

Avtomatizacija zaključnih operacij pri montaži obutve

Bojan Nemeč, Leon Žlajpah, Borut Lenart
Institut Jožef Stefan
Jamova 39, 1000 Ljubljana
bojan.nemec@ijs.si

Robotic cell for custom finishing operations

Abstract: *The paper describes a robotic cell for finishing operations in a custom shoe production plant. Such customization of shoe production should allow production of small batches of shoes of the same type. This requires automatic set up and adaptation of the production line. To meet these requirements, a CAD system for automatic generation, optimization and validation of motion trajectories was integrated into a robotic cell.*

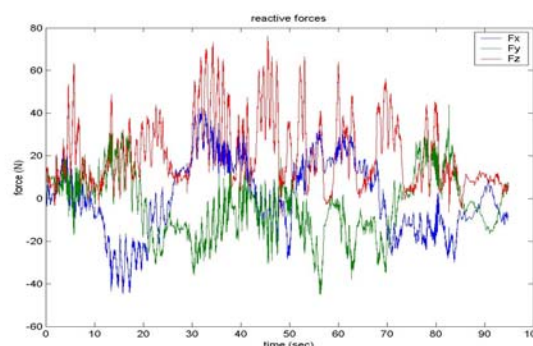
1 Uvod

Proizvodnja obutve spada med delovno intenzivne panoge. Zaradi tega se proizvodnja seli na območja s cenejšo delovno silo. V našem prostoru lahko to proizvodnjo ohranimo samo z izdelavo čevljev po meri ob sprjemljivi ceni. To omogoča samo popolnoma avtomatizirana proizvodnja [1,2,3]. Ker se s enako problematiko srečujejo tudi evropske države, kjer je bodisi obutvena industrija bodisi strojogradnja za obutveno industrijo pomembna panoga, je evropska skupnost financirala raziskovalno-razvojni projekt EUROShoE, kjer naj bi med ostalim razvili metodologijo in avtomatizacijo za industrijsko izdelavo čevljev po meri [4]. Institut Jožef Stefan je sodeloval na projektu z nalogo izdelati robotizirano celico za končne operacije. Končne operacije pri proizvodnji čevljev obsegajo razmaščevanje, čiščenje, poliranje, nanos zaščitnih sredstev v obliki polirne paste, razpršila in trdega voska ter pregled obutve pred embaliranjem. Vse te operacije morajo potekati popolnoma avtomatsko brez intervencije operaterja in se avtomatsko prilagajati različnim modelom čevljev, ki prihajajo po proizvodni liniji. Prav

tako se morajo vse nastavitve celice, vključno z generacijo robotskih trajektorij za čiščenje, poliranje ter nanos zaščitnih sredstev izvesti samodejno brez intervencije operaterja.

2 Določitev komponent celice

Najprej smo analizirali proces končnih operacij pri proizvajalcih obutve Frau, Ecco, Lloyd, Bally ter Alpina. Ugotovili smo, da tipičen cikel potrebnih operacij zajema nanos polirne kreme, nanos polirnega voska, nanos polirnih sredstev v obliki razpršila ter poliranje-krtachenje obutve. Med posameznimi fazami je potrebno sušenje, ki traja od 5 do 10 minut. Tipične trajektorije, s katerimi izvajamo poliranje čevljev, smo zajeli s pomočjo videokamere in analizirali s sistemom za obdelavo videosignalov. S pomočjo univerzalnega večdimenzionalnega senzorja sile smo zajeli potrebne sile in navore ter določili podajnost polirnih krtač pri različnih hitrostih vrtenja. Najmanjša podajnost krtače je 2.1 N/mm, kar še omogoča zadovoljivo regulacijo sile tudi z robotom brez uporabe senzorja sile [5]. Tipični potek sil med poliranjem s trdo krtačo pri 900 obr/min prikazuje slika 1.

