

Vpliv kinematičnih indeksov manipulabilnosti na sposobnost izvedbe trajektorije orodja z robotom UR5

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

The influence of kinematic manipulability indices on the execution of the tool trajectory with the robot UR5

Abstract. *A detailed understanding of the movement capability of robots in their workspace is crucial for the successful planning and execution of complex robot tasks. The importance of the feasibility of robot tasks, which is determined by singularities, kinematic and dynamic limits or collisions, receives even more attention with the development of intelligent collaborative robotic systems.*

In the past, different robot performance indices have been developed to measure and qualify the different characteristic of the robot workspace. However, when planning a specific robot task, its actual influence on the kinematic ability to perform a robot task is questioned. In this paper an approach to compare different manipulability indices based on measurable kinematic characteristic during task execution is presented in order to optimally position the workpiece relative to the robot base frame. In this way, we can increase the probability of a successfully executed robot task, reduce the time required for its planning and achieve a more accurate execution.

1 Uvod

Kadar opisujemo delovni prostor robota, ga po navadi v grobem opišemo s pomočjo dosegljivega in priročnega delovnega prostora [1]. Dosegljiv delovni prostor robota obsega volumen okrog robota, ki ga lahko robot doseže z vsaj eno od vseh možnih orientacij. Čeprav lahko robot znotraj priročnega delovnega prostora, ki je podmnožica dosegljivega delovnega prostora, doseže posamezno točko s poljubno orientacijo, je pri načrtovanju robotske naloge ključnega pomena tudi poznavanje drugih parametrov, ki pomembno vplivajo na njeno izvedljivost. Pogosto se lahko zgodi, da robot prekorači svoje kinematične in dinamične limite, kot so položajne sklepne limite, limite sklepnih hitrosti, pospeškov ali navorov. Lahko se tudi zgodi, da je gibljivost robotskega mehanizma močno zmanjšana v primeru, da se konfiguracija robota nahaja v bližini singularne lege ali pa neizvedljivost robotske trajektorije povzročijo kolizije robota samega s sabo ali z njegovo okolico.

Da bi lahko natančneje opisali delovni prostor robota so bili razviti t.i. robotski performančni indeksi s katerimi lahko merimo in kvalificiramo različne karakteristike delovnega prostora robota [2]. Pogosto se nanašajo na splošno analizo delovnega prostora, v tem članku pa se

osredotočimo na obravnavo indeksov, ki se nanašajo na konkretno pot gibanja orodja na robotu UR5. Sposobnost premikanja in gibljivosti v njegovem delovnem prostoru analiziramo za potrebe aplikacij natančnega sledenja obliki površine. Le-te predstavljajo eno izmed kompleksnejših nalog za robota, saj jih večina zahteva generiranje konstantne hitrosti gibanja orodja, ohranjanje pravokotne orientacije orodja na površino tekom izvajanja robotske trajektorije ter zagotavljanje zadostne togosti pravokotno na smer gibanja. Naš namen v tem članku je zasnovati kvalitativno vrednotenje poti pri obravnavi znane robotske naloge na podlagi različnih indeksov manipulabilnosti poti, s katerimi lahko potem načrtujemo optimalno postavitev obdelovanca. Pri tem vpeljemo nov utežen indeks smerne manipulabilnosti poti, primerjamo njegov vpliv na kinematične sposobnosti robota pri izvajanju podane robotske trajektorije z drugimi opisanimi indeksi manipulabilnosti poti ter ovrednotimo kateri izmed njih nam daje najbolj optimalne rezultate s stališča kinematičnih sposobnosti robota.

V nadaljevanju predstavimo različne izpeljanke kinematičnih indeksov manipulabilnosti na podlagi katerih lahko izrišemo barvne mape optimalne postavitve obdelovanca v območju obravnavanega delovnega prostora robota. Vpliv definiranih indeksov verificiramo z zajemom sklepnih hitrosti in na ta način ocenimo, kateri izmed njih daje najboljše rezultate pri obravnavi znane robotske naloge.

