



**FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA
UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU**
Katedra za proizvodno mašinstvo
Kragujevac, Srbija



**37. SAVETOVANJE PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE
- SPMS 2018 -
37th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION
ENGINEERING OF SERBIA
- ICPE-S 2018 -**

25 – 26 October 2018, Kragujevac, Serbia

**ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS**

EDITORS: Bogdan Nedić, Slobodan Mitrović





Society of Production
Engineering

SPMS 2018

37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

ICPE-S 2018

37th International Conference on Production
Engineering of Serbia



Faculty of Engineering
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

INTERAKTIVNI KORISNIČKI INTERFEJS ZA ELEKTROLUČNO ROBOTSKO ZAVARIVANJE - PRIMENA U EDUKACIJI INŽENJERA

Božica BOJOVIĆ*¹, Ivan DANILOV¹, Nemanja GVOJIĆ¹, Petar PETROVIĆ¹

¹Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Republika Srbija, bbojovic@mas.bg.ac.rs;
danilov@mas.bg.ac.rs, ngvojic@yahoo.com, pbpetrovic@mas.bg.ac.rs

Apstrakt: Programiranje industrijskih robota u malim i srednjim preduzećima najčešće se sprovodi obučavanjem, što je dugotrajna metoda, koja zahteva angažovanje robota van proizvodnih tokova. Stoga su fleksibilni, jeftini i jednostavni pristupi u programiranju svakako potrebni za proširenje robotike u malim i srednjim preduzećima. Pristup kognitivne infokomunikacije u interakciji između operatera i robota u projektovanju i nadzoru kompletnog procesa robotskog zavarivanja omogućava operateru uspešno programiranje korišćenjem računara. Istovremeno nivo kompetencija zaposlenih u malim i srednjim preduzećima ima ključnu ulogu u uspešnom suočavanju sa aktuelnim izazovima u industrijskoj proizvodnji, kao što su kraći ciklusi proizvoda, veći broj varijanti proizvoda, ambicije u pogledu efikasnosti i digitalizacija. Da bi se poboljšale postojeće kompetencije zaposlenih, ali i studenata kao budućih inženjera, postoji nekoliko mogućnosti za učenje. U poređenju sa učenjem kroz npr. klasična predavanja, studentima na praktičnim kursovima učenja (work-based education) se uvećavaju mogućnosti delovanja potkrepljenog praktičnim znanjem. Navedeni metod edukacije je lako primenjiv i u pripremi obuka za zaposlene na radnom mestu. Upravo radi lakše interakcije ljudi i robota, koja se može primeniti ne samo za programiranje robota, već i za obuku neiskusnih operatera, u ovom radu je predstavljen rezultat završnog master rada u vidu razvijenog korisničkog interfejsa za adaptivno upravljanje robotskog elektro-lučnog zavarivanja. Time se daje doprinos u osmišljavanju inženjerske edukacije radi sticanja novih znanja i veština za potrebe Industrije 4.0, a praktično bazirane na eksperimentalnoj platformi za robotsko elektro-lučno zavarivanje razvijene u okviru projekta TR 35007 u CMSysLab-u na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Ključne reči: robotsko zavarivanje, edukacija, mala i srednja preduzeća, korisnički interfejs, programiranje

1. UVODNA RAZMATRANJA

Inženjerska praksa se sa različitostima između realnih i apstraktnih objekata [1] susreće u vidu odstupanja oblika gotovog dela od idealnog oblika ili položaja, koje se u okviru propisanog tolerancijskog polja proglašava dozvoljenim, a samim tim i prihvatljivim [2].

Suštinski problem koji se javlja u procesu robotskog zavarivanja su greške makrogeometrije sklopa koji se zavaruje i mikrogeometrije spoja/šava. Dodatno se

javljaju statičke i dinamičke greške pozicije delova sklopa i greške relativne lokacije kako sklopa tako i spoja/šava. Adaptivnim ponašanjem robotskog sistema moguće je kompenzovati sve navedene greške, koje utiču na kvalitet procesa zavarivanja.

Realizacija adaptivnog ponašanja robota u nedovoljno poznatom radnom okruženju, što podrazumeva različite oblike geometrijskih odstupanja koje zahtevaju promene na nominalnom radnom zadatku, su doveli do razvoja CyberFABRICATOR eksperimentalne

platforme za robotsko elektrolučno zavarivanje u CMSysLab na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Sa istraživačko-razvojnog aspekta, praktična provera novih pristupa stvara uslove za efektivnu primenu robota u maloserijskoj i/ili ekstremno varijantnoj proizvodnji, što dalje razrešava problem finansijskih barijera i problem ljudskog resursa za primenu tehnologije robotskog zavarivanja u malim i srednjim preduzećima [3].

