

Ocenjevanje kinematične izvedljivosti robotske naloge za sinhrono translacijsko in rotacijsko gibanje po površini obdelovanca

Saša Stradovnik, Aleš Hace

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru

Koroška cesta 46, 2000 Maribor

E-pošta: sasa.stradovnik@um.si, ales.hace@um.si

Task-oriented kinematic feasibility evaluation for synchronous translational and rotational robot motion on workpiece surface

Abstract. *When it comes to the collaborative robots, the margin between the actuation capabilities of the robot and task requirements is largely reduced with respect to classical industrial robots. Therefore, a detailed understanding of the motion capabilities of collaborative robots in their workspace is crucial for the successful planning and execution of the robotic task, especially in the context of more complex surface machining applications.*

In the past, various robot performance indices have been developed to measure and qualify the characteristics of the robot workspace. However, most of them do not consider maximum capabilities of the individual joint. In this paper, a new task-oriented kinematic feasibility index is presented, which is used as a qualitative criterion for optimal workpiece placement. The efficiency of the proposed method is demonstrated using a surface machining application with the UR5 collaborative robot as an example.

1 Uvod

Natančno poznavanje sposobnosti premikanja robota znotraj njegovega delovnega prostora je ključnega pomena pri uspešnem načrtovanju in izvedbi kompleksnejših robotskih nalog. Z razvojem kolaborativnih robotov je razmerje med sposobnostmi premikanja in zahtevami naloge v primerjavi s klasičnimi industrijskimi roboti močno zmanjšano. Omejene kinematične in dinamične sposobnosti ter želja po fleksibilnem in avtonomnem delovanju pa povečujejo zanimanje po sistemih za optimizacijo njihovega premikanja.

Kvalitativni opis sposobnosti premikanja robota znotraj njegovega delovnega prostora je bil skozi zgodovino razvoja robotike predstavljen z različnimi metodami. Večina le-teh temelji na analizi elipsoida manipulabilnosti [1] in se nanaša bodisi na splošno analizo delovnega prostora [2] ali pa obravnava konkretno robotsko nalogo in sposobnosti premikanja ocenjuje na podlagi obravnavane konfiguracije in želene smeri premikanja [3]. Kljub temu, da so te metode med

raziskovalci zelo uveljavljene, se je izkazalo, da ne podajajo povsem natančnih zmožnosti premikanja robota [4, 5].

V članku vpeljemo nov indeks kinematične izvedljivosti na podlagi katerega lahko kvalitativno ocenjujemo maksimalne kinematične zmogljivosti robota glede na podane tehnološke zahteve kompleksnih robotskih nalog, ki zahtevajo sinhrono translacijsko in rotacijsko gibanje robota. Na podlagi vrednosti tega indeksa lahko kvalitativno ovrednotimo kinematično izvedljivost robotske naloge za izbrano lego obdelovanca in s preiskovanjem delovnega prostora robota določimo kinematično optimalno lego obdelovanca za katero bo robotska naloga uspešno izvedljiva brez predhodne časovno potratne simulacije robotske naloge in prilagajanja tehnoloških parametrov.

V nadaljevanju predstavimo zahteve robotske naloge za površinsko obdelavo iz katerih izhajamo pri ocenjevanju kinematične izvedljivosti robotske naloge. Za potrebe ocenjevanja izpeljemo nov indeks na podlagi katerega izrišemo barvno mapo v obravnavanem delovnem prostoru robota UR5 ter verificiramo učinkovitost metode na podlagi primerjave sklepnih hitrosti dveh različnih leg obdelovanca.

