

## Rekonfigurabilna robotska celica za malo in srednjeseerijsko proizvodnjo

Martin Bem<sup>1</sup>, Žiga Gosar<sup>2</sup>, Timotej Gašpar<sup>1</sup>, Igor Kovač<sup>1</sup>, Aleš Ude<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut »Jožef Stefan«, <sup>2</sup>ELVEZ d.o.o.

### POVZETEK

Za uporabo robotov v maloserijski proizvodnji je potrebno obiti številne težave. Menjava serije izdelkov je drag časovno zamuden proces zato se robotska proizvodnja običajno uporablja v velikoserijski proizvodnji. Da bi omejitev obšli je bila v sklopu projekta ReconCell razvita robotska celica naslednje generacije, ki s pomočjo fleksibilnih in rekonfigurabilnih pristopov obvladuje proizvodnjo raznolikih izdelkov. V članku so opisani ključni mehanski in programski pristopi, ki to omogočajo. Obravnavana je tudi njihova implementacija ter rezultati njihove uporabe na področju proizvodnje avtomobilskih žarometov.

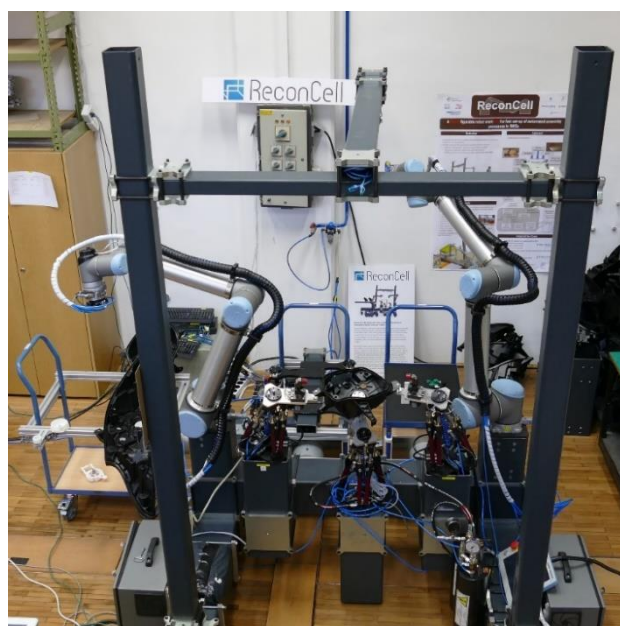
### 1. UVOD

Roboti se najpogosteje uporabljajo v velikoserijski proizvodnji z majhno raznolikostjo. Glavni razlog za to je drag in zamuden proces ob menjavi serije proizvodov. Za proizvodnjo majhnih serij raznolikih izdelkov klasični pristopi robotske proizvodnje niso primerni.

Robot je izredno prilagodljiva naprava, saj omogoča programsko definicijo poljubnega giba znotraj svojega delovnega območja. Težava pa je, da programiranje robota zahteva izobražen kader in je pogosto časovno potraten proces.

Periferni moduli robotske celice so z vidika prilagodljivosti bistveno bolj problematični. Ti so običajno specifični in povezani z izdelavo enega produkta. Ob menjavi serije je potrebno periferne elemente na novo zasnovati, izdelati ter nazadnje fizično namestiti. Primer takšnih perifernih elementov so vpenjala, zamenjava katerih je drag, časovno potraten proces, ki zahteva visoko kvalificiran kader. Večje spremembe gabaritnih dimenzij produkta pa lahko privedejo tudi do potrebe po spremembi ogrodja robotske celice. Prav tako se ob menjavi produkta občasno pojavi potreba po dodatnih funkcionalnostih npr. vijačenje, vtiskovanje, strojni vid, ipd..

Da bi omilili vpliv zgoraj navedenih omejitev je v sklopu projekta ReconCell nastala robotska celica naslednje generacije (Slika 1). Le-ta uporablja fleksibilne in rekonfigurabilne pristope s katerimi minimizira kompleksnost, stroške in čase povezane s spremembo serije produktov.