Sa edukativnog aspekta, navedena eksperimentalna platforma pruža jedinstvenu priliku studentima završne godine master akademskih studija, da kroz izradu završnog master rada kompletiraju veštine Kolbovog eksperimentalnog cikličnog modela učenja [4]. Posmatrajući revidiranu Blumovu taksonomiju ishoda obrazovanja inženjera u kognitivnom području [5], izrada završnog master rada pokriva tri kategorije na višim nivoima od ukupno šest hijerarhijski uređenih kategorija.

2. ROBOTSKO ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE

Robotsko zavarivanje podrazumeva zadovoljavajuća tačnost, ponovljivost i robusnost robota, a veća produktivnost, bezbednost, kvalitet i fleksibilnost su dokazane prednosti [6]. Konkretno, primena kod malih i srednjih preduzeća dovodi do najbolje jedinične cene rada u poređenju sa manuelnim radom ili krutom automatizacijom [6].

Za kvalitetno izveden postupak elektrolučnog zavarivanja, potrebno je da upravljačka jedinica robota vodi mlaznicu za zavarivanje definisanom putanjom i brzinom, uz određenu orijentaciju i nagib u odnosu na zavareni spoj. Kretanje robotske ruke zadaje se definisanjem pozicije i orijentacije završnog uređaja od strane operatera.

Za razliku od tradicionalnog korišćenja upravljačke konzole za obučavanje robota ili vođenje end efektora kao jednog od popularnih vidova kolaboracije čoveka i robota (eng. Programming by Demonstration - PbD), primena 3D CAD softvera omogućena je upotreba računara za programiranje (eng. Offline Programming) putanje zavarivanja sa

simulacijama van proizvodnih tokova. Pri tome simulacioni softver koristi 3D CAD modele radnog dela, pomoćnog pribora, robota za programiranje kompleksnih putanja. U tu svrhu generisan programski kod se može sačuvati, po potrebi lako modifikovati i ponovo pozivati čime se smanjuje zastoje u procesu proizvodnje prilikom programiranja putanje kod uvođenja novog dela.

U slučajevima koji se dešavaju u praksi, kao što je loše poziciranje komada, deformisanost komada ili međusobni odnos koji nije idealan, javljaju se problemi iz razloga što robot nema informaciju o spoljašnjoj sredini. Ovakvi problemi zahtevaju primenu robota sa sensorima koji navedene greške mogu kompenzovati u tolerantnom vremenskom intervalu. Adaptivno upravljanje robota za zavarivanje. Sistemi poput ovih su izuzetno skupi i iz tog razloga se u proizvodnji mogu videti u nekim većim korporacijama ili u specijalizovanim laboratorijama [3, 7] gde se vrše testiranja i razvoj tehnologije.

2.1 Platforma za elektrolučno zavarivanje *CyberFABRICATOR*

Platforma za elektrolučno zavarivanje CyberFABRICATOR se sastoji od robota Yaskawa Motoman MA1400 [3] i specijalno razvijenih senzorskih sistema organizovanih po stratumima, koje inteligentni korisnički interfejs povezuje sa operaterom. CyberFABRICATOR se neprestano hardverski i softverski dograđuje i proširuje. Ovde opisan korisnički interfejs za robotsko zavarivanje je jedan od dodatih softverskih modula, koji je realizovan u okviru postojećeg CAD sistema, konkretno SolidWORKS-a, sa ciljem olakšanog programiranja robota primenom računara.

2.2 Kreiranje inteligentnog korisničkog interfejsa u SolidWORKS okruženju

Interfejs, koji objedinjuje zasebno kreirane module za programiranje robotskog zavarivanja, je radi lakšeg snalaženja korisnika u ovom konkretnom programskom rešenju projektovan sa osnovnim ciljem da bude

jednostavan za upotrebu. Ekran inteligentnog korisničkog interfejsa generisan u CMSysLab je prikazan na slici 1.