2 Zahteve robotske naloge za površinsko obdelavo

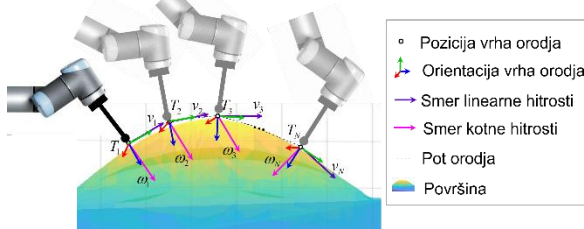
Natančno sledenje obliki geometrijsko kompleksne površine predstavlja eno izmed kompleksnejših robotskih nalog, saj zahteva premikanje vrha orodja po površini obdelovanca s konstantno linearno hitrostjo in sinhrono spreminjanje orientacije z namenom zagotavljanja pravokotnosti orodja na površino. Če želimo oceniti in optimizirati sposobnosti robota za sledenje površini z iskanjem najbolj ugodne lege obdelovanca, je potrebno najprej poznati njene natančne tehnološke zahteve.

2.1 Pozicija in orientacija referenčnih točk

Tehnološka pot po površini geometrijsko razgibanega obdelovanca je sestavljena iz povezanega niza diskretnih referenčnih leg vrha robota, ki jih lahko opišemo s homogenimi transformacijskimi matrikami 4×4 :

$$\{T_i | T_i = (p_i, R_i) \in SE(3), i \in \{1, \dots, N\}\}, \quad (1)$$

kjer $p_i \in \mathbb{R}^3$ predstavlja pozicijo vrha orodja, $R_i \in SO(3)$ njeno orientacijo in N število vseh definiranih referenčnih leg na tehnološki poti. Pozicije leg so določene tako, da so le-te enakomerno razporejene po površini, njihova orientacija pa je v vsaki točki definirana pravokotno na površino, kot v prerezu prikazuje slika 1.



Slika 1 Pozicija in orientacija referenčnih točk ter smer linearne in kotne hitrosti

2.2 Smer linearne in kotne hitrosti v referenčnih točkah

Večina postopkov površinske obdelave zahteva premikanje vrha orodja po površini s konstantno linearno hitrostjo. Če se želimo v vsaki definirani referenčni legi robota, opisani z (1), premikati s konstantno linearno hitrostjo, je potrebno v zahtevanem časovnem intervalu opraviti ustrezno spremembo pozicije z linearno hitrostjo $v_i \in \mathbb{R}^3$ in obenem tudi ustrezno spremembo orientacije s kotno hitrostjo $\omega_i \in \mathbb{R}^3$, kar opišemo z vektorjem zasuka v_i :

$$v_i = [v_i \quad \omega_i]^T \in \mathbb{R}^6. \quad (2)$$

Linearna hitrost $v_i \in \mathbb{R}^3$ je določena z velikostjo $V_i \in \mathbb{R}$ in s smerjo $u_i^v \in \mathbb{R}^3$, kot prikazuje slika 1:

$$v_i = V_i \cdot u_i^v, \quad (3)$$

kjer je $V_i = \|v_i\|_2$ in $u_i^v = v_i / \|v_i\|_2$. Podobno je kotna hitrost določena z velikostjo $\Omega_i \in \mathbb{R}$ in s smerjo $u_i^\omega \in \mathbb{R}^3$, kot prikazuje slika 1:

$$\omega_i = \Omega_i \cdot u_i^\omega, \quad (4)$$

kjer je $\Omega_i = \|\omega_i\|_2$ in $u_i^\omega = \omega_i / \|\omega_i\|_2$.

3 Kinematična izvedljivost robotske naloge

Čprav lahko robot vsako točko svojega priročnega delovnega prostora doseže s poljubno orientacijo, je potrebno za zagotavljanje izvedljive robotske naloge upoštevati tudi kinematične omejitve robota. Kinematično izvedljivost robotske poti lahko zagotavljamo zgolj na način, da podane tehnološke zahteve robotske naloge ne presegajo razpoložljivih kinematičnih sposobnosti robota.

