

Gibljivost robotskih sistemov pri obdelovalnih procesih

Karl GOTLIH, Simon BREZOVNIK, Denis KOVAČ,
Miran BREZOČNIK

Izvleček: Industrijski roboti (IR) so del proizvodnega sistema in zato je pomembno, da jih vgradimo v sistem glede na njihove sposobnosti in zahteve obdelovalnega procesa. Podatki o lastnostih robotov, ki jih dobimo iz tehniških dokumentov proizvajalcev, so nepopolni in jih ne moremo direktno uporabiti pri projektiranju proizvodnega sistema. Bistven podatek, ki manjka, je gibljivost mehanizma, podana za vse točke delovnega prostora. Da bi bolje opisali lastnosti robota v delovnem prostoru, vpeljemo pojem hitrostna anizotropija. Ta skalarna veličina, ki jo izračunamo za katerokoli točko delovnega prostora, je definirana kot normalizirana dolžina najkrajše osi hitrostnega elipsoida, ki ga konstruiramo v vrhu robota (TCP). V delu je predstavljeno grafično okolje za 3D-diskretno predstavitev delovnega prostora industrijskega robota z dodanim parametrom hitrostne anizotropije za vsako diskretno točko. Prednosti razvitega grafičnega okolja so predstavljene na primeru delovnega prostora komercialnega industrijskega robota.

Ključne besede: industrijski robot, delovni prostor, hitrostna anizotropija

■ 1 Uvod

Roboti se uporabljajo v najrazličnejših industrijskih aplikacijah. Uporabo narokujejo zahteve tržišča in tehnološke potrebe med posameznimi proizvajalci iz najrazličnejših panog. Največ industrijskih robotov [1] je v uporabi v proizvodnji vozil, sledi ji proizvodnja komponent za proizvodnjo vozil. Robotizacija proizvodnih sistemov ni pomembna samo zaradi humanizacije delovnega procesa, temveč tudi zaradi povečanja kakovosti in kontinuitete procesov in seveda zmanjšanja proizvodnih stroškov. Robot je postal skoraj

nepogrešljiv del proizvodne verige. To pa je možno zaradi široke izbire industrijskih robotov na svetovnem tržišču. Sama uporaba visokokvalitetnih robotov in opreme še ne zagotavlja visoke kakovosti izdelkov, če postavitev tehnološkega sistema ni optimalna. Projektiranje robotiziranega tehnološkega sistema je zato izredno pomembno za zagotavljanje vrhunskega proizvodnega sistema in kakovosti produktov [2].

Namen članka je prikazati razvoj grafičnega okolja za 3D-predstavitev hitrostne anizotropije v delovnem prostoru industrijskega robota.

Razvoj je prikazan na primeru komercialnega industrijskega robota. V grafično predstavitev delovnega prostora obravnavanega industrijskega robota je vnesen še dodaten parameter hitrostne anizotropije. Grafično okolje je razvito za uporabo s komercialnim CAD-paketom Autocad Mechanical Desktop [3], ki ob tem omogoča tudi modeliranje proizvodnih sistemov.

Obravnavano grafično orodje uporabniku omogoča modeliranje proizvodnih sistemov z optimalno postavitvijo industrijskega robota glede na hitrostno anizotropijo, za posredno programiranje obstoječih robotov v proizvodnih sistemih in simulacije obdelovalnih procesov, kjer je industrijski robot aktivni element proizvodnega sistema.

■ 2 Tirnice TCP v delovnem prostoru robota

Tirnice TCP industrijskih robotov lahko razdelimo v dve skupini.

V prvo spadajo manipulativne tirnice, kjer je zgolj pomembno, da robot prenese objekt z ene točke delovnega prostora in ga pozicionira na neki drugi točki delovnega prostora brez kakršnih koli dodatnih zahtev. Zaradi delovnega takta proizvodnega sistema so pri tem tipu tirnic pomembne samo časovne ali pa energetske optimizacije.

