



KOLABORATIVNI ROBOTI U ZADACIMA MAŠINSKE OBRAD PRIMENA I PROGRAMIRANJE

Slobodan Tabaković¹, Saša Živanović²

Rezime: Aktuelne strategije razvoja industrije u pravcu digitalizacije u koje spadaju Industrija 4.0 i 5.0 obuhvataju automatizaciju industrijske proizvodnje i u operacijama izrade proizvoda koji obuhvataju neposredno učešće čoveka. To se najčešće odnosi na procese manipulacije i montaže. U radu se analizira mogućnost primene kolaborativnih robota u segmentu industrijske proizvodnje koji pored neposrednog učešća čoveka zahteva i mašinsku obradu materijala. To se pre svega odnosi na obradu materijala skidanjem ili dodavanjem materijala.

Ključne riječi: kolaborativni roboti, programiranje, mašinska obrada

COLLABORATIVE ROBOTS IN MACHINING TASKS APPLICATION AND PROGRAMMING

Abstract: Modern strategies for developing the industry in the direction of digitization, such as Industry 4.0 and 5.0, include the automation of industrial production in manufacturing operations that include direct human participation. This most often refers to the processes of manipulation and assembly. The paper analyzes the possibility of using collaborative robots in the segment of industrial production, which, in addition to direct human participation, also requires machining materials. It primarily refers to the processing of the material by removing or adding material.

Key words: collaborative robots, robot programming, machining

1 UVOD

Najvažnija merila razvoja ljudskog društva u poslednjih dve stotine godina obuhvataju stanje industrijskog sektora i trendove njegovog usavršavanja. Samim tim su se za ključne promene u industrijskoj proizvodnji vezivali periodi značajnog

¹ prof. dr Slobodan Tabaković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, tabak@uns.ac.rs (CA)

² prof. dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, szivanovic@mas.bg.ac.rs

unapređenja kvaliteta ljudskog života [1]. Tako se mehanizacija proizvodnje (I industrijska revolucija) vezuje za razvoj modernog društva, a digitalizacija proizvodnje za društvo zasnovano na Internet tehnologiji. Savremeni trendovi koji se poslednjih godina javljaju kao nastavak procesa digitalizacije u industriji i posledica globalne pandemije ukazuju na potrebu za istraživanjima u pravcu stvaranja humano organizovane proizvodnje koja obuhvata integraciju ljudskog rada sa savremenim proizvodnim sistemima [2].



Slika 1. Kolaborativni roboti u procesu montaže

da se koriste kao automatizovani sistemi koji omogućuju delimičnu automatizaciju ljudskog rada u operacijama: mašinske obrade ivica radnih predmeta (obaranje ivica), merenja i kontrole, zakivanja i aditivnih tehnologija kao što su nanošenje materijala kao i površinske zaštite.

U radu se opisuje deo istraživanja sprovedenog sa ciljem analize mogućnosti primene kolaborativnih robota u operacijama mašinske obrade materijala rezanjem sa stanovišta programiranja i tačnosti.

2 KOLABORATIVNI ROBOTI

Koncept industrijskih robota sposobnih za rad u ljudskom okruženju je nastala iz potrebe za proširenjem oblasti automatizacije. Time je omogućena fleksibilna automatizacija i na radnim mestima koja podrazumevaju učešće ljudskog rada [4] što se primenjuje u manjim i srednjim serijama.

Značaj kolaborativnih robota u industriji danas raste vrlo brzo. Oni imaju nekoliko prednosti u odnosu na klasične industrijske robote: mogu da rade zajedno sa ljudima, njihovom okruženju je potrebno manje prilagođavanja, mogu se lako transportovati itd. S obzirom da su njihovi zglobovi elastičniji od onih kod klasičnih industrijskih robota, ovi roboti su manje pogodni za zadatke mašinske obrade. Međutim, kolaborativni roboti mogu biti opremljeni, senzorom sila i fleksibilnim glavnim vretenom kao end-efektorom, koji se može koristiti i za obrade glodanjem na mekim materijalima [5].



Slika 2. Senzor sile za Fanuc robote

Bezbednost učesnika proizvodnje u okruženju robota se obezbeđuje ugradnjom odgovarajućih davača sposobnih da detektuju kretanja, kontakte i sile koje su po pravcu i intenzitetu van očekivanih za kretanje predviđenog tereta po programiranoj putanji. Karakteristike komercijalnih robota su definisane ISO-TS 15066 standardom [6]. Komercijalne verzije kolaborativnih robota najčešće koriste senzore sile ili momenta (slika 2) uz moguće dodatne elemente u vidu lidar sistema ili kamera.