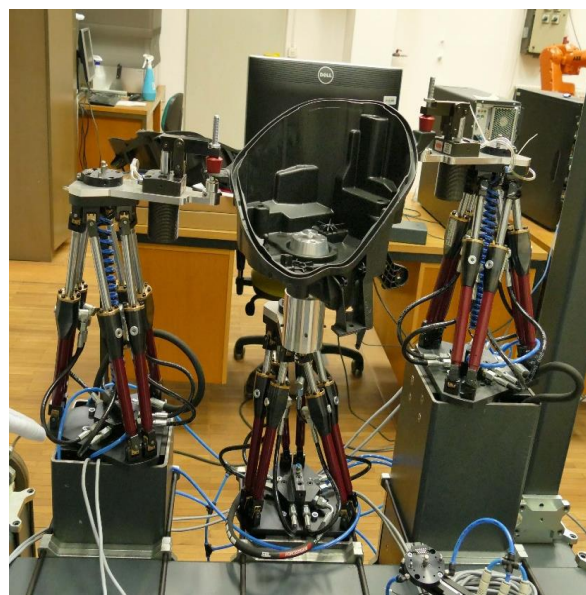
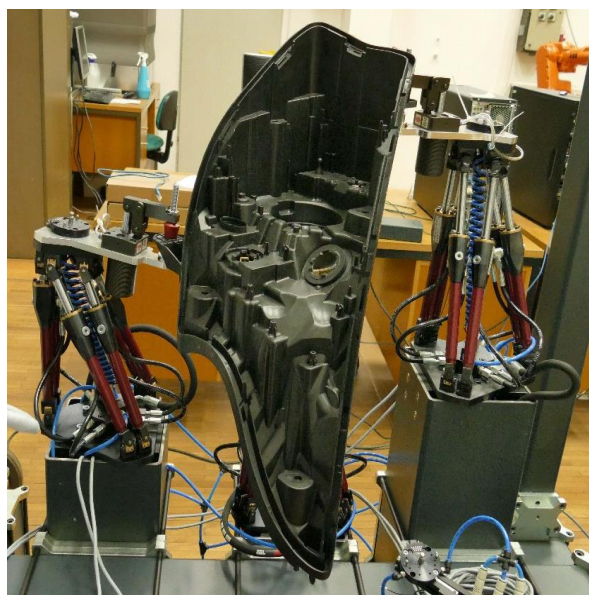


Slika 1: Robotska celica razvita v ReconCell projektu

### 2. REKONFIGURABILNA STROJNA OPREMA

Robotska celica projekta ReconCell je sestavljena iz ogrodja, dveh UR10 robotov, vpenjal ter številnih perifernih modulov. Vsi elementi so bili od začetka zasnovani tako, da omogočajo hitro in učinkovito prilagoditev proizvodnim potrebam.

V celici tako ločimo tri mehanizme rekonfiguracije. Prvi, ki ga omogoča fleksibilna vpenjalna priprava (Hexapod), je v celoti avtonomen in zato najhitrejši. Gre za t.i. robotsko podprto rekonfiguracijo saj za prilagoditev vpenjalnih priprav uporabljamo robota [1]. Drugi



Slika 2: Dva modela avtomobilskih luči vpeta v fleksibilno vpenjalo

je mehanizem Plug and Produce. Je nekoliko počasnejši saj ga izvajamo ročno. Rekonfiguracija s Plug and Produce mehanizmom omogoča dodajanje perifernih elementov opremljenih z istoimenskim konektorjem. Zadnji mehanizem rekonfiguracije je ročna rekonfiguracija ogrodja, ki je od naštetih najpočasnejša in najredkeje uporabljena. Mehanski elementi, ki omogočajo naštete mehanizme rekonfiguracije so opisani v nadaljevanju poglavja.

### 2.1. Ogrodje

Ogrodje celice je element, ki mehansko povezuje robota z vsemi elementi periferije. Kljub navidezni preprostosti pa gre za element robotske celice, kjer lahko s premišljeno zasnovo znatno izboljšamo prilagodljivosti na morebitne bodoče spremembe.

Najpomembnejša lastnost ogrodja je mehanska togost in cenena izvedba. Visoka togost je potrebna, ker lahko že majhne deformacije privedejo do napak robotskih operacij ali neustrezne kakovosti izdelkov. V primeru varjene izvedbe ogrodja, ki je sicer zelo togo, je prilagodljivosti celice pomanjkljiva.