2 Indeksi kinematične manipulabilnosti

Kot je že znano, prenos gibanja od posameznega aktuatorja ne povzroči enakih hitrosti gibanja vrha robota v vseh točkah delovnega prostora. Prenos gibanja je odvisen predvsem od strukture in geometrije mehanizma, zato lahko robotski mehanizem zelo poenostavljeno obravnavamo kot prenosnik moči s spreminjajočim se prenosnim razmerjem. Skalarno predstavitev prenosa sklepnih hitrosti na hitrosti vrha robota opisuje indeks kinematične manipulabilnosti w , ki ga je prvi vpeljal Yoshikawa [3]:

$$w = \sqrt{\det(J(q)J(q)^T)} \quad (1)$$

Njegova vrednost podaja sposobnost spreminjanja pozicije vrha robota glede na spreminjanje pozicije sklepov pri premiku v poljubni smeri in na ta način nekako podaja bližino do singularne konfiguracije robota. Konfiguracija robota z boljšo manipulabilnostjo zahteva nižje sklepne hitrosti pri premiku z enako

hitrostjo vrha robota. Opisuje gibljivost točno določene konfiguracije robota v njegovem delovnem prostoru in je neodvisna od obravnavane poti. Z uporabo singularnega razcepa ga lahko opišemo tudi kot produkt singularnih vrednosti Jacobijeve matrike.

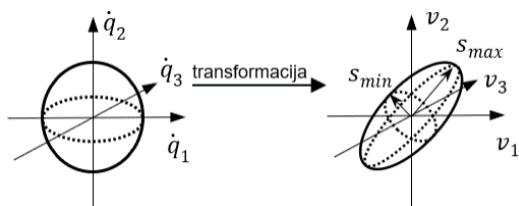
$$J = U\Sigma V^T \quad (2)$$

$$\Sigma = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_m) \quad (3)$$

$$s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_m \geq 0 \quad (4)$$

$$w = \prod_{i=1}^m s_i \quad (5)$$

pri čemer U in V predstavljata ortogonalni matriki ter Σ diagonalno matriko singularnih vrednosti s_i . Singularne vrednosti Jacobijeve matrike določajo tudi glavne osi hitrostnega elipsoida v posamezni točki, ki nastane kot rezultat transformacije hitrostne hipersfere iz prostora notranjih koordinat v elipsoid v prostoru zunanjih koordinat, kot je prikazano na sliki 1. Glavne osi elipsoida predstavljajo smeri v katerih ima robotski mehanizem najboljše oz. najslabše sposobnosti generiranja hitrosti in sil.



Slika 1. Hitrostni elipsoid manipulabilnosti

V nadaljevanju predstavimo indekse manipulabilnosti za obravnavo celotne robotske poti.

Indeks kinematične manipulabilnosti poti

Za razliko od splošnega indeksa w , indeks kinematične manipulabilnosti poti w^{path} definiramo kot aritmetično sredino manipulabilnosti točk po celotni poti.

$$w^{path} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w(k) \quad (6)$$

N predstavlja število vseh kontrolnih točk na poti.

Smerni translacijski indeks kinematične manipulabilnosti poti

Sposobnost generiranja translacijskih hitrosti vrha robota ni odvisna le od položaja vrha robota v njegovem delovnem prostoru, temveč tudi od smeri v kateri se robot premika. To karakteristiko lahko najbolj interpretabilno predstavimo s pomočjo prej omenjenega hitrostnega elipsoida manipulabilnosti. Sposobnost generiranja hitrosti v smeri podani z vektorjem u določimo z indeksom smerne manipulabilnosti w_{dir} , ki je proporcionalen dolžini daljice od centra elipsoida do točke na površini elipsoida v tej smeri [4].

$$w_{dir} = \left[u^T (J(q)J(q)^T)^{-1} u \right]^{-1/2} \quad (7)$$

Pri obravnavi točno določene poti orodja računamo aritmetično sredino smerne translacijskega indeksa manipulabilnosti w_{dir}^{path} po celotni poti.

$$w_{dir}^{path} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w_{dir}(k) \quad (8)$$

pri čemer N predstavlja število vseh kontrolnih točk na robotski poti.

