

Avtomatizacija v montaži obutve z uporabo industrijskih robotov

Bojan NEMEC, Leon ŽLAJPAH

Izvleček: Prispevek opisuje štiri celice v proizvodnji obutve, ki smo jih avtomatizirali z uporabo industrijskih robotov. Dve celici – celica za nakopitenje in celica za zaključne operacije v montaži obutve – sta posebej zahtevni s stališča avtomatizacije in sta edini primer tovrstne avtomatizacije v svetu. Težišče članka je v avtomatski pripravi robotskih trajektorij za obdelavo neposredno iz CAD-modela obutve. V prispevku prav tako opisujemo, kako dosežemo večjo fleksibilnost z uporabo kinematične redundance robotov. Za lažjo obravnavo tega problema smo uvedli princip navideznega mehanizma.

Ključne besede: avtomatizacija proizvodnje, robotika, generacija trajektorij, kinematična redundanca,

■ 1 Uvod

Proizvodnja obutve spada med delovno intenzivne panoge. Zaradi tega se seli na območja s cenejšo delovno silo, predvsem v dežele Bližjega in Daljnega vzhoda. V Evropi lahko to proizvodnjo ohranimo samo z izdelavo čevljev po meri ob sprejemljivi ceni, kar lahko dosežemo s popolnoma avtomatizirano proizvodnjo [1, 2, 3]. S podobno problematiko se srečujejo tudi evropske države, kjer je bodisi obutvena industrija bodisi strojegradnja za obutveno industrijo pomembna panoga. Zato je evropska skupnost financirala in še nadalje pospešuje raziskovalno-razvojne projekte, kjer naj bi med ostalim razvili metodologijo in avtomatizacijo za industrijsko izdelavo čevljev po meri [4]. V največjem projektu 5. okvirnega programa s to tematiko, EUROShoE [4], je sodeloval tudi Institut Jožef Stefan z nalogo izdelati robotizirano celico za končne operacije [5]. Pri tem projektu je bil eden izmed osnovnih ciljev osvojiti znanje, kako avtomatsko generirati vse obdelovalne programe za vse stroje v proizvodnem procesu

neposredno iz geometrijskih modelov obutve. Ta pristop se je do neke mere že uveljavil pri numerično krmiljenih obdelovalnih strojih. V našem primeru pa smo šli še korak naprej, saj se programi generirajo avtomatsko, ko bodoči kupec izbere model obutve ter izmeri geometrijo noge s pomočjo t. i. skenerja. Z razvojem na področju avtomatizacije v proizvodnji obutve smo nadaljevali v sodelovanju s tovarno Alpina. Zanj smo razvili tri celice – za nakopitenje, za nanašanje lepila pri lepljenju podplatov in za brušenje spodnjega dela obutve pred nanosom lepila za lepljenje podplatov. V nadaljevanju bomo opisali te tri celice ter celico za avtomatizacijo zaključnih operacij v proizvodnji obutve. Pri tem bomo posebej prikazali problematiko avtomatske generacije trajektorij pri industrijskih robotih.

■ 2 Avtomatizacija nakopitenja

Ena izmed najzahtevnejših nalog s stališča avtomatizacije je nakopitenje. Pri ročnem nakopitenju delavec vstavi kopito z notranjikom in plaščem obutve v stroj za nakopitenje, ki zlepi plašč in notranjik. Pri tem je zelo pomembno, da delavec pravilno poravnava plašč obutve in notranjik na kopito. Dosedanji poizkusi avtomatizacije nakopitenja so bili neuspešni,