3.1 Kinematična manipulabilnost

Direktna hitrostna kinematika robotskega mehanizma za konfiguracijo $q \in \mathbb{R}^n$ opisuje povezavo med vektorjem zasuka $v \in \mathbb{R}^m$ in sklepni hitrostmi $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ preko Jacobijeve matrike $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$:

$$v = J(q)\dot{q}. \quad (5)$$

Merilo za učinkovitost preslikave hitrosti iz notranjega v zunanji prostor robota in s tem povezane sposobnosti premikanja vrha robota podaja Yoshikawin indeks manipulabilnosti [1] v obliki:

$$w = \sqrt{\det(JJ^T)}. \quad (6)$$

Vrednost indeksa ocenjuje gibljivost obravnavane robotske konfiguracije in je neodvisna od želene smeri premikanja ter na ta način zgolj v grobem ocenjuje bližino do singularne lege.

Sposobnost premikanja robota v smeri določeni z vektorjem $u \in \mathbb{R}^m$ lahko podamo s smernim kinematičnim indeksom manipulabilnosti w_{dir} [3]:

$$w_{dir} = [u^T (JJ^T)^{-1} u]^{-1/2}, \quad (7)$$

kjer je $u = v / \|v\|_2$ (in $m = 6$). Kadar ocenjujemo kinematično sposobnost premikanja robota, imamo v mislih sposobnost dovajanja linearne in kotne hitrosti. Smerni kinematični indeks manipulabilnosti podaja sposobnost dovajanja linearnih in kotnih hitrosti v obliki ene, skupne skalarne vrednosti, vendar pri izračunu norme vektorja zasuka v prihaja do neželenega mešanja enot translacije in rotacije. Problem nekonsistentnosti enot v hibridnem prostoru hitrosti mnogo študij sploh ne izpostavi [3]. Nekateri avtorji to rešujejo z metodami, ki vključujejo uvedbo utežnostnih faktorjev [5, 6], vendar ne ponujajo univerzalne rešitve, saj izbira njihovih vrednosti ostaja arbitrarna. Zato bomo v nadaljevanju predstavili nov indeks kinematične izvedljivosti, ki ocenjuje sposobnosti premikanja robota glede na maksimalne razpoložljive sklepne hitrosti.

3.2 Indeks kinematične izvedljivosti

Če obravnavamo ne-redundantni robotski mehanizem ($m = n$), lahko inverzno hitrostno kinematiko izrazimo:

$$\dot{q} = J^{-1}(q)v. \quad (8)$$

Kadar analiziramo premik robota bo le-ta kinematično izvedljiv pod pogojem, da potrebne sklepne hitrosti $\dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]^T \in \mathbb{R}^n$ ne bodo presegle maksimalnih limit sklepnih hitrosti $\dot{q}_{\max} = [\dot{q}_1^{\max}, \dot{q}_2^{\max}, \dots, \dot{q}_n^{\max}] \in \mathbb{R}^n$ v nobenem izmed n sklepov:

$$-\dot{q}_j^{\max} \leq \dot{q}_j \leq \dot{q}_j^{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

Maksimalno absolutno vrednost elementov vektorja sklepne hitrosti \dot{q} lahko zapišemo tudi v obliki neskončne norme:

$$\|\dot{q}\|_\infty = \max\{|\dot{q}_1|, |\dot{q}_2|, \dots, |\dot{q}_n|\}. \quad (10)$$

Če z matriko uteži $W_{\dot{q}} = \text{diag}\{(\dot{q}_1^{\max})^{-1}, \dots, (\dot{q}_n^{\max})^{-1}\}$ upoštevamo maksimalne sklepne hitrosti posameznega sklepa, lahko neenačbo (9) z upoštevanjem (10) in (11)

$$\tilde{q} = W_{\dot{q}} \dot{q} \quad (11)$$

preoblikujemo v normirano obliko:

$$\|\tilde{q}\|_\infty \leq 1. \quad (12)$$

Inverzno Jacobijevo matriko J lahko razčlenimo na translacijski del P_v in rotacijski del P_ω (kot v [5]):

