

# Sodelujoča modularna robotska učna celica

Dimitrije Prelevič, Mitja Golob, Aleš Hace

## Izveček:

Sodobna industrijska proizvodnja, za katero so značilne visoka stopnja variabilnosti in dinamično se spreminjajoče proizvodne zahteve, spodbuja razvoj fleksibilnih, prilagodljivih in rekonfigurabilnih avtomatiziranih naprav. Ti industrijski trendi se neposredno odražajo tudi v zasnovi sodobnih izobraževalnih programov na področju avtomatizacije in robotike. Povečana potreba po integrirani in večnamenski robotski platformi za raziskovalno delo, študentske projekte ter laboratorijske vaje je spodbudila razvoj modularne, prilagodljive sodelujoče robotske celice za sestavljanje manjših mehanskih sklopov. Predlagana platforma omogoča študentom neposredno interakcijo z realnimi industrijskimi tehnologijami in podpira poučevanje ključnih konceptov, kot so prilagodljiva avtomatizacija, modularna in rekonfigurabilna zasnova sistemov ter njihova integracija v pametna proizvodna okolja. Poseben poudarek je namenjen razvoju strokovnih in praktičnih kompetenc na področjih sodelujoče robotike, saj predlagana robotska celica študentom zagotavlja potrebno opremo za načrtovanje in razvoj lastne sodelujoče robotske aplikacije, vključno s pripadajočo varnostno rešitvijo. Z vidika pedagoškega procesa platforma omogoča učinkovito povezovanje teoretičnih znanj s praktičnimi izkušnjami ter podpira implementacijo sodobnih učnih pristopov, zlasti problemsko usmerjenega, projektnega in izkustvenega učenja. Predstavljena rešitev tako predstavlja relevantno in sodobno učno opremo, ki prispeva k dvigu kakovosti izobraževalnega procesa ter k razvoju kompetenc, potrebnih za uspešno delovanje v sodobnih industrijskih okoljih.

## Ključne besede:

sodelujoča robotika, modularnost, rekonfigurabilnost, fleksibilnost, varnost, učna platforma

## 1 Uvod

Sodobni proizvodni sistemi, zlasti na področju avtomatizacije in industrijske robotike, se soočajo z izrazitimi spremembami, ki jih zaznamujejo visoka stopnja variabilnosti, dinamično spreminjajoče se zahteve ter prehod od množične k naročniški in maloserijski proizvodnji. Ti trendi zahtevajo razvoj fleksibilnih in rekonfigurabilnih avtomatiziranih sistemov, ki omogočajo hitro in učinkovito prilagajanje proizvodnih procesov [1, 2]. Hkrati se spreminjajo tudi zahteve na področju izobraževanja in strokovnega usposabljanja, saj industrijska robotika in avtomatizacija predstavljata temeljni področji za delo v sodobnih digitaliziranih proizvodnih okoljih. Razvoj konceptov industrije 4.0 in 5.0 zato spodbuja potrebo po sodobnih laboratorijskih in učnih platformah, ki omogočajo učinkovito povezovanje teoretičnih vsebin z realnimi industrijskimi aplikacijami ter podpirajo pridobivanje znanj s področja avtomatizacije, digitalizacije, systemske integracije in sodelujoče robotike [3]. V tem kontekstu sodobni pedagoški pristopi vse bolj temeljijo na projektno zasnovanem, problemsko usmerjenem in izkustvenem učenju, pri čemer imajo pomembno vlogo modularne in rekonfigurabilne robotske platforme [4]. Takšne platforme omogočajo integracijo različnih industrijskih in sodelujočih robotov, senzorskih sistemov, sistemov strojnega

vida, digitalnih tehnologij ter naprednih pristopov interakcije človek-robot [5, 6].

Industrijski roboti v sodobnih proizvodnih okoljih ne delujejo kot samostojne enote, temveč kot integralni deli kompleksnih proizvodnih sistemov oziroma robotskih celic [5, 7]. Njihova učinkovitost in funkcionalnost sta v veliki meri odvisni od celostne systemske zasnove, ki poleg robotske enote vključuje tudi različne periferne module in druge podsisteme. Periferni moduli imajo pri tem ključno vlogo, saj robotski celici zagotavljajo dodatne funkcionalnosti, potrebne za učinkovito, zanesljivo in avtonomno izvajanje proizvodnih nalog. Med tovrstne module sodijo različni vpenjalni in prijemalni sistemi, senzorski podsistemi, transportni sistemi, avtomatski menjalniki orodij, sistemi strojnega vida ter drugi specializirani funkcionalni podsistemi.

Prav periferni moduli v veliki meri določajo stopnjo fleksibilnosti, rekonfigurabilnosti, zmogljivosti in avtonomnosti robotske celice, saj omogočajo prilagajanje različnim geometrijam izdelkov, proizvodnim procesom ter spreminjajočim se zahtevam proizvodnega okolja. Njihova modularna zasnova in ustrezna integracija omogočata učinkovito prilagoditev proizvodnega sistema različnim proizvodnim scenarijem, skrajševanje časa rekonfiguracije ter povečanje odzivnosti sistema na spremembe v proizvodnem procesu [1, 5, 7]. Načrtovanje robotskih celic kot integriranih in modularnih sistemov zato predstavlja pomemben strokovni, razvojni in pedagoški izziv. Tradicionalni pristopi pogosto temeljijo na togo zasnovanih rešitvah, pri katerih omejena prilagodljivost posameznih komponent, zlasti perifernih modulov, zmanjšuje celostno fleksibilnost in rekonfigurabilnost proizvodnega sistema [1, 5, 6].

Obstoječe raziskave modularnost in rekonfigurabilnost prepoznava kot ključni načeli pri načrtovanju sodobnih fleksibilnih proizvodnih sistemov [7]. V izobraževalnem okolju se ta

Dimitrije Prelevič, mag. inž. meh.; Mitja Golob, mag. inž. meh.; izr. prof. dr. Aleš Hace, univ. dipl. inž.; vsi Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-3.24>

koncepta odražata v razvoju različnih učnih platform in laboratorijskih sistemov, namenjenih demonstraciji, analizi in validaciji temeljnih principov robotike, avtomatizacije ter sistemске integracije. Raziskovalna literatura poudarja, da uporaba realnih industrijskih robotskih sistemov pomembno prispeva k boljšemu razumevanju sistemске integracije, načrtovanja proizvodnih procesov ter razvoja fleksibilnih in rekonfigurabilnih avtomatiziranih sistemov [6, 8].

Pomemben segment pri tem predstavljajo komercialne učne platforme proizvajalcev ABB, KUKA, FANUC ipd., ki omogočajo standardizirano, varno in industrijsko podprto vključevanje robotike v pedagoški proces [9–11]. Prednosti tovrstnih sistemov vključujejo visoko stopnjo zanesljivosti, skladnost z industrijskimi standardi ter uporabo industrijskih robotskih krmilnikov in programskih okolij [3]. Kljub temu so takšne platforme pogosto zasnovane kot zaprti in visoko specializirani sistemi z omejenimi možnostmi rekonfiguracije ter integracije odprtih raziskovalnih tehnologij, kar zmanjšuje njihovo fleksibilnost pri raziskovalnih in razvojnih aplikacijah [5]. Na drugi strani pa raziskovalno usmerjene učne in eksperimentalne platforme poudarjajo modularno zasnovano, odprto programsko arhitekturo, uporabo okolij ROS/ROS2, hitro rekonfiguracijo ter integracijo različnih senzorskih in perifernih modulov [5, 8]. Takšni sistemi omogočajo večjo prilagodljivost, eksperimentalno raziskovanje ter razvoj naprednih algoritmov, vendar so pogosto usmerjeni predvsem v podporo raziskovalnim in eksperimentalnim dejavnostim, zaradi česar lahko v manjši meri izpolnjujejo zahteve industrijske standardizacije, robustnosti in celovite varnostne integracije [3, 5].