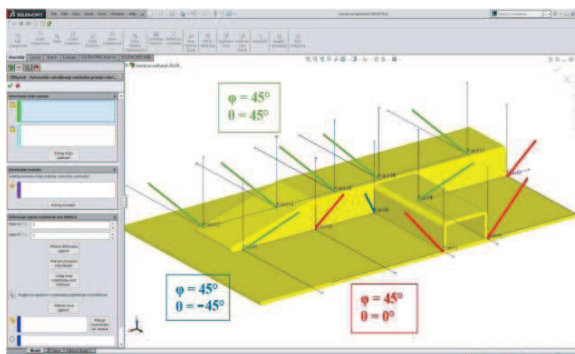
Slika 1. Prikaz ekrana CyberFABRICATOR korisničkog interfejsa

Prednost SolidWORKS-a da poseduje otvorenu arhitekturu dozvoljava korisnicima samostalnu automatizaciju i programiranje korišćenjem API (eng. Application Programming Interface) rutina, koje se koriste za automatizaciju redundantnog i dugotrajnog zadatka, kao i za kreiranje kompletnih inženjerskih aplikacija koje se pokreću unutar ili izvan samog SolidWorks aplikacije. API rutine sadrže veliki broj funkcija koje se mogu pozivati iz Visual Basic-a i obezbeđuju direktan pristup funkcijama SolidWORKS-a. U ovom konkretnom primeru to su kreiranje linija, unos već postojećih delova, verifikacija parametara površine i dr.

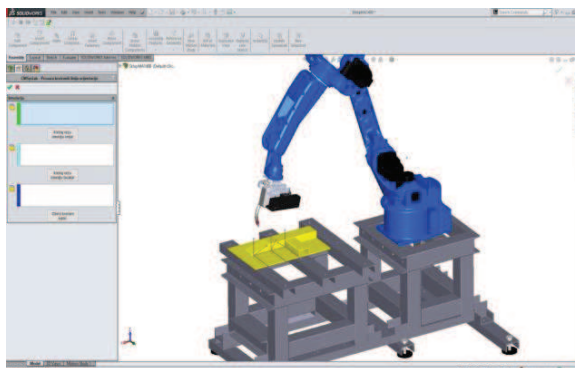
Inteligentni korisnički interfejs korisniku/operateru omogućava da kreira putanju za robotsko zavarivanje na samom CAD modelu i to selektovanjem površi u čijem preseku se dobijaju linije. Takođe je omogućeno da se definišu dva ugla nagiba mlaznice u odnosu na pravac kretanja (θ, ϕ). Automatski se generišu tačke na putanji zavarenog spoja (x, y, z) i orijentacije mlaznice (α, β, γ) za svaku od generisanih tačaka. Konačno se na osnovu vektora orijentacije end efektor, mogu odrediti uglovi orijentacije mlaznice, što je na slici 2 i prikazano crvenim linijama na modelu dela datog žutom bojom.

Dodatno je simulacijom omogućena automatska provera kreirane putanje zavarivanja i orijentacije mlaznice korišćenjem 3D modela robotske ćelije sa radnim komadom u okviru programskog paketa SolidWORKS (Sl. 3), čime se smanjuju troškovi

koji mogu nastati usled nepravilno definisane pozicije i orijentacije mlaznice.



Slika 2. Model sa generisanim planom zavarivanja



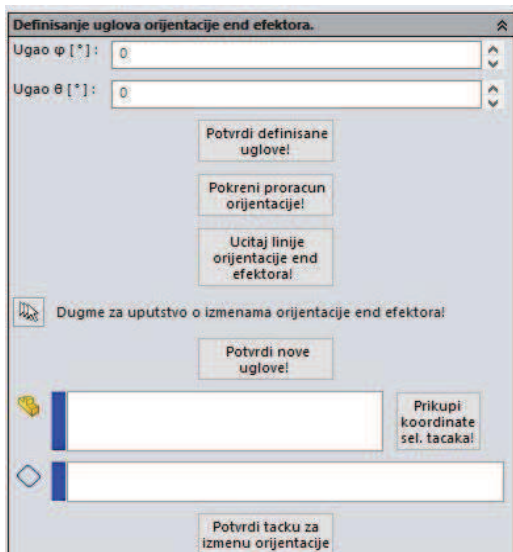
Slika 3. Grafički prikaz simulacije u okviru sklopa za ispitivanje

Algoritam rada inteligentnog korisničkog interfejsa je sledeći:

1. Ulaz u interfejs je CAD model dela za zavarivanje na kome se selektuju površi i zadaju dva ugla nagiba mlaznice (θ, ϕ) u odnosu na pravac kretanja,
2. Generisanje vektora normale na površi,
3. Formiranje lokalnih koordinatnih sistema za svaki od šavova,
4. Automatsko generisanje putanje zavarenog spoja odnosno koordinata generisanih tačaka (x, y, z),
5. Određivanje orijentacije mlaznice (α, β, γ) u koordinatnom sistemu robota na osnovu zadatih uglova mlaznice (θ, ϕ) u lokalnom koordinatnom sistemu,
6. Automatsko generisanje programskog koda za zavarivanje na osnovu koordinata tačaka i orijentacije mlaznice ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$).