Alternativno lahko ogrodje robotske celice izdelamo iz standardnih aluminijastih profilov. Tako ogrodje, katerega montaža je enostavna ter hitra, omogoča povečano prilagodljivost, saj ne potrebuje varjenja in omogoča kasnejše modifikacije. Slabost uporabe aluminijastih

profilov pa je bistveno manjša togost ter visoka cena.

V projektu uporabljena rešitev, ki združuje prednosti obeh zgoraj navedenih možnosti je uporaba t.i. BoxJoint sistema [2]. Gre za sistem, ki jeklene pravokotne profile različnih dimenzij spoji z jeklenimi ploščami, namenski maticami in vijaki. Uporaba jeklenih profilov pomeni visoko togost uporaba vijačnih zvez pa omogoča kasnejše enostavne spremembe konfiguracije ogrodja.

Tovrstni spoji so bili razviti za letalsko industrijo, v projektu ReconCell pa je bila tehnologija prvič uporabljena v avtomobilski industriji. Tehnologija se je izkazala kot izjemno učinkovita, saj bistveno skrajša čas in stroške postavitve ter poenostavi izpeljavo modifikacij robotske celice.

### 2.2. Fleksibilna vpenjalna priprava

Vpenjalna priprava je del robotske celice, ki je odgovorna za pravilno pozicioniranje in fiksiranje obdelovancev med izvajanjem robotskih nalog. Običajno so vpenjalne priprave specifične določenemu obdelovancu. V primeru menjave serije jih je potrebno na novo zasnovati, izdelati in montirati. Ta proces je drag, časovno zamuden in potrebuje kvalificirano delovno silo.

Da bi se temu izognili je bila v projektu uporabljena fleksibilna vpenjalna priprava, ki temelji na pasivni Stewartovi platformi (Hexapodu). Fleksibilna vpenjalna priprava, je

produkt predhodnega razvoja. Med projektom je nastalo tudi odcepljeno podjetje, odgovorno za komercializacijo omenjene tehnologije [3].

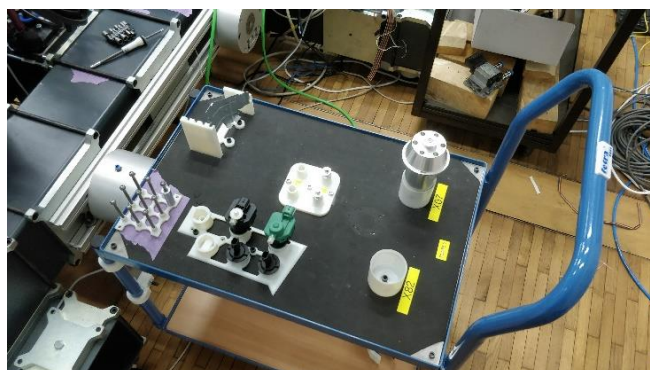
Stewartov mehanizem, ki omogoča rekonfiguracijo vpenjala je sestavljen iz dveh plošč povezanih z šestimi pasivnimi prizmatičnimi vezmi. Spodnja plošča mehanizma je togo pritrjena na ogrodje celice, zgornja pa ima šest prostostnih stopenj. Vsaka od šestih prizmatičnih vezi ima vgrajeno hidromehansko zavoro, ki lahko mehanizem zaklene. Zaradi paralelne narave je mehanizem v zaklenjenem stanju zelo tog. Rekonfiguracijo je mogoče izvesti ročno ali s pomočjo zunanjega mehanizma npr. robota.

Za vpetje vsakega obdelovanca, v našem primeru avtomobilskega žarometa, smo v celici uporabili po tri rekonfigurabilne vpenjalne priprave (glej Slika 2). Dve sta opremljeni s pnevmatsko spono eno pa pasivno podpira ohišje luči. V primeru potrebe po uporabi različnih dimenzij ostalih podpornih elementov, lahko izvedemo robotsko menjavo letih.

