

Izvedba okolja za delo z robotskim manipulatorjem s petimi prostorskimi stopnjami

Aleš Klun, mentor: doc. dr. Gregor Klančar
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
alesklun@gmail.com

Abstract

This article represents the development of environment for 5 DOF robotic manipulator Pioneer 2 Arm. It's main emphasis is given on kinematics. At first is described how to determine coordinate systems for the each joint and associated Denavit-Hartenberg parameters. At direct kinematics is described the procedure for determining the global transformation matrix, which describes the position of the robot gripper, according to the base coordinate system. Inverse kinematics describes the inverse calculational problem, by which we are, from global transformation matrix, able to determine individual angles of each joint. We have also consecrate to the successfulness of calculation of inverse kinematics. And at last we focused on linear movement of robotic arm in space.

Povzetek

Članek opisuje razvoj okolja za 5 DOF robotski manipulator Pioneer 2 Arm. Glavni poudarek je dan kinematiki. Najprej opisujemo določitev koordinatnih sistemov posameznih sklepov ter pripadajočih Denavit – Hartenbergovih parametrov. Pri direktni kinematiki je opisan postopek določitve globalne transformacijske matrike, katera opisuje lego robotskega prijemala glede na bazni koordinatni sistem. Inverzna kinematika opisuje obratni računski problem, s pomočjo katerega nato iz globalne transformacijske matrike določimo posamezne kote sklepov. Posvetili smo se tudi uspešnosti izračuna inverzne kinematike. Za konec pa predstavimo še linearni pomik robotske roke v prostoru.

1 Uvod

Cilj projekta je bila izdelava okolja za upravljanje z robotsko roko Pioneer 2 Arm (slika 1). Za samostojno delo potrebuje robotska roka kinematiko. S pomočjo direktne kinematike določimo pozicijo in orientacijo prijemala robotskega manipulatorja v delovnem prostoru robotskega manipulatorja. V veliko primerih pa se zgodi, da želimo z robotom prijeto določen predmet na neki znani lokaciji. V tem primeru potrebujemo za to dejanje inverzno kinematiko, s pomočjo katere, nato določimo odklone posameznih sklepov. S pomočjo spremenljivk sklepov, ki nam jih vrne inverzna kinematika lahko nato dosežemo željen objekt v prostoru s predpisano orientacijo prijemala.



Slika 1: Robotska roka Pioneer 2 Arm

Ko robotska roka izvaja premik iz ene lege v drugo, je pogosto zelo pomembno, da premik opravi po linearni trajektoriji. Pri linearnem premiku pride do veliko večje kontrole robotske roke med gibanjem. V primerih, ko želimo ročno priti v bližino določene točke, pomeni linearni pomik v vseh šestih smereh veliko olajšanje dela.

2 Robotska roka Pioneer 2 Arm

Pioneer 2 Arm je robotski manipulator s petimi rotacijskimi sklepi. Odklon posameznih sklepov je med 160° in 190° . Konfiguracija roke je takšna, da predmet, ki ga prime lahko odloži za seboj. Doseg prstov robotske roke je do 50 cm (glej sliko 2). Prijemalo ima tri prste in lahko prenaša breme do teže 150 gramov.

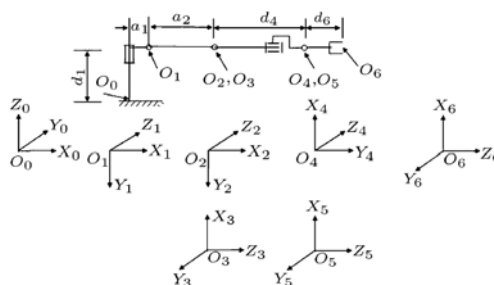
Namenjena je namestitvi in delu na mobilnem robotu iz serije Pioneer 3.