V drugo skupino spadajo tirnice, kjer je robot aktiven element obdeloval-

Izr. prof. dr. Karl Gotlih, univ. dipl. inž., Simon Brezovnik, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
Mag. Denis Kovač, Dvojezična srednja šola, Lendava
Izr. prof. dr. Miran Brezočnik, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

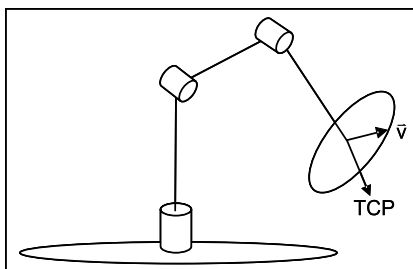
nega postopka, bodisi da vodi varilno šobo pri vseh vrstah elektroobločnega varjenja, nanaša lepila po predpisani tirnici ali pa rezka 3D-površine. Pri tej vrsti tirnic so robotu naložene še dodatne zahteve, ki izhajajo iz tehnologije in narave dela. Natančno se mora držati tirnice v geometrijskem pomenu besede, ob tem pa v vsaki točki na tirnici zagotoviti še dodatne pogoje, ki so lahko kinematični (predpisani hitrostni profili) ali kinetični (predpisani profili sil, ki so posledica obdelovalnega procesa).

Programiranje prve skupine tirnic se opravi s tako imenovanim PTP-programiranjem. Pri tem so pomembne samo začetna in končna točka na tirnici, sama tirnica pa je rezultat algoritma, ki je programiran v krmilniku robota. Drugo skupino tirnic programiramo v CP-načinu. Pri tem lahko izbiramo geometrijsko obliko tirnice med začetno in končno točko, lahko uporabimo celo CAD-model tirnice glede na produkt, ki ga obdelujemo z robotom.

V delu nas zanimajo tehnološko pogojene tirnice, na katerih so pomembni dodatni robni pogoji tako hitrosti kakor tudi sile. Da se pri razvoju parametra hitrostne anizotropije izognemo težavam s fizikalno nekonsistentnimi enotami, v nadaljnji obravnavi upoštevamo samo pozicijski del robota s tremi rotacijskimi sklepi, kar pa ne predstavlja nobene strukturne omejitve, kajti industrijski roboti imajo večinoma antropomorfnost strukturo, ki ustreza zadanim geometrijskim omejitvam.

■ 3 Gibljivost mehanizma IR

Mehanizem nima enake gibljivosti v vseh točkah delovnega prostora. Prenos gibanja od posameznega aktuatorja na TCP ne bo zagotovil enakih hitrosti TCP v vseh točkah v delovnem prostoru (slika 1). Prenos gibanja je odvisen od strukture in geometrije mehanizma, ki ga v tem primeru lahko obravnavamo po teoriji mehanizmov kot prenosnik moči s spreminjajočim se prenosnim razmerjem. Točko TCP na robotu moramo najprej identificirati kot točko v delovnem prostoru industrijskega



Slika 1. Gibljivost in hitrostni elipsoid

robota. Glede na naravo strukture odprte kinematične verige se tudi ne bomo ukvarjali z več kot eno rešitvijo inverzne kinematične naloge za posamezno točko delovnega prostora. Za vsako točko delovnega prostora je mogoče najti vsaj en položaj mehanizma in temu položaju kasneje tudi ustrezen parameter gibljivosti.

Hitrosti, ki jih lahko doseže TCP industrijskega robota, se razlikujejo ne samo glede na položaj točke TCP v delovnem prostoru robota, temveč tudi v različnih smereh v posamezni točki. Hitrost je v delovnem prostoru anizotropna, kar lahko jasno prikažemo s hitrošnim elipsoidom [4, 5]. Hitrostni elipsoid v posamezni točki delovnega prostora nastane kot rezultat transformacije hitrostne hipersfere iz prostora notranjih koordinat v elipsoid v prostoru zunanjih koordinat (slika 2), če razumemo prostor notranjih koordinat kot prostor, kjer se mehanizem izraža z zasuki oziroma pomiki v posameznih prostostnih stopnjah, in prostor zunanjih koordinat kot prostor, kjer je TCP definiran v koordinatnem sistemu okolja industrijskega robota.

