

PRORAČUN KINEMATIKE I DINAMIKE MANIPULATORA  
KONFIGURACIJE RRTR POMOĆU ELEKTRONIČKOG RAČUNALA

Darko Stipaničev, Ivica Mandić

Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje - Split

Proračun kinematike (položaja, brzine i ubrzanja pojedinih segmenata) i dinamike (sila i momenata u zglobovima) manipulatora važan je, kako u fazi projektiranja, tako i u fazi primjene industrijskog manipulatora. Analitički proračun je već kod sustava s tri stupnja slobode izuzetno složen i nepregledan. Zbog toga se problemu proračuna kinematike i dinamike manipulatora pristupa simuliranjem sustava na elektroničkom računalu. U radu je opisan program za proračun kinematike i dinamike manipulatora s četiri stupnja slobode (osnovna konfiguracija s valjanjem hvataljke - RRTR) pomoću elektroničkog računala, a na temelju Paulove metode sukcesivnih transformacija. Dan je primjer proračuna za nekoliko karakterističnih manipulacijskih pokreta u pogonima za kovanje.

CALCULATION OF MANIPULATOR'S KINEMATICS AND DYNAMICS BY DIGITAL COMPUTER: In the phase of design, as well as in the phase of control of industrial manipulators we must know his kinematics and dynamics. Analytical calculation of manipulator's kinematics and dynamics is very complicated, so the solution is calculation by simulating the system on digital computer. The paper describes the program for calculating kinematics and dynamics of the manipulator with four degrees of freedom (basic spherical configuration + rotation of hand - RRTR) based on the Paul's method of successive transformations. Also results of calculation for few characteristic manipulating movements in industrial workshops for forging are given.

## 1. UVOD

Proračun kinematike (brzina i ubrzanja pojedinih segmenata) i dinamike (momenata i sila) manipulatora je važan kako u fazi projektiranja, tako i u fazi primjene industrijskog manipulatora.

U fazi projektiranja analitički proračun kinematike i dinamike jasno ne dolazi u obzir već i kod najjednostavnijih konfiguracija. Rješenje problema proračuna kinematike i dinamike je strojno rješavanje na elektroničkom računalu.

Iz kritičke usporedbe nekoliko različitih metoda proračuna kinematike i dinamike manipulatora [1] pokazalo se da je za primjenu na elektroničkom računalu prednost u onim metodama koje izbjegavaju deriviranje. Zbog najjednostavnijeg pristupa i matematičkog opisa najpovoljnija je Paulova metoda temeljena na Newton-Eulerovim jednadžbama i sukcesivnim transformacijama [2].

Radni uvjeti u industrijskim pogonima za kovanje i prešanje su vjerojatno jedni od najtežih u industriji. Buka, vrućina, težina predmeta i prljavština su elementi koji rad u takvim pogonima čine neugodnim za radnika, a sve to rezultira u nisku produktivnost. Zbog toga je već dugo prisutna težnja da se takvi pogoni automatiziraju ili u posljednje vrijeme robotiziraju. Većinu problema u pogonima za kovanje i prešanje moguće je riješiti s manipulatorima sa četiri stupnja slobode gibanja (osnovna sferna konfiguracija RRT, te kao četvrti stupanj rotacija hvataljke) [1]. Takvu konfiguraciju kratko nazivamo RRTR konfiguracije manipulatora.

U nastavku je opisan program za proračun kinematike i dinamike manipulatora konfiguracije RRTR na osnovu Paulove metode sukcesivnih transformacija.

## 2. PROGRAM ZA PRORAČUN KINEMATIKE I DINAMIKE MANIPULATORA

Program se sastoji od 5 osnovnih dijelova:

- a) učitavanje ulaznih podataka,
- b) proračun internih koordinata i početnog položaja težišta manipulatora,
- c) proračun brzina i ubrzanja,
- d) proračun momenata inercije pojedinih segmenata te proračun sila i momenata i
- e) ispis izlaznih podataka.