Slika 2: Doseg robotske roke Pioneer 2 Arm

3 Direktna kinematika roke Pioneer 2 Arm

Preden začnemo z razvojem direktne kinematike, je potrebno v vsak sklep robotske roke postaviti koordinatni sistem (glej sliko 3). Zaradi konfiguracije roke v tem primeru določimo še dodatni k.s. O_5 , ki nam bo v pomoč pri razvoju inverzne kinematike.



Slika 3: Postavitev posameznih k.s.

S pomočjo posameznih k.s. sedaj določimo D-H parametre za vsak posamezen segment robotske roke posebej (tabela 1).

Segment	a_i (mm)	α_i ($^\circ$)	d_i (mm)	θ_i
$O_0 - O_1$	$a_1 = 68,75$	-90	$d_1 = 70$	θ_1
$O_1 - O_2$	$a_2 = 160$	0	0	θ_2
$O_2 - O_3$	0	-90	0	$\theta_3 - 90$
$O_3 - O_4$	0	90	$d_4 = 137,75$	θ_4
$O_4 - O_5$	0	-90	0	θ_5
$O_5 - O_6$	0	0	$d_6 = 113,21$	0

Tabela 1: Denavit – Hartenbergovi parametri

S pomočjo D-H parametrov lahko sedaj zapišemo vseh šest transformacijskih matrik A_i^{i-1} , za vsak segment robotskega manipulatorja posebej. Z Globalno transformacijsko matriko določimo pozicijo robotskega prijemala (P_x, P_y, P_z) in njegovo orientacijo v vseh treh smereh $\{(n_x, n_y, n_z), (s_x, s_y, s_z), (a_x, a_y, a_z)\}$.

Izračunamo jo z zaporednim množenjem vseh šestih transformacijskih matrik.

$$T_6^0 = A_1^0 \cdots A_6^0 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Z globalno transformacijsko matriko T_6^0 je robotsko prijemalo popolnoma definirano v prostoru, glede na bazni koordinatni sistem.

4 Inverzna kinematika roke Pioneer 2 Arm

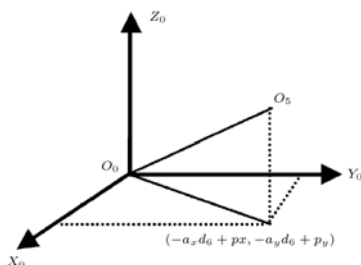
Za nekoliko lažji potek izračuna upoštevamo, da je zadnji segment robotske roke, kot je razvidno iz tabele 1 translacijski. Zato sledi, da ni odvisen od vrednosti kotov. Globalno transformacijsko matriko T_6^0 spremenimo v obliko, kot jo prikazuje enačba (2).

$$T_5^0 = T_6^0(A_6^0)^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & -a_x d_6 + p_x \\ n_y & s_y & a_y & -a_y d_6 + p_y \\ n_z & s_z & a_z & -a_z d_6 + p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pri izpeljavi inverzne kinematike se opremo na sliko 4, in z njeno pomočjo pridemo do dveh kandidatov za prvi kot θ_1 (3) in (4), izberemo tistega, kateri je znotraj omejitve prvega sklepa.

$$\theta_{11} = \arctan2(-a_y \cdot d_6 + p_y, -a_x \cdot d_6 + p_x) \quad (3)$$

$$\theta_{12} = \arctan2(a_y \cdot d_6 - p_y, a_x \cdot d_6 - p_x) \quad (4)$$



Slika 4: Projekcija koordinatnih sistemov O_5 do O_0

Rešitev θ_{11} je primerna za vse točke, ki se nahajajo na pozitivni x -osi, θ_{12} pa za vrednosti negativne x -osi.

Pri izračunu kotov θ_2 in θ_3 si pomagamo s tremi pomožnimi spremenljivkami. Višino med izhodišči k.s. O_1 in O_5 določa B_1 (5), njegova vrednost je negativna, za primere, ko je roka na pozitivni z osi in pozitivna za negativno os. Horizontalno dolžino med obema izhodiščema označuje parameter B_2 (6), katerega vrednost mora biti vedno pozitivna. Tretji parameter je kot γ , ki označuje absolutno vrednost kota,

glede na negativno z -os (7) in (8) (glej sliko 5), vrednost kota lahko presega vrednost 180° .

