pomeni, da rekonfigurabilnost ni omejena na posamezen element celice, temveč je vgrajena v samo arhitekturo sistema. Celica je zato zasnovana kot prilagodljiva proizvodna enota, ki omogoča postopno širitev funkcionalnosti in vključevanje novih modulov brez temeljite prenove obstoječe strukture.

3 Celica za vijačenje

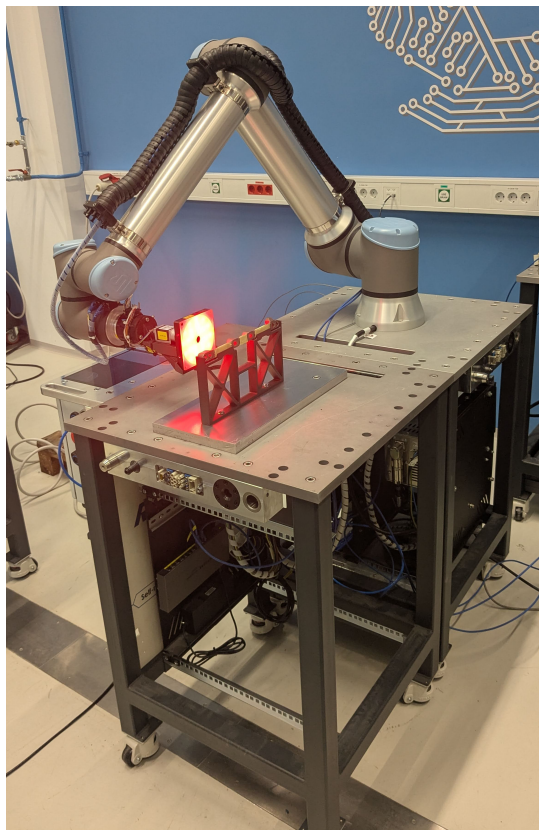
Celica za vijačenje predstavlja prototip rekonfigurabilne proizvodne enote, namenjene avtomatiziranemu procesu vijačenja z integriranim nadzorom kakovosti. Prikazana je na sliki 1. Zasnovana je kot modularna delovna celica, ki omogoča prilagoditev različnim tipom izdelkov ter avtomatsko menjavo orodij brez mehanskih posegov v osnovno strukturo sistema.

Osrednji element celice je robot Yaskawa HC20, integriran v fiksno postavitev. Izbira fiksne konfiguracije v okviru tega demonstratorja omogoča stabilno validacijo procesne in programske rekonfigurabilnosti, medtem ko mobilne koncepte v projektu razvijajo drugi partnerji. Robot je nameščen na modularni delovni mizi, ki vključuje integrirane priključke za napajanje, pnevmatiko in signalne povezave. Takšna zasnova omogoča samostojnost posamezne mize ter potencialno reorganizacijo postavitve brez posega v preostale module.

V celico je integriran industrijski momentno nadzorovani vijačnik Desoutter z avtomatskim



Slika 1: Celica za vijačenje.



Slika 2: Celica za vizualni pregled.

podajalcem vijakov. Sistem omogoča nadzor končnega navora, spremljanje kota oziroma števila obratov ter zaznavo uspešnosti vijačenja (OK/NOK). Procesni podatki se shranjujejo in predstavljajo osnovo za sledljivost ter nadaljnjo integracijo v informacijske sisteme proizvodnje. Uporabljena rešitev omogoča obdelavo dveh tipov izdelkov, ki uporabljata dovolj sorodne vijake, da je mogoče uporabiti standardno industrijsko opremo brez mehanske prilagoditve sistema. S tem je zagotovljena procesna prilagodljivost ob ohranjeni stabilnosti sistema.

Posebno vlogo v celici ima aktivno gnezdo, ki deluje kot zamenljiv procesni modul. Robot gnezdo prevzame iz nosilca oziroma odložišča, ga postavi v delovni položaj in s tem vzpostavi mehansko konfiguracijo za izbrani izdelek. Gnezdo vključuje aktivni vpenjalni mehanizem s pnevmatskim krmiljenjem, ki omogoča fiksiranje dveh različnih tipov kosov znotraj iste osnovne strukture. Rekonfiguracija med izdelkoma poteka na ravni izbire ustreznega programa in parametrov vodenja, brez potrebe po mehanski predelavi celice. V primeru uvedbe nove družine izdelkov je mogoče uporabiti drugo gnezdo, ki se mehansko in funkcionalno integrira preko enakih priključnih točk.