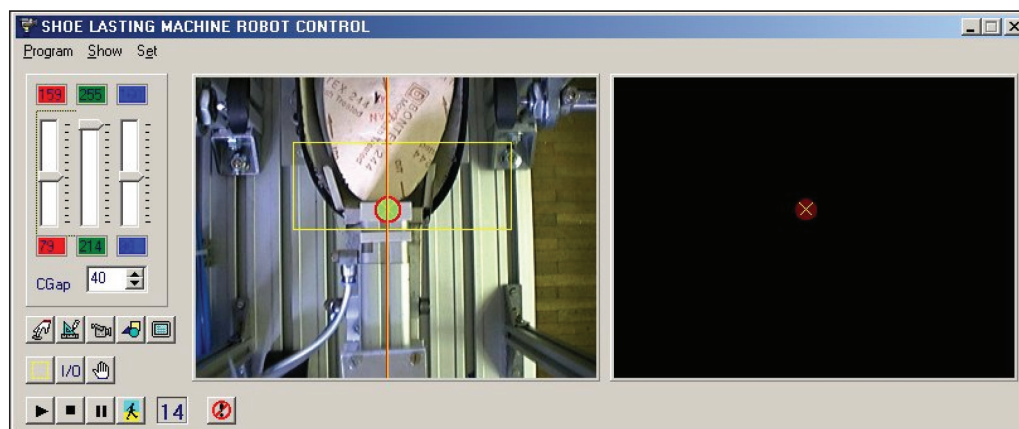
ker so skušali poravnati plašč obutve kar v stroju za nakopitenje, pri tem pa so uporabili umetni vid za določanje lege plašča obutve. Ker je plašč obutve zelo različnih oblik in narejen iz zelo različnih materialov, je bilo nemogoče natančno zaznavati lego plašča glede na kopito. Našo celico za nakopitenje sestavljajo ločena enota za poravnavanje, industrijski robot s posebnim prijemalom ter stroj za nakopitenje. Celico prikazuje *slika 1*. Bistvena razlika v našem pristopu je v ločeni enoti za poravnavo kopita, notranjika in plašča obutve. Enoto sestavlja 9 pnevmatskih cilindrov za pritrdjevanje in prijemanje ter servoos za pozicioniranje plašča čevlja. Lego plašča čevlja določamo s pomočjo videokamere. Naš pristop se razlikuje od ostalih v tem, da poravnavamo obrnjen čevljev. Notranja stran čevlja je namreč izdelana iz homogenih nesvetlečih materialov, kjer je sredina plašča označena z zarezo ali kakšno drugo oznako, kot je npr. črta, pika itd. Tako oznako brez težav zaznamo tudi s preprostim sistemom za umetni vid. Pnevmatško gnane klešče nato zgrabijo sprednji del plašča čevlja, servovodena os pa s pomočjo kamere v povratni zanki poskrbi za pravilno naleganje plašča obutve na kopito. Pnevmatški cilindri nato fiksirajo kopito, plašč in notranjik, robot

Dr. Bojan Nemec, univ. dipl. inž.,
dr. Leon Žlajpah, univ. dipl. inž.,
Institut Jožef Stefan, Ljubljana



Slika 1. Avtomatizirana celica za nakopitenje

imeti tako kopito referenčno vpenjalno ploščico, ki je natančno definirana glede na geometrijo kopita. Ker takih kopit v tovarni Alpina še ne morejo zagotoviti, smo se odločili za vpenjanje čevlja z vpenjalno napravo, ki se prilega obliki obutve. Slabost takega pristopa je v tem, da vpenjalna naprava ne vpne vseh oblik in velikosti čevlja enako. Zato je bilo potrebno razviti poseben ekspertni sistem, ki s pomočjo oblike kopita in oblike vpenjalnih čeljusti izračuna naleganje obutve v vpenjalni



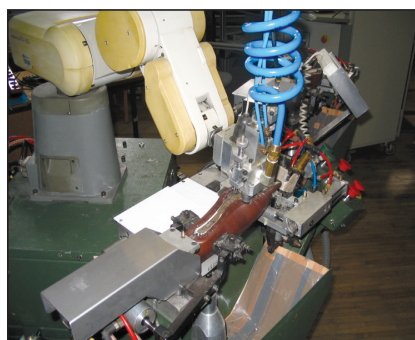
Slika 2. Poravnava plašča čevlja na kopitu s pomočjo umetnega vida

pa s posebno prijemalko vstavi kopito v običajen stroj za nakopitenje. Prednost razvite celice je ponovljiva kvaliteta, poleg tega pa pribijanje notranjika na kopito ni več potrebno. S tem se izognemo dvema operacijama – pribijanju in odstranjevanje žebličkov, obenem pa povečamo življenjsko dobo kopita. V okviru največjega evropskega projekta 5. okvirnega programa – projekta EU-ROShoE, katerega cilj je bil avtomatizacija celotne proizvodnje čevljev, je bilo nakopitenje edina faza, ki je niso uspeli avtomatizirati [4].

■ 3 Avtomatizacija nanašanja lepila

Pri razvoju celice za nanašanje lepila je bil glavni poudarek na avtomatski generaciji trajektorij. Celica deluje tako, da delavec ročno vstavi čevlj v eno izmed dveh vpenjalnih naprav, nato robot nanese lepilo na spodnji del čevlja. Čeljusti vpenjalne naprave objamejo čevlj. S stališča avtomatizacije je lažje in zanesljivejše, če vpenjamo kopita, vendar morajo biti v ta namen vsa kopita prirejena za avtomatizirano proizvodnjo. To pomeni, da mora

napravi. Poseben grafični vmesnik omogoča tudi enostavno popravljanje avtomatsko generiranih trajektorij. Trajektorije se določajo na referenčno številko čevlja, program pa nato preračuna trajektorije za vse številke ter upošteva naleganje usnja na kopito, ki je različno glede na geometrijo in velikost čevlja. Podatki iz tega programa se avtomatsko naložijo v krmilnik delovne celice. Ta nato transformira celice trajektorije tako, da jih poravna