3 METODE PROGRAMIRANJA KOLABORATIVNIH ROBOTA

Metode programiranja industrijskih robota se usavršavaju od početka njihovog razvoja. U tom, skoro sedamdeset godina dugom periodu je razvijen veći broj različitih pristupa definisanju putanje izvršnog organa (end-efektora), funkcije kretanja kao i komunikacije sa drugim, automatizovanim, sistemima u proizvodnji [7-12]. Metode programiranja se najčešće dele na direktne i indirektne koji se realizuju u blizini robota uz primenu jedinice za obučavanje ili na udaljenim računarima primenom odgovarajućeg softvera.

Razlog za složenost programiranja robota za zadatke mašinske obrade je u tome što svaki proizvođač robota uglavnom koristi svoj sopstveni programski jezik robota, jer ne postoji industrijski standard [13,14,15]. Programiranje robota u zadacima mašinske obrade može se vršiti na nekoliko načina [9]: (i) korišćenjem CAD/CAM sistema za programiranje višeosnih mašina alatki uz korišćenje odgovarajućih translatora CAM podataka (Cutter Location File – CLF i G-kod) na jezik robota, (ii) postprocesiranjem CLF-a, od trenutnih CAD/CAM sistema za višeosnu obradu do G-koda ako kontroler robota može direktno da interpretira G-kod [13], (iii) korišćenjem novog metoda programiranja primenom protokola STEP-NC za zadatke mašinske obrade uz upotrebu razvijenih translatora za prevođenje u G kod ili jezik robota [9] (iv) koristeći specijalizovani CAM softver za programiranje robota za obradu koji generiše direktno jezik robota koristeći odgovarajuće postprocesore za robote (RoboGuide, RobotStudio, itd.).

Programiranje kolaborativnih robota se sprovodi na isti način uz uvođenje dodatnih naredbi kojima se reguliše ponašanje robota u slučajevima kontakta sa subjektima u okolini. Ovo je naročito važno u pripremi aktivnosti kao što je mašinska obrada. Prilikom kretanja alata osim neželjenog kontakta sa ljudskim subjektima postoji značajna mogućnost kolizije sa steznim priborom kao i pojave porasta opterećenja na vretenu usled promene dubine rezanja ili nehomogenosti materijala obrade. Kod većine komercijalnih robota lokalne promene nosivosti robota (odnosno granicu pojave kontakta) obezbeđuje uvođenjem sigurnosnih naredbi u programske rečenice. Japanski proizvođač Fanuc omogućava uvođenje PAYLOAD funkcije kojom se reguliše dozvoljeno opterećenje robota prilikom kretanja po programiranoj putanji. Ova funkcija preuzima vrednosti iz odgovarajuće matrice čime se omogućava definisanje različitih vrednosti preopterećenja različitim programskim rečenicama. Pri tome se preopterećenja definišu kao vektorske veličine što omogućava predviđanje potencijalnih kolizija. Na slici 3 je prikazan primer dela programa za kolaborativni robot sa definisanim lokalnim naredbama koje određuju nosivost.

```

1: !SimPRO Auto-Generated TPP ;
2: !test_komad, Zljeb ;
3: COL DETECT ON ;
4: UFRAME_NUM[GP1]=1 ;
5: UTOOL_NUM[GP1]=2 ;
6: PAYLOAD[1:EOAT w/o part] ;
7: MESSAGE[...] ;
8: ;
9: !Segment1 ;
10: J P[1] 100% FINE ;
11: PAYLOAD[1:EOAT w/o part] ;
12: L P[3] 50mm/sec CNT100 ;
.....
.....
P[7]{
  GP1:
    UF : 1, UT : 2,          CONFIG : 'N U T, 0, 0, 0',
    X = 700.000 mm,  Y = -82.668 mm,  Z = 24.997 mm,
    W = -180.000 deg,  P = -90.000 deg,  R = 0.000 deg
};
/END

```

Slika 3. Primer dela programa za kolaborativni robot

4 PRIMER PRIMENE

Iz predhodno navedenog može da se zaključi da je primena kolaborativnih robota u fazama mašinske obrade moguća ali se primenjuje kod obrada kod kojih se stvaraju manje i predvidive sile otpora rezanjem kao što su obaranje ivica, izrada i obrada jednostavnijih otvora kao i završna obrada brušenjem mekih materijala (šmirglanje). Razlozi za to su neposredno prisustvo ljudskih subjekata i problemi koji nastaju usled uticaja subjektivnih faktora u definisanju preopterećenja. Takođe, moguća je primena kod obrade glodanjem mekih materijala kao što je stirodur, i lakše obradivi modelarski materijali, pri izradi modela složene geometrije. Kolaborativni roboti se uspešno primenjuju u realizaciji obrade beskontaktnim metodama kao što su lasersko graviranja (ne postoji mehaničko opterećenje kinematske strukture robota) i procesima dodavanja materijala aditivnim tehnologijama [12].



