



S. Stojadinović, N. Slavković, D. Milutinović¹

OFF-LINE PROGRAMIRANJE I SIMULACIJA ČELIJE NA BAZI ROBOTA „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“

Rezime

Mogućnost simulacije vrlo je značajna u oblasti projektovanja ćelija sa robotom u cilju analize varijantnih rešenja layout-a, verifikacije programa i analize ciklusnog vremena. U radu se razmatra programiranje i simulacija ćelije sa robotom „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“ u licenciranom softverskom sistemu Workspace 5. U radu je takođe razmatrano i kinematičko modeliranje ovog robota u cilju razvoja novog sistema upravljanja otvorene arhitekture.

Ključne reči: robot, ćelija sa robotom, modeliranje i simulacija

1. UVOD

U poslednje četiri decenije roboti se veoma uspešno primenjuju za realizaciju različitih tehnoloških zadataka u industriji kao što su manipulacija, zavarivalje, montaža, bojenje kao i u tzv. pomoćnim operacijama vezanim za obradu (obaranje ivica, čišćenje, poliranje i sl.) [1]. Jedna od važnih pretpostavki uspešne primene robota su softverski sistemi za programiranje i simulaciju robota i ćelija kao što su Robcad, Delmia, Workspace 5 itd. [2,3,4]. Simulacija je vrlo značajna u oblasti projektovanja ćelija sa robotom u cilju analize varijantnih rešenja layout-a, verifikacije programa, analize ciklusnog vremena i sl.

U radu je korišćen licencirani simulacioni softver Workspace 5 čiji su osnovni moduli CAD modul, simulacioni modul i modul za off-line programiranje [5]. Pored biblioteke modela robota koja sadrži preko 500 robota vodećih svetskih proizvođača sistem raspolaže i bibliotekama sa tipičnim primerima modela end-efektora za različite oblasti primene kao i biblioteku sa primerima modela periferne opreme [4]. Razmatrano je modeliranje, programiranje i simulacija ćelije sa robotom „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“. Ovaj robot je već duži niz godina jedan od osnovnih resursa za izvođenje laboratorijskih vežbi iz predmeta Industrijski roboti na Mašinskom fakultetu u Beogradu i nije obuhvaćen bibliotekom modela robota u Workspace 5. U radu je takođe razmatrano i kinematičko modeliranje ovog robota u cilju razvoja novog sistema upravljanja otvorene arhitekture.

2. KINEMATIČKO MODELIRANJE

Osnovni ciljevi kinematičkog modeliranja robota „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“ su:

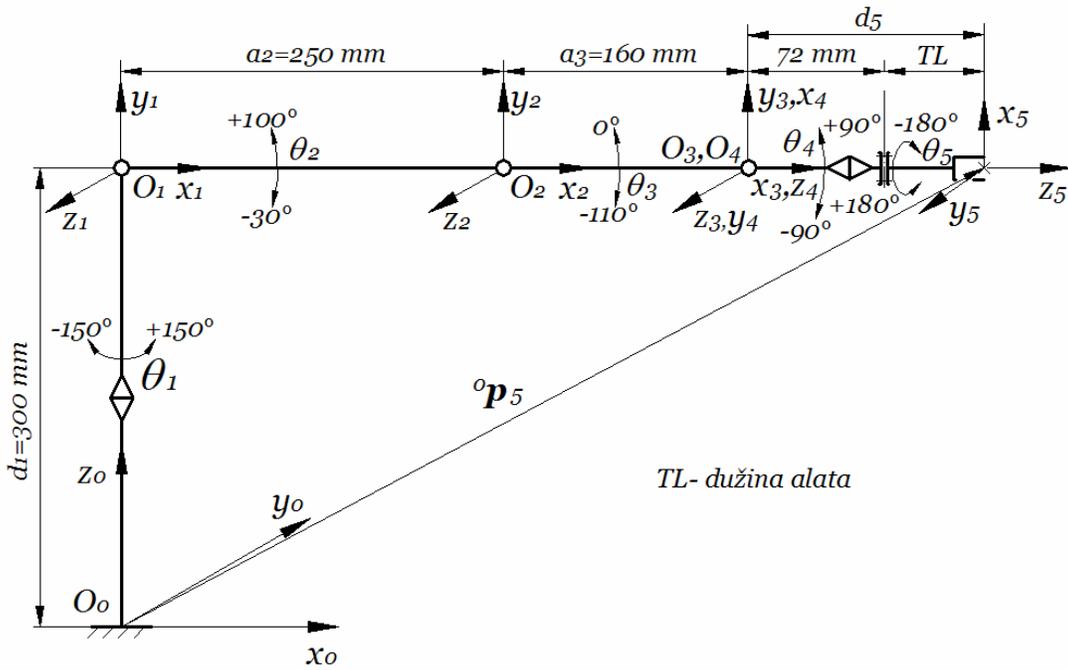
- formiranje modela ovog robota u cilju proširenja biblioteke robota u softverskom sistemu za simulaciju robota i ćelija Workspace 5, i
- stvaranje podloga za razvoj sopstvenog sistema upravljanja otvorene arhitekture baziranom na PC real-times Linux platformi i EMC2 (Enhanced Machine Control) softverskom sistemu [1].