Slika 3. Celica za nanašanje lepila

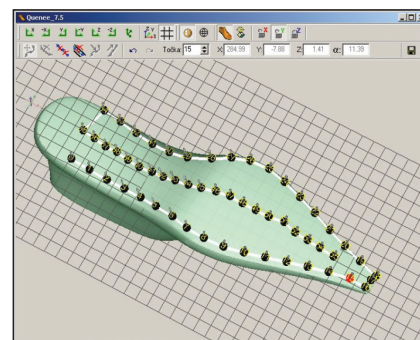
glede na lego vpenjalne naprave. Slika 4 prikazuje grafični vmesnik sistema za določanje trajektorij.

■ 4 Avtomatizacija zaključnih operacij v proizvodnji obutve

Zaključne operacije pri proizvodnji čevljev obsegajo razmaščevanje, čiščenje, poliranje, nanos zaščitnih sredstev v obliki polirne paste, razpršila in trdega voska ter pregled obutve pred embalaranjem. Vse te operacije morajo potekati popolnoma avtomatsko brez intervencije operaterja in se avtomatsko prilagajati različ-

nim 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. 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,

polirnega voska, polirnih sredstev v obliki razpršila ter poliranje in krtačenje 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



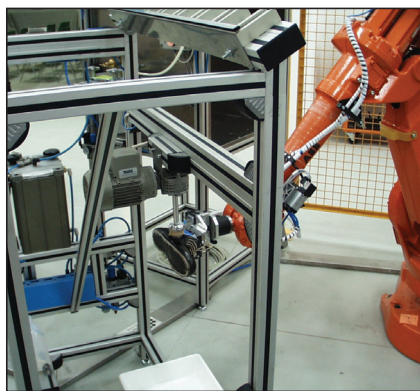
Slika 4. Grafični vmesnik programa za določanje trajektorij lepljenja

podajnost krtače je 2,1 N/mm, kar še omogoča zadovoljivo regulacijo sile

tudi z robotom brez uporabe senzorja sile [5]. Glede na analize smo določili potrebne komponente celice, ki obsegajo industrijski 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. Ustrezni komponent ni na tržišču, zato smo jih morali na novo razviti in izdelati.

4.1 Stroj za nanašanje polirne paste

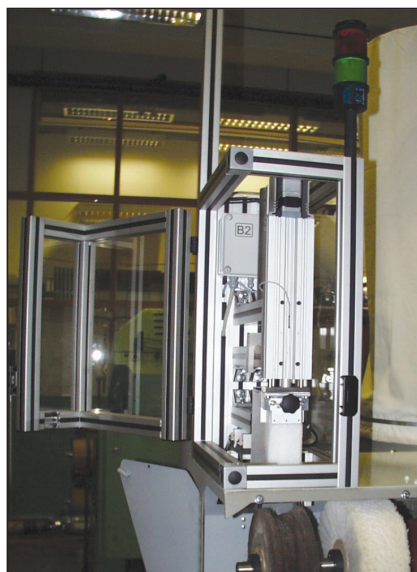
Stroj za nanašanje polirne paste sestavljajo vrteča krtača, skozi katero doteka polirna pasta, enota za doziranje polirne paste ter velik pnevmatski cilindri, ki je obenem zalogovnik za polirno pasto. Polirno krtačo vrti elektromotor preko prenosa. Pri tem je hitrost vrtenja konstantna, vse ostale parametre, 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 5*. Na stroju so še nameščena vodila za shranjevanje čevljev med sušenjem.



Slika 5. Stroj za nanašanje polirne kreme

4.2 Polirni stroj

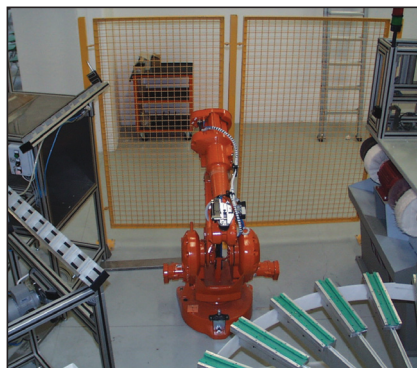
Obstoječi komercialno dosegljiv polirni stroj smo predelali v polirni stroj z enoto za dodajanje polirnega voska ter računalniško kontrolo vseh funkcij stroja, ki obsega kontrolo dodajanja polirnega voska, želeno hitrost vrtenja polirnih krtač ter vklopa in izklopa sistema za sesanje. Stroj za poliranje prikazuje *slika 6*.