Slika 4. Test radni predmet i priprema za verifikaciju

Imajući u vidu postojeća ograničenja a u cilju provere jednostavnosti i tačnosti opisa putanje alata prilikom programiranja definisan je test radni predmet od mekanog materijala stirodur. Na slici 4 je prikazan izgled test radnog predmeta kao i robot pripremljen za obradu u Laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka.

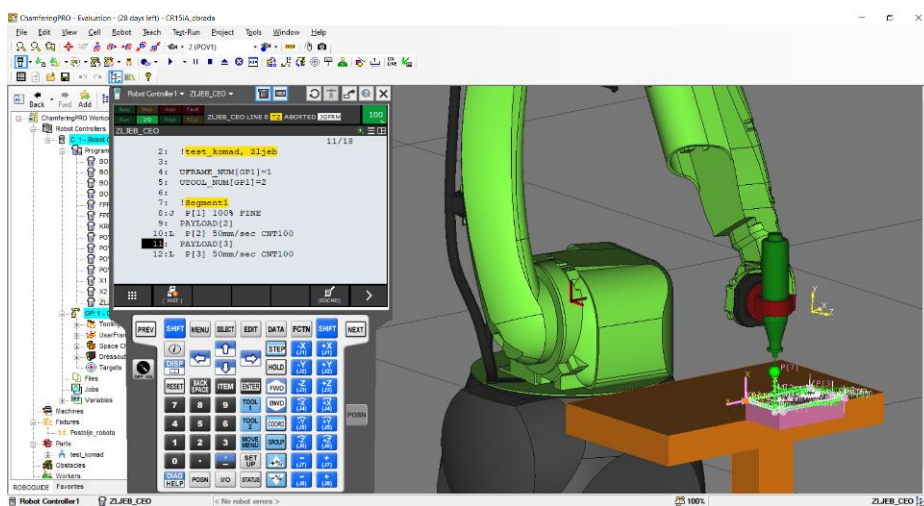
Test radni predmet se sastoji od ravnih površina orijentisanih u ortogonalnim pravcima, kosih površina (sa nagibom od 45°), jednog cilindričnog i dva ukrštena linearna žljeba. Ovakvim radnim

predmetom se testira mogućnost programiranja robota da izvrši linearne i kružnu interpolaciju kao i obradu površina pod nagibom u cilju simulacije 3+2 osne obrade tokom obaranja ivica.

Postupak programiranja i izrade odgovarajućih upravljačkih programa je realizovan za kolaborativni robot Fanuc CR 15-iA sa upravljačkim sistemom R-30iB instaliranom u Laboratoriji za mašine alatke Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Programiranje robota je realizovano primenom dve metode:

- automatizovano, primenom softvera RoboGuide i
- ručno primenom Teaching Pendant jedinice.

U prvom slučaju je programiranje robota u automatizovanom režimu realizovano definisanjem putanje alata na površinama CAD modela test radnog predmeta. Programski sistem RoboGuide omogućava simulaciju okruženja robota sa funkcijama interaktivnog definisanja putanje izvršnog organa uz simulaciju jedinice za obučavanje (slika 5).



Slika 5. Programski sistem za automatizovano programiranje robota sa definisanim putanjama neophodnim za obradu test radnog predmeta



Slika 6. Programiranje kolaborativnog robota u laboratorijskim uslovima

Drugi metod izrade programa je realizovan primenom jedinice za obučavanje na robotu uz definisanje geometrijskih parametara i kolaborativnih funkcija. Ovaj postupak podrazumeva definisanje korisničkog koordinatnog sistema prema procedurama proizvođača, formiranje programa u skladu sa geometrijskim karakteristikama pojedinih površina koje se obrađuju. Ovakav postupak ručnog programiranja na samom robotu je primaran kod mašinske obrade skidanjem materijala (obezbeđuje geometrijski tačnu putanju alata), slika 6.