Kinematičko modeliranje petoosnog robota vertikalne zglobove konfiguracije „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“ u ovom radu obuhvata rešavanje direktnog i inverznog kinematičkog problema.

S obzirom da je za modeliranje robota u softverskom sistemu Workspace 5. potrebno definisati Denavit-Hartenberg-ove kinematičke parametre segmenata [6,7] to se dalje daje procedura rešenja direktnog i inverznog kinematičkog problema.

Korišćenjem Denavit-Hartenberg-ovih parametara formiran je kinematički model robota, slika 1, definisane su unutrašnje i spoljašnje koordinate.

¹ Slavenko Stojadinović, dipl. maš. inž., 011/3400501, slavenkostojadinovic@gmail.com, student doktorskih studija Mašinskog fakulteta u Beogradu, Nikola Slavković, asistent, Mašinski fakultet – Beograd, nslavkovic@mas.bg.ac.rs, dr Dragan Milutinovic, redovni profesor, Mašinski fakultet - Beograd, 011/330-24-15, dmilutinovic@mas.bg.ac.rs



Slika 1 Kinematički model robota „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“ u referentnom položaju

Unutrašnje koordinate: Vektor unutrašnjih koordinata je poznat kao $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$, gde su $\theta_i, i=1,2,\dots,5$ skalarne promenljive odnosno ugaona pomeranja u zglobovima upravljanim aktuatorima.

Spoljašnje koordinate: Vektor spoljašnjih koordinata je poznat kao $x = [p_x \ p_y \ p_z \ \theta \ \phi]^T$, gde su

$${}^0\mathbf{p}_5 = [p_x \ p_y \ p_z]^T \quad (1)$$

vektor položaja vrha end-efektora, a θ i ϕ uglovi orijentacije end-efektora.

S obzirom da robot ima pet stepeni slobode to je moguće govoriti samo o delimičnoj orijentaciji end-efektora odnosno u ovom slučaju o orijentaciju ose O_5x_5 , slika 1.

Kao što se vidi sa slike 1, pridruženi koordinatni sistemi segmetima robota $O_i x_i y_i z_i, i=1,2,\dots,5$ i referentni položaj robota definišu parametre segmeta, tabela 1, na osnovu kojih su formirane matrice ${}^{i-1}A, i=1,2,\dots,5$:

Tabela 1 Denavit-Hartenberg-ovi parametri

$${}^0_1A = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^1_2A = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^2_3A = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & a_3 C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & a_3 S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Segment	α_i [°]	a_i [mm]	d_i [mm]	θ_i [°]
1	90	0	300	θ_1
2	0	250	0	θ_2
3	0	160	0	θ_3
4	90	0	0	$\theta_4 + 90$
5	0	0	d_5	θ_5

$${}^3_4A = \begin{bmatrix} -S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^4_5A = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

pri čemu je $c_i = \cos\theta_i; s_i = \sin\theta_i, i=1,2,\dots,5$.