Robot je opremljen z avtomatskim menjalnikom orodij (tool changer), ki omogoča samodejno menjavo vijačnika ter potencialno drugih orodij. Takšna zasnova omogoča izvajanje manipulacijskih operacij, pozicioniranja in vijačenja v eni delovni konfiguraciji brez ročnega posega operaterja. Orodna modularnost tako neposredno podpira procesno rekonfigurabilnost celice.

Programsko je celica zasnovana razslojeno, pri čemer ključno vlogo igra komunikacijski

sloj ROS2. Na najvišjem nivoju deluje razvojno okolje RBS, ki skrbi za planiranje trajektorij, zaporedje operacij in orkestracijo procesa. RBS preko ROS2 akcijskega strežnika komunicira z robotskim krmilnikom Yaskawa, pri čemer se uporablja vmesni sloj MotoROS za povezavo med ROS2 in industrijskim krmilnikom robota.

Uporaba ROS2 predstavlja pomemben element modularnosti sistema. Arhitektura temelji na ločenih vozliščih (node), ki izvajajo posamezne funkcionalnosti, kot so upravljanje podajalnika, vijačnega cikla, pnevmatskih elementov ali menjalnika orodij. Med moduli poteka komunikacija preko jasno definiranih servisov, akcij in sporočil. Takšna zasnova omogoča nizko stopnjo medsebojne odvisnosti, kar pomeni, da je mogoče posamezen podsistem zamenjati ali nadgraditi brez spremembe celotne programske strukture.

Poleg notranje modularnosti ROS2 omogoča tudi lažjo integracijo v širše proizvodne informacijske sisteme. Standardizirana komunikacija in omrežna zasnova omogočata povezovanje z nadrejenimi sistemi ter pripravo na nadaljnjo integracijo v koncepte pametnih tovarn. S tem je zagotovljena povezljivost celice tako na ravni naprav kot tudi na ravni digitalnih storitev.

Pomembna lastnost celice je analogija med mehansko in programsko modularnostjo. Tako kot so mehanski elementi zasnovani kot samostojni moduli z jasno določenimi priključnimi točkami, so tudi programski podsistemi implementirani kot ločene entitete z definiranimi komunikacijskimi vmesniki. Ta dosledna uporaba modularnega principa na obeh ravneh povečuje robustnost sistema ter omogoča nadgradnje in razširitve brez posega v osnovno strukturo.

Celica za vijačenje v predstavljeni konfiguraciji dosega raven tehnološke zrelosti TRL 5. Sistem je bil integriran in validiran v relevantnem laboratorijskem okolju, pri čemer so bile preverjene funkcionalnosti avtomatske menjave orodij, uporabe aktivnega gnezda ter izvedbe vijačnega procesa za dva tipa izdelkov. Arhitektura sistema omogoča nadaljnjo nadgradnjo, zlasti na področju širše podpore različnim tipom vijakov ter integracije v nadrejene proizvodne informacijske sisteme.

4 Celica za vizualni pregled

Celica za vizualni pregled, ki je prikazana na sliki 2, predstavlja rekonfigurabilno proizvodno enoto, namenjeno avtomatiziranemu zajemu slik in podpori nadaljnji analizi kakovosti izdelkov po obdelavi. V tej celici je poudarek predvsem na senzorski in digitalni rekonfigurabilnosti, ki omogoča prilagoditev sistema različnim geometrijam izdelkov ter različnim zahtevam pregleda brez spremembe osnovne mehanske infrastrukture.

Osrednji element celice je robot UR10e, ki omogoča fleksibilno manipulacijo kamere ali izdelka znotraj delovnega prostora. Celica je zasnovana tako, da podpira več konfiguracij zajema slik. Kamera je lahko nameščena na robotu preko avtomatskega menjalnika orodij, kar omogoča dinamično prilagajanje položaja kamere glede na geometrijo izdelka. Alternativno je kamera lahko fiksno nameščena v celici, robot pa manipulira kos in ga pozicionira v optimalen položaj za zajem slike. Možna je tudi uporaba dveh kamer, s čimer se poveča pokritost površine izdelka in zmanjša potreba po dodatnih premikih.