Kljub vsem obstoječim rešitvam zato ostaja odprto raziskovalno vprašanje razvoja učnih robotskih celic, ki bi hkrati združevale modularnost, rekonfigurabilnost, odprtost raziskovalnih platform ter robustnost in reprezentativnost realnih industrijskih sistemov. Ta vrzel se odraža tudi v omejeni pedagoški učinkovitosti, saj številni obstoječi sistemi ne omogočajo celovite obravnave kompleksnosti načrtovanja, integracije in delovanja sodobnih avtomatiziranih robotskih sistemov [12–14].

V ta namen je bila v Laboratoriju za industrijsko robotiko UM FERi razvita fleksibilna, modularna in rekonfigurabilna robotska učna celica za sestavljanje manjših mehanskih sklopov.

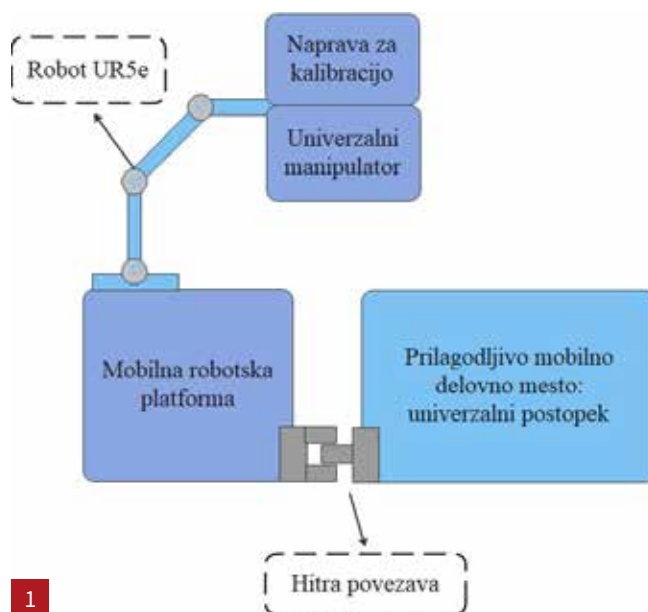
Predlagana platforma integrira robotsko enoto, krmilni sistem, varnostni sistem, uporabniški vmesnik in drugo periferno opremo v enoten sistem. Takšna arhitektura omogoča hitro rekonfiguracijo ter enostavno nadgradnjo z dodatnimi funkcionalnimi moduli. Zasnova sistema podpira sistematično obravnavo ključnih konceptov, kot so prilagodljiva avtomatizacija, modularnost in integracija v pametna proizvodna okolja. Poseben poudarek je namenjen sodelujoči robotiki, varni interakciji človek-robot ter načrtovanju in integraciji avtomatiziranih sistemov v kontekstu sodobnih industrijskih paradig. Platforma hkrati omogoča povezovanje teoretičnih in praktičnih vidikov ter podpira sodobne pedagoške pristope, kot so problemsko usmerjeno, projektno zasnovano in izkustveno učenje.

Glavni prispevki članka vključujejo zasnovano modularne in rekonfigurabilne arhitekture učne robotske celice, implementacijo in integracijo modularnih enot v enoten sistem ter razvoj in implementacijo programskih rešitev na reprezentativnem vzorčnem učnem primeru. Članek je strukturiran v štiri poglavja. V drugem poglavju je obravnavan koncept modularnosti in prilagodljivosti učne robotske celice s poudarkom na opisu posameznih mobilnih modularnih enot. Tretje poglavje predstavlja sistemsko arhitekturo, četrto poglavje pa je namenjeno snovanju robotskih aplikacij, vključno s predstavitevjo vzorčnega primera. Zaključki so podani v zadnjem poglavju.

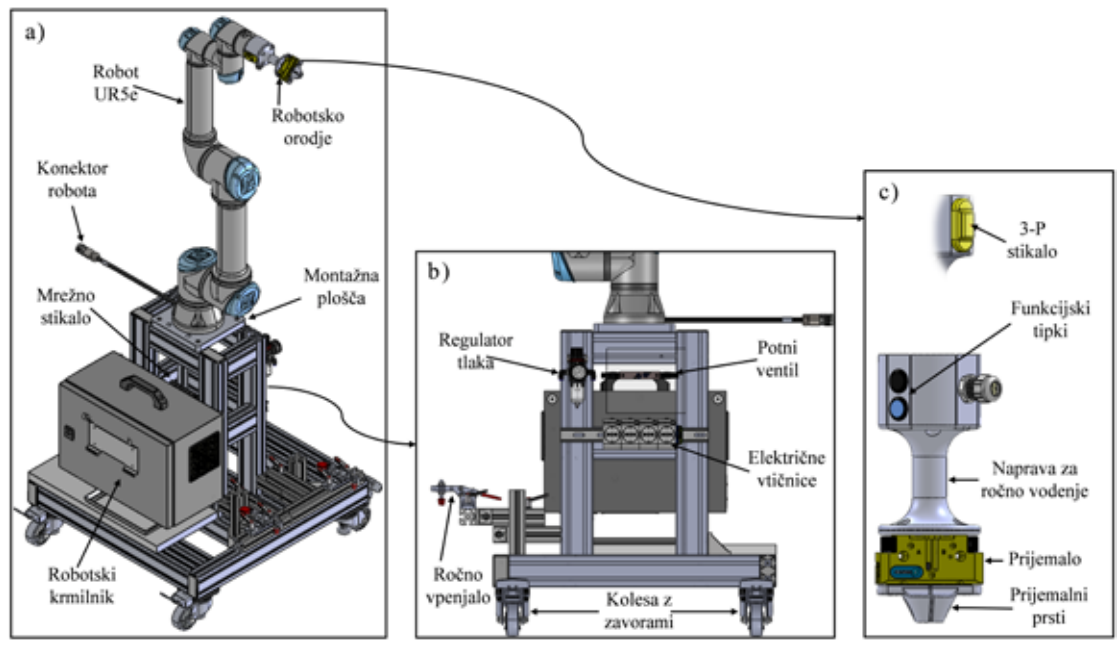
## 2 Modularnost in prilagodljivost robotske celice

Mobilna robotska platforma je zasnovana kot učno-raziskovalni sistem (*slika 1*) za razvoj in obravnavo sodelujočih robotskih aplikacij. Opremljena je s sodelujočim robotom Universal Robots UR5e, ki zaradi vgrajenih varnostnih funkcij omogoča varno interakcijo z operaterjem ter s tem neposredno podpira razumevanje konceptov sodelujoče robotike. Robot je nameščen na mobilno platformo, zgrajeno iz aluminijastih profilov, kar zagotavlja visoko stopnjo konstrukcijske fleksibilnosti ter možnost prilagajanja različnim učnim scenarijem. Po vzoru mobilnih robotskih platform [15], uveljavljenih v industrijski praksi, je modularna robotska učna celica zasnovana kot sistem dveh mobilnih enot: mobilne robotske platforme in delovne mize [16]. Obe enoti sta zasnovani kot funkcionalno neodvisna pod-sistema, kar omogoča njuno samostojno uporabo v pedagoškem procesu, hkrati pa tudi njuno integracijo v enovit sistem prek namenskega mehanizma za hitro in zanesljivo mehansko ter električno sklopitev.