Slika 6. Polirni stroj z enoto za dodajanje polirnega voska

4.3 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 7*.

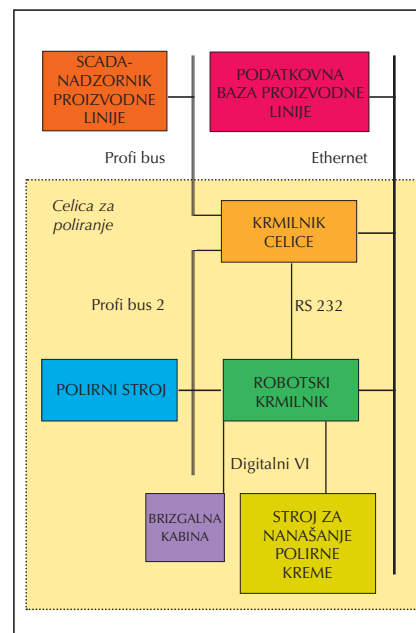


Slika 7. Celica za poliranje

4.4 Krmiljenje celice

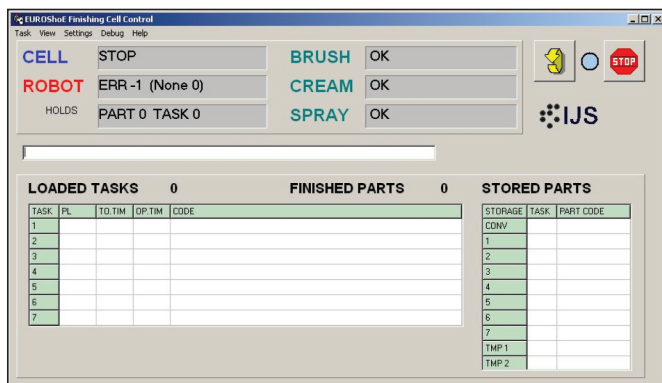
Delovanje celice krmili nadzorni računalnik. Krmilni računalnik komunicira z nadzornim računalnikom celotne proizvodne linije preko linije ProfiBus. Ta mu sporoča stanje transportne linije in kodo čevlja, ki prihaja po liniji. Nadzorni računalnik s pomočjo kode poišče vse potrebne datoteke za obdelavo tega čevlja v podatkovni bazi proizvodne linije. Povezava poteka preko linije Ethernet. Komunikacija

med računalnikom polirnega stroja in nadzornim računalnikom poteka preko ločene linije ProfiBus. Za povezavo med robotskim krmilnikom in nadzornim računalnikom skrbijo tri linije. Linija ProfiBus je namenjena izmenjavi ukazov ter stanj. Preko povezave Ethernet in protokola FTP 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 8*.



Slika 8. Blokovna shema krmiljenja celice

Programska oprema za krmilnik celice je napisana v programskem okolju Delphi in teče pod operacijskim sistemom Windows XP. Omogoča enostavno ravnanje s celico, nastavljanje parametrov, servisnih intervalov, nadzor nad vsemi elementi celice ter testiranje elementov celice. Za opis zaključnih operacij smo izdelali makrojezik in ustrezen interpreter. Programska oprema omogoča, ob upoštevanju, da je čas sušenja razmeroma dolg, hkratno obdelavo do 24 čevljev v proizvodni celici. Glavno okno nadzornega programa prikazuje *slika 9*.



Slika 9. Glavno okno nadzornega programa

4.5 Avtomatska generacija trajektorij

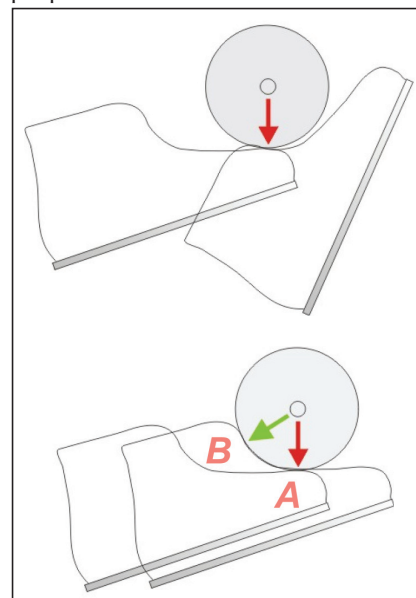
Ena izmed glavnih zahtev pri realizaciji proizvodne celice je, da se vse nastavitve za različne modele čevljev izvajajo brez posredovanja operaterja, vključno z generacijo trajektorij. Zaradi tega moramo generirati vse trajektorije samo s pomočjo geometrijskih in tehnoloških podatkov o posameznem čevlju. V ta namen smo razvili nova orodja v programu za računalniško modeliranje PowerShape [6]. Orodja je izdelal proizvajalec programa Delcam in omogočajo določanje trajektorije na 3D modelu čevlja, kjer lahko poleg same trajektorije spreminjamo tudi orientacijo 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 projiciramo na površino novega čevlja. Na

4.6 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 se naloga pogosto zdi 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. Z

ta način precej skrajšamo čas, potreben za generacijo trajektorij podobnih čevljev. Slika 10 prikazuje primer generacije trajektorij za poliranje s pomočjo programa PowerShape.

je podrobneje opisan v poglavju 5 tega prispevka.