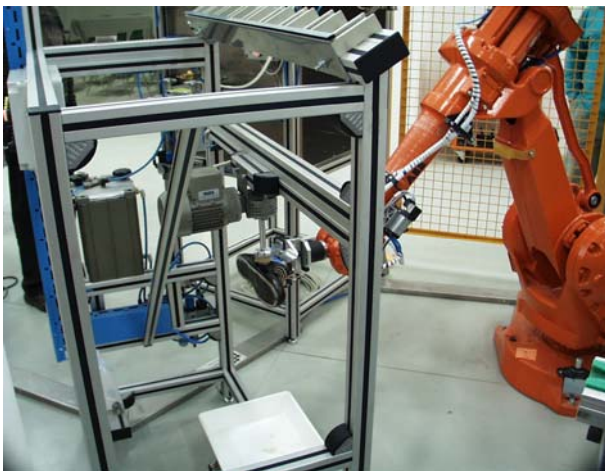


Slika 1: Izmerjene sile med poliranjem s trdo krtačo pri 900 obr/min

Glede na analize smo določili potrebne komponente celice, ki obsegajo inustrijski robot ABB IRB 2400 z nosilnostjo 16 kg, stroj za nanašanje polirne kreme, stroj za poliranje s štirimi krtačami ter enoto za dodajanje polirnega voska, brizgalno kabino ter odlagalna mesta za sušenje čevljev. Vsi stroji morajo imeti možnost računalniškega upravljanja. Ustreznih komponent ni na tržišču, zato smo jih morali na novo razviti in izdelati.

2.1 Stroj za nanašanje polirne paste

Stroj za nanašanje polirne paste sestavljajo vrteča krtača, skozi katero doteka polirna pasta, enota za doziranje polirne paste ter velik pnevmatski cilindar, ki je obenem zalogovnik za polirno pasto. Polirno krtačo vrti elektromotor preko prenosa. Pri tem je hitrost vrtenja konstantna, vse ostale parametre, kot so doziranje, vklop krtače, dotok polirne paste ter nadzor nad napravo pa dosegamo preko računalnika. Za potrebe testiranja so vse funkcije dostopne ročno preko komandne plošče. Stroj za nanašanje polirne paste prikazuje slika 2. Na stroju so še nameščena vodila, ki služijo shranjevanju čevljev med sušenjem.



Slika 2 : Stroj za nanašanje polirne kreme

2.2 Polirni stroj

Obstoječi komercialno dosegljivi polirni stroj smo predelali v polirni stroj z enoto za dodajanje polirnega voska ter računalniško

kontrolno vseh funkcij stroja, ki obsega kontrolno dodajanja polirnega voska, želeno hitrost vrtenja polirnih krtač ker vklopa in izklopa sistema za sesanje. Stroj za poliranje prikazuje slika 3.



Slika 3. Polirni stroj z enoto za dodajanje polirnega voska

2.3 Brizgalna kabina

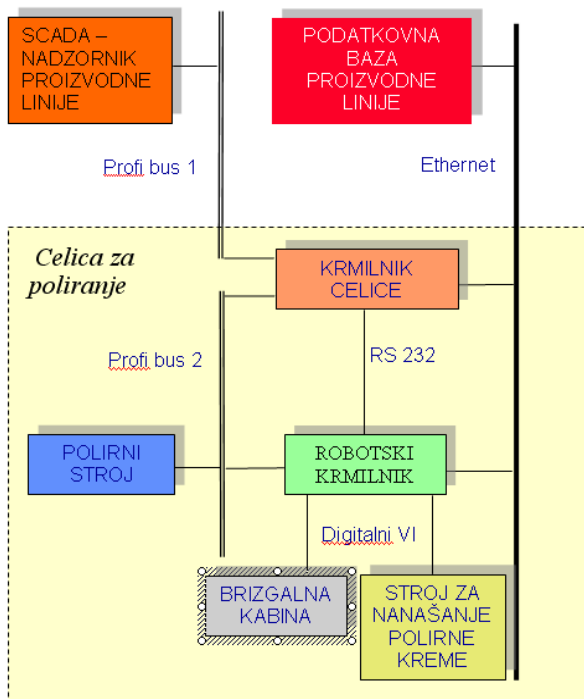
Brizgalna kabina ima računalniško vodeno brizgalno pištolo ter sistem za izbiro brizgalnega tlaka. Senzorski sistem detektira stanje pištole ter nivo raztopine v zalogovniku. Celotno proizvodno celico z brizgalno kabino na levi, industrijskim robotom ter transportnim sistemom prikazuje slika 4.