### 2.1. Ulazni podaci

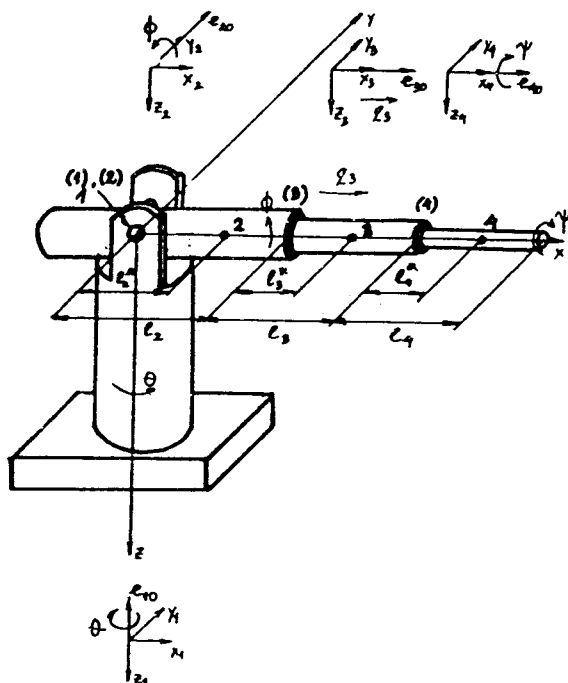
Ulazne podatke možemo podijeliti u tri grupe:

- a) podaci o mehaničkim karakteristikama manipulatora
  - broj segmenata,
  - mase segmenata,
  - momenti inercije segmenata oko osi koje prolaze kroz težište tog segmenta i
  - maksimalno dozvoljena ubrzanja pojedinih segmenata,
- b) podaci o radnom zadatku i radnom prostoru manipulatora
  - početne i krajnje  $x, y, z$  i  $\psi$  ( $\psi$  je rotacija hvataljke) koordinate hvataljke manipulatora, i
  - vanjski moment i vanjska sila na hvataljci manipulatora (npr. težina predmeta kojim se manipulira), i
- c) konstante
  - konstanta gravitacije
  - broj koraka na koji se diskretizira svaki pokret manipulatora, i
  - maksimalni broj iteracija kod proračuna internih koordinata manipulatora.

### 2.2. Proračun internih koordinata i početnog položaja težišta manipulatora

Sl.1. prikazuje početni položaj manipulatora konfiguracije RRTR.

Prema Paulovoj metodi proračuna kinematike i dinamike manipulatora za proračun brzina, ubrzanja, sila i momenata potrebne su interne koordinate  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $q_3$  i  $\psi$ . Medjutim radi lakšeg opisa, radni



Sl.1. Osnovni početni položaj manipulatora konfiguracije RRTR

zadatak se zadaje pravokutnim koordinatama  $x, y, z$  plus valjanje hvataljke  $\psi$ . Zbog toga je bilo potrebno provesti proračun internih koordinata manipulatora.

Manipulacioni pokret se zadaje početnim koordinatama hvataljke  $(x_0, y_0, z_0, \psi_0)$  i krajnjim koordinatama hvataljke  $(x_k, y_k, z_k, \psi_k)$ . Gibanje vrha manipulatora između te dvije točke prostora je pravocrtno.

Manipulacioni pokret traje neko određeno vrijeme. Kako nas ne zanimaju samo konačne vrijednosti brzina, ubrzanja, sila i momenata, već i njihov vremenski tok, svaki manipulacioni pokret je diskretiziran u  $J_{MAX}$  koraka i u svakom pojedinom koraku se računaju sve potrebne veličine.

Jedan od ulaznih podataka programa je maksimalno dozvoljeno ubrzanje pojedinih segmenata manipulatora  $\ddot{\theta}_M, \ddot{\phi}_M, \ddot{q}_{3M}$  i  $\ddot{\psi}_M$ . Dozvoljena ubrzanja mogu biti različita, pa trajanje pomaka u  $\theta, \psi, q_3$  i  $\psi$  smjeru može također biti različito. Zbog toga je potrebno odrediti za koju komponentu pokreta je trajanje najduže i na osnovu tog najdužeg vremena izračunati diskretne vremenske intervale.