Indeks minimalne singularne vrednosti poti

Rezultat singularnega razcepa Jacobijeve matrike predstavlja produkt treh matrik, pri čemer diagonala matrike singularnih vrednosti Σ vključuje singularne vrednosti obravnavane matrike. Skalarna vrednost minimalne singularne vrednosti je proporcionalna najkrajši osi hitrostnega elipsoida manipulabilnosti. Indeks minimalne singularne vrednosti poti orodja s_{min}^k predstavlja aritmetično sredino minimalne singularne vrednosti točk, pri čemer N predstavlja število vseh kontrolnih točk na robotski poti.

$$w_s^{path} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s_{min}(k) \quad (9)$$

Utežen smerni translacijski indeks kinematične manipulabilnosti poti

Kljub temu, da je aritmetična sredina zelo občutljiva na ekstremne vrednosti, se lahko zgodi, da robotska pot z visoko vrednostjo povprečne smerne manipulabilnosti, vključuje tudi kritične točke v katerih bi lahko prišlo do prekoračitve kinematičnih ali dinamičnih limit robota. Le-te bi lahko povzročile neizvedljivost robotske naloge. To se lahko zgodi predvsem kadar je pot orodja sestavljena iz premikov v različnih smereh, saj ima robot v različnih smereh različne zmožnosti. V ta namen želimo iz obravnave izločiti točke v katerih je vrednost minimalne smerne manipulabilnosti poti nižja od tiste, ki bi lahko povzročila neizvedljivost robotske naloge. Indeks iz enačbe (8) zato modificiramo kot:

$$w_{dir}^{path} = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w_{dir}(k), & w_{dir}(k) > w_{dir}^{min} \\ 0, & \text{sicer} \end{cases} \quad (10)$$

V vseh ostalih točkah želimo, da bi bil padec smerne translacijskega indeksa manipulabilnosti čim manjši. S tem namenom uvedemo nov kriterij ocenjevanja kvalitete poti, ki se nanaša na relativni enostranski odklon smerne manipulabilnosti $\sigma_{L,rel}$, kjer v izračun vključimo samo vrednosti pod aritmetično sredino.

$$\sigma_{L,rel} = \frac{1}{w_{dir}^{path}} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (w_{dir}(k) - w_{dir}^{path})^2}{N}} \quad (11)$$

Vrednost relativnega standardnega odklona smerne manipulabilnosti normiramo glede na celoten delovni prostor in tako oblikujemo utež $\sigma_{L,rel}^{norm}$,

$$\sigma_{L,rel}^{norm} = (\sigma_{L,rel} - \sigma_{L,rel}^{max}) / (\sigma_{L,rel}^{min} - \sigma_{L,rel}^{max}) \quad (12)$$

kjer maksimalna (minimalna) vrednost $\sigma_{L,rel}^{max}$ ($\sigma_{L,rel}^{min}$) predstavlja največji (najmanjši) odklon od povprečnega indeksa v obravnavanem prostoru. Utežen smerni indeks manipulabilnosti poti definiramo v obliki (13).

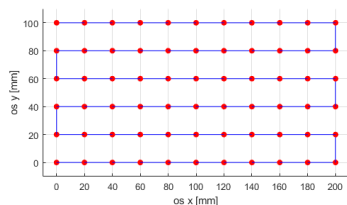
$$w_{dir}^{path} = \sigma_{L,rel}^{norm} \cdot w_{dir}^{path} \quad (13)$$

3 Rezultati

Glede na to, da je pot gibanja orodja definirana z geometrijo obdelovanca in je le-ta v naprej poznana, je postavitev obdelovanca relativno glede na pozicijo robota lahko poljubna, vendar še kako pomembna s stališča izvedljivosti robotske trajektorije, saj mora robot, za doseg vseh točk trajektorije, ves čas delovati znotraj območja svojih kinematičnih in dinamičnih zmožnosti. Z namenom vrednotenja kvalitete poti se želimo prepričati kako posamezen opisan indeks manipulabilnosti vpliva na kinematične sposobnosti pri izvajanju znane robotske trajektorije ter kateri izmed opisanih indeksov manipulabilnosti nam daje najbolj optimalne rezultate.