Fleksibilne vpenjalne priprave smo testirali na dveh različicah avtomobilskih žarometih. Oba smo vpeli v ustrezno nastavljene vpenjalne priprave (Slika 2) ter pri obeh izvedli robotsko montažno nalogo. Rekonfiguracija je bila izvedena popolnoma avtonomno brez človeškega posredovanja in je trajala manj kot 3 minute. S tem smo pokazali, da tehnologija omogoča prilagoditev celice znotraj družine izdelkov. Avtonomnost ter čas rekonfiguracije sta v tem primeru zelo pomembna, saj so tovrstne spremembe proizvodnje najpogostejše.

### 2.3 Plug and produce (PnP) tehnologija

Plug and produce je izraz izpeljan iz izraza Plug and play, ki na področju računalništva implicira enostavno priključitev perifernih računalniških naprav (npr. tiskalnik). V primeru PnP gre za način dodajanja perifernih modulov robotske celice, ki so specifični za določeno serijo izdelkov in ki robotski celci dajo določeno funkcionalnost. Ključna omogočitvena tehnologija je v projektu razvit PnP konektor, ki omogoča prenos podatkov preko interneta ter povezavo napajanja in pnevmatike. PnP konektor omogoča tudi togo in ponovljivo mehansko



Slika 3: PnP modul za shranjevanje sestavnih delov

povezavo z ogrodjem celice. Ponovljivost povezave je pomembna, saj robotu omogoča neposredno manipulacijo s priključenimi moduli.

S PnP moduli celici dodamo zahtevane funkcionalnosti. V primeru menjave proizvodne naloge module zamenjamo in s tem celico prilagodimo novim zahtevam.

Do sedaj so bili implementirani številni PnP moduli. Primeri modulov, ki so uporabljeni v montaži avtomobilskih žarometov so: modul za shranjevanje sestavnih delov, modul za shranjevanje robotskih prijemalk, in modul za vpenjanje ohišja luči. Koncept smo eksperimentalno potrdili tako, da smo celico, ki je bila konfigurirana za montažo avtomobilskih žarometov, v manj kot 10 minutah rekonfigurirali v celico namenjeno izdelavi motorjev za pametno pohištvo. PnP modul za shranjevanje sestavnih delov je prikazan na Slika 3.

### 3. PROGRAMSKA OPREMA

Robotske celice se običajno programira neposredno z uporabo tovarniškega vmesnika robota ali s pomočjo simulacijskega okolja. Oba pristopa zahtevata znanje specifično za proizvajalca robota. V primeru izdelave novega programa celice, podjetje najame zunanje storitve, kar dodatno povečuje stroške in podaljša čase menjave serij.

Da bi te težave zmanjšali, smo v projektu razvili programski sistem, namenjen poenostavitvi in pospešitvi programiranja robotske celice. Programski sistem ponuja orodja, ki omogočajo intuitivno programiranje robota.

Celoten sistem robotske celice deluje znotraj ekosistema Robot Operating System (ROS) [4], za nizkonivojsko vodenja robota pa skrbi Matlab

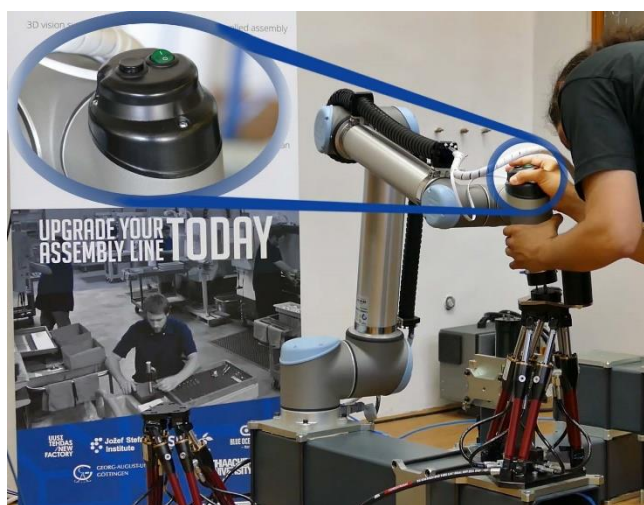
Simulink Real-Time (SLRT) strežnik [5]. ROS ponuja zanesljivo odprtokodno ogrodje, možnost razvoja programov na različnih platformah ter veliko zbirko knjižnic in orodij za razvijanje robotskih aplikacij, SLRT strežnik pa skrbi za časovno kritične procese.