Dolžine osi elipsoida so proporcionalne singularnim vrednostim Jacobijeve matrike kinematične strukture industrijskega robota. Za vsako točko delovnega prostora singularne vrednosti izračunamo numerično. Sin-

gularne vrednosti matrike J so, če je matrika regularna, povezane z lastnimi vrednostmi te matrike:

$$\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

Število od nič različnih singularnih vrednosti matrike določa rang Jacobijeve matrike. Če je ena singularna vrednost enaka nič, je Jacobijeva matrika singularna in mehanizem je v singularnem položaju. Produkt singularnih vrednosti določa volumen hitrostnega elipsoida in s tem indeks gibljivosti po Yoshikawi [6].

$$M = \prod_{i=1}^m \sigma_i \quad (2)$$

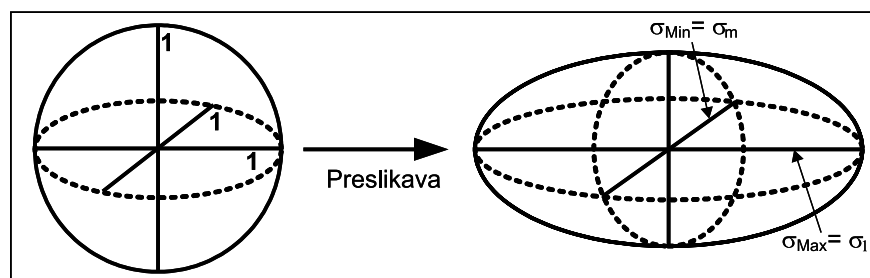
Razmerje med najmanjšo in največjo singularno vrednostjo je v literaturi poznano kot pogojno število (Condition number).

$$K = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3)$$

Pogojno število je normalizirana veličina, ki opisuje okroglost hitrostnega elipsoida. Če je $K = 1$, se elipsoid preoblikuje v kroglo. Mehanizem je v hitrostno izotropnem položaju. V dani točki delovnega prostora se bo TCP lahko v vseh smereh gibal enako hitro. Kadar je $K = 0$, je mehanizem v singularnem položaju. Hitrostni elipsoid degenerira v elipso. TCP se lahko giblje samo v smereh, ki ležijo v ravnini elipse, in dosega hitrosti, ki so proporcionalne radiju elipse v določeni smeri.

■ 4 Kriterij gibljivosti za IR

Kriterij, ki najbolje opiše in vrednoti hitrostno anizotropijo, je pogojno število, ki ga bomo za naše potrebe še modificirali. V delu nas zanima gibljivost za vse točke delovnega prostora,



Slika 2. Hipersfera/hitrostni elipsoid

zato je potrebno najti mero za ocenjevanje gibljivosti temu primerno [7–10]. Pogojno število modificiramo v obliko:

$$u_i = \frac{\sigma_{m,i}}{\sigma_{m,max}} \quad (4)$$

kjer sta najdaljša od vseh najkrajših osi hitrostnega elipsoida v celotnem delovnem prostoru robota in dolžina najkrajše od nič različne osi hitrostnega elipsoida za točko "i" delovnega prostora. Normirana vrednost parametra hitrostne anizotropije lahko privzame vrednosti med 0 (singularni položaj mehanizma industrijskega robota) in 1 (položaj industrijskega robota z največjo možno gibljivostjo). Za oceno gibljivosti je izbrano razmerje najkrajših osi hitrostnega elipsoida, ki nakazuje najslabši

možen primer tako, da bo v določeni točki delovnega prostora transformacija hitrosti/sil v TCP najmanj takšna, kot je definirana z osmi hitrostnega elipsoida.