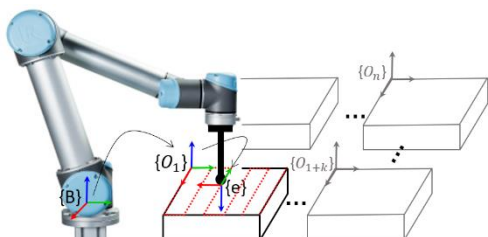
3.1 Robotska naloga

Vpliv obravnavanih indeksov manipulabilnosti na kinematične sposobnosti robota UR5 smo izvedli na primeru znane robotske poti orodja, sestavljene iz enakomerno razporejenih točk v x in y smeri, kot prikazuje slika 2.



Slika 2. Definirana pot orodja po površini obdelovanca

Ilustracijo obravnavanih postavitev surovcev prikazuje slika 3. Na prvem obdelovancu je ilustrirana pot obdelave, ki določa pot orodja. Pozicija in orientacija poti orodja sta definirani glede na lokalni koordinatni sistem obdelovanca $\{O\}$, pri čemer le-ta sovpada z začetno točko poti orodja. Koordinatni sistem obdelovanca $\{O\}$, ki ga premikamo po obravnavanem delovnem prostoru robota, je postavljen relativno glede na bazni koordinatni sistem robota $\{B\}$.



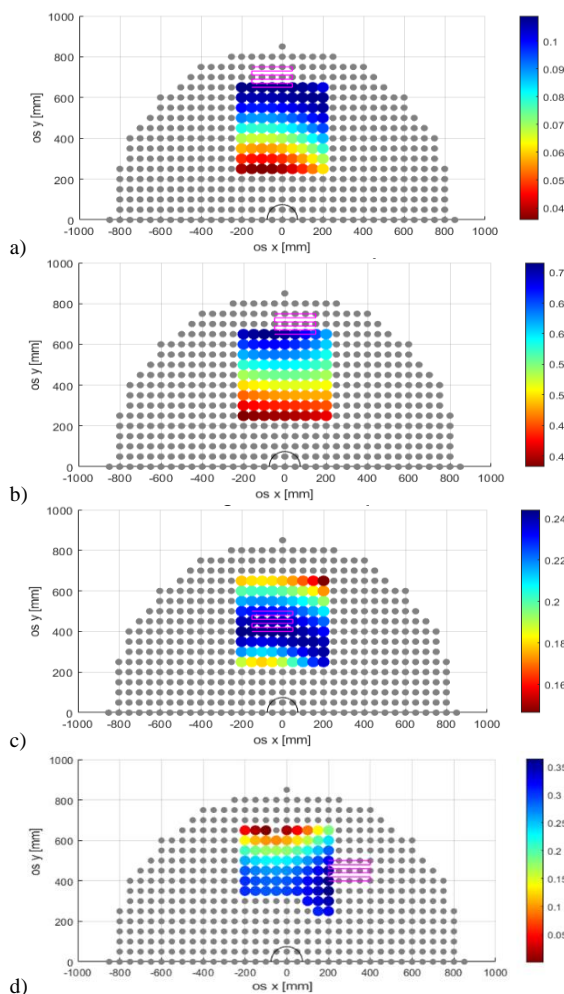
Slika 3. Robot UR5 in iskanje optimalne postavitve surovca za površinsko obdelavo