Ključni vhod v proces rekonfiguracije predstavlja digitalni model izdelka z definiranimi območji oziroma točkami pregleda. Na podlagi tega modela se generira zaporedje preglednih

točk in izračuna ustrezna robotska pot. Takšen pristop omogoča, da je postopek prilagoditve na nov kos primarno vezan na model izdelka, medtem ko osnovna struktura celice ostane nespremenjena. Dodajanje novega izdelka tako zahteva predvsem definiranje območij pregleda v modelu, nakar sistem generira ustrezne trajektorije in zaporedje operacij.

Digitalni model celice vključuje model robota, delovnega prostora ter model izdelka z definiranimi preglednimi območji. Na tej osnovi se izvaja optimizacija zaporedja zajema slik z namenom zmanjšanja skupnega časa cikla pregleda. Postopek temelji na formulaciji problema kot optimizacijskega problema v prostoru stanj, kjer posamezno stanje predstavlja kombinacijo pregledne točke in kamere, kot je podrobneje opisano v [1]. Na podlagi izračunanih robotskih konfiguracij in prehodnih časov med stanji se določi optimalno zaporedje preglednih točk, ki minimizira celotni čas cikla ob zagotavljanju popolne pokritosti. Takšen pristop omogoča, da je rekonfiguracija celice neposredno vezana na digitalni model izdelka, pri čemer se optimizacija izvede pred fizično izvedbo procesa.

Na podlagi optimiziranega zaporedja se generirajo breztrkovne trajektorije, ki se nato prenesejo na realni sistem. Takšen pristop omogoča sistematično skrajševanje časa cikla ter zmanjšuje tveganje pri uvajanju nove konfiguracije.

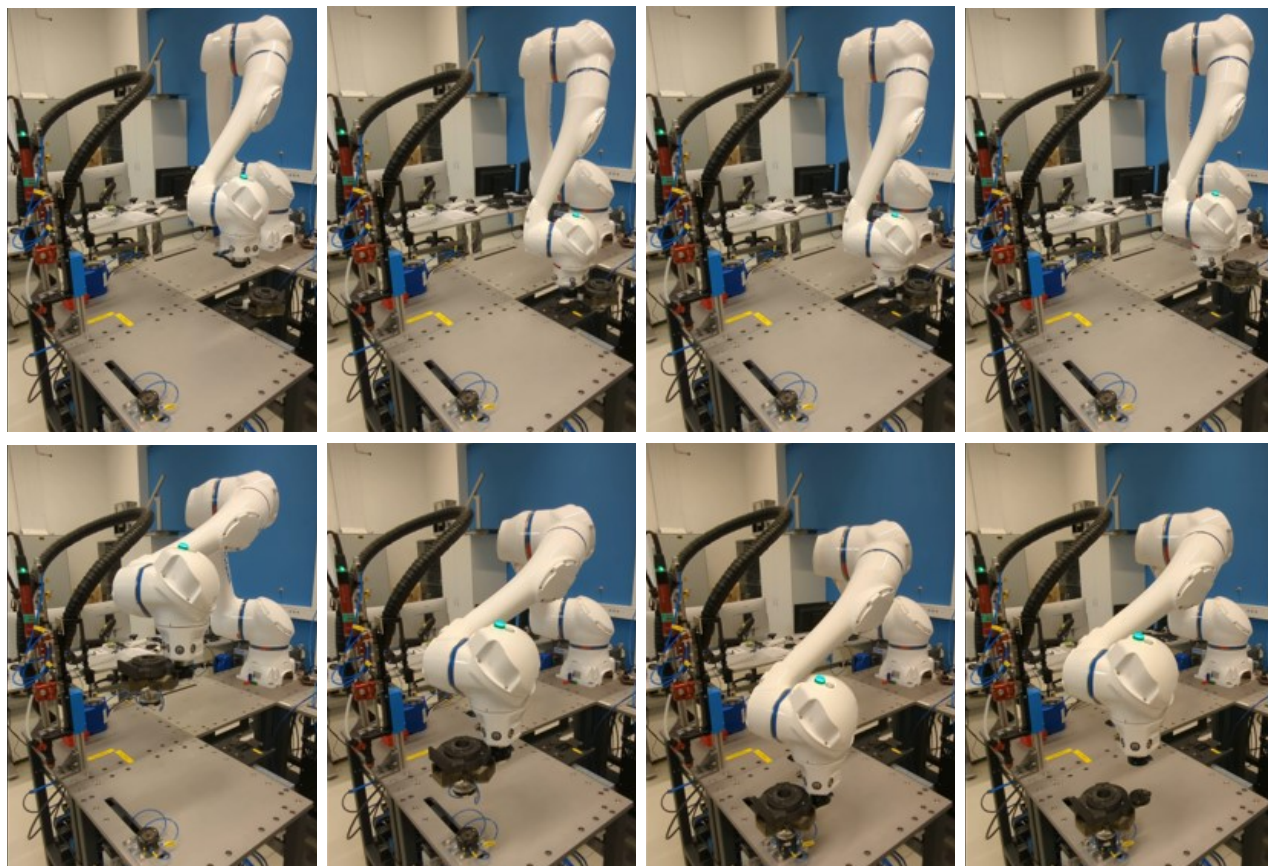
Digitalni model v tem kontekstu deluje kot funkcionalni digitalni dvojček, ki podpira planiranje in validacijo procesa pred njegovo izvedbo. Čeprav model ne predstavlja popolne fizikalne simulacije vseh procesnih parametrov, zagotavlja zadostno natančnost za zanesljivo generacijo poti in preverjanje kolizij. S tem digitalni sloj postane osrednji element rekonfigurabilnosti sistema.