■ 5 Primer komercialnega IR

Izbrani robot je eden izmed komercialno dobavljivih robotov, namenjen za MAG-varjenje. Njegova nosilnost je 4 kg. Struktura robota je prikazana na *sliki 3* in izhaja iz podatkov, ki so dosegljivi v tehničnih listih proizvajalca [11]. Kinematična struktura položajnega dela mehanizma robota je dana na slikah *3a* in *3b*.

Položaj vrha (TCP) robota je dan s krajevnim vektorjem, ki ima komponente:

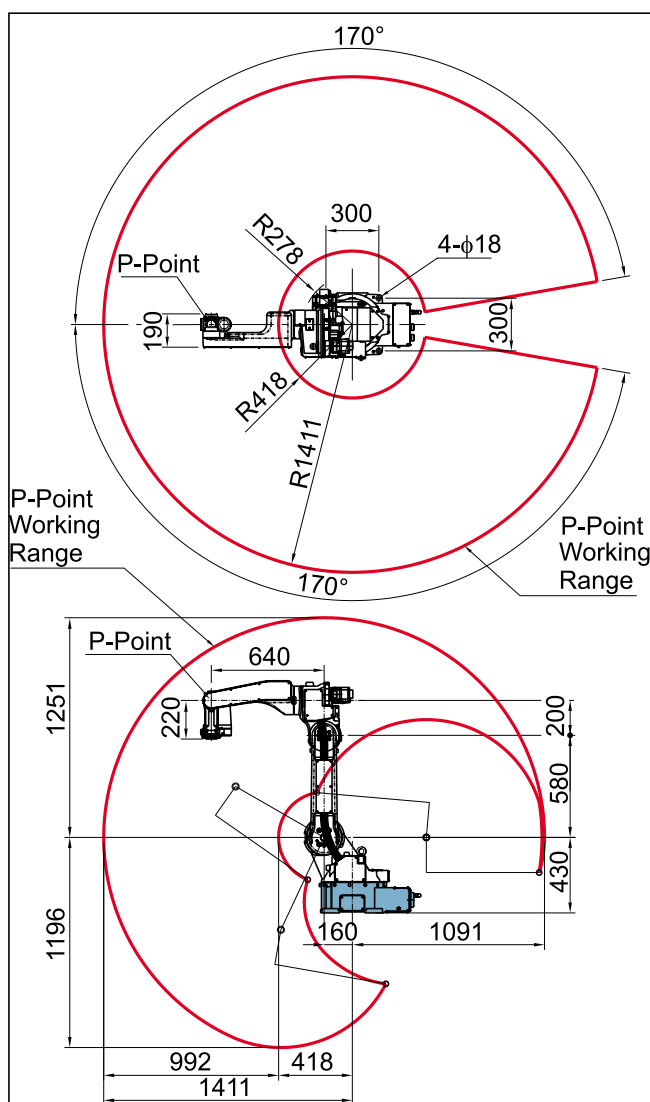
$$x = \cos q_1 (l_1 + l_3 \cdot \cos q_2 + l_4 \cdot \cos(q_2 + q_3)) \quad (5)$$

$$y = \sin q_1 (l_1 + l_3 \cdot \cos q_2 + l_4 \cdot \cos(q_2 + q_3)) \quad (6)$$