Sliki 11 a in 11 b. Kinematična redundanca zaradi okrogle oblike brusnega koluta omogoča optimizacijo gibanja, kot to kaže slika 11 b

5 Avtomatizacija brušenja podplatov

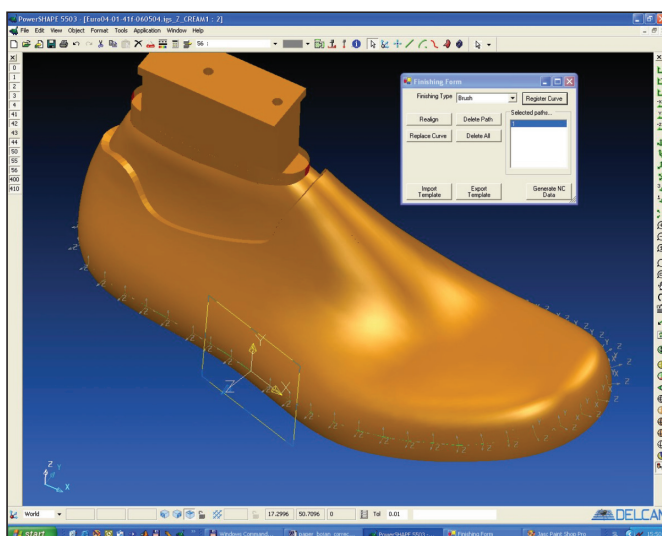
Po fazi nakopitenja je plašč čevlja prilepljen na notranjik, kot to kaže slika 12. Ker je usnje relativno neraztegljiv material, se ne prilega povsem površini notranjika in je na površini podplata nagubano. Te gube je potrebno pred nanosom lepila, s katerim prilepimo podplat na notranjik, odbrusiti.



Slika 12. Nagubano usnje na podplatu, ki ga je potrebno odbrusiti. Konica čevlja je že obrušena.

upoštevanjem tega pridobimo eno stopnjo redundance. To ponazarjata tudi sliki 11 a in 11 b. Žal pa ena sama stopnja redundance največkrat ne zadošča za izpolnitev vseh kriterijev. Zato lahko do določene mere žrtvujemo želeno orientacijo, kar prinese še dodatni stopnji redundance. Postopek vodenja

Brušenje je zahtevna operacija. Če o brusimo premalo, potem je podplat slabo prilepljen in tak čevlj kmalu razpade. Če o brusimo preveč, raztrgamo usnje in tudi tak čevlj lahko kmalu po uporabi razpade. Koliko



Slika 10. Generacija trajektorij s programom PowerShape

obrusimo, je odvisno od materiala, brusnega koluta, oblike in velikosti čevljev. Predvsem moramo pri tej fazi nadzorovati silo, s katero pritiskamo med brušenjem, in čas brušenja. Za brušenje usnja obstajajo tudi namenski NC-stroji, ki pa so vodeni le pozicijsko ali pa imajo premajhno število servoosov, da bi lahko uspešno obrusili vse čevlje. Glavna pomanjkljivost je dolgotrajno nastavljanje stroja za posamezen tip in velikost čevlja, zato so primerni le za velikoserijsko proizvodnjo. Fleksibilno celico za brušenje lahko izvedemo samo s pomočjo robota, ki ima vsaj 6 stopenj prostosti in ga lahko krmilimo s pomočjo sile. Glede na to, da robot ni zmožen pre-prijemanja, kot to dela človek med brušenjem podplatov, tudi 6 stopenj prostosti velikokrat ne zadošča in je potrebno uporabiti robot s kinematično redundantno strukturo. V okviru projekta EUROShoE, v katerem smo sodelovali tudi mi, so italijanski partnerji že avtomatizirali fazo brušenja [6]. Pri tem so uporabili standardni robot ABB IRB 2400 s šestimi prostostnimi stopnjami, ki ni omogočal krmiljenja po sili. Da bi zaobšli to pomanjkljivost, so razvili brusilno glavo z eno prostostno stopnjo, ki je lahko krmilila silo. Tak način ima kar nekaj pomanjkljivosti. Brusilna glava je težka in nerodna, kar zmanjšuje fleksibilnost celice. Tak pristop je poleg vsega tudi zelo drag. Uporabili so pristop, kjer čevljev miruje na liniji, robot pa nosi brusilno glavo. Vsemu temu se lahko izognemo z uporabo primernih metod krmiljenja. Naša celica je zasnovana tako, da robot potiska čevljev na kolut brusilnega stroja, kot to kaže *slika 13*.