Slika 4: Celica za poliranje

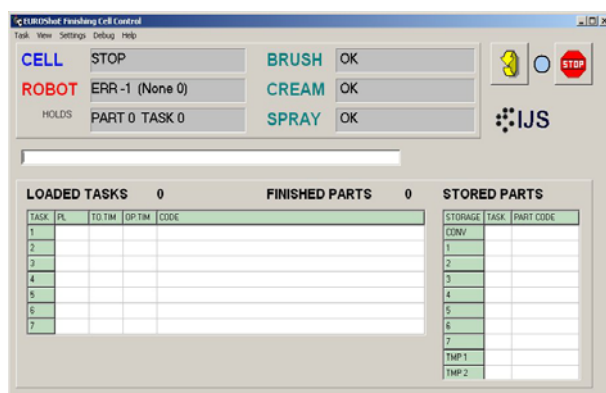
3 Krmiljenje celice

Delovanje celice krmili nadzorni računalnik. Krmilni računalnik komunicira z nadzornim računalnikom celotne proizvodne linije preko ProfiBus linije. Ta mu sporoča stanje transportne linije in kodo čevlja, ki prihaja po liniji. Nadzorni računalnik s pomočjo kode poišče vse potrebne datoteke za obdelavo tega čevlja v podatkovni bazi proizvodne linije. Povezava poteka preko Ethernet linije. Komunikacija med računalnikom polirnega stroja in nadzornim računalnikom poteka preko ločene ProfiBus linije. Za povezavo med robotskim krmilnikom in nadzornim računalnikom skrbijo tri linije. ProfiBus linija je namenjena izmenjavi ukazov ter stanj. Preko Ethernet povezave in FTP protokola pošiljamo robotskemu krmilniku robotske programe in trajektorije. Serijska linija je namenjena testiranju. Brizgalna kabina in stroj za nanašanje polirne kreme sta priključena na robotski krmilnik preko digitalnih vhodov in izhodov. Nadzorni računalnik komunicira z njima posredno preko robotskega krmilnika. Blokovno shemo krmiljenja celice prikazuje slika 5.



Slika 5: Blokovna shema krmiljenja celice

Programska oprema za krmilnik celice je napisana v programskem okolju Delphi in teče pod operacijskim sistemom Windows XP. Omogoča enostavno rokovanje s celico, nastavljanje parametrov, servisnih intervalov, nadzor nad vsemi elementi celice ter testiranje elementov celice. Za opis zaključnih operacij smo izdelali makro jezik in vstrezen interpreter. Programska oprema omogoča, ob upoštevanju, da je čas sušenja razmeroma dolg, hkratio obdelavo do 24 čevljev v proizvodni celici. Glavno okno nadzornega programa prikazuje slika 6.