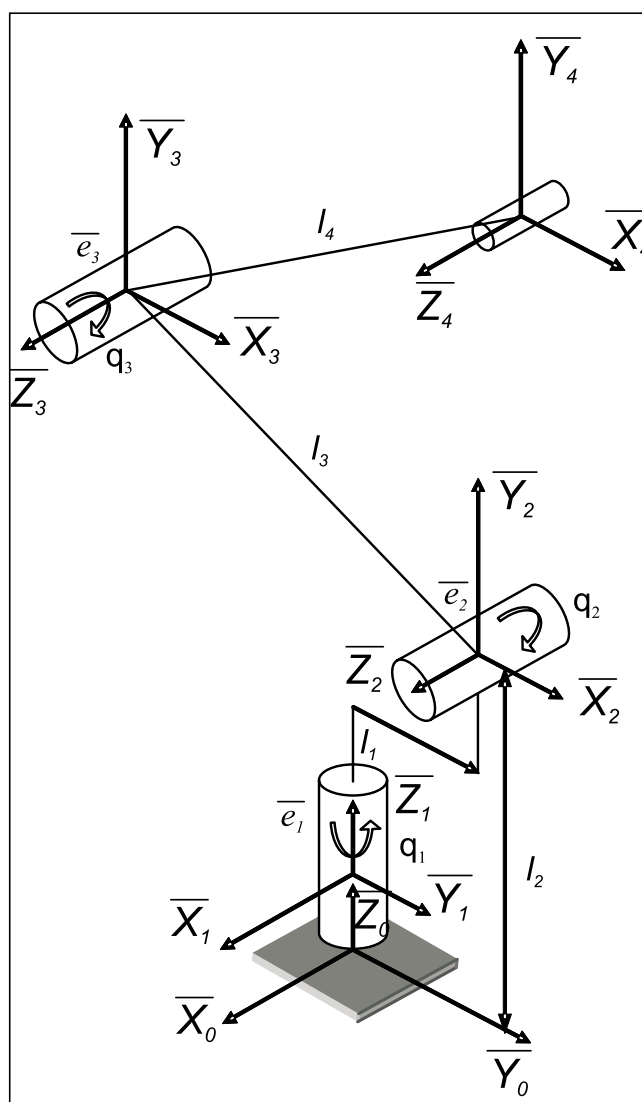
$$z = l_2 + l_3 \cdot \sin q_2 + l_4 \cdot \sin(q_2 + q_3) \quad (7)$$

Jacobijeva matrika mehanizma pa je:

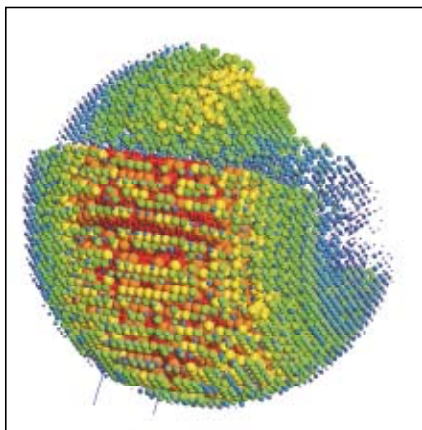
$$J = \begin{bmatrix} -\sin q_1 (l_2 + l_3 \cos q_2 + l_4 \cos(q_2 + q_3)) \\ \cos q_1 (l_2 + l_3 \cos q_2 + l_4 \cos(q_2 + q_3)) \\ 0 \\ -\cos q_1 (l_3 \sin q_2 + l_4 \sin(q_2 + q_3)) \\ -\sin q_1 (l_3 \sin q_2 + l_4 \sin(q_2 + q_3)) \\ -l_3 \cos q_2 - l_4 \cos(q_2 + q_3) \\ -l_4 \cos q_1 \sin(q_2 + q_3) \\ -l_4 \sin q_1 \sin(q_2 + q_3) \\ -l_4 \cos(q_2 + q_3) \end{bmatrix} \quad (8)$$