Tekom analize delovnega prostora robota, pot orodja premikamo s korakom 50 mm v x-y ravnini

obrnovanega delovnega prostora robota UR5, ki zajema prostor v območju $x = -200 \text{ mm} \dots 200 \text{ mm}$, $y = 250 \text{ mm} \dots 650 \text{ mm}$ in $z = 100 \text{ mm}$ relativno glede na bazni koordinatni sistem robota $\{B\}$. Za vsako posamezno pozicijo obdelovanca znotraj omenjenega območja izračunamo obravnavani indeks manipulabilnosti z uporabo Matlaba in knjižnice Robotic Toolbox [5], na podlagi katerega obravnavani točki delovnega prostora določimo pripadajočo barvo in na ta način grafično prikažemo karakteristiko obravnavanega indeksa manipulabilnosti v definiranem delovnem prostoru.

3.2 Barvna mapa manipulabilnosti

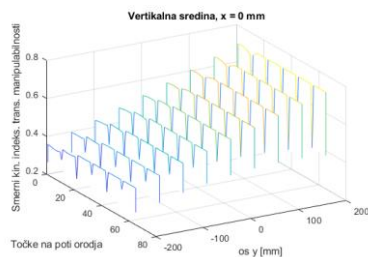
Barvna mapa manipulabilnosti predstavlja skupek točk z barvno upodobitvijo vrednosti posameznega indeksa manipulabilnosti poti orodja v obravnavanem delovnem prostoru robota v primeru, da začetno točko poti postavimo v opazovano točko. Primerjavo barvnih map manipulabilnosti smo naredili na podlagi štirih različnih indeksov, ki smo jih opisali v poglavju 2 (slika 4).



Slika 4. Barvna mapa: a) indeksa kinematične manipulabilnosti poti, b) smernega indeksa kinematične manipulabilnosti poti, c) minimalne singularne vrednosti poti, d) uteženega smernega indeksa kinematične manipulabilnosti poti

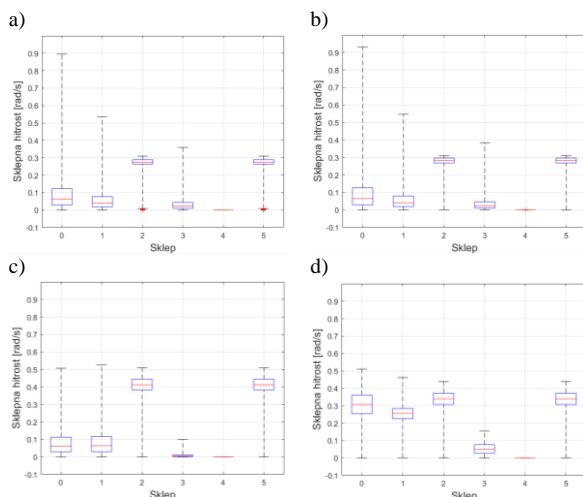
Pri tem območja z modro barvo predstavljajo območja z dobro manipulabilnostjo poti orodja, medtem ko rdeče

obarvana območja predstavljajo območja s slabo manipulabilnostjo poti orodja. Optimalna postavitev obdelovanca glede na najvišjo vrednost posameznega obravnavanega indeksa je prikazana z magenta barvo. Opazimo lahko, da se optimalne postavitev obdelovanca glede na posamezen indeks med sabo precej razlikujejo. Postavlja se torej vprašanje, katero optimalno rešitev je smiselno izbrati. V primeru smerne translacijskega indeksa kinematične manipulabilnosti opazimo, da se njegova povprečna vrednost v smeri pozitivne osi y povečuje, kar je razvidno tudi s slike 5. Poleg tega lahko na tej sliki opazimo, da na mestih, kjer pride do spremembe gibanja, smerna manipulabilnost močno pade. Z namenom, da bi poleg povprečja smerne manipulabilnosti upoštevali še njen padec, za katerega želimo, da bi bil čim manjši, smo vpeljali uteženi smerni translacijski indeks manipulabilnosti.