Robotska platforma (*slika 2*) vključuje tudi pnevmatski sistem za krmiljenje prijemala skupaj s pripadajočo periferno opremo (mrežno stikalo, električne vtičnice itd.). Robotsko orodje je pri tem sestavljeno iz naprave za kinestetično oziroma ročno vodenje, opremljene s tripoložajnim (3-P) stikalom in funkcijskima



Konceptna shema modularne sodelujoče robotske celice



2

Mobilna robotska platforma: a) izometrična projekcija, b) stranski pogled, c) robotsko orodje

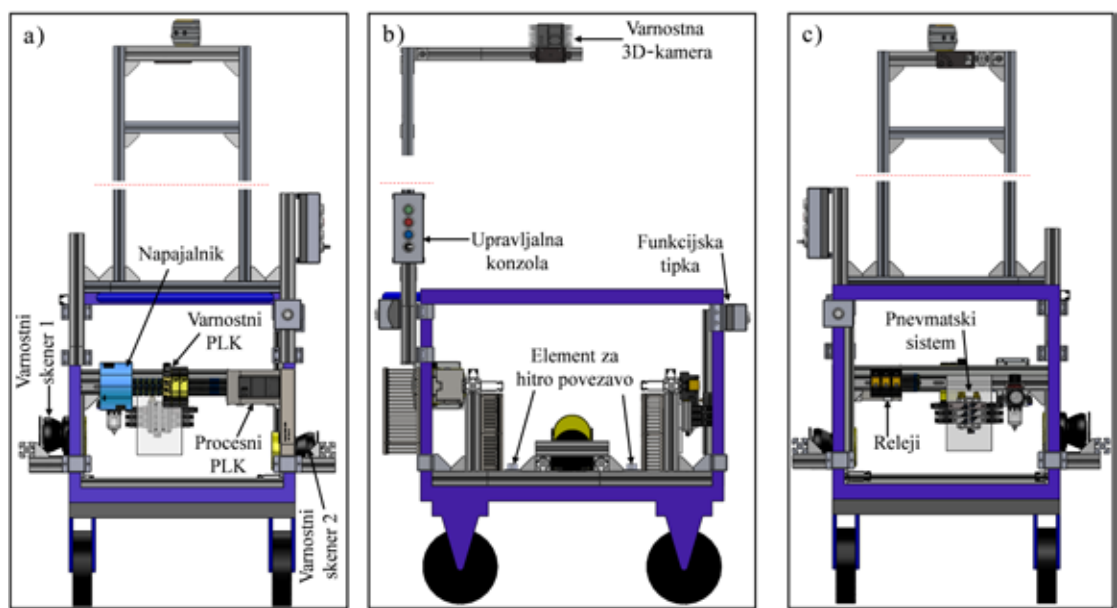
tipkama, kar omogoča intuitivno upravljanje robota ter učenje programskih točk. Poleg tega je integrirano pnevmatsko prijemalo Schunk PGN-plus-P z univerzalnimi prijemalnimi prsti, ki omogoča manipulacijo raznolikih objektov in s tem podporo izvedbi različnih učnih nalog. Platforma je dodatno opremljena z mehanskimi ročnimi vpenjalnimi elementi, ki omogočajo hitro in zanesljivo povezovanje z drugimi mobilnimi moduli ter eksperimentalno analizo vpliva posameznih komponent na delovanje celote. Takšna zasnova pomembno prispeva tudi k poglobljenemu razumevanju integracije, modularnosti in rekonfigurabilnosti sodobnih avtomatiziranih sistemov, hkrati pa študentom omogoča praktično obravnavo teh konceptov ter spodbuja njihovo aktivno vključevanje pri sestavi in prilagajanju robotske celice glede na specifične aplikativne zahteve.

Mehanska konstrukcija mobilne delovne mize (slika 3) je prav tako zasnovana kot učni modul, ki omogoča celovito obravnavo integracije mehanskih, krmilnih in varnostnih komponent v okvi-

ru robotskih sistemov. Osnovo predstavlja mobilni voziček, na katerega je na zgornji ravni nameščena prilagodljiva perforirana delovna površina (slika 4). Ta deluje kot univerzalna montažna platforma za integracijo raznolike strojne opreme, kar omogoča hitro rekonfiguracijo sistema, prilagajanje različnim učnim scenarijem ter izvedbo širokega spektra robotskih aplikacij.

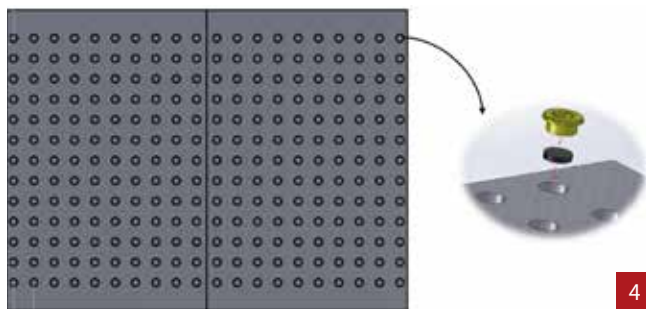
Mobilna delovna miza vključuje tudi uporabniški vmesnik z upravljalno konzolo in funkcijskimi tipkami, ki omogočajo neposredno interakcijo s sistemom ter podpirajo razumevanje osnovnih principov upravljanja in nadzora avtomatiziranih procesov. V okviru učne obravnave krmilnih sistemov je delovna miza opremljena s procesnim programirljivim logičnim krmilnikom (PLK) Mitsubishi FX5U z napajalnim modulom ter pnevmatskim sistemom, ki vključuje regulator tlaka in ventilski otok. Takšna konfiguracija omogoča praktično usvajanje osnov programiranja PLK-jev, upravljanja pnevmatskih aktuatorjev ter njihove integracije v celovit avtomatiziran sistem.

ZNANSTVENI PRISPEVKI



3

Mobilna delovna miza: a) levi stranski pogled, b) naris, c) desni stranski pogled