Zajete slike se nadalje obdelujejo z uporabo globoke nevronske mreže, ki je namenjena detekciji napak na izdelku. Vizualni del sistema je tako razdeljen na dva nivoja: robotski nivo, ki skrbi za optimalen zajem slik, ter analitični nivo, ki izvaja obdelavo in klasifikacijo napak. Takšna ločitev dodatno prispeva k modularnosti sistema, saj je mogoče nadgrajevati ali prilagajati algoritme obdelave slik neodvisno od robotskega dela sistema.

Programsko je celica zasnovana v skladu z razslojeno arhitekturo, uporabljeno tudi v celici za vijačenje. Na najvišjem nivoju deluje razvojno okolje RBS, ki skrbi za planiranje poti in zaporedje operacij. Komunikacija z robotom UR10e poteka preko protokola UR_RTDE, ki omogoča neposredno IP povezavo z robotskim krmilnikom. RBS generira trajektorije na podlagi digitalnega modela, medtem ko robotov krmilnik skrbi za nizkonivojsko interpolacijo in regulacijo gibanja.

Integracija robota UR10e v celico za vizualni pregled ter robota Yaskawa HC20 v celico za vijačenje potrjuje, da razvojno okolje RBS ni vezano na specifičnega proizvajalca robota. Visok nivo planiranja in optimizacije ostaja nespremenjen, medtem ko komunikacijski sloj deluje kot prilagoditveni vmesnik do konkretnega krmilnika. Takšna zasnova predstavlja pomemben element modularnosti sistema ter omogoča uporabo enotne razvojne platforme v heterogenih proizvodnih okoljih.

Celica za vizualni pregled v predstavljeni konfiguraciji dosega raven tehnološke zrelosti TRL 5, pri čemer je bil del funkcionalnosti validiran tudi v industrijskem okolju in dosega TRL 6. Validacija je potrdila izvedljivost digitalno podprte rekonfiguracije, optimizacijo časa cikla pregleda ter uporabo naprednih metod obdelave slik v realnem procesu.



Slika 3: Prikaz zaporedja manipulacije aktivnega gnezda v celici za vijačenje. Robot se najprej pozicionira nad nosilec gnezda, nato preko avtomatskega menjalnika orodij vzpostavi mehansko povezavo. Po uspešnem priklopu robot gnezdo dvigne iz nosilca in ga transportira v delovni položaj znotraj celice, kjer se nahaja drugi mehanski vmesnik. Gnezdo se pozicionira in mehansko spoji z delovno postajo, nato robot sprosti povezavo, se odklopi ter se umakne iz delovnega območja.