Direktni kinematički problem: Kao što je poznato, na osnovu formiranih matrica ${}^{i-1}_i A, i = 1, 2, \dots, 5$ položaj i orijentacija end-efektora odnosno pozicija i orijentacija koordinatnog sistema $O_5x_5y_5z_5$ u odnosu na referentni koordinatni sistem određuju se kao

$${}^0_5T = {}^0_1A \cdot {}^1_2A \cdot {}^2_3A \cdot {}^3_4A \cdot {}^4_5A = \begin{bmatrix} {}^0_5R & {}^0_5\mathbf{p}_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

gde su

$$\begin{aligned} n_x &= -C_1C_5S_{234} + S_1S_5 \\ n_y &= -S_1C_5S_{234} - C_1S_5 \\ n_z &= C_5C_{234} \\ o_x &= C_1S_5S_{234} + S_1C_5 \\ o_y &= S_1S_5S_{234} - C_1C_5 \\ o_z &= -S_5C_{234} \\ a_x &= C_1C_{234} \\ a_y &= S_1C_{234} \\ a_z &= S_{234} \\ p_x &= C_1[C_{234}d_5 + a_3C_{23} + a_2C_2] \\ p_y &= S_1[C_{234}d_5 + a_3C_{23} + a_2C_2] \\ p_z &= S_{234}d_5 + a_3S_{23} + a_2S_2 + d_1 \end{aligned} \quad (4)$$

pri čemu su $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$; $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$; $i, j \in \{1, 2, \dots, 5\}$.

Kao što se vidi iz jednačine (4) položaj vrha end-efektora je određen vektorom ${}^0_5\mathbf{p}_5 = [p_x \ p_y \ p_z]^T$, međutim da bi se kompletirao vektor spoljašnjih koordinata potrebno je još odrediti uglove orijentacije θ i ϕ [6,7].

Inverzni kinematički problem: Metoda za analitičko rešavanje inverznog kinematičkog problema kod robota sa šest stepeni slobode za slučaj kada se ose orijentacije seku ili kada su tri susedne ose paralelne je poznata kao Pieper-ova metoda. Ova metoda omogućava dekuplovanje inverznog kinematičkog problema na dva prostija problema odnosno inverzni kinematički problem pozicije i inverzni kinematički problem orijentacije [6,7,8,]. Analitičko rešenje inverznog kinematičkog problema ovog tipa robota je razmatrano u većem broju radova od kojih se ovde izdvajaju pristupi dati u [8,9] kao pogodni za praktičnu primenu.

S obzirom da robot ima pet stepeni slobode to end-efektor ne može ostvariti potpunu orijentaciju. Kao što se vidi sa slike 2, segmenti a_2, a_3 i d_5 su uvek u istoj ravni odnosno vektori ${}^0_5\mathbf{p}_5$ i \mathbf{a} ne mogu biti specificirani simultano jer oba zavise samo od prve četiri unutrašnje koordinate. Iz ovog razloga je uobičajeno da se za rešavanje inverznog kinematičkog problema zadaju vektori ${}^0_5\mathbf{p}_5$ i npr. \mathbf{n} , a da se zatim odrede vektori \mathbf{a} i \mathbf{o} kada se reše unutrašnje koordinate.

Kako su segmenti a_2, a_3 i d_5 u istoj ravni to se posmatrajući projekciju vektora položaja vrha end-efektora na ravan x_0, y_0 , slika 1, ugao θ_1 može se odrediti kao

$$\theta_1 = \text{Atan}2(p_y, p_x). \quad (5)$$

Ovo rešenje je jednoznačno s obzirom na mehaničke mogućnosti robota odnosno ograničenja kretanja zglobova θ_2 i θ_3 .