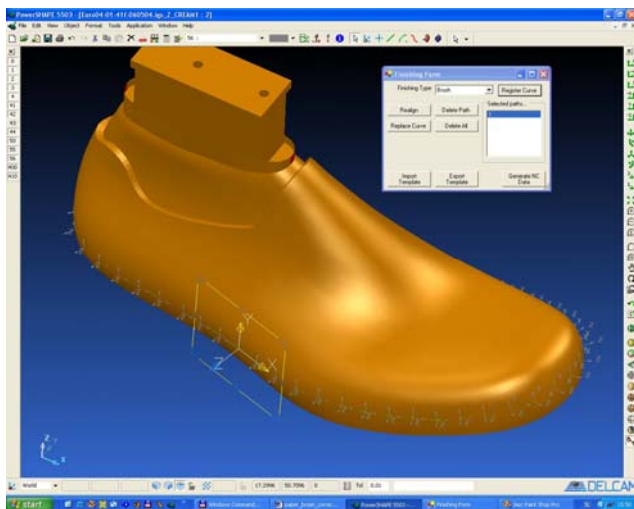


Slika 6: Glavno okno nadzornega programa

4 Avtomatska generacija trajektorij

Ena izmed glavnih zahtev pri realizaciji proizvodne celice je, da se vse nastavitve za različne modele čevljev izvajajo brez posredovanja operaterja, vključno z generacijo trajektorij. Zaradi tega moramo generirati vse trajektorije samo s pomočjo geometrijskih in tehnoloških podatkov o posameznem čevlju. V ta namen smo razvili nova orodja v programu za računalniško modeliranje PowerShape [6]. Orodja je izdelal proizvajalec program Delcam. Orodja omogočajo določanje trajektorije na 3D modelu čevlja, kjer lahko poleg same trajektorije spreminjamo tudi orjentacijo orodja. Program je prilagojen trem operacijam – nanašanju polirne kreme, razprševanju in poliranju s krtačami. Ker je določanje teh trajektorij zamudno opravilo, lahko uporabimo predhodno določene trajektorije in jih avtomatsko projeciramo na površino novega

čevlja. Na ta način precej skrajšamo čas, potreben za generacijo trajektorij podobnih čevljev. Slika 7 prikazuje primer generacije trajektorij za poliranje s pomočjo programa PowerShape.

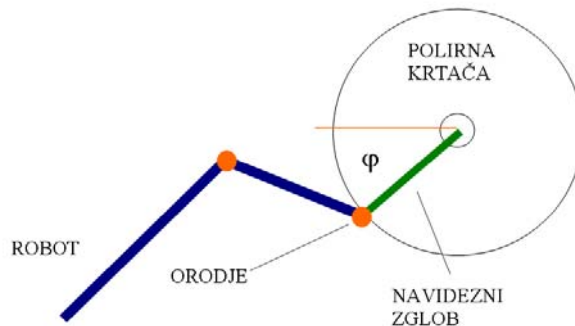


Slika 7 : Generacija trajektorij s programom PowerShape

5 Optimizacija trajektorij

Glavni problem pri avtomatski generaciji robotskih trajektorij je v tem, da pri podajanju trajektorije in orientacije orodja ne moremo enostavno predvideti gibanja robotskega mehanizma. Pogosto namreč pride do prekoračitve omejitev v zglobnih koordinatah, do trka zapestja robota z okolico ali/in do singularne konfiguracije zapestja robota. Pogosto lahko že minimalen premik v poziciji ali orientaciji povzroči povsem drugačno konfiguracijo robota. S pomočjo grafične simulacije lahko sicer detektiramo takšno situacijo, vendar je postopek dolgotrajen. V praksi so pogosto se zdi naloga brezupna, saj je zelo težko najti takšno zvezno trajektorijo, ki bo zadostila vsem omejitvam. Problem smo rešili z upoštevanjem kinematične redundance robota. Zaradi okrogle oblike krtače, gobice za nanašanje polirne paste in curka brizgalne pištole je namreč vseeno, kakšna je orientacija orodja glede na središče krožnice orodja. To ponazarja tudi slika 8. Na ta način imamo eno stopnjo redundance, ker pa največkrat ne

zadošča za izpolnitev vseh kriterijev. Zato lahko do določene mere žrtvujemo želeno orientacijo, kar prinese še dodatni dve stopnji redundance.