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} P_v & P_\omega \end{bmatrix}, \quad (13)$$

kjer je $P_v \in \mathbb{R}^{n \times 3}$ in $P_\omega \in \mathbb{R}^{n \times 3}$. Z upoštevanjem (13) in (2) normirane sklepne hitrosti \tilde{q} zapišemo kot normirano vsoto sklepnih hitrosti, ki povzročijo spremembo pozicije $\tilde{q}_v \in \mathbb{R}^6$ in spremembo orientacije $\tilde{q}_\omega \in \mathbb{R}^6$:

$$\tilde{q} = W_{\dot{q}} \begin{bmatrix} P_v & P_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \tilde{P}_v v + \tilde{P}_\omega \omega = \tilde{q}_v + \tilde{q}_\omega, \quad (14)$$

kjer je $\tilde{q}_v = \tilde{P}_v v$ in $\tilde{q}_\omega = \tilde{P}_\omega \omega$. Neenačbo (12) potem preoblikujemo v:

$$\|\tilde{q}\|_\infty = \|\tilde{q}_v + \tilde{q}_\omega\|_\infty \leq 1. \quad (15)$$

Na podlagi tega lahko izraz (12) zapišemo kot:

$$\|\tilde{P}_v v + \tilde{P}_\omega \omega\|_\infty \leq 1. \quad (16)$$

Za potrebe aplikacije sledenja površini, kjer je zahtevano sinhrono translacijsko in rotacijsko gibanje robota bomo uvedli nov indeks kinematične izvedljivosti na podlagi katerega lahko ocenjujemo sposobnosti premikanja vrha robota v želeni smeri glede na maksimalne razpoložljive sklepne hitrosti. Pri tem naj bo razmerje med velikostjo linearne in kotne hitrosti definirano s $h \in \mathbb{R}$:

$$h = V / \Omega. \quad (17)$$

Njegova vrednost je določena z geometrijo površine in je neodvisna od kinematičnega skaliranja robotske trajektorije. Indeks kinematične izvedljivosti definiramo ob predpostavki, da velja $\|\tilde{q}\|_\infty = 1$ in ga izračunamo:

$$\mu_{dir} = \|\tilde{P}_v v + \tilde{P}_\omega h^{-1} \omega\|_\infty^{-1}. \quad (18)$$

Vrednost indeksa kinematične izvedljivosti μ_{dir} predstavlja maksimalno velikost linearne hitrosti V_{\max} , ki za premik v smeri določeni z u^v ne bo povzročila

preseganja maksimalnih sklepnih hitrosti v nobenem izmed sklepov. Višja kot je vrednost indeksa, z višjo hitrostjo lahko robot izvede premik v obravnavani smeri.

3.3 Ocenjevanje kinematične izvedljivosti robotske naloge

Kadar analiziramo kinematično izvedljivost v naprej definirane robotske poti, podane z nizom diskretnih leg robota (1), je potrebno preučiti kinematične sposobnosti robota glede na podane zahteve robotske naloge v vsaki izmed N leg na celotni robotski poti in jih, z namenom iskanja najbolj ugodne lege obdelovanca, za podano lego obdelovanca predstaviti v obliki ene skalarne vrednosti.

Če predpostavimo konstantno linearno hitrost robota na celotni poti in kotno hitrost, ki je določena predvsem z razgibanostjo površine, lahko zagotavljamo kinematično izvedljivost robotske naloge zgolj s takšnim kinematičnim skaliranjem, ki pri preslikavi v sklepni prostor ne bo povzročil preseganja maksimalnih kinematičnih sposobnosti robota t.j. limit sklepnih hitrosti $\dot{q}_{\max} \in \mathbb{R}^n$ v nobeni izmed N leg na robotski poti. Ker je verjetnost za prekoračitev limit sklepnih hitrosti največja v legi, kjer so sposobnosti premikanja robota glede na podane zahteve naloge najslabše (najnižja vrednost indeksa kinematične izvedljivosti), vzamemo kot merilo za ocenjevanje kinematične izvedljivosti celotne robotske naloge minimalno vrednost indeksa kinematične izvedljivosti glede na vse obravnavne referenčne lege na robotski poti:

$$\mu_{dir}^{path} = \min(\mu_{dir}(i)), \quad i = 1, \dots, N. \quad (19)$$

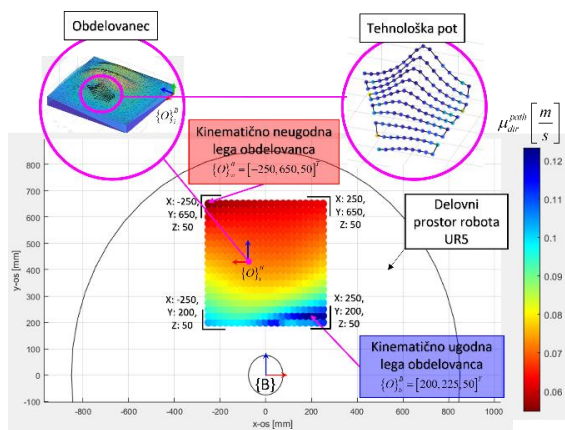
4 Rezultati

S ciljem iskanja kinematično optimalne lege obdelovanca smo učinkovitost metode prikazali na primeru robotske naloge sestavljene iz 133 točk. Tekom kinematične analize delovnega prostora robota, smo obdelovanec premikali s korakom 20 mm v x-y ravnini obravnavanega delovnega prostora robota UR5, ki zajema prostor v območju $x = -250 \text{ mm} \dots 250 \text{ mm}$, $y = 250 \text{ mm} \dots 650 \text{ mm}$ in $z = 100 \text{ mm}$ relativno glede na bazni koordinatni sistem robota {B}, kot prikazuje slika 2. Za vsako posamezno lego obdelovanca smo izračunali obravnavani indeks kinematične izvedljivosti robotske poti μ_{dir}^{path} na podlagi vrednosti katerega smo obravnavani točki delovnega prostora dodelili pripadajočo barvo in na ta način grafično prikazali karakteristiko kinematično optimalne postavitve obdelovanca v primeru, da koordinatni sistem obdelovanca {O} postavimo v obravnavano točko.

4.1 Barvna mapa izvedljivosti robotske naloge

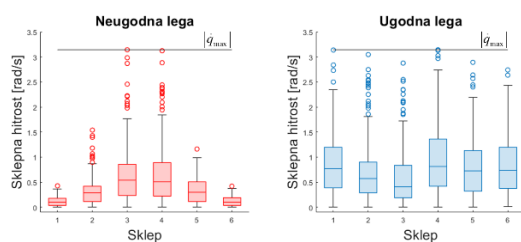
Barvna mapa izvedljivosti robotske naloge, ki je prikazana na sliki 2, predstavlja barvno ponazoritev izvedljivosti v naprej definirane robotske naloge v diskretiziranem delovnem prostoru robota, ki nam je v pomoč pri optimalni postavitvi obdelovanca. Področja v delovnem prostoru robota, ki so obarvana z rdečo barvo, predstavljajo območja z najnižjo vrednostjo indeksa

kinematične izvedljivosti robotske naloge μ_{dir}^{path} . To pomeni, da bo robotska naloga za to lego obdelovanca izvedljiva zgolj z najnižjo linearno hitrostjo. Medtem ko modro obarvana področja predstavljajo kinematično najbolj ugodna območja, saj je vrednost opisanega indeksa najvišja. To pomeni, da bo robotska naloga za to lego obdelovanca izvedljiva z najvišjo linearno hitrostjo, ne da bi bile presežene limite sklepnih hitrosti.