Polazeci od jednačina (3) i (4) i zamenom vrednosti rešenja za θ_1 odnosno

$$({}^0_1A)^{-1} \cdot {}^0_5T = {}^1_2A \cdot {}^2_3A \cdot {}^3_4A \cdot {}^4_5A \quad (6)$$

dobija se

$$n_x C_1 + n_y S_1 = -S_{234} C_5 \quad (7)$$

$$n_z = C_{234}C_5 \quad (8)$$

$$n_x S_1 - n_y C_1 = S_5. \quad (9)$$

Kako je θ_1 izračunato to se iz jednačine (9) promenljiva θ_5 može odrediti kao

$$\theta_5 = \sin^{-1}(n_x S_1 - n_y C_1).$$

Zatim se iz jednačina (7) i (8) može dobiti ugao θ_{234} kao

$$\theta_{234} = \text{Atan} 2[(-n_x C_1 - n_y S_1) / C_5, n_z / C_5]. \quad (10)$$

Uzimajući u obzir da se za rešavanje inverznog kinematičkog problema koriste samo vektori ${}^0 \mathbf{p}_5$ i \mathbf{n} to se iz (6) dobijaju jednačine

$$p_x C_1 + p_y S_1 = d_5 C_{234} + a_3 C_{23} + a_2 C_2 \quad (11)$$

$$p_z - d_1 = d_5 S_{234} + a_3 S_{23} + a_2 S_2, \quad (12)$$

koje se mogu napisati kao sistem jednačina

$$a_2 C_2 + a_3 C_{23} = k_1 \quad (13)$$

$$a_2 S_2 + a_3 S_{23} = k_2 \quad (14)$$

gde su

$$k_1 = p_x C_1 + p_y S_1 - d_5 C_{234} \quad (15)$$

$$k_2 = p_z - d_1 - d_5 S_{234}. \quad (16)$$

Kvadriranjem i razvijanjem jednačina (13) i (14) dobijamo da je

$$C_3 = \cos \theta_3 = \frac{k_1^2 + k_2^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3}. \quad (17)$$

Kako je θ_3 u granicama $[-110^\circ, 0^\circ]$ to je rešenje

$$\theta_3 = \text{Atan} 2(-\sqrt{1 - C_3^2}, C_3). \quad (18)$$

Kao što je poznato, rešenje za promenljivu θ_3 ima uticaja na rešenje za promenljivu θ_2 . Zamenom vrednosti rešenja za promenljivu θ_3 u jednačine (13) i (14) se dobija da je

$$C_2 = \frac{k_2 a_3 S_3 + k_1 (a_2 + a_3 C_3)}{a_2^2 + a_3^2 + 2a_2 a_3 C_3} \quad (19)$$

$$S_2 = \frac{-k_1 a_3 S_3 + k_2 (a_2 + a_3 C_3)}{a_2^2 + a_3^2 + 2a_2 a_3 C_3} \quad (20)$$

odnosno

$$\theta_2 = \text{Atan} 2(S_2, C_2). \quad (21)$$

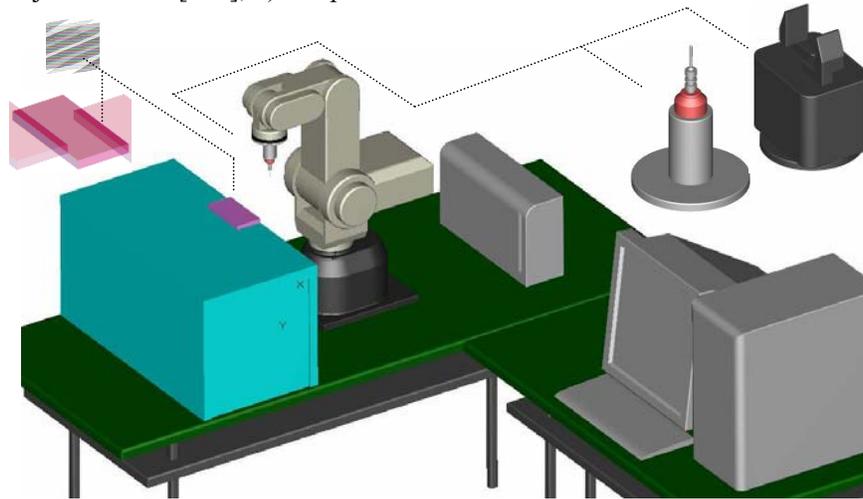
Na kraju se promenljiva θ_4 može odrediti kao