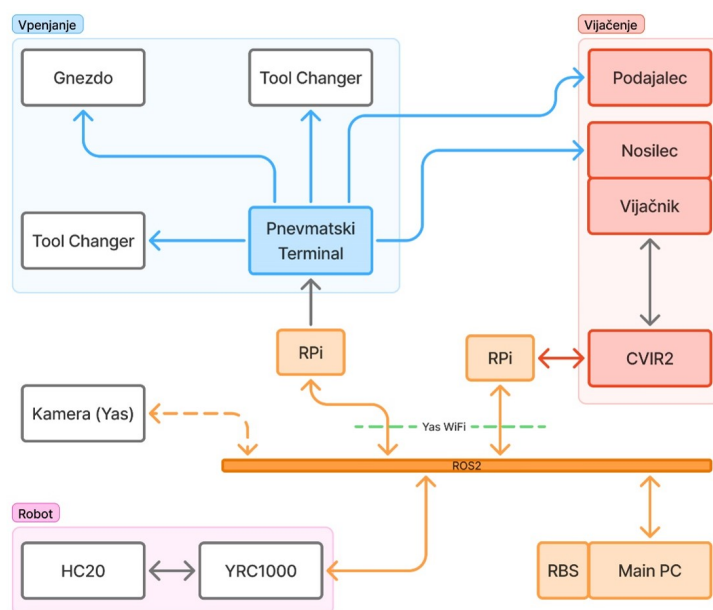
5 Večnivojska modularnost in rekonfigurabilnost

Rekonfigurabilnost predstavljenih celic ni omejena na posamezen tehnični element, temveč je sistematično vgrajena v več nivojev arhitekture sistema. Ključna značilnost implementiranih rešitev je dosledna uporaba modularnega principa tako na mehanski kot na procesni, senzorski in programski ravni. Takšen pristop omogoča, da sprememba enega elementa sistema ne zahteva celovite prenove preostale strukture.

Na mehanski ravni modularnost temelji na uporabi samostojnih funkcionalnih enot, kot so modularne delovne mize, izmenljiva aktivna gnezda ter avtomatski menjalnik orodij. Modularne mize so zasnovane kot samostojne enote z integriranimi napajalnimi, signalnimi in pnevmatskimi priključki, ki omogočajo hitro povezovanje in razširjanje sistema. Pri tem se uporabljajo koncepti Plug-and-Produce konektorjev, ki omogočajo standardizirano mehansko in funkcionalno priključevanje modulov ter zmanjšujejo čas integracije in rekonfiguracije sistema [2]. Takšna zasnova omogoča reorganizacijo postavitve ali zamenjavo posameznega modula brez posega v osnovno strukturo celice.

Poseben poudarek mehanske modularnosti predstavlja sklop izmenljivega aktivnega gnezda

in avtomatskega menjalnika orodij. Aktivno gnezdo deluje kot procesni modul, ki ga robot prevzame iz nosilca, postavi v delovni položaj ter po potrebi zamenja (slika 3). Mehanski in pnevmatski vmesniki so standardizirani, kar omogoča uporabo različnih gnezd za različne družine izdelkov brez spremembe osnovne konstrukcije celice. Avtomatski menjalnik orodja predstavlja enoten mehanski vmesnik med robotom in procesnimi moduli. Isti menjalnik se uporablja tako za manipulacijo gnezda kot za priklop industrijskega vijačnika, kar pomeni, da robot razpolaga z univerzalnim mehanskim priključkom za različne funkcionalne module.