Slika 13. Celica za brušenje podplatov

Pri tem je potrebno regulirati silo, s katero pritiska robot na brusni kolut. V ta namen je v zapestju robota nameščen 6-dimenzionalni merilnik sil in navorov. Uporabili smo robot Mitsubishi Pa10 s 7 prostostnimi stopnjami. To pomeni, da je robot kinematično redundanten, dodatne kinematično redundantne prostostne stopnje pa nastopijo zaradi oblike brusnega koluta. V nadaljevanju bomo na kratko opisali vodenje kinematično redundantnega robota s principom navideznega mehanizma.

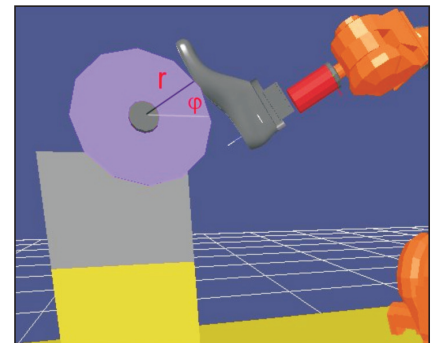
■ 6 Princip navideznega mehanizma pri vodenju kinematično redundantnega robota

Enačba (1) opisuje kinematiko robota z redundantnimi stopnjami prostosti [7].

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

kjer prvi del enačbe 1 opisuje gibanje vrha oz. orodja robota, drugi del pa gibanje zglobov robota, ki ne vplivajo na pozicijo in orientacijo vrha robota. Gibanje, ki ne vpliva na pozicijo in orientacijo vrha robota, imenujemo gibanje v ničelnem prostoru. Pri tem je $\dot{q}$ vektor zglobovni hitrosti ($n \times 1$), J Jakobijeva matrika ($m \times n$), $\bar{J}$ je psevdoinverz Jakobijeve matrike, utežen z matriko vztrajnostnih momentov robota H , $\dot{x}$ 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. Ničelni prostor obstaja samo, če ima robot več prostostnih stopenj, kot je potrebno za izvajanje določene naloge, kar pomeni, da je dimenzija vektorja x manjša od dimenzije vektorja q . Če je naloga taka, da je ena izmed koordinat vektorja x nepotrebna za opis delovne naloge, potem je rešitev problema trivialna. Problem pa so naloge, kjer nastopi kinematična redundanca zaradi oblike orodja, kljub temu pa za opis delovne naloge potrebujemo vseh 6 koordinat vektorja x . Ravno brušenje podplatov čevljev je tipičen primer take operacije, kjer lahko prosto izbiramo, kje na obodu in pod kakšnim kotom glede na obod

brusilnega koluta brusimo, kljub temu pa za opis naloge potrebujemo vseh 6 prostorskih koordinat. Robot Mitsubishi Pa10, ki smo ga uporabili za brušenje, ima 7 prostostnih stopenj. Glede na to, da lahko prosto izbiramo mesto, kjer se na obodu brusnega koluta dotikamo podplata čevlja, imamo dodatno kinematično redundanco. To najlažje opišemo, če brusni kolut opišemo kot nek mehanizem z eno prostostno stopnjo dolžine r_b in kotom ϕ , kot kaže *slika 14*, pri čemer lahko prosto izbiramo kot ϕ .



Slika 14. Kinematična redundanca zaradi oblike brusnega koluta

Zapišimo vektor zunanjih koordinat v obliki:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ yaw \\ pitch \\ roll \end{bmatrix}$$

Naj leži ta točka na osi brusilnega koluta. Točka na obodu je potem:

$$x_1 = x + \begin{bmatrix} -r_b \cos(\phi) \\ 0 \\ r_b \sin(\phi) \\ 0 \\ \phi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Odvajajmo enačbo (2) parcialno po zglobovni koordinati robota q in kotu ϕ :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = J\dot{q} + \begin{bmatrix} r_b \sin(\varphi) \\ 0 \\ -r_b \cos(\varphi) \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\varphi} = \\ = J_1 \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = J_1 q_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Pri tem je J običajna Jakobijeva matrika robota Pa10, drugi del enačbe 3 pa je dodatni del Jakobijeve matrike, ki opisuje kinematične transformacije zaradi proste izbire kota φ . Sedaj, ko smo dobili Jakobijevo matriko za celotni sistem, se lotimo problema, kako izkoristiti kinematično redundanco za bolj učinkovito izvajanje naloge. Naj bo p želena kriterijska funkcija, ki jo želimo bodisi maksimizirati ali minimizirati. Potem vektor

$$\phi = \left(\frac{\partial p}{\partial q_1}, \frac{\partial p}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial p}{\partial q_n} \right) k \quad (4)$$