Slika 8 : Kinematična redundanca pri poliranju z robotom

Enačba (1) opisuje kinematiko redundantnega robota [7]

$$\dot{q} = J^T \dot{x} + N\phi, \quad N = (I - J^+ J) \quad (1)$$

kjer je \dot{q} vektor zglobnih hitrosti ($n \times 1$), J Jakobijeva matrika ($m \times n$), J^+ je Moore-Penrose-jev pseudo-inverz Jakobijeve matrike, \dot{x} je vektor orodnih koordinat ($m \times 1$), N je ničelni operator redundantnega robota ($n \times n$), ϕ pa je poljubno izbran vektor ($n \times 1$). Skalar n označuje število zglobov robota, m pa število podanih orodnih koordinat. Naj bo p zelena kriterijska funkcija, ki jo želimo bodisi maksimizirati ali minimizirati. Potem vektor

$$\phi = \left(\frac{\partial p}{\partial q_1}, \frac{\partial p}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial p}{\partial q_n} \right) k \quad (2)$$

iz enačbe (1) maksimizira p za $k > 0$ in minimizira p za $k < 0$, kjer poljubno izbrani skalar k določa korak optimizacije [8]. Za rešitev našega problema smo izbrali takšno kriterijsko funkcijo p , ki maksimizira razdaljo med ovirami in zapestjem robota, maksimizira razdaljo med trenutno in singularno konfiguracijo robota ter maksimizira razdaljo med zglobnimi koordinatami ter omejitvami v zglobnih koordinatah. Ker želimo, da je orientacija orodja čim bližja predpisani orientaciji, minimiziramo razdaljo med zeleno orientacijo zglobov in dejansko orientacijo.

Jakobijevo matriko 6-stopenjskega robota in orodne koordinate razdelimo na

$$J = \begin{bmatrix} J_p \\ J_r \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_p \\ x_r \end{bmatrix}, \quad (3)$$

kjer index p označuje pozicijski del, r pa orjetacijski del. Kriterijsko funkcijo definiramo kot vsoto štirih kriterijskih funkcij $p = p_A + p_L + p_S + p_O$, kjer je p_A kriterijska funkcija za izogibanje oviram zapestja, p_L je kriterijska funkcija namenjena izogibanju robu delovnega področja, p_S je kriterijska funkcija za preprečevanje singularne lege, p_O pa je kriterijska funkcija, s pomočjo katere bomo ohranjali orjentacije orodja čimbližje predpisanim orjentacijam. Kriterijsko funkcijo za izogibanje oviram izberemo v obliki [9,10]

$$p_A = V(x_c - x_o) = Vd, \quad (4)$$

kjer je V vektor navideznega potencialnega polja, ki potiska zglobe stran od ovire, x_c točka na robotu, ki je najbližja oviri, x_o je koordinata ovire, d pa je razdalja med tema dvema točkama. Kriterijsko funkcijo, ki definira razdaljo med koordinatami robota in omejitvami v zglobeh definiramo kot

$$p_L = \begin{cases} (q_{\max} - q)^2, & |q_{\max} - q| < \varepsilon \\ 0 & \\ (q_{\min} - q)^2, & |q_{\min} - q| < \varepsilon \end{cases}, \quad (5)$$

kjer je ε pozitivna konstanta, ki določa okolico omejitev v zglobeh. Podobno definiramo kriterijsko funkcijo, ki določa razdaljo med dejansko in želeno orientacijo orodja.

$$p_O = (x_{rd} - x_r)^2, \quad (6)$$

Vektor x_{rd} označuje želene orientacije.

Za izogibanje singularnim konfiguracijam smo uporabili zano mero manipulabilnosti [11]

$$p_S = \sqrt{|JJ^T|} \quad (7)$$

Z upoštevanjem gornjih enačb izračunamo hitrost robota v zglobnih koordinatah s sledečima enačbama:

$$\dot{q} = J_p^T \dot{x}_p + N\phi, \quad N = (I - J_p^+ J_p) \quad (8)$$

$$\phi = k_A J_p^{03} Vd - 2k_L (q_L - q) - 2k_O (x_{dr} - x_r) J_r - 2k_s \frac{\partial J}{\partial q} J^T \quad (9)$$