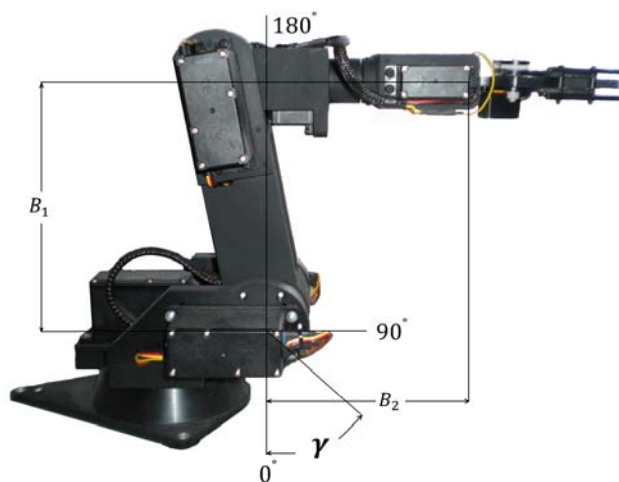
$$B_1 = a_x \cdot d_6 - p_x + d_1 \quad (5)$$

$$B_2 = \pm \sqrt{(a_x \cdot d_6 + p_x)^2 + (a_y \cdot d_6 + p_y)^2} \pm a_1 \quad (6)$$

$$\gamma = \arctan2(B_2, B_1) \quad (7)$$

V kolikor je vrednost x komponente pozicije matrike T_5^0 manjša od vrednosti a_1 , je potrebno enačbo (7) prilagoditi v obliko (8);

$$\gamma = 2 \cdot \pi - \arctan2(B_2, B_1) \quad (8)$$



Slika 5: Prikaz kota pomožnih spremenljivk

S pomočjo enačb (5) do (8) pridemo do dveh kandidatov za kot θ_2 (9) in (10).

$$\theta_{21} = \arcsin\left(\frac{B_1^2 + B_2^2 + a_2^2 - d_4^2}{2 \cdot a_2 \cdot \sqrt{B_1^2 + B_2^2}}\right) - \gamma \quad (9)$$

$$\theta_{22} = \pi - \arcsin\left(\frac{B_1^2 + B_2^2 + a_2^2 - d_4^2}{2 \cdot a_2 \cdot \sqrt{B_1^2 + B_2^2}}\right) - \gamma \quad (10)$$

Seda j z uporabo enačb od [5] do [10] izračunamo še tretji kot θ_3 , ki je:

$$\theta_3 = \arctan2(B_1 - a_2 \cdot s_2, B_2 - a_2 \cdot c_2) - \theta_2 \quad (11)$$

Z tem smo zaključili s koti, ki spadajo v skupino »roka« in določajo pozicijo. Nadaljujmo s zadnjima dvema, ki spadata v »zapestje« manipulatorja in predstavljata orientacijo prijemala. Sedaj z pomočjo prvih treh kotov

izračunamo transformacijsko matriko T_5^4 in na ta način olajšamo izračun zadnjih dveh kotov.

$$T_5^4 = A_1^{\alpha_1} \cdot A_2^{\alpha_2} \cdot A_3^{\alpha_3} \cdot T_5^0 \quad (12)$$

Pri izračunu vrednosti kotov θ_4 in θ_5 imamo na izbiro dva načina računanja. Prvi upošteva horizontalno orientacijo n in s robotskega prijemala in drugi način, ki je ne upošteva.

Najprej pogledjmo način izračuna, ki upošteva horizontalno orientacijo. S pomočjo enačbe (12) dobimo rešitev za četrti sklep θ_4 .

$$\theta_4 = \arctan2(-s_x(T_4^1), s_y(T_4^1)) \quad (13)$$

Na podoben način pridemo tudi do rešitve za peti sklep θ_5 .

$$\theta_5 = \arctan2(n_z(T_5^1), \alpha_z(T_5^1)) \quad (14)$$

Pri tem načinu je potrebno za izračun uporabiti celotno transformacijsko matriko, z vsemi pripadajočimi orientacijami prijemala.