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. Kriterijsko funkcijo definiramo kot vsoto treh kriterijskih funkcij $p = p_A + p_J + p_S$, kjer je p_A kriterijska funkcija za izogibanje oviram zapestja, p_L je kriterijska funkcija, namenjena izogibanju robu delovnega področja, p_S pa je kriterijska funkcija za preprečevanje singularne lege. Kriterijsko funkcijo za izogibanje oviram izberemo v obliki [9, 10]

$$p_A = V(x_c - x_o) = Vd \quad (5)$$

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 zgloboh, definiramo kot

$$p_L = \begin{cases} (q_{\max} - q)^2, & |q_{\max} - q| < \varepsilon \\ 0 & \\ (q_{\min} - q)^2, & |q_{\min} - q| < \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

kjer je ε pozitivna konstanta, ki določa okolico omejitev v zgloboh. Za izogibanje singularnim konfiguracijam smo uporabili znano mero manipulabilnosti [11]

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

Z upoštevanjem gornjih enačb izračunamo potrebno hitrost robota v zglobnih koordinatah, ki definira gibanje v ničelnem prostoru in optimizira našete kriterije

$$\begin{aligned} \dot{q}_{dn} = N(k_A J^{03} Vd - 2k_L(q_L - q) - \\ - 2k_S \frac{\partial J}{\partial q} J^T) \end{aligned} \quad (8)$$

Regulacijski zakon, ki zagotovi popolno sledenje vrha robota želeni trajektoriji in loči dinamične vplive gibanja vrha robota in gibanja v ničelnem prostoru, podaja enačba [10]

$$\begin{aligned} \tau = H\bar{J}(\ddot{x}_d + K_v \dot{e}_x + K_p e_x - \ddot{J}\dot{q}) + \\ HN(\ddot{q}_{dn} + K_n \dot{e}_n - \ddot{N}\dot{q}) + h + J^T F \end{aligned} \quad (9)$$

Pri tem τ pomeni krmilne navore na motorjih, $\ddot{x}_d$ želeni pospešek vrha robota, e_x pogrešek vrha robota, $\dot{e}_n$ pogrešek hitrosti v ničelnem prostoru, h je vektor, ki opisuje centrifugalne, Coriolisove in gravitacijske sile na zglobe, F pa je sila na vrhu robota. Regulacijski zakon izračuna potrebni navor, s katerim krmilimo motorje robota in navideznega mehanizma. Ker navidezni mehanizem dejansko ne obstaja, moramo pri izračunu pogreška izračunati tudi kot navideznega zglobo z uporabo enačbe

$$\varphi = q_8 = \int H_8^{-1} \tau_8, \quad (10)$$

kjer oznaka 8 pomeni osmi – navidezni zglob mehanizma. Vztrajnostni moment navideznega zglobo H_8 lahko prosto izberemo. Najboljše rezultate dobimo, če izberemo dovolj majhne vztrajnosti, kar pomeni lahek navidezni zglob.

7 Zaključek

Prispevek opisuje zasnovo in izvedbo robotiziranih celic za nakopitenje, brušenje podplato, nanašanje lepila ter izvedbo zaključnih operacij pri montaži obutve. Pri tem je bilo potrebno analizirati obstoječo tehnologijo in jo prilagoditi potrebam avtomatizirane proizvodnje. Razvili smo stroj za pravilno pozicioniranje plašča obutve in notranjika na kopito ter izdelali aparaturno in programsko opremo krmilnika celice za nakopitenje, nanašanje lepila ter brušenje podplato. Razvili smo tudi CAD-program za določanje robotskih trajektorij ter izdelali postopke za optimizacijo teh trajektorij z upoštevanjem kinematične redundance stopenjskega industrijskega robota. Uvedli smo princip navideznega mehanizma, ki precej poenostavlja transformacije za opis kinematične redundance, ki je posledica oblike orodja.