5 DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Definisanje područja primene kolaborativnih robota u zadacima mašinske obrade skidanjem materijala se može ostvariti kompleksnom analizom koja obuhvata: mogućnosti preciznog definisanja putanje alata postupcima programiranja, kompleksnost pripreme robota za proizvodnju sa stanovišta definisanja koordinatnih sistema kao i očekivanih rezultata sa stanovišta kvaliteta obrade.

Primenom pomenutih metoda programiranja može se zaključiti da je precizno definisanje putanje alata moguće za jednostavnije radne predmete. Pre svega se misli na putanje koje obuhvataju većim delom linearne segmente. Ovu informaciju treba uzeti sa određenom rezervom budući da CAM programski sistemi i za robotske sisteme omogućuju definisanje kompleksnijih putanja ali ovom fazom istraživanja oni nisu obuhvaćeni.

Priprema robotskih sistema za obradu koja podrazumeva definisanje lokalnih koordinatnih sistema. Zbog otvorene kinematske strukture, većeg broja stepeni slobode (6 i više DOF) i različite orijentacije izvršnih organa u odnosu na primarni koordinatni sistem podrazumeva kompleksne postupke definisanja pozicije i orijentacije. Samim tim ovo je izvor potencijalnih grešaka u procesu obrade.

Smanjena krutost kolaborativnih robota usled kinematske strukture uz dodatna ograničenja uslovljena bezbednosnim protokolima svakako ih ne preporučuje za zadatke mašinske obrade, mada je njihova primena i u ovoj oblasti moguća. Tu se pre svega misli na završne obrade mekših materijala niže klase tačnosti, kao što je na primer obrada modela od stirodura ili mekog drveta.

ZAHVALNOST

U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta „Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN” na Fakultetu Tehničkih Nauka Univerziteta u Novom Sadu i projekta “Integrisana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva” i podprojekta TR35022 „Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema” na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, koje finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] ElMaraghy, H., Monostori, L., Schuh, G., ElMaraghy, W. (2021). Evolution and future of manufacturing systems, *CIRP Annals*, 70/2, p.p.635-658.
- [2] Bisen, A. S., Payal, H. (2022). Collaborative robots for industrial tasks: A review. *Materials Today: Proceedings*, 52, p.p. 500-504.
- [3] Matthews, P., Greenspan, S.(2020) *Automation and Collaborative Robotics: A Guide to the Future of Work*, Apress, ISBN: 1484259645, 97814842596
- [4] Krüger, J., Lien, T., & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines, *CIRP Annals*, Vol.: 58/2, p.p.628-646.
- [5] Perez-Ubedaa, R. Gutierrez, S.C., Zotovic, R., Lluch-Cerezoa, J. (2019). Study of the application of a collaborative robot for machining tasks, *Procedia Manufacturing* 41, p.p. 867–874.
- [6] El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview, *Robotics and Autonomous Systems*, 116, p.p.162-180.

- [7] Pizá, R., Hermida, N. (2007). Programming and simulation of robotic systems for machining operations, *IFAC Proceedings*, 40/3, p.p. 36-41.
- [8] Zivanovic, S., Slavkovic, N., & Milutinovic, D. (2018). An approach for applying STEP-NC in robot machining, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, p.p.361-373.
- [9] Slavkovic, N., Zivanovic, S., Milutinovic, D. (2018) An indirect method of industrial robot programming for machining tasks based on STEP-NC, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32/1, p.p.43-57.
- [10] Fogli, D., Gargioni, L., Guida, G., Tampalini, F. (2022). A hybrid approach to user-oriented programming of collaborative robots, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102234.
- [11] Hocken, R., Morris, G. (1986). An Overview of Off-Line Robot Programming Systems, *CIRP Annals*, 35/2, p.p. 495-503.
- [12] Verl, A., Valente, A., Melkote, S., Brecher, C., Ozturk, E., Tunc, L. T. (2019). Robots in machining, *CIRP Annals*, 68/2, p.p.799-822.
- [13] Milutinovic, D., Glavonjic, M, Slavkovic, N., Dimic, Z., Zivanovic, S., Kokotovic, B., Tanovic, Lj. (2011). Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53/9-12, p.p.1217-1229
- [14] Li, W., E. Red, G. Jensen, and M. Evans. (2007). Reconfigurable Mechanisms for Application Control (RMAC): Applications. *Computer-Aided Design and Applications*,4/1–4,p.p.549–556. <https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738574>
- [15] DePree, J., and C. Gesswein. (2008). Robotic Machining White Paper project-Halcyon Development. Robotic Industries Association, October 31. <https://www.robotics.org/robotic-content.cfm/Robotics/Halcyon-Development-RIA/id/43>