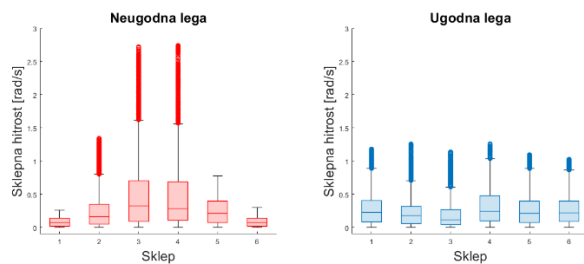
Slika 2 Barvna mapa izvedljivosti robotske naloge

Da bi lahko potrdili učinkovitost predstavljene metode, smo izračunali sklepne hitrosti za dve različni legi obdelovanca. V prvem primeru smo izbrali kinematično najmanj ugodno lego (rdeče) in v drugem kinematično najbolj ugodno lego (modro), glede na barvno mapo prikazano na sliki 2. S škatličnega diagrama na sliki 3 je razvidno, da so v obeh primerih dosežene maksimalne vrednosti sklepnih hitrosti, vendar je linearna hitrost pri kateri jih dosežemo v primeru kinematično neugodne lege ($V=0.0548 \text{ m/s}$) za več kot polovico nižja od linearne hitrosti v primeru kinematično ugodne lege ($V=0.1233 \text{ m/s}$).



Slika 3 Primerjava sklepnih hitrosti pri maksimalni linearni hitrosti v kin. neugodni (levo) in ugodni legi (desno)

Z namenom verifikacije smo opravili še eksperiment v simulacijskem okolju URSim. Obe robotski trajektoriji smo izvedli z enako linearno hitrostjo (50 mm/s), ki ne presega kinematične zmogljivosti robota v nobeni izmed obravnavanih leg. Primerjavo absolutnih vrednosti sklepnih hitrosti, prikazano na sliki 4, smo predstavili v obliki škatličnega diagrama. Za razliko od velikosti sklepnih hitrosti kinematično neugodne lege obdelovanca, kjer lahko opazimo izrazito obremenitev 3. in 4. sklepa, so velikosti sklepnih hitrosti v primeru kinematično ugodne lege znatno nižje, posamezni sklepi pa bolj enakovredno obremenjeni.



Slika 4 Primerjava sklepnih hitrosti kinematično neugodne (levo) in ugodne (desno) lege obdelovanca

5 Zaključek

Na podlagi rezultatov primerjave sklepnih hitrosti je razvidno, da lahko enako tehnološko pot opravimo z bistveno nižjimi sklepnimi hitrostmi, če poznamo kinematično optimalno lego obdelovanca. V pomoč pri tem nam je indeks kinematične izvedljivosti robotske poti μ_{dir}^{path} , ki smo ga izpeljali v članku. Le-ta nam podaja maksimalno vrednost linearne hitrosti robotske poti pri kateri ne bodo presežene limite sklepnih hitrosti v nobenem izmed sklepov. Ključna prednost predstavljenega indeksa v primerjavi s smernim indeksom kinematične manipulabilnosti je v tem, da upošteva maksimalne sklepne hitrosti posameznih sklepov. S takšno analizo lahko s preiskovanjem delovnega prostora robota poiščemo kinematično najbolj optimalno lego obdelovanca in na ta način dosežemo maksimalno izkoriščenost zmožnosti robota glede na podane zahteve robotske naloge.

Ker pa izvedljivost robotske naloge ni omejena samo s kinematičnimi zmožnostmi robota, bomo v nadaljnjem delu vključili tudi njegove dinamične omejitve, kot so limite sklepnih navorov in pospeškov.

Literatura

- [1] T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, 1985.
- [2] Nikolaus Vahrenkamp and T. Asfour, "Representing the Robot's Workspace through Constrained Manipulability Analysis," 2014.
- [3] S. Chiu, "Task Compatibility of Manipulator Postures," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 7, no. 5, pp. 13-21, 1988.
- [4] H. B. Choi and J. Ryu, "Convex Hull-based Power Manipulability Analysis of Robot Manipulators," (in English), *2012 Ieee International Conference on Robotics and Automation (Icra)*, pp. 2972-2977, 2012.
- [5] R. Finotello, T. Grasso, G. Rossi, and A. Terribile, "Computation of kinetostatic performances of robot manipulators with polytopes," presented at the Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998.
- [6] A. Nektarios and N. A. Aspragathos, "Optimal location of a general position and orientation end-effector's path relative to manipulator's base, considering velocity performance," (in English), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 26, no. 2, pp. 162-173, Apr 2010.