Pri tem J_p^{03} označuje Jakobijevo matriko do zapestja robota. Skalarji k_A, k_L, k_S in k_O so pozitivne konstante, ki določajo korak (hitrost) optimizacije. V praksi postavimo konstante k_A in k_L na nič, ko je zapestje dovolj daleč od ovire in ko so zglobi dovolj daleč od omejitev. Prav tako zadnjega člena funkcije ϕ ne računamo, če je manipulabilnostni indeks dovolj velik, saj je računanje parcialnega odvoda $\frac{\partial J}{\partial q}$

v analitični obliki zahtevno in ga računamo numerično. Optimizacijo trajektorije bi lahko izvajali tudi sproti med izvajanjem naloge, vendar je ugodneje, da jo izvajamo že v fazi generacije trajektorije. Pri tem rekurzivno izračunavamo enačbo (9), dokler ne dobimo zelene konfiguracije, ki zadosti vsem našim kriterijem. Prav lahko se zgodi, da rekurzija ne konvergira k rešitvi, ker so zahteve v nasprotju. Na primer, izogibanje oviram lahko v določeni konfiguraciji potiska zglobe v fizične omejitve. V takem primeru rešitve ne obstaja in moramo optimizacijski postopek prekiniti ter spremeniti vhodno trajektorijo.

6 Zaključek

Prispevek opisuje zasnovano in izvedbo robotizirane celice za zaključne operacije v proizvodnji obutve. Pri tem je bilo potrebno analizirati obstoječo tehnologijo in jo prilagoditi potrebam avtomatizirane proizvodnje. Razvili smo stroj za nanašanje polirne paste, modificirali polirni stroj ter izdelali primerno brizgalno kabino. Razvili in izdelali smo aparaturno in programsko opremo krmilnika proizvodne celice, sodelovali razvoju CAD

programa za določanje robotskih trajektorij ter izdelali postopke za optimizacijo teh trajektorij z upoštevanjem kinematične redundance 6 stopenjskega industrijskega robota. Opisana celica je prvi primer tovrstne avtomatizacije v svetu. Od septembra 2004 deluje v prototipni proizvodni liniji v mestu Vigevano, Italija.

7 Literatura

- [1] Taylor, P.M., & Taylor, G.E. 1988, Garments and Shoe Industry – Robots, In Encyclopedia of Robotics, ed. Dorf R.C., Nof S.Y., (Wiley Interscience), pp. 587-591
- [2] Nemeč, B. Lenart, B. Žlajpah, L. 2003, Automation of lasting operation in shoe production industry., International conference on industrial technology, IEEE ICIT 2003, Maribor, Slovenia, December 10-12, *Proceedings*. Piscataway: IEEE, pp. 462-465.
- [3] Nemeč, B. et al 2003, Technology fostering individual, organisational, and regional development: an international perspective. In Brandt, D. *Kompetenzentwicklung 2003 : Technik, Gesundheit, Ökonomie*. Münster (New York : Waxmann Muenster), pp. 19-70.
- [4] ITIA – CNR Institute of Industrial Technologies and Automation, 2003, Development of the processes and implementation of management tools for the Extended User Oriented Shoe Enterprise, Project description
- [5] Hogan, N. 1985, Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part 1: Theory, Part 2: Implementation, Part 3: Applications, Trans. of ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control
- [6] <http://www.delcam.com/>, Solutions for Shoes/footwear, Delcam 2004
- [7] Nenchev, D. N. 1989, Redundancy Resolution through Local Optimization: A Review; J. of Robotic Systems, 6(6), pp. 769-798
- [8] Yoshikawa, T., 1996, Basic optimization methods of redundant manipulators., *Laboratory Robotics and Automation*, 8(1), pp. 49 - 90
- [9] Khatib, O.:1986, Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *J. of Robotic Systems*, 5(1) :pp. 90 – 98
- [10] Nemeč, B. Žlajpah, L. 2000: Null velocity control with dynamically consistent pseudo-inverse, *Robotica*, 18: pp 513 - 518
- [11] Yoshikawa, T. 1990, Foundations of robotics: analysis and control, MIT Press.