Na slikama 1-3, se grafički korisnički interfejs nalazi s desne strane ekrana sa

poljima za selekciju i unos podataka, što je izdvojeno i prikazano na slici 4.



Slika 4. Grafički prikaz korisničkog interfejsa

2.3 Prednosti inteligentnog korisničkog interfejsa u SolidWORKS okruženju

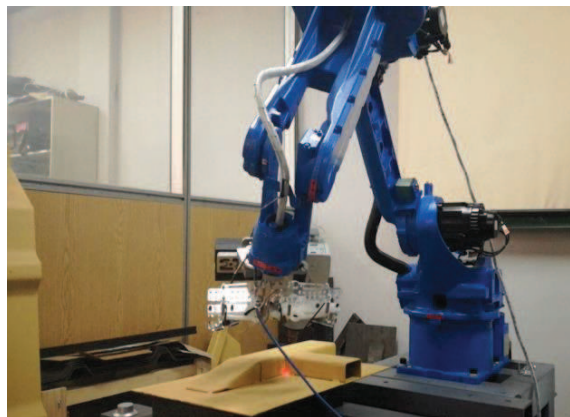
Prednost korisničkog interfejsa u okviru platforme za elektrolučno zavarivanje CyberFABRICATOR za operatera je višestruka:

- Kreirani korisnički interfejs se može koristiti kao zasebna celina ili kao dodatak već postojećim komandama SolidWORKS-a. Svakoj grupi korisničkog interfejsa se može zasebno pristupiti, kao i dobijenim podacima, koji se smeštaju u spisak elemenata modela.
- Operater ima apsolutnu kontrolu nad kodovima kroz korisnički interfejs, tako da nije potrebna posebna veština i znanje u programiranju. Neophodno je samo da je operater upoznat sa osnovama programa SolidWORKS, kako bi bez problema mogao da odredi nominalnu putanju robotskog elektrolučnog zavarivanja. Samim tim operater niže stručne sprema može biti angažovan na ovom radnom mestu.
- Nakon unosa dva ugla nagiba mlaznice u (θ, ϕ) , koji su definisani tehnološkim postupkom, kao izlaz dobijaju se automatski generisane orjentacije mlaznice (α, β, γ) za svaku od tačaka $(x,$

$y, z)$ na putanji zavarenog spoja. Takođe, postoji mogućnost pojedinačne izmene uglova (θ, ϕ) orijentacije mlaznice za određene šavove u slučaju kada je to tehnološkim postupkom zahtevano. Navedeno, omogućava uštedu u vremenu.

- Kroz simulaciju procesa robotskog zavarivanja, omogućeno je automatsko prepoznavanje kolizione situacije mlaznice i dela. Interfejs nudi korisniku alternativna rešenja parametara zavarivanja. Time se i robot i deo čuvaju od oštećenja i otkaza.
- Obuka za korisnički interfejs za robotsko zavarivanje je laka, s obzirom da koristi prednost poznatog grafičkog interfejsa postojećeg CAD sistema, a samim tim i upotreba dodatnih komandi za programiranje nominalne putanje je lakša u odnosu na korišćenje softvera specijalne namene.

Verifikacija korisničkog interfejsa je sprovedena u laboratorijskom okruženju u CMSysLab na opisanoj platformi za robotsko elektrolučno zavarivanje CyberFABRICATOR. Na slici 5 je prikazana scena zavarivanja gde je zrak simuliran laserskim snopom, na slici predstavljen crvenom tačkom na realnom objektu za zavarivanje.



Slika 5. Eksperimentalni rezultati za uglove $\phi=45^\circ$ i $\theta=-45^\circ$.