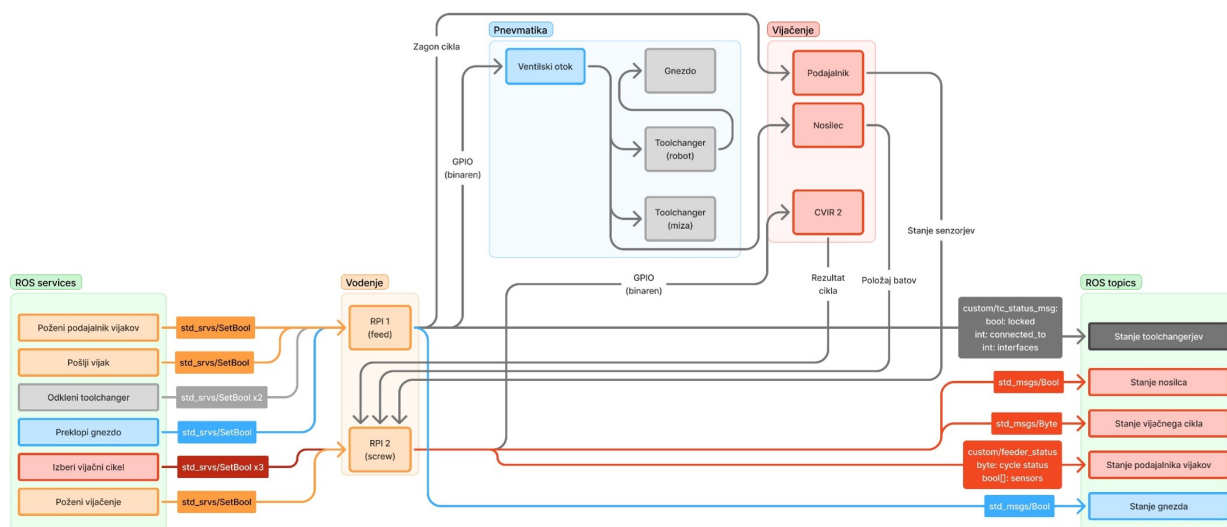


Slika 4: Shema prikazuje višjenivojsko modularno arhitekturo celice za vijačenje, kjer ROS2 predstavlja komunikacijsko hrbtenico sistema. Posamezne funkcionalne komponente, kot so robot, modul za vijačenje in sistem za vpenjanje, so implementirane kot ločene enote z jasno definiranimi ROS2 vmesniki. Periferne naprave so povezane preko RPi vmesnikov, kar omogoča razslojeno in modularno zasnovo.

Na procesni ravni se modularnost odraža v parametrični prilagoditvi zaporedja operacij in procesnih nastavitev. V celici za vijačenje je mogoče preklapljati med različnimi tipi izdelkov brez mehanskih sprememb sistema, medtem ko je v celici za vizualni pregled rekonfiguracija vezana predvsem na digitalni model izdelka. Glavni vhod v sistem predstavlja model kosa z definiranimi območji pregleda, na podlagi katerega se generira zaporedje preglednih točk in ustrezne trajektorije robota. Rekonfiguracija je tako informacijsko vodena in ni odvisna od fizične spremembe infrastrukture.

Na programski ravni modularnost zagotavlja razslojena arhitektura, ki temelji na ROS-pristopu in sledi konceptom modularnih, robotsko neodvisnih delovnih celic, kot je opisano v [3]. Takšna arhitektura omogoča jasno ločitev funkcionalnih modulov, standardizirane komunikacijske vmesnike ter podporo plug-and-produce povezljivosti tako na ravni strojne kot programske opreme. Posamezni podsistemi delujejo kot ločene entitete z definiranimi vmesniki, kar zmanjšuje medsebojno odvisnost in omogoča postopne nadgradnje ali zamenjavo komponent brez posega v celoten sistem. Shema modularnosti za primer vijačenja je prikazana na višjem nivoju na sliki 4 in na ROS2 komunikacijskem nivoju na sliki 5.

Integracija dveh različnih robotskih platform v okviru D2.3 dodatno potrjuje modularnost na sistemski ravni. Razvojno okolje RBS ni vezano na specifičnega proizvajalca robota,



Slika 5: Nizkonivojski ROS2 komunikacijski nivo celice za vijačenje, ki prikazuje povezave med ločenimi funkcionalnimi vozlišči, kot so robot, vijačnik, podajalnik in pnevmatski sklopi. Komunikacija poteka preko servisov, akcij in sporočil, medtem ko RPi vmesniki omogočajo krmiljenje perifernih naprav. Arhitektura zagotavlja modularnost in nizko medsebojno odvisnost posameznih komponent.

temveč omogoča uporabo enotnega planirnega in optimizacijskega sloja nad različnimi krmilniki. Komunikacijski sloj deluje kot prilagoditveni vmesnik, kar omogoča uporabo sistema v heterogenih proizvodnih okoljih, kjer so prisotni roboti različnih proizvajalcev.

Digitalni model predstavlja povezovalni element vseh omenjenih ravni modularnosti. Omogoča validacijo rekonfiguracije pred dejansko izvedbo, optimizacijo zaporedja operacij ter generacijo breztrkovnih trajektorij. Digitalni dvojček tako ne deluje zgolj kot simulacijsko orodje, temveč kot aktivni del procesa planiranja in prilagajanja sistema.