Slika 5. Diagram spreminjanja smerne manipulabilnosti v smeri y-smeri obravnavanega območja

3.3 Verifikacija



Slika 6. Škatlični diagram sklepnih hitrosti: a) indeks kinematične manipulabilnosti poti b) smerni indeks kinematične manipulabilnosti poti, c) minimalna singularna vrednost poti, d) utežen smerni indeks kinematične manipulabilnosti poti

Primerjavo učinkovitosti definiranih indeksov manipulabilnosti smo naredili na podlagi zajetih sklepnih hitrosti za pozicije poti orodja, kjer je vrednost posameznega indeksa najvišja. Simulacijo gibanja robota po definirani poti, katere sklepne hitrosti smo zajeli, smo generirali s pomočjo simulacijskega orodja URSim. Pri tem smo v

vseh štirih primerih zagotavljali enake pogoje izvajanja robotske trajektorije. Robotsko trajektorijo smo generirali s hitrostjo 200 mm/s in s pospeškom 1200 mm/s². Absolutne sklepne hitrosti vsakega posameznega sklepa robota smo prikazali s pomočjo škatličnega diagrama, ki omogoča nazorno grafično ponazoritev in statistično analizo številčnih podatkov, kot prikazuje slika 6. V primeru a) in b) lahko opazimo veliko razpršenost vrednosti sklepnih hitrosti okrog mediane. Najmanjšo razpršenost sklepnih hitrosti lahko dosežemo s kvalitativnim vrednotenjem poti na podlagi indeksa c) in d). V primeru c) je sicer večina sklepnih hitrosti nižja kot v primeru d), vendar je maksimalna dosežena sklepna hitrost v primeru c) višja kot v primeru d).

4 Zaključek

Na podlagi prikazanih rezultatov je razvidno, da lahko s takšno analizo delovnega prostora predvidimo kinematično obnašanje robota za potrebe izvajanja zelene robotske trajektorije, vendar opazimo tudi, da se območja z najvišjo vrednostjo različnih indeksov manipulabilnosti med sabo razlikujejo. Z namenom iskanja odgovora na to, kateri indeks ima največji vpliv na optimalno izvajanje robotske naloge s stališča njegovih kinematičnih sposobnosti, smo naredili njihovo primerjavo na podlagi zajema sklepnih hitrosti. Najbolj optimalne rezultate s stališča generiranih sklepnih hitrosti smo dosegli z upoštevanjem uteženega smerne translacijskega indeksa manipulabilnosti poti, ki smo ga predstavili v članku. Na podlagi analize smo ugotovili, da je povprečje smerne translacijske manipulabilnosti dobra osnova za iskanje optimalne poti, vendar je pri tem potrebno vključiti dodatne kriterije na podlagi katerih izločimo pozicije obdelovanca, ki vključujejo kritične točke v katerih pade smerna manipulabilnost pod dopustno mejo. Za nadaljnje kvalitativno razvrščanje poti je to povprečje smiselno utežiti še z enostransko standardno deviacijo, ki nam v povprečju podaja merilo za prisotnost točk z nižjo vrednostjo smerne manipulabilnosti.

Zahvala

To delo je bilo delno sofinancirano z raziskovalnim programom št. P2-0028 Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, in v okviru projekta ROBOTool-1, OP20.03540, kjer naložbo sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

- [1] O. Porges, R. Lampariello, J. Artigas, A. Wedler, C. Borst, and M. A. Roa, "Reachability and Dexterity: Analysis and Applications for Space Robotics," (ASTRA), 2015.
- [2] S. Patel and T. Sobh, "Manipulator Performance Measures - A Comprehensive Literature Survey," 2014.
- [3] T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, 1985.
- [4] S. Chiu, "Task Compatibility of Manipulator Postures," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 7, no. 5, pp. 13-21, 1988.
- [5] P. Corke, *Robotic Toolbox for Matlab*. 2018.