### 3.1 Kinestetično učenje robotskih nalog

V zadnjih letih se je na trgu pojavil trend uvajanja sodelujočih (kolaborativnih) robotov. Zanje je značilno, da so certificirani za sodelovanje s človekom brez potrebe po varnostnih ogradah. Ta tehnologija je pogojena z zaznavali navorov v vsakem robotskem sklepu in jo je mogoče uporabiti za t.i. kinestetično vodenje. Robote sposobne kinestetičnega vodenja je mogoče premikati po prostoru tako, da robota primemo in premaknemo v želeno lego. S pomočjo enkoderjev v sklepih ter znanega kinematičnega modela je tako mogoče robota učiti proizvodne naloge.

V projektu uporabljen robot omogoča kinestetično vodenje, s katerim smo izdelali uporabniške aplikativne programe. Razvit sistem omogoča kinestetični zajem posameznih točk ali celotne trajektorije v sklepni ali kartezičnih koordinatah.

Tehnologija je bila uspešno uporabljena pri učenju montažne naloge avtomobilskih žarometov. Tako smo proces programiranja robota bistveno pospešili in zmanjšali potrebo po kvalificirani delovni sili. Sistem, razvit v projektu, je neodvisen od proizvajalca in modela robota kar



programiranje dodatno poenostavi. Izdelan je bil tudi vmesnik, nameščen na robotu s pomočjo

katerega je mogoče vključiti kinestetični način manipulacije robota ter shranjevati točke ali trajektorije. Prikazan je na **Error! Reference source not found.**

### 3.2 Napredni algoritmi krmiljenja robota

Razvita programska oprema, omogoča tudi implementacijo naprednejših metod generacij trajektorij. Do sedaj so razviti algoritmi za generacijo trajektorij so:

- trapezni hitrostni profil v sklepni koordinatah,
- premik po ravni črti v kartezičnih koordinatah po najmanjšem odvodu pospeška za translacijo ter SLERP [6] za orientacijo
- admitančno vodenje [7],
- dinamični generatorji gibov v sklepni koordinatah,
- dinamični generatorji gibov v kartezičnih koordinatah [8].

## 4. ZAKLJUČEK

V članku je predstavljena inovativna robotska celica namenjena uporabi v maloserijski proizvodnji. Celica omogoča hitro postavitve, učinkovito rekonfiguracijo ter intuitivno programiranje. Tako skrajšamo čase in zmanjšamo stroške povezane z menjavo serije proizvajanih produktov s čimer postane maloserijska robotsko podprta proizvodnja ekonomsko upravičljiva.

V članku opisane tehnologije smo preizkusili na področju montaže avtomobilskih žarometov. Razvite mehanske in programske inovacije so bistveno povečale učinkovitost menjave serije žarometov. Tehnologije izkazujejo velik potencial vendar je za njihovo množično uporabo v industriji potreben nadaljnji razvoj.

### Literatura:

- [1] M. Goedl, I. Kovač, and A. Frank, "A robot guided reconfigurable assembly system," presented at the 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor Michigna USA, 2005.
- [2] "BoxJoint," *Prodtex*. [Online]. Available: <http://www.prodtex.com/boxjoint/>. [Accessed: 01-Dec-2017].

- [3] “Home,” *FlexHex Robot*. [Online]. Available: <http://flexhex-robot.com/>. [Accessed: 01-Dec-2017].
- [4] M. Quigley *et al.*, “ROS: an open-source Robot Operating System,” in *ICRA workshop on open source software*, 2009, vol. 3, p. 5.
- [5] “Simulink Real-Time - Simulink - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/simulink-real-time.html>. [Accessed: 14-Mar-2017].
- [6] K. Shoemake, “Animating rotation with quaternion curves,” vol. 19, no. 3, pp. 245–254, 1985.
- [7] L. Villani and J. De Schutter, “Force control,” in *Springer handbook of robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. Berlin: Springer, 2008, pp. 161–185.
- [8] A. Ude, B. Nemeč, T. Petric, and J. Morimoto, “Orientation in cartesian space dynamic movement primitives,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, pp. 2997–3004.