Slika 3a. Tloris in naris delovnega prostora komercialnega robota OTC Daihen



Slika 3b. Kinematična shema položajnega dela robota OTC Daihen



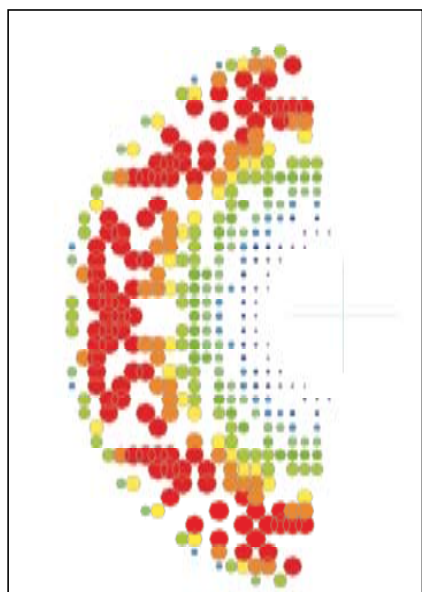
Slika 4a. Izometrična projekcija delovnega prostora IR

Za ilustracijo podajamo še indeks gibljivosti po Yoshikawi:

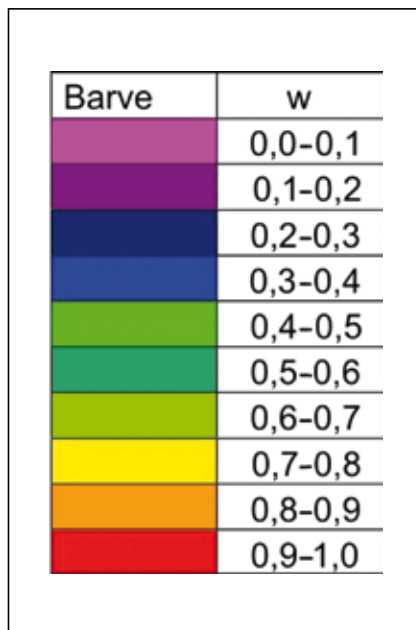
$$w = |\det(J)| \quad (9)$$

$$w = |-l_3 l_4 (l_2 + l_3 \cos q_2 + l_4 \cos(q_2 + q_3)) \sin q_3| \quad (10)$$

Z opisanim postopkom za prikazovanje 3D-delovnega prostora industrijskega robota z vrisanim parametrom hitrostne anizotropije dobimo orodje, ki je primerno za konstruktorje proizvodnih sistemov, prav tako pa za programerje obdelovalnih procesov z roboti, kajti za vsako točko delovnega prostora je sedaj znana robotova gibljivost in sposobnost izpeljati določen proces zahtevam primerno. Za obravnavani IR je na *sliki 4* prikazana izometrična projekcija delovnega prostora z vrisano hitrostno



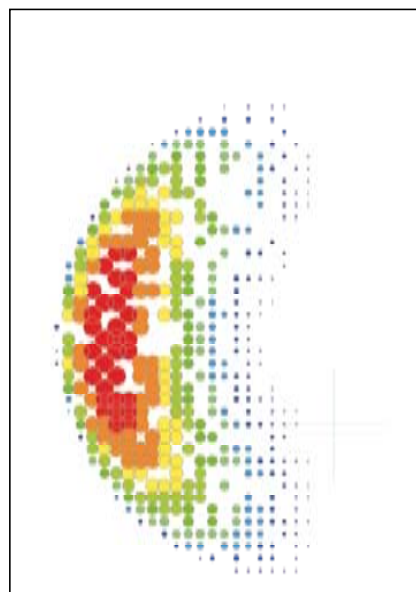
Slika 5. Presek skozi delovni prostor v X-Y ravnini (horizontalna ravnina)



Slika 4b. Absolutna barvna razdelitev gibljivosti od največje (1,0) do najmanjše (0,0) vrednosti

anizotropijo. Prostor je tridimenzionalen, torej imamo težavo videti, kakšna je struktura prostora v notranjosti, zato nam izbrani CAD-programski paket omogoča izdelati prereze prostora kjer koli, tako da je možen zelo preprost in nazoren vpogled v samo strukturo delovnega prostora, kot je prikazano na *slikah 5* in *6*.