Viri

- [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] Nemec, B. Lenart, B. Žlajpah, L. 2003, Automation of lasting operation in shoe production industry, International conference on industrial technology, IEEE ICIT 2003, Maribor, Slovenija, december 10–12, Proceedings. Piscataway: IEEE, pp. 462–465.
- [3] Nemec, B. et al 2003, Technology fostering individual, organisational, and regional development: an international perspective. In Brandt, D. Kom-

- petenzentwicklung 2003: Technik, Gesundheit, Ökonomie. Münster (New York: Waxmann Muenster), pp. 19–70.
- [4] Dulio, S., Boër, C. B. 2004, Integrated production plant (IPP): an innovative laboratory for research projects in the footwear field, Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing, 17 (7) 601–611.
- [5] Nemec, B., Žlajpah, L. 2007, Robotic cell for custom finishing operations. Int. J. Computer Integrated Manufacturing, 20 (5), 2007.
- [6] Jatta, F., Zanoni, L., Fassi, I., Negri, I. 2004, A Roughing Cementing Robotic Cell for Custom Made Shoe Manufacture. Int. J. Computer Integrated Manufacturing, 17(7): pp. 645–652.
- [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] Nemec, 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.

Automation in shoe assembly using industrial robots

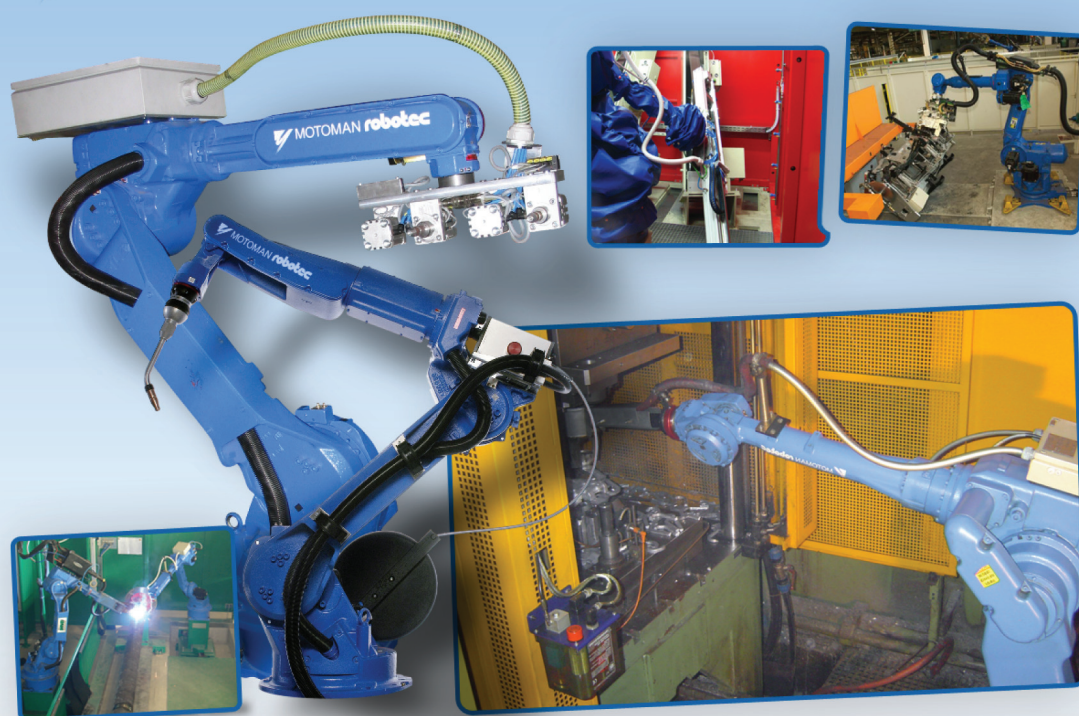
Abstract: The paper describes four applications of industrial robots in shoe production. Two of them – automation of shoe lasting machine and automation of finishing process are extremely difficult to automate and are according to our knowledge first successful automation of the above processes. The focus of the paper is on automatic robot trajectory generation directly from CAD shoe design data. The paper shows also how kinematic redundancy resolution approach was used in order to design fault tolerant robot trajectories.

Keywords: Production automation, robotics, trajectory optimization, kinematic redundancy,



MOTOMAN robotec d.o.o.

Podjetje za trženje, projektiranje ter gradnjo industrijskih robotskih in fleksibilnih sistemov



VODILNI SVETOVNI PROIZVAJALEC ROBOTOV

MOTOMAN ROBOTEC s proizvodnjo 18.000 robotov letno nudi široko paleto implementacij robotov v različna tehnološka okolja

- .varjenja (MIG/MAG, uporovno, TIG)
- .rezanja (laser, plazma, vodni curek)
- .brušenja oz. površinske obdelave
- .strege (CNC obdelovalnih strojev, stružnic)
- .tlačni liv
- .čiščenja odlitkov oz. pobiranja srha
- .montaže
- .paletiranja

Naša strokovna ekipa vam nudi celovito rešitev od idejne izvedbe projekta do zagona, usposabljanja in servisiranja.