Način, ki za izračun inverzne kinematike ne potrebuje orientacije v horizontalni ravnini, se razlikuje v tem, da nas zanima le vertikalna orientacija prijemala α , katero je potrebno pred izračunom določiti, horizontalna pa je nepomembna. Način računanja za prve tri kote je identičen, kot v prejšnjem primeru, do razlike pride le pri zadnjih dveh kotih. Spremenjen je tudi vrstni red računanja, saj najprej izračunamo vrednost kota θ_5 in šele nato določimo način izračuna zadnjega preostalega kota θ_4 .

$$\theta_5 = \pm \arccos(p_z(T_5^1)) \quad (15)$$

Izbiro predznaka argumenta za izračun kota θ_4 določimo s pomočjo predznaka dobljene vrednosti za $\sin(\theta_5)$.

$$\theta_4 = \arctan2(\pm p_y(T_5^1), \pm p_x(T_5^1)) \quad (16)$$

V kolikor je vrednost sinusa večja od nič, uporabimo negativni predznak, v nasprotnem primeru pa pozitivnega. V primeru, ko je vrednost sinusa enaka nič, pa se za izračun uporabi namesto matrike T_5^4 , kar matriko T_5^0 .

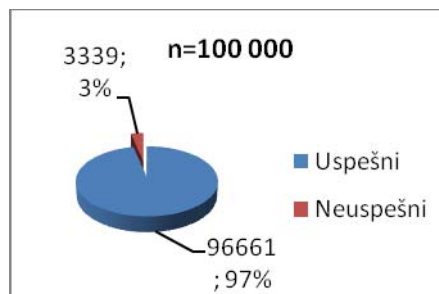
Pri tem vrednosti, ki jih vstavimo, obdržijo predznak.

Določitev predznaka za kot θ_5 je v naprej težko predvideti, zato najprej uporabimo pozitiven predznak in izračunamo še četrti kot ter določimo lego prijemala. V kolikor sta nova in stara globalna transformacijska matrika približno enaki, sta rešitvi pravi. Drugače pa je potrebno ponoviti izračune zadnjih dveh kotov s spremenjenim predznakom.

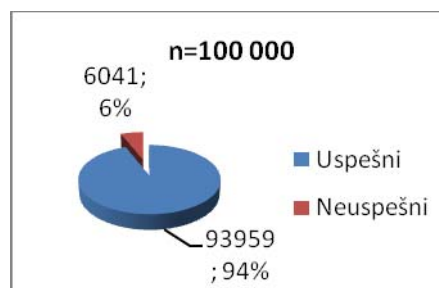
5 Preizkus inverzne kinematike

Pri uporabi inverzne kinematike v praksi je zelo pomemben podatek, zanesljivost predstavljene metode.

Preizkus delovanja smo izvedli na način, da smo generirali naključno vrednost vseh petih kotov, na ta način dobili lego prijemala. Nato smo preizkusili oba načina za izračun inverzne kinematike. Za oba primera smo vzeli 100 000 različnih kombinacij kotov. Rezultate za inv. kin. z uporabo horizontalne orientacije prikazuje slika 6, brez orientacije pa slika 7.



Slika 6: Uspešnost metode z orientacije



Slika 7: Uspešnost metode brez orientacije

Med uspešnimi izračuni je bil delež tistih, ki so podali napačno vrednost lege prijemala zanemarljivo majhen, velikostni red promila ali

manj. Iz tega sledi, da ta metoda dokaj verjetno pripelje do zelene rešitve.

6 Linearen pomik

Za načrtovan pomik roke iz začetne točke v novo točko se v veliko primerih uporablja linearen pomik. V ta namen smo razvili dva različna programska koncepta.

Prvi način je, da izvedemo premik iz začetne točke v znano končno točko. Drugi pa premik iz trenutne pozicije v novo, ki je premaknjena za določen faktor v eni izmed glavnih smeri.