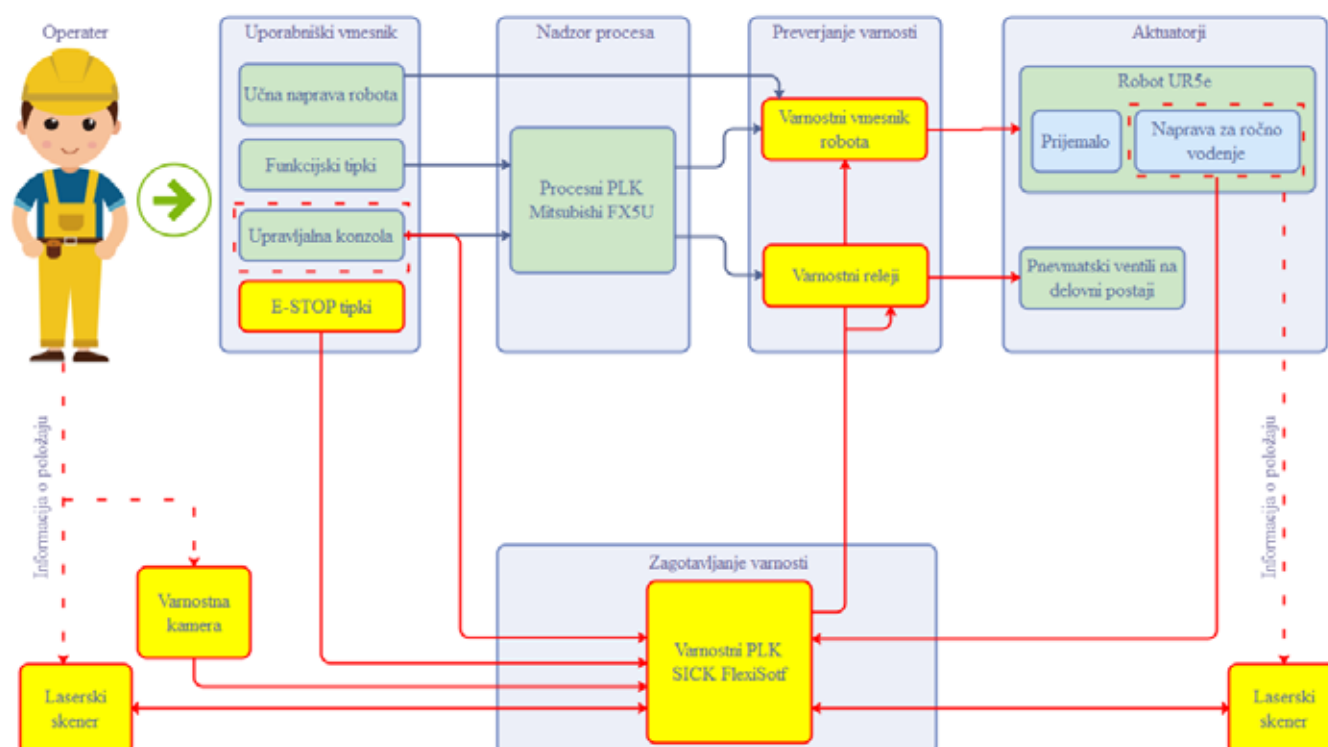


Perforirana delovna površina

Poseben poudarek je namenjen varnosti, kar se odraža tako v ustrezni umestitvi *E-STOP* tipka na delovni površini, ki zagotavlja njihovo enostavno in hitro dostopnost kot tudi v celovito zasnovanem varnostnem sistemu robotske celice. Ta temelji na uporabi varnostnega PLK Sick Flexi Soft FX3-CPU3 z ustreznimi vhodno-izhodnimi enotami, varnostnih laserskih skenerjev in 3D-kamere, pri čemer njihova integracija omogoča enotno in sistematično obravnavo varnostnih načel, funkcionalne varnosti ter principov zaznavanja prisotnosti. Takšna zasnova hkrati podpira poglobljeno razumevanje implementacije naprednih varnostnih mehanizmov in ustreznega odzivanja v kritičnih situacijah v kontekstu sodobnih robotskih aplikacij.

### 3 Sistemsko arhitekturo robotske celice

Modularna robotska celica je zasnovana kot učno-raziskovalni sistem, sestavljen iz dveh samostojnih mobilnih modulov, med katerima je vzpostavljena integrirana električna (napajalna, krmilna in varnostna) ter pnevmatska povezava. Takšna



5 Sistemsko arhitekturo robotske celice

arhitektura (slika 5) omogoča jasno razmejitev funkcionalnih podsistemov in njihovo sistematično obravnavo v pedagoškem procesu. Predlagana sistemsko zasnova vključuje več industrijskih komponent, organiziranih v logične funkcionalne sklope, kar podpira poglobljeno razumevanje strukture in delovanja kompleksnih avtomatiziranih sistemov.

Krmilni sistem temelji na procesnem PLK, ki mu operater prek uporabniškega vmesnika posreduje zahteve, pri čemer PLK zagotavlja koordinirano delovanje celotne robotske celice, vključno s sodelujočim robotom UR5e in pnevmatskimi aktuatorji. Upravljalna konzola omogoča izbiro med ročnim in avtomatskim režimom delovanja ter izvajanje osnovnih operacij, kot so zagon, zaustavitev in prekinitev izvajanja procesa. Funkcijske tipke dodatno omogočajo posredno ročno upravljanje posameznih aktuatorjev, kar podpira sistematično obravnavo temeljnih principov krmiljenja in nadzora avtomatiziranih sistemov.

Poseben učni poudarek je namenjen obravnavi varnostnih vidikov avtomatiziranih sistemov. Varnostni PLK neprekinjeno zajema in obdeluje varnostno kritične signale, vključno s podatki o položaju operaterja in robota, stanju *E-STOP*, upravljalne konzole ter 3-P stikala na ročnem upravljalniku. Na podlagi teh informacij sistem ustrezno omogoča oziroma onemogoča delovanje posameznih komponent ter po potrebi omejuje hitrost ali zaustavi gibanje robota. Takšna zasnova omogoča poglobljeno obravnavo principov funkcionalne varnosti, implementacije varnostnih algoritmov ter razumevanje pomena varnostnih mehanizmov v sodobnih robotskih sistemih.

Celotna arhitektura sistema tako podpira integrirano učno obravnavo krmilnih, pnevmatskih in varnostnih podsistemov ter omogoča izvajanje eksperimentalnega, problemsko usmerjenega in projektnega učenja na področju industrijske robotike in avtomatizacije.

Tabela 1: Faze razvoja robotske aplikacije in pripadajoči učni cilji

Aktivnosti	Učni cilji
<b>1. Analiza obstoječega sistema:</b> - pregled sistema in tehnične dokumentacije	- razumevanje strukture robotskega sistema - interpretacija tehnične dokumentacije
<b>2. Načrtovanje robotske naloge:</b> - opredelitev naloge - razvoj algoritma poteka procesa	- sposobnost formalizacije problema - razvoj logičnega poteka naloge
<b>3. Načrtovanje delovne postaje:</b> - 3D-modeliranje celice - integracija periferne opreme	- razumevanje prostorske postavitve - načrtovanje integracije komponent
<b>4. Razvoj in simulacija krmilnih programov:</b> - PLK-programiranje - programiranje robota	- razvoj krmilnih programov - obvladovanje robotskih programskih orodij - validacija delovanja sistema - preverjanje algoritmov v simulaciji
<b>5. Razvoj varnostnega sistema:</b> - ocena tveganja - načrtovanje in implementacija varnostnih ukrepov	- razumevanje varnostnih standardov - načrtovanje varnostnih sistemov
<b>6. Validacija in zagon sistema</b> - implementacija na realnem sistemu - diagnostika in odprava napak - testiranje in optimizacija	- sposobnost sistemske validacije - reševanje praktičnih problemov

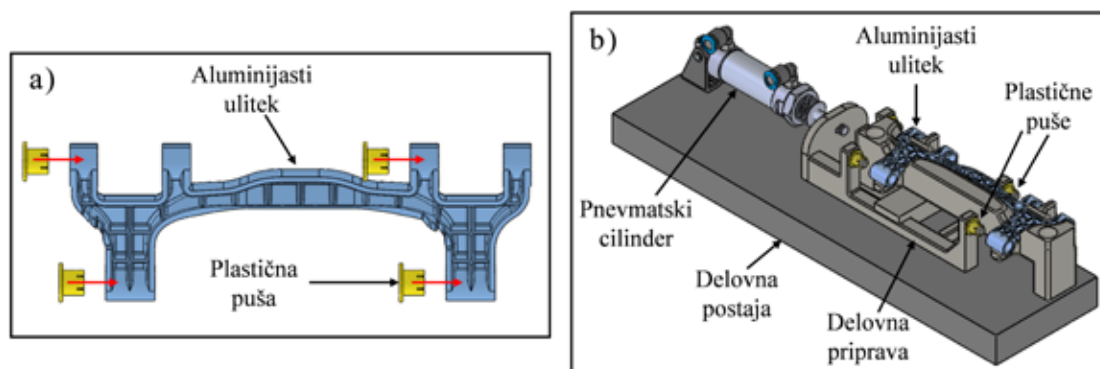
## 4 Snovanje robotskih aplikacij

Predstavljena sodelujoča modularna robotska celica je zasnovana kot učni sistem, namenjen izobraževanju na področju avtomatizacije, industrijske robotike ter zlasti sodelujoče robotike. Omogoča izvajanje širokega spektra učnih aktivnosti, ki obsegajo tako osnovne kot tudi zahtevnejše primere uporabe ter podpirajo postopno nadgrajevanje znanja in kompetenc. V okviru pedagoškega procesa študent pri delu – bodisi v sklopu laboratorijskih vaj bodisi projektne dela – prevzema vlogo razvojnega inženirja, katerega nalogi (tabela 1) sta načrtovanje in implementacija robotizirane izvedbe izbranega industrijskega procesa z uporabo predstavljene učne platforme. Takšen pristop spodbuja aktivno učenje, razvoj problemsko-analitičnega razmišljanja ter pridobivanje praktičnih izkušenj na področju načrtovanja in integracije avtomatiziranih sistemov.