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3. \quad (22)$$

3. OFF-LINE PROGRAMIRANJE I SIMULACIJA

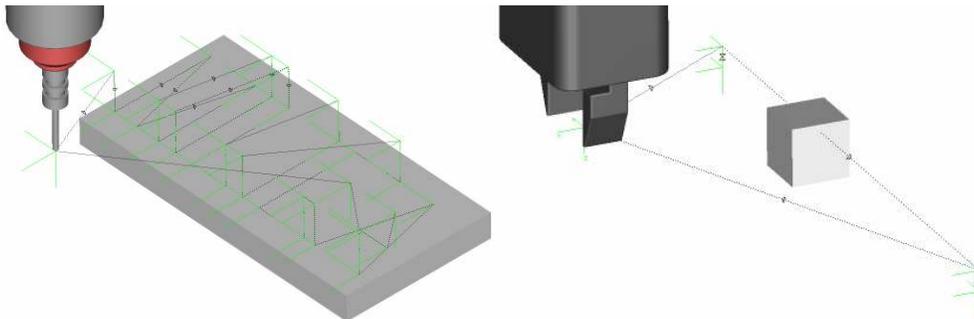
Modeliranje robota u Workspace 5 [10] obuhvata: 1) modeliranje segmenata; 2) pridruživanje koordinatnih sistema segmentima; 3) definisanje osa robota; 4) definisanje ograničenja ugaonih pomeranja u zglobovima; 5) podešavanje kinematike robota; 6) modeliranje end-efektora u obliku hvatača i elektromotornog vretena. Modelirani segmenti robota se sastoje iz nekoliko osnovnih geometrijskih tela spojenih pomoću pravila definisanog u [10]. Koristeći sliku 1 i proceduru takođe definisanu u [10], vrši se pridruživanje koordinatnih sistema segmentima robota, definišu se svih pet rotacionih osa kao i granice ugaonih pomeranja u zglobovima. Na osnovu tako pridruženih koordinatnih sistema, definisanih osa i ograničenja ugaonih pomeranja u zglobovima softver Workspace 5 generiše svoju varijantu Denavit-Hartenberg-ovih parametara. Ovako generisane Denavit-Hartenberg-ove parametre neophodno je izmeniti tako da odgovaraju parametrima prema modelu sa slike 1 datim u tabeli 1. Za razliku od pridruživanja koordinatnih sistema segmentima robota, gde se jednom segmentu pridružuje jedan koordinatni sistem, end-efektoru se pridružuju dva koordinatna sistema. Osnovna uloga početnog koordinatnog sistema je da omogućiti postavljanje modeliranog end-efektora na ploču za vezu robota sa end-efektorom. Na slici 2 pokazan je model robota sa okruženjem, koje se sastoji iz: 1) radnog stola; 2) pomoćnih stolova; 3) upravljačke jedinice i računara; 4) radnih predmeta za manipulaciju i graviranje. Robot sa okruženjem čini

mini ćeliju u okviru koje se realizuju tehnološki zadaci graviranja i manipulacije. Na slici 2 pokazan je modelirani robot „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“ na koji se mogu postaviti modelirani end-efektori u vidu hvatača i elektromotornog vretena. Na slici je data i modelirana periferna oprema koju čini: 1) upravljačka jedinica; 2) računar; 3) radni sto na koji se postavljaj radni predmeti u vidu pločice dimenzija i kockice dimenzija 30x30x30 [mm]; 4) dva pomoćna stola.