Pri načinu, ki uporablja premik za faktor, se najprej določi trenutna lokacija in se tej lokaciji prišteje smerni vektor v eni izmed glavnih smeri. V novi točki je sedaj potrebno prilagoditi še x in y -komponento vertikalne orientacije a . Ta orientacija se določi s pomočjo spremembe kota baznega sklepa. Orientacija se spremeni za enak faktor, kot se je spremenil kot. Med premikom ohranimo z -komponento orientacije a nespremenjeno.

Pri linearnem pomiku iz začetne točke v novo znano končno točko, je potrebno najprej izračunati smerni vektor med točkama. Tega nato razdelimo na n enakih delov, katere nato postopoma prištevamo vedno novi trenutni poziciji. Za izračun orientacije uporabimo podoben način, kot v prejšnjem primeru, saj, če vzamemo enak način računanja, kot za pozicijo, pride do težave pri prehodu preko izhodišča y -osi. V določenih primerih se lahko zgodi, da je prijemalo že prešlo izhodišče osi, orientacija pa ne in pride do napake pri izračunu inverzne kinematike. Natančnejši način je, da orientacijo računamo sproti. Podobno, kot za pozicijo, pa se z -komponenta orientacije a razdeli na n delov. Te nato prištevamo trenutni orientaciji. Ostali dve komponenti pa izračunamo po enakem principu kot prej, torej glede na spremembo velikosti baznega kota v vsaki vmesni točki.

Na ta način dobimo linearen pomik med začetno točko in znano ali pa tudi neznano končno točko.

7 Zaključek

Izdelali smo delovno okolje za robotsko roko Pioneer 2 Arm, ki omogoča enostavnejše upravljanje z njo. Predstavljeno okolje je osnovni uporabniški vmesnik, ki pa omogoča še veliko nadgradnje, o kateri bi bilo smiselno razmisliti.

Linearni pomik je mogoč le v primerih, ko se prijemalo nahaja na področju pozitivni x -osi. Področje okrog izhodišča baznega koordinatnega sistema in negativna x -os pa ne omogočata linearnega pomika. V nadaljevanju bi bilo potrebno nadgraditi linearen pomik pri poljubni vrednosti četrtega sklepa θ_4 , ki sedaj podaja zadovoljive rezultate le v primerih, ko je njegova vrednost enaka nič.

Robotska roka Pioneer 2 Arm, ki je podprta s predstavljenimi funkcijami, predstavlja sistem, ki omogoča njeno uporabo v enostavnejših opravilih s področja robotike.

8 Literatura

- [1] Tadej Bajd in Matjaž Mihelj. *Robotika*. 1. izdaja. Fakulteta za Elektrotehniko, Ljubljana 2008.
- [2] Tadej Bajd. *Osnove robotike*. 7. dopolnjena izdaja. Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2006.
- [3] Marko Munih. *Robotika I, Dinamika in vodenje robotov*. Založba FE in FRI, Ljubljana 2002.
- [4] Pioneer Arm Manual: http://www.ist.tugraz.at/_attach/Publish/Kmr06/pioneer-arm.pdf
- [5] Original Pioneer 2 5DOF Arm: http://robots.mobilerobots.com/wiki/Original_Pioneer_2_5DOF_Arm
- [6] Imitation Towards Service Robotics: <http://cswww.essex.ac.uk/staff/hhu/Papers/IROS04-202.pdf>
- [7] An Analysis of the Inverse Kinematics for a 5-DOF Manipulator: <http://www.scribd.com/doc/36954557/2005->
- [8] An-Analysis-of-the-Inverse-Kinematics-for-a-5-DOF-Manipulator
- [9] A complete analytical solution to the inverse kinematic of the Pioneer 2 robotic arm: <http://journals.cambridge.org/action/displayFulltext?type=1&fid=275495&jid=ROB&volumeId=23&issueId=01&aid=275494&bodyId=&membershipNumber=&societyETOCSession=>