V nadaljevanju je predstavljen vzorčni primer robotske aplikacije sestavljanja izdelka, ki je zasnovan kot učni primer za uporabo v pedagoškem procesu na področjih avtomatizacije, mehatronike in sodelujoče industrijske robotike. Obravnavani primer predstavlja tipičen učni scenarij, ki študentom omogoča sistematično razumevanje načrtovanja, implementacije in

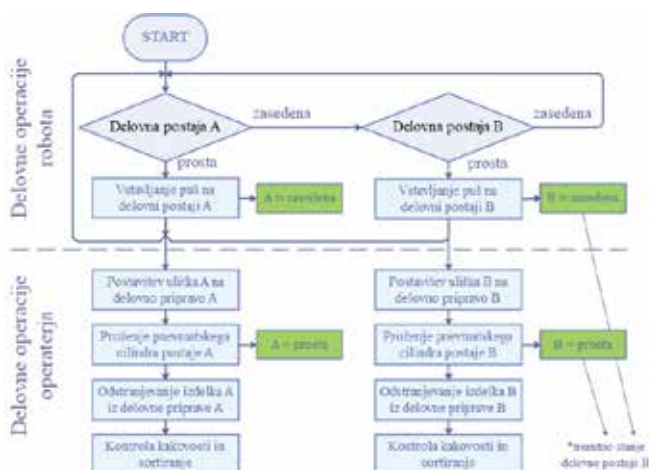
optimizacije robotskih montažnih procesov. Vzorčni primer se nanaša na montažo elementa, ki predstavlja del štirizgibnega mehanizma, namenjenega večstopenjskemu nastavljanju naslonjala za roke v avtomobilu. V predvidene izvrtine dveh različnih tipov aluminijastih ulitkov je potrebno vstaviti plastične puše. Postopek vstavljanja se izvaja na namenski delovni postaji in vključuje namestitev štirih plastičnih puš na ustrezne pozicijske zatiče delovne priprave, pozicioniranje aluminijastega ulitka na delovno pripravo ter sprožitev procesa vstavljanja (slika 6). Takšna zasnova učnega primera študentom omogoča celovito in praktično obravnavo ključnih vidikov, vključno z načrtovanjem zaporedja operacij, integracijo prijemalnih sistemov, definiranjem robotskih trajektorij, implementacijo varnostnega sistema ter zagotavljanjem ponovljivosti in zanesljivosti procesa.

Obravnavana robotska aplikacija je zasnovana kot učni scenarij, ki omogoča sodelovanje med človekom in robotom v sodobnih proizvodnih sistemih. Predvideva porazdelitev delovnih operacij med robotom in operaterjem, pri čemer robot izvaja postopek vstavljanja plastičnih puš na pozicijske zatiče delovne priprave, medtem ko operater skrbi za pozicioniranje aluminijastih ulitkov tipa A in B na



6

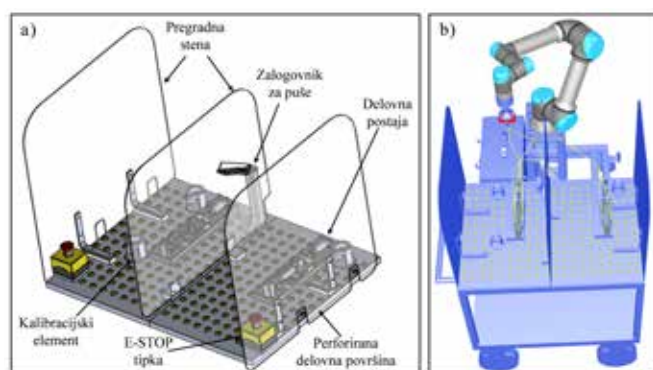
a) Aluminijasti ulitek tipa A z definiranimi montažnimi mesti plastičnih puš, b) delovna postaja z nameščenim ulitkom in plastičnimi pušami



7 Algoritem poteka naloge sestave izdelka

ustrezno delovno pripravo ter za aktiviranje procesa vstavljanja puš. Kontrolo kakovosti končnega izdelka in sortiranje izdelkov glede na uspešnost izvedene montaže prav tako izvaja operater (slika 7). Takšna zasnova učnega sistema omogoča študentom poglobljeno obravnavo principov sodelujoče robotike, načrtovanja delitve nalog med človekom in robotskim sistemom ter razumevanje vpliva takšne porazdelitve na učinkovitost, varnost in zanesljivost proizvodnega procesa.

Na podlagi predhodno opredeljenega tehnološkega procesa je bila načrtovana in izdelana specializirana oprema za izvedbo obravnavane robotske aplikacije. To je vključevalo zasnovo zalogovnika za plastične puše in prilagoditev delovnih postaj za njihovo ustrezno pritrditev na delovno površino. V nadaljevanju je bila določena optimalna konfiguracija delovne površine (slika 8a), ki je z uporabo pregradnih sten iz akrilnega stekla razdeljena na dve ločeni delovni mesti, kar omogoča obravnavo vpliva prostorske organizacije na produktivnost sistema. Na delovni površini so nameščeni tudi trije kalibracijski elementi za potrebe kalibracije robotskega manipulatorja, ki jo je praviloma potrebno izvesti ob vsaki mehanski rekonfiguraciji ali priklopu mobilnih modulov, ter dve E-STOP tipki. Nadalje je bil izdelan še simulacijski 3D-model robotske celice, prilagojen izvedbi obravnavane montažne aplikacije, ki je bil implementiran v simulacijskem programskem okolju RoboDK (slika 8b). V tem okolju je bila izvedena simulacija robotskih gibov, kar študentom omogoča analizo, preverjanje in optimizacijo robotskih trajektorij pred dejansko implementacijo na fizičnem sistemu.