Grafična podpora predstavitve hitrostne anizotropije je izdelana z izbranim CAD-programskim paketom. Podatke za željeni industrijski robot naložimo preko programskega vmesnika iz MS Excelove datoteke.



Slika 6. Presek skozi delovni prostor v X-Z ravnini (vertikalna ravnina)

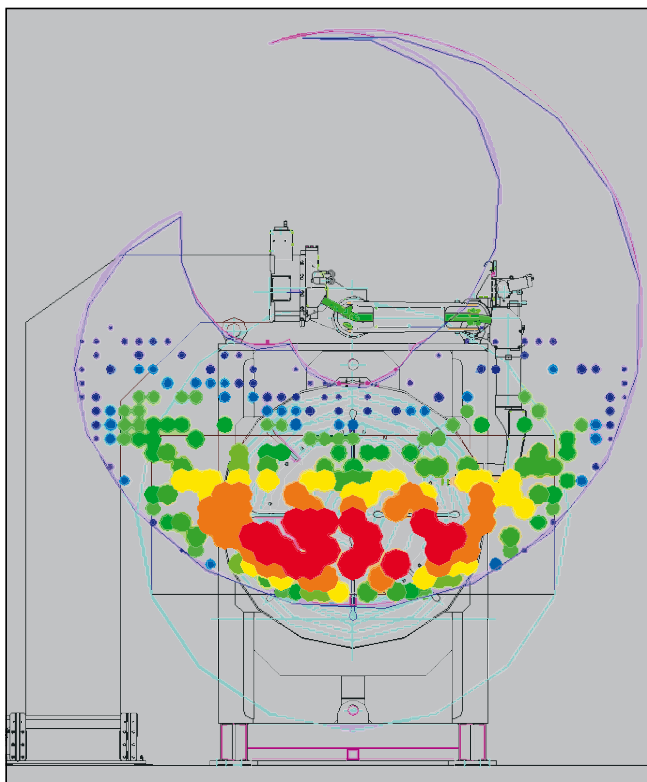
Po vključitvi ukaza za izris hitrostne anizotropije v načrtovanem programskem vmesniku dobimo rezultat izrisa, ki je prikazan v grafičnem oknu programske opreme (*slika 4a*). Krogle, ki predstavljajo hitrostno anizotropijo, so razporejene po definiranih ravninah glede na njihov radij. Barvni spekter predstavlja določeno vrednost radija, s katerim lahko ustvarimo različno kombinacijo vidnosti ravnin in s tem prikaz različnih hitrostnih anizotropij.

6 Sklep

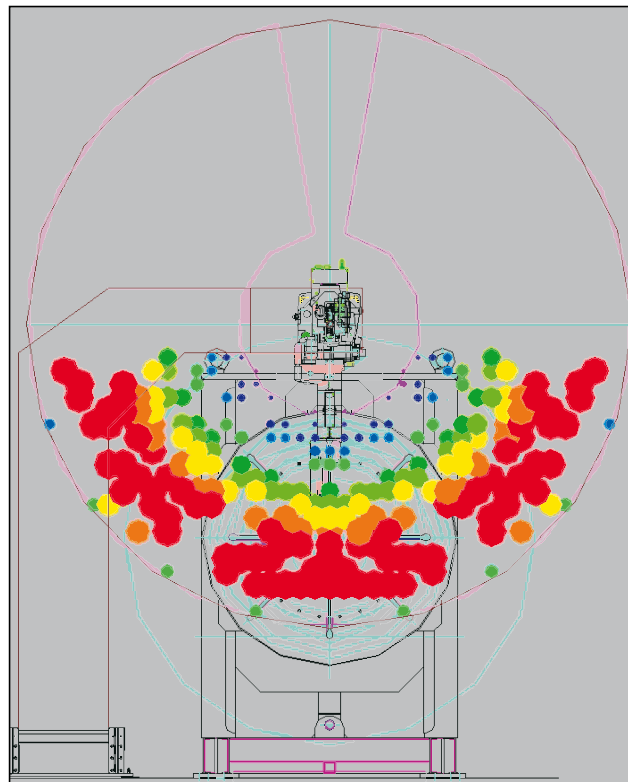
Grafična predstavitev hitrostne anizotropije je zelo uporabno orodje pri načrtovanju robotiziranih proizvodnih sistemov, posebej v primerih, kjer bo robot direktno vključen v tehnološke operacije. Omogoča odličen vpogled v strukturo delovnega prostora, in tako postane izbira območja delovanja lažja, povsod tam, kjer bo robot izvajal določene tehnološke operacije, pri katerih so razen natančnega vodenja TCP pomembni tudi drugi tehnološki kriteriji. Za nazorno ilustracijo opisanega sta na *slikah 7* in *8* prikazani dve varianti robotizirane varilne celice, kjer je robot na *sliki 7* postavljen prečno na obdelovanec, na *sliki 8* pa vzdolžno na obdelovanec. S *slik* se vidi, v katerem območju bo robot deloval z večjo (rdeče pike) in kje z manjšo gibljivostjo. V območjih manjše gibljivosti je pri programiranju tirnic možno pričakovati težave sledenja TCP dani nalogi. Nastalemu problemu se lahko izognemo s pravilno postavitvijo robota glede na hitrostno anizotropijo.