Večnivojska modularnost, implementirana v predstavljenih celicah, omogoča kombinacijo mehanske prilagodljivosti, procesne fleksibilnosti in digitalne podpore. Rekonfigurabilnost je vgrajena v samo arhitekturo sistema in predstavlja temeljno lastnost zasnove, kar je ključnega pomena za implementacijo v pametnih tovarnah, kjer je zahtevana visoka stopnja prilagodljivosti in interoperabilnosti.

6 Povezava z rezultati D2.1 in D2.2 ter zaključki

Implementacija rekonfigurabilnih celic v okviru D2.3 neposredno temelji na rezultatih predhodnih faz projekta, predvsem na metodah za generacijo poti, optimizacijo trajektorij ter optimizacijo zaporedja operacij, razvitih v D2.1 in D2.2. D2.3 predstavlja njihov prenos iz algoritmičnega in simulacijskega okolja v fizično realizirano in eksperimentalno validirano prototipa.

Metode za generacijo gladkih poti in časovno parametrizacijo trajektorij, razvite v okviru D2.1, so implementirane v razvojnem okolju RBS in omogočajo generacijo izvedljivih ter časovno učinkovitih gibanj ob upoštevanju kinematičnih omejitev sistema [4]. V D2.3 so te funkcionalnosti uporabljene tako v celici za vijačenje kot v celici za vizualni pregled, kjer RBS generira trajektorije na podlagi digitalnega modela delovnega prostora.

Rezultati D2.2 so v D2.3 implementirani predvsem v celici za vizualni pregled, kjer optimizacija zaporedja preglednih točk in postavitve kamer temelji na grafovni formulaciji problema in minimizaciji časa cikla pregleda [1]. Digitalni model tako povezuje optimizacijo zaporedja operacij in generacijo breztrkovnih trajektorij v enoten planirni postopek. V celici za vijačenje se iste metode uporabljajo za manipulacijo aktivnega gnezda, menjavo orodij in pozicioniranje nad vijačne točke, kar omogoča parametrično prilagoditev procesa brez sprememb osnovne infrastrukture.

Pomemben rezultat D2.3 je tudi demonstracija modularne in robotsko neodvisne arhitekture. RBS deluje kot enoten visokonivojski planirni sloj nad različnimi robotskimi platformami, medtem ko komunikacijski sloji omogočajo povezavo z robotskimi krmilniki različnih proizvajalcev. Integracija robotov Yaskawa HC20 in UR10e potrjuje prenosljivost razvite arhitekture v heterogena proizvodna okolja.

V okviru D2.3 sta bili razviti in validirani dve prototipni rekonfigurabilni celici, ki demonstrirata mehansko, procesno, senzorsko in programsko modularnost. Celica za vijačenje temelji na uporabi modularnih miz s Plug-and-Produce konektorji, izmenljivega aktivnega gnezda ter avtomatskega menjalnika orodij kot univerzalnega mehanskega vmesnika. Celica za vizualni pregled pa poudarja digitalno podprto rekonfigurabilnost, kjer je glavni vhod model izdelka z definiranimi območji pregleda, vizualna analiza pa temelji na uporabi globokih nevronske mreže.

Obe celici dosegata raven tehnološke zrelosti TRL 5, medtem ko del funkcionalnosti celice za vizualni pregled dosega TRL 6 zaradi validacije v industrijskem okolju. Rezultati potrjujejo izvedljivost digitalno podprte rekonfiguracije ter primernost modularne, robotsko neodvisne arhitekture za nadaljnjo integracijo v pametna proizvodna okolja.

Literatura

- [1] M. Deniša, T. Gašpar, L. Žlajpah, and A. Ude. Optimizing camera placement in agile robotic cells for visual inspection. In K. Jovanović, A. Rodić, and M. Raković, editors, *Advances in Service and Industrial Robotics*, pages 406–413, Cham, 2025. Springer Nature Switzerland.
- [2] P. Radanović, J. Jereb, I. Kovač, and A. Ude. Design of a modular robotic workcell platform enabled by plug & produce connectors. In *Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 304–309. IEEE, 2021.
- [3] M. Simonič, T. Gašpar, S. Abdolshah, S. Haddadin, M. G. Catalano, F. Wörgötter, and A. Ude. Modular ros-based software architecture for reconfigurable, industry 4.0 compatible robotic workcells. In *Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 44–51. IEEE, 2021.
- [4] L. Žlajpah and T. Petrič. Robotblockset (rbs)-path and trajectory generation. In *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region*, pages 121–129. Springer, 2025.