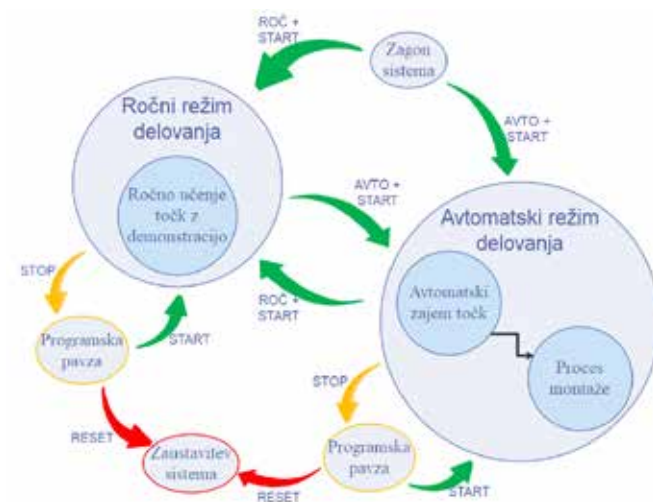


8 a) Konfiguracija delovne površine, b) simulacijski model v okolju RoboDK

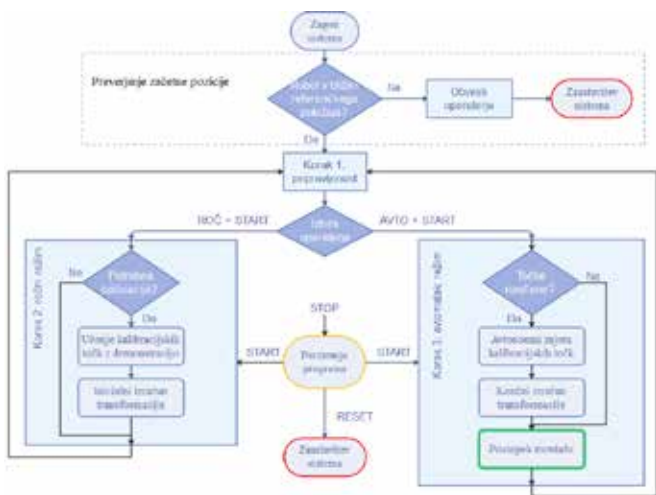
V nadaljevanju je sledila izdelava aplikativnih programov procesnega PLK in robota, kar predstavlja ključen korak pri razvoju kompetenc na področju načrtovanja in implementacije avtomatiziranih sistemov. Pri tem je treba upoštevati spodaj definirano vzorčno shemo delovanja robotske aplikacije (slika 9), ki služi kot učno orodje za razumevanje strukture in logike krmiljenja. Shema prikazuje dva temeljna režima delovanja sistema, tj. ročni in avtomatski način, ter pogoje za prehod med njima. Operater z uporabo izbirnega stikala ROC/AVTO izbere želeni režim delovanja, medtem ko s pritiskom tipke START omogoči sistem v izbranem režimu. Ročno učenje kalibracijskih točk s kinestetičnim vodenjem poteka izključno v ročnem režimu. V avtomatskem režimu pa robot na podlagi predhodno ročno določenih kalibracijskih točk samodejno ponovi njihov zajem, s čimer se zmanjšujeta vpliv človeškega dejavnika in verjetnost napak, nastalih v fazi ročnega postopka, hkrati pa se zagotovi avtonomna izvedba procesne naloge.

Na podlagi zahtev glede delovanja robotske aplikacije je bil v okviru obravnavanega učnega sistema zasnovan vzorčni robotski program (slika 10), ki služi kot učno orodje za razumevanje strukture in logike vodenja avtomatiziranih procesov. Slednji študentom omogoča sistematično obravnavo ključnih faz izvajanja robotske aplikacije ter razumevanje povezave med posameznimi funkcionalnimi sklopi.

V začetnem koraku se izvede preverjanje, ali je robot ob zagonu v bližini vnaprej definiranega referenčnega položaja. V primeru izpolnjenega pogoja se izvajanje programa nadaljuje, sicer se proces varno prekine. Ob nadaljevanju izvajanja program preide v stanje pripravljenosti, v katerem robot miruje in čaka na nadaljnjo zahtevo operaterja, kar omogoča jasno ponazoritev koncepta nadzorovanega zagona sistema. Preklop sistema v ročni režim in aktivacija tipke START sprožita prehod v naslednjo fazo, v kateri se izvedeta ročno učenje kalibracijskih točk ter inicialni izračun kalibracijskega algoritma (tritočkovna kalibracijska metoda). Ta del učnega procesa študentom omogoča neposredno interakcijo z robotskim sistemom in razumevanje postopkov kalibracije robotskega manipulatorja. Preklop v avtomatski režim in ponovna aktivacija tipke START sprožita prehod v avtomatsko izvajanje, kjer robot najprej izvede avtomatski zajem kalibracijskih točk na osnovi predhodno ročno določenih točk ter ponovno izvede kalibracijski algoritem [17]. Rezultati kali-



9 Shema delovanja vzorčne robotske aplikacije



10 Diagram poteka izvajanja vzorčnega robotskega programa

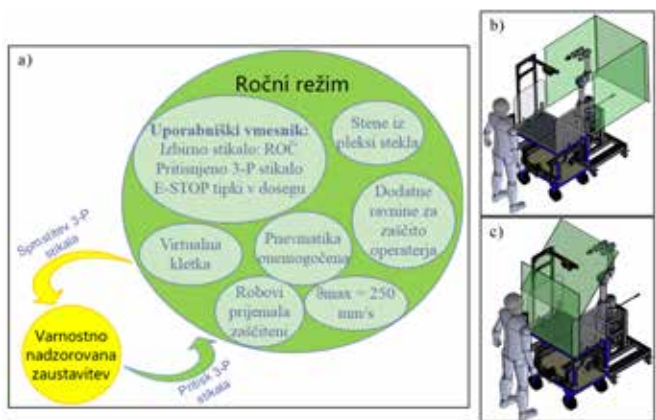
bracije se nato uporabijo pri nadaljnji izvedbi procesne naloge, kar študentom omogoča razumevanje pomena natančnosti in ponovljivosti v avtomatiziranih sistemih.

Pomembna značilnost predstavljenega učnega sistema je modularna zasnova programskega algoritma, ki omogoča njegovo hitro in enostavno prilagoditev za uporabo v različnih robotskih aplikacijah. Pri prehodu na novo aplikacijo je praviloma potrebno prilagoditi le določen segment programa, ki opisuje konkretno robotsko nalogo (»postopek montaže«), medtem ko ostali funkcionalni sklopi ostajajo nespremenjeni. Takšen pristop v okviru pedagoškega procesa študentom omogoča poglobljeno razumevanje principov modularnega programiranja in koncepta ponovne uporabe že pripravljenih programskih rešitev.

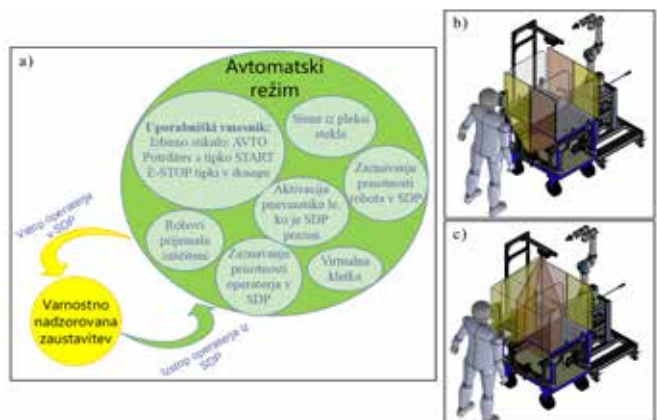
Varnostna zasnova [18] predstavlja zelo pomemben del obravnavanega učnega sistema, pri čemer je treba poudariti, da je varnostna rešitev specifična za vsako posamezno robotsko aplikacijo tudi takrat, ko se te izvajajo na isti robotski celici. V okviru pedagoškega procesa se zato identifikacija nevarnosti in ocena tveganja sistematično izvajata za vsako novo aplikacijo, razvito na tej platformi, pri čemer se upošteva uveljavljen metodološki pristop [19]. Takšen pristop študentom omogoča razumevanje pomena celostne varnostne analize in njene vlo-

ge pri načrtovanju robotskih sistemov. Ker obravnavana robotska aplikacija vključuje dva ločena režima delovanja, ročni in avtomatski, je potrebno za vsak režim posebej opredeliti tudi ustrezne varnostne ukrepe. Ročni režim (slika 11a), v katerem se izvaja kinestetično vodenje robota, zahteva specifične varnostne mehanizme, ki zagotavljajo varno neposredno interakcijo med operaterjem in robotskim sistemom. Aktivacija ročnega vodenja je mogoča le ob ustrezni nastavitvi izbirnega stikala na upravljalni konzoli, pri čemer je premikanje robota omogočeno izključno ob aktivnem držanju 3-P stikala v srednjem položaju. V obeh skrajnih položajih (neaktivirano ali popolnoma pritisnjeno stikalo) robot preide v stanje varnostno nadzorovane zaustavitve, ki predstavlja varnostno funkcijo, pri kateri se gibanje robota kontrolirano ustavi, pogoni ostanejo aktivni, sistem pa nadzoruje položaje osi in preprečuje ponovni zagon do vzpostavitve varnih pogojev. Dodatno raven varnosti v ročnem režimu zagotavljajo tudi fizični varnostni elementi, kot so pregradne stene iz akrilnega stekla in E-STOP tipki.