Viri

- [1] ISO 8373: 1994: Manipulating industrial robots – Vocabulary.
- [2] Botturi, D., Martelli, S., Fiorini, P.: A geometric method for robot workspace computation, Proceedings of »International conference on autonomous robots and system (ICAR), 2003.
- [3] Autodesk Inventor Suite 2008 EE License, 52712-091462-9540, C4645079, 2008.
- [4] Angeles, J.: Rational kinematics, New York, Springer-Verlag, 1988.



Slika 7. Proizvodna celica z robotom, postavljenim prečno glede na obdelovanec



Slika 8. Proizvodna celica z robotom, postavljenim vzdolžno glede na obdelovanec

- [5] Lenarčič, J., Bajd, T.: Robotic mechanisms, 1. ed., Ljubljana, Fakulteta za elektrotehniko, 2003.
- [6] Yoshikava, T.: Manipulability of robotic mechanisms, The Int. J. Robotics Res. 4/1985/2, str. 3–9.
- [7] Gotlih, K., Kovač, D., Vuherer, T., Brezovnik S., Brezočnik, M., Zver, A.: Velocity anisotropy of an industrial robot, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27/2011/1, str. 205–211.
- [8] Elkady, A., Y., Mohammed, M., Sobh, T.: A new algorithm for measuring and optimizing the manipulability index, J Intell Robot Sys, DOI 10.1007/s10846-009-9388-9.
- [9] Kucuk, S., Bingul Z.: Robot workspace optimization based on a novel local and global performance indices, IEEE ISIE 2005, Dubrovnik, str. 1593–1598.
- [10] Mansouri, I., Ouali, M.: The power manipulability – A new homogeneous performance index of robot manipulators, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, (2010), DOI 10.1016/j.rcim.2010.09.004.
- [11] Almega AX Series, Daihen Corporation, CAT.No.R20503, Osaka 566-0021, 2006.

Mobility of robot systems in machining processes

Abstract: Industrial robots are part of production systems and it is important to place them into the system according to requirements and their properties and behaviour. The information, obtained from the technical sheets of robots, about workspace (its dimensions and shape) is insufficient for designing the production system. The information about mobility is missing. To represent the behaviour of the robot in the workspace, velocity anisotropy of the robot is introduced and defined as the normalised length of the shortest velocity ellipsoid axes which can be constructed in the tool centre point (TCP) for any position of robot. A graphical discrete representation of the 3D workspace with included velocity anisotropy is then performed. The advantages of the developed graphical representation are presented on a workspace example for a commercial industrial robot.

Key words: industrial robot, workspace, velocity anisotropy