3. ZAKLJUČAK

Na kraju dvogodišnjih master akademskih studija u oblasti mašinskog inženjerstva,

podrazumeva se da student poseduje kognitivne sposobnosti (matematičko i logičko rasuđivanje, kognitivna fleksibilnost, kreativnost, vizuelizacija) i osnovne veštine (aktivno učenje, razumevanje pročitano, usmeno i pismeno izražavanje, tehnička pismenost), koje je razvio i/ili unapredio tokom studija. Izrada završnog master rada je prilika da se dodatno razviju multifunkcionalne tehničke i socijalne veštine i to one koje će kod budućeg inženjera činiti „jaču stranu“. U konkretnom slučaju, koji je predstavljen u ovom radu, izrada korisniku usmerenog interfejsa je zahtevala tehničke veštine za korišćenje opreme i programiranja, veštine za rešavanje kompleksnih problema i tzv. „meke“ veštine neophodne za pripremu operatera za adaptivno robotsko elektrolučno zavarivanje.

Celoživotno učenje koje je neizbežni deo koncepta Industrije 4.0 podstiče prvo samostalno učenje za posao, čime se stiču sposobnosti i veštine za pronalaženje i zadržavanje zaposlenja i drugo, učenje na poslu kroz obuku, što podiže nivo kompetencija zaposlenih kao odgovor na aktuelne izazove u industrijskoj proizvodnji. Prvo se upravo i postiže rešavanjem aktuelnih problema iz prakse kroz predstavljeni master rad, a za drugo se korisnički interfejs iz master rada može uspešno primeniti.

ZAHVALNOST

Ovaj rad je rezultat aktivnosti na Projekatu „Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju“ TR35007, koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Z. Pizlo, T. Sawada, Y. Li, W.G. Kropatsch, R.M. Steinman: New Approach to the perception of 3D shape based on veridicality, complexity, symmetry and volume, *Vision Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-11, 2010.
- [2] SRPS EN ISO 1101, *Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Geometrijsko propisivanje tolerancija – Tolerancije oblika, orijentacije, položaja i bacanja*, 2017.
- [3] I. Danilov, P.B. Petrović, F. Korać, N. Lukić: Stratified Visual 3D Feedback for Adaptive Robotic Arc-Welding, *Proceedings of 2st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcEtran 2015*, pp. ROI4.3 1-6, Silver Lake, Serbia, June 8 – 11, ISBN 978-86-80509-71-6. 2015.
- [4] D.A. Kolb: *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 1984.
- [5] B.S. Bloom, D.R. Krathwohl: *Taxonomy of Educational Objectives, Handbook 1: Cognitive Domain*, Addison-Wesley, New York, 1984.
- [6] P. Kah, M. Shrestha, E. Hiltunen, J. Martikainen: Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 10, No 13, 2015.
- [7] A.L. Ames, E.M. Hinman-Sweeney, J.M. Sizemore: Automated generation of weld path trajectories in: *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing*, 9-21.07.2005, Montreal, Canada, rr. 182-187
- [8] N. Gvojić: *Inteligentni interfejs za interaktivno generisanje plana zavarivanja u tehnologiji robotske montaže zavarenih sklopova*, Master rad, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2018.

INTERACTIVE USER INTERFACE FOR ROBOTIC ARC WELDING - APPLICATION IN ENGINEERING EDUCATION

Abstract: On-line programming of industrial robots in SME as often used method is time-consuming an production breaking method. Therefore, flexible, cost-effective and easy-to-use programming approaches are certainly needed to expand robotics in SME. The approach of cognitive info-communication in the human/robots interface in designing and monitoring the complete robotic welding process enables successful off-line programming. At the same time, the level of competence of employees in SME plays a key

role in successful response to current challenges in industrial production, such as shorter product cycles, a greater number of product variants in terms of efficiency and digitization. In order to improve the existing competencies of employees and students as future engineers, there are several learning opportunities. Compared to learning through e.g. conventional lectures, students in practical work-based education increase the possibilities of action supported by practical knowledge. The mentioned method of education is easily applicable in employees training preparation at the workplace. In order to simplify human/robots interface, which can be applied not only for robot programming, but for training of inexperienced operators, this paper presents the developed user interface for adaptive control of robotic arc welding as result of the Master work. This contributes to the engineering education design for obtain new knowledge and skills required for Industry 4.0 and practically based on the robotic arc welding experimental platform developed within project No.TR 35007 at CMSysLab in Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade.

Key words: *Robotic welding, Education, SME, User interface, Programming*