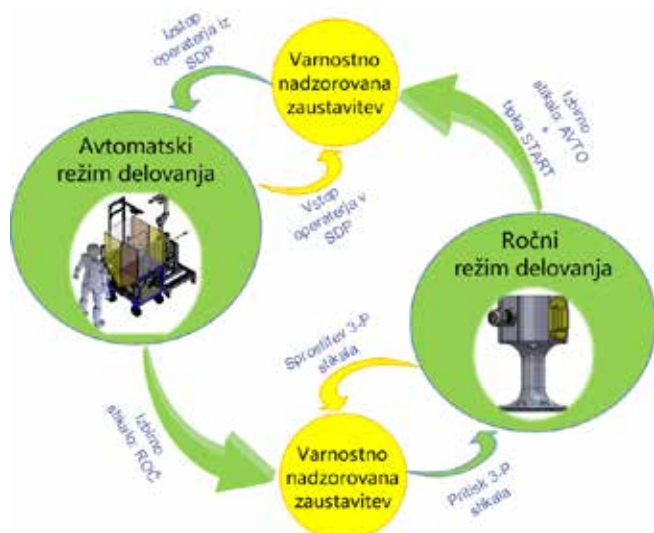
Virtualne varnostne ravnine, programsko definirane neposredno v robotskem krmilniku, dodatno omejujejo gibanje robota in služijo za določanje dovoljenega delovnega območja robota. S pomočjo treh varnostnih ravnin je bila vzpostavljena virtualna varnostna kletka, ki omejuje gibanje robota znotraj definirane delovnega prostora in je aktivna v obeh režimih delovanja (slika 11b). Poleg tega sta bili na sprednji strani robotske celice definirani še dve dodatni varnostni ravlini, katerih namen je omejevanje gibanja robota proti operaterju med ročnim vodenjem. Ti ravlini sta aktivni izključno v ročnem režimu delovanja, s čimer se dodatno povečuje raven varnosti pri interakciji operaterja in robota (slika 11c). Prva, vertikalna ravnina, ščiti območje trupa, druga, poševna ravnina, pa zmanjšuje tveganje stika robota z glavo operaterja. Hitrost gibanja robota je v tem režimu omejena na 250 mm/s, kar dodatno prispeva k varnosti interakcije. V okviru učnega sistema so implementirane tudi dodatne varnostne omejitve, kot je onemogočanje aktivacije pnevmatskih aktuatorjev znotraj sodelujočega delovnega prostora (SDP) v ročnem režimu ter ustrezna zaščita ostrih robov robotske celice, zlasti na robotskem orodju. Takšna celostna varnostna zasnova študentom omogoča poglobljeno razumevanje principov funkcionalne varnosti, implementacije varnostnih mehanizmov ter njihovega pomena pri razvoju in uporabi sodelujočih robotskih sistemov.



11 a) Ukrepi za zagotavljanje varnosti v ročnem režimu, b) virtualno delovno območje, c) varnostne ravnine za omejitev premikanja robota



12 a) Ukrepi za zagotavljanje varnosti v avtomatskem režimu, b) konfiguracija skener-skener, c) konfiguracija skener-kamera



13 Varnostni prehod med režimoma delovanja

Za omogočanje avtomatskega režima delovanja (slika 12a) mora operater izbirno stikalo na upravljalni konzoli preklopiti v ustrezen položaj in sistem aktivirati s pritiskom na tipko *START*. V primeru sočasne prisotnosti robota in operaterja znotraj istega SDP mora varnostni sistem zagotoviti takojšnjo zaustavitev gibanja robota, pri čemer robot preide v stanje varnostno nadzorovane zaustavitve.

Dodatno raven varnosti v avtomatskem režimu zagotavljajo tudi fizični varnostni elementi, kot je *E-STOP* tipka. Za zaznavanje posega v SDP se uporablja varnostni laserski skener za detekcijo gibanja robota, medtem ko se za zaznavanje prisotnosti operaterja lahko uporabi bodisi varnostni laserski skener bodisi 3D varnostna kamera (slika 12b in 12c). Tako je v okviru učnega sistema mogoče obravnavati različne pristope detekcije, in sicer konfiguracijo skener-skener ali konfiguracijo skener-kamera, kar študentom omogoča primerjalno analizo različnih varnostnih rešitev. Med avtomatskim režimom delovanja je aktivno tudi virtualno varnostno območje, ki omejuje gibanje robota znotraj dovoljenega delovnega prostora. Poleg tega morajo biti vsi ostri robovi robotske celice ustrezno zaščiteni. Aktivacija pnevmatskih aktuatorjev je dovoljena le v primeru, ko operater ne posega v skupni SDP.

Prehod med ročnim in avtomatskim režimom delovanja obravnavanega učnega sistema je mogoč izključno na podlagi neposrednega in namenskega posega operaterja in se vedno izvede preko stanja varnostno nadzorovane zaustavitve. Takšen pristop zagotavlja nadzorovan, determinističen in varen prehod med posameznima režimoma delovanja ter prispeva k zagotavljanju funkcionalne varnosti sistema (slika 13).

## 5 Zaključek

V članku je predstavljena sodelujoča modularna robotska učna celica, zasnovana kot fleksibilna, prilagodljiva in rekonfigurabilna platforma za izobraževanje in raziskovanje na področju industrijske robotike in avtomatizacije. Predlagana rešitev odgovarja na sodobne zahteve industrije in izobraževalnega okolja ter omogoča celostno obravnavo robotskih

celic kot integriranih sistemov, ki vključujejo robotske, krmilne, pnevmatske in varnostne podsisteme. Pri tem pa modularna arhitektura omogoča visoko stopnjo prilagodljivosti, enostavno rekonfiguracijo ter učinkovito podporo različnim učnim scenarijem. Osrednji prispevek predstavljenega dela je razvoj celovite učne platforme, ki presega tradicionalne, toga zasnovane laboratorijske sisteme. Platforma omogoča neposredno delo z industrijsko relevantnimi tehnologijami in podpira razvoj ključnih kompetenc, kot so načrtovanje robotskih aplikacij, programiranje, sistemska integracija in zagotavljanje funkcionalne varnosti. Predstavljeni vzorčni primer montažne aplikacije potrjuje uporabnost sistema za izvedbo projektnega, problemsko usmerjenega in izkustvenega učenja, pri čemer modularna zasnova omogoča tudi uporabo in prilagoditev že pripravljenih programskih ter strojnih rešitev. Poseben poudarek predstavlja integrirana varnostna zasnova, ki omogoča sistematično obravnavo različnih varnostnih konceptov in pristopov v sodelujočih robotskih sistemih. S tem platforma prispeva k boljšemu razumevanju varne interakcije človek-robot ter pomena ocene tveganja v procesu načrtovanja.

Pomembna prednost predstavljenega platforme je tudi povezovalne ključne prednosti komercialnih učnih sistemov in raziskovalno usmerjenih eksperimentalnih platform. V primerjavi s komercialno dostopnimi učnimi sistemi platforma ne temelji na zaprti in vnaprej definirani arhitekturi, temveč omogoča visoko stopnjo modularnosti, odprto integracijo dodatnih perifernih modulov ter prilagodljivo rekonfiguracijo glede na različne učne, raziskovalne in razvojne scenarije. Hkrati v primerjavi z raziskovalnimi platformami ohranja reprezentativnost realnega industrijskega okolja, uporabo industrijsko relevantnih komponent, integrirano varnostno zasnovo ter sistemski pristop k načrtovanju avtomatiziranih procesov. Predlagana rešitev tako združuje fleksibilnost in odprtost raziskovalnih sistemov z robustnostjo, standardizacijo in industrijsko relevantnostjo komercialnih rešitev, kar predstavlja pomemben prispevek k razvoju sodobnih učnih platform za industrijsko robotiko in avtomatizacijo.