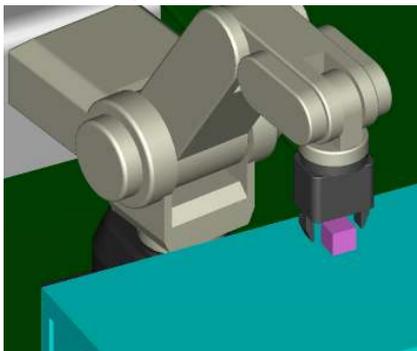


Slika 2 Prikaz modelirane ćelije sa robotom

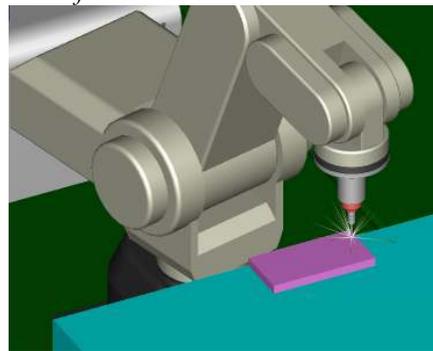
Off- line programiranje robota u Workspace 5 moguće je izvršiti na više načina. Ovde se koristi off-line programiranje u izvornom robotskom jeziku [4]. Off-line programiranje robota se sastoji iz: 1) zadavanja kordinata tačaka kroz koje treba da prođe vrh alata; 2) formiranja pravilnog redosleda unetih tačaka ili formiranje putanje vrha alata; 3) definisanje ponašanja alata. Na slici 4. dat je prikaz zadatih tačaka i putanje vrha alata za pod a) tehnološki zadatak graviranja i pod b) tehnološki zadatak manipulacije. Pod ponašanjem alata podrazumeva se stanje alata u zadatima tačkama. Za alat u obliku hvatača su moguća dva stanja i to prsti otvoreni i prsti zatvoreni, dok za elektromotorno vreteno stanje kad je uključeno i stanje kad je isključeno. Na slici 5. pokazano je stanje prstiju hvatača otvoreni i stanje elektromotornog vretena uključeno. Takođe je pokazan specijalni efekat obrade kreiran u Visual Basic-u.



Slika 3 Prikaz zadatih tačaka i putanje vrha end-efektora za oba zadatka



a) prsti hvatača otvoreni



b) elektromotorno vreteno uključeno

Slika 4 Prikaz stanja end-efektora robota „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“

Zaključak

Mogućnost simulacije vrlo je značajna u oblasti projektovanja ćelija sa robotom u cilju analize varijantnih rešenja layout-a, verifikacije programa i analize ciklusnog vremena. Rezultati simulacije robota i njegovog okruženja se mogu koristiti za proveru programa pre puštanja u rad robota. Biblioteka modela robota u softveru Workspace 5 je proširena reprogramabilnim modelom robota „MITSHUBISHI MOVEMASTER RV-M1“ . U okviru dobijenog modela ćelije na bazi robota mogu se simulirati i drugi zadaci kao i simultan rad više robota. U cilju razvoja novog sistema upravljanja otvorene arhitekture razmatrano je kinematičko modeliranje robota.

LITERATURA

- [1] Milutinović D, Glavonjić M, Slavković N, Dimić Z, Zivanović S, Kokotović B, Tanović Lj (2010) Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner. Int J Adv Manuf Technol. (rad u štampi).
- [2] http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/robotics_automation/robcad/index.shtml/
- [3] <http://www.3ds.com/products/delmia/>
- [4] <http://www.workspace5.com/>
- [5] Manual, Workspace 5.
- [6] Fu KS, Gonzalez RC, Lee CSG (1989) Robotics: control, sensing, vision, and intelligence. McGraw-Hill ISBN 0-07-022625-3.
- [7] Milutinović D, INDUSTRIJSKI ROBOTI - RUKOPISI, Mašinski fakultet Beograd, 2008/2009.
- [8] Craig JJ (1981) Introduction to robotics: mechanics and control, 2nd ed. Addison – Wesley ISBN 0-201-09528-9.
- [9] Tsai LW (1999) Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators, John Willwy & Sons, New York.
- [10] Stojadinović S, Kinematički model petosnog robota i njegova implementacija u softverskom sistemu za off-line programiranje i simulaciju, Diplomski rad, Mašinski fakultet Beograd, 2009.
- [11] Manual, MITSUBISHI MOVEMASTEREX RV-M1.

Slavenko Stojadinovic, Nikola Slavkovic, Dragan Milutinovic

OFF-LINE PROGRAMMING AND SIMULATION OF THE CELL BASED ON THE MITSUBISHI MOVEMASTER RV-M1 ROBOT

Summary

The possibility of simulation is very important in the design of the robot cell in order to analyze the decision variant layout, verification and analysis of cycle time. This paper discusses the programming and simulation of robot cells "MITSUBISHI MOVEMASTER RV-M1" in a licensed software system Workspace 5. The paper also discussed and kinematic modeling of the robot to develop a new system of open architecture.

Key words: robot, the robot cell, modeling and simulation