Nadaljnje raziskave bi bilo smiselno usmeriti v sistematično eksperimentalno vrednotenje pedagoške učinkovitosti platforme in poglobljeno analizo njenega vpliva na razvoj praktičnih ter sistemskih kompetenc. Hkrati predstavlja pomembno smer nadaljnega razvoja nadgradnja sistema z naprednimi senzorskimi sistemi, sistemi strojnega (računalniškega) vida ter drugimi tehnologijami, ki bi omogočile implementacijo in obravnavo sodobnih konceptov, kot so digitalni dvojčki, napredni načini vodenja robotov ter uporaba metod umetne inteligence v robotskih aplikacijah. Dodaten potencial platforme predstavlja tudi integracija odprtih programskih okolij (npr. ROS/ROS2) ter naprednih metod povezovanja robotskih in informacijskih sistemov, kar bi omogočilo še učinkovitejšo podporo raziskovalnim in industrijsko usmerjenim učnim scenarijem. Na tej osnovi lahko zaključimo, da predstavljena modularna robotska učna celica predstavlja sodobno in strokovno utemeljeno rešitev, ki učinkovito povezuje zahteve industrijske prakse z aktualnimi pedagoškimi pristopi ter pomembno prispeva k razvoju kompetenc za uspešno delovanje v naprednih proizvodnih okoljih.

**Podatki vključeni v članek.** "Vsi relevantni podatki so vključeni v članek oziroma njegove dodatne materiale."

## Viri

- [1] Napoleone, A., Andersen, A. L., Brunoe, T. D., & Nielsen, K.: Towards human-centric reconfigurable manufacturing systems: Literature review of reconfigurability enablers for reduced reconfiguration effort and classification frameworks. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 23–34 (2023).
- [2] Yang, J., Son, Y.H., Lee, D., Noh, S.D.: Digital Twin-Based Integrated Assessment of Flexible and Reconfigurable Automotive Part Production Lines. *Machines* 2022, 10, 75.
- [3] Antunes, R., Nunes, L., Aguiar, M.L.d., Gaspar, P.D.: A Laboratory-Based Multidisciplinary Approach for Effective Education and Training in Industrial Collaborative Robotics. *Laboratories* 1, 34–51 (2024).
- [4] Reyes-Zárate, G.G., Garay-Rondero, C.L.: Experiential Learning for Industry 4.0 in Higher Education: A Challenge-Based Learning Case Study. *Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2023)*, vol. 69, pp. 880–887 (2023).
- [5] Asif, S., Bueno, M., Ferreira, P., Anandan, P., Zhang, Z., Yao, Y., Ragunathan, G., Tinkler, L., Sotoodeh-Bahraini, M., Lohse, N., et al.: Rapid and automated configuration of robot manufacturing cells, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 92 (2025).
- [6] Bem, M., Gašpar, T., Kovač, I., Ude, A.: Rekonfigurabilna in modularna robotska celica za maloserijsko proizvodnjo, *Ventil*, vol. 24, no. 2, pp. 136–139, 2018.
- [7] Radanovič, P., Jereb, J., Kovač, I., Ude, A.: Design of a Modular Robotic Workcell Platform Enabled by Plug & Produce Connectors, in *Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2021)*, Ljubljana, Slovenia, 2021,
- [8] Simonič, M., et al.: Modular ROS-Based Software Architecture for Reconfigurable, Industry 4.0 Compatible Robotic Workcells, in *Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2021)*, Ljubljana, Slovenia, 2021, pp. 44–51.
- [9] ABB Robotics: Robotics Education Package, ABB, 2026, ([https://www.abb.com/global/en/areas/robotics/solutions/functional\\_modules/education-package](https://www.abb.com/global/en/areas/robotics/solutions/functional_modules/education-package)).
- [10] KUKA: KUKA Training Cell – Educational Robotics Solutions, KUKA AG, 2026, (<https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/kuka-education-robot-training-cell>).
- [11] FANUC: Collaborative Robot Educational Package, FANUC Europe, 2026, (<https://www.fanuc.eu/eu-en/accessory/software/collaborative-educational-package>).
- [12] Aderoba, O.A., Mpofu, K., Swanepoel, J.A.: Modular Robotic System Framework for Project-Based Learning Factory Environment. In: Louw, L., Hummel, V., de Kock, I., von Leipzig, K. (eds) *Advancing Learning Factories: Enabling Future-Ready Skills*. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1545, Springer, Cham (2025).
- [13] Geiser, A., Stamer, F., Lanza, G.: Advancing Learning Factories: Reworking the Semi-Automated Stations of the Learning Factory to Provide a Framework for Research, Education and Industry Collaboration in Modern Manufacturing. In: Louw, L., Hummel, V., de Kock, I., von Leipzig, K. (eds) *Advancing Learning Factories: Enabling Future-Ready Skills*. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1546, Springer, Cham (2025).
- [14] Tekerek, M., Beyazaslan, Z., Aydemir, H., et al.: A Systematic Literature Review and Mapping of Human-Robot Interaction in Educational Contexts. *Humanit. Soc. Sci. Commun.* 13, 336 (2026).
- [15] Universal Robots: CNC Machine Tending by Vention, (<https://www.universal-robots.com/plus/products/vention/cnc-machine-tending-by-vention/>).
- [16] Prelevič, D.: Nadgradnja specializirane robotske celice za montažo v modularno prilagodljivo kolaborativno robotsko celico za sestavljanje manjših sklopov. *Magistrsko delo*, UM FER, Maribor (2026).
- [17] Zhang, W., Ma, X., Cui, L., Chen, Q.: 3 Points Calibration Method of Part Coordinates for Arc Welding Robot. In: Xiong, C., Huang, Y., Xiong, Y., Liu, H. (eds) *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2008*. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5314, pp. xx–xx. Springer, Berlin, Heidelberg (2008).
- [18] SIST ISO TS 15066: Roboti in robotske naprave, Varnostne zahteve za industrijske robote – 3. del: Kolaborativni roboti, SIST, Ljubljana, 2025.
- [19] Robotiq: How to Perform a Risk Assessment for Collaborative Robots, (<https://blog.robotiq.com/how-to-perform-risk-assessment>).

## Collaborative Modular Robotic Educational Cell

## Abstract:

Modern industrial manufacturing, characterized by high degree of variability and dynamically changing production demands, encourages the development on flexible, adaptable, and reconfigurable automated machinery. Those industrial trends are reflected directly onto the curriculum of contemporary education programs in the fields of automation and robotics. The need for an integrated multipurpose robotics platform for research projects, student educational projects and laboratory exercises motivated the development of a modular, flexible collaborative robotic cell for small parts assembly. The proposed teaching platform allows the students a close-up interaction with real-life industrial technologies and supports the teaching of key concepts, such as: flexible automation, design of modular and reconfigurable systems, and integration of such systems into smart manufacturing facilities. A special emphasis was given to the development of professional and practical competences in collaborative robotics, as the proposed robotic cell provides student with infrastructure to design, develop and deploy their own unique collaborative robotic application along with the accompanying safety solution. From the pedagogical aspect, the proposed platform allows for the effective connection between the theoretical knowledge and practical experience and supports the implementation of modern learning methods such problem-based, project-based and experience-based learning. The described solution thus represents a relevant and modern teaching aid, that adds to the quality of the educational process and the development of competences needed for successful work in modern industrial environments.

## Keywords:

collaborative robotics, modularity, reconfigurability, flexibility, safety, teaching platform