Prema tome postupak proračuna internih koordinata u pojedinim diskretnim vremenskim intervalima bio bi slijedeći:

1. Iz  $(x_0, y_0, z_0, \psi_0)$  izračunati  $\underline{a}_0 = \text{stu}(\theta_0, \phi_0, q_{30}, \psi_0)$  i iz  $(x_k, y_k, z_k, \psi_k)$  izračunati  $\underline{a}_k = \text{stu}(\theta_k, \phi_k, q_{3k}, \psi_k)$ .

2. U vremenu  $T$  pomaci internih koordinata su:
 
$$\underline{a} = \underline{a}_k - \underline{a}_0 \quad (1)$$

3. Iz zadanog maksimalno dozvoljenog ubrzanja  $\underline{a}_M = \text{stu}(\ddot{\theta}_M, \ddot{\phi}_M, \ddot{q}_{3M}, \ddot{\psi}_M)$  i prije izračunatog pomaka  $\underline{a} = \text{stu}(\theta, \phi, q_3, \psi)$  odrediti vrijeme potrebno za svaku komponentu pokreta  $\underline{T} = \text{stu}(T_\theta, T_\phi, T_{q3}, T_\psi)$ :

$$\underline{T}_\alpha = f_\alpha(\underline{a}, \underline{a}_M)$$

4. Vrijeme  $T$  koje ćemo trebati diskretizirati je
 
$$T = \max(T_\theta, T_\phi, T_{q3}, T_\psi)$$

5. Manipulacioni pokret će trajati vrijeme  $T$ , koje će neka od ubrzanja biti manja od maksimalno dozvoljenih. Nova ubrzanja su  $\underline{a}_M^* = \text{stu}(\ddot{\theta}_M^*, \ddot{\phi}_M^*, \ddot{q}_{3M}^*, \ddot{\psi}_M^*)$ :

$$\underline{a}_M^* = g_\alpha(\underline{a}, T)$$

6. Ako je  $J_{MAX}$  maksimalno dozvoljeni broj diskretnih koraka trajanje diskretnog intervala je

$$\Delta t = T/J_{MAX} \quad (2)$$

7. Na kraju svakog diskretnog vremenskog intervala potrebno je izračunati:

$$\underline{a}(J\Delta t), \underline{\dot{a}}(J\Delta t), \underline{\ddot{a}}(J\Delta t)$$

$$J = 1, \dots, J_{MAX}$$

U većini slučajeva vrh manipulatora je na početku i na kraju manipulacionog pokreta u stanju mirovanja. Prema tome u vremenu manipulacionog pokreta manipulator se jedan dio vremena ubrzava, a drugi dio vremena usporava. Kako je kod industrijskih manipulatora u pogonima za kovanje i prešanje bespredmetno ići na minimizaciju potroška energije manipulatora, najpovoljnije varijanta vremenske promjene ubrzanja je da se u toku pola vremenskog intervala  $T/2$  manipulator ubrzava konstantnom akceleracijom, a u toku slijedeće polovine usporava konstantnom deceleracijom. Iz tako zadane zakonitosti promjene ubrzanja direktno slijedi i vremenska zakonitost promjene brzine i pomaka.

Na taj način se dobije funkcijska veza između vremena, pomaka i ubrzanja koja se za slučaj koordinate  $\theta$  može izraziti:

$$T_\theta = f_1(\theta, \ddot{\theta}_M) = (4\theta/\ddot{\theta}_M)^{1/2} \quad (3)$$

$$\ddot{\theta}_M^* = g_1(\theta, T) = 4\theta/T^2 \quad (4)$$

Problem izračunavanja početnih i krajnjih internih koordinata  $(\theta, \phi, q_3, \psi)$  iz zadanih pravokutnih koordinata  $(x, y, z, \psi)$  vodi na problem rješavanja nelinearne vektorske jednadžbe oblika  $\underline{x} = f(\underline{\theta})$  (5)

gdje su  $\underline{x} = \text{stu}(x, y, z, \psi)$  i  $\underline{\theta} = \text{stu}(\theta, \phi, q_3, \psi)$ . Postavljeni problem se rješava modificiranim Newton-Raphsonovom iterativnom metodom [3]

Deriviranjem jednadžbe (5) dobijemo:

$$\frac{d\underline{x}}{d\underline{\theta}} = J(\underline{\theta}) \quad (6)$$

gdje je  $J(\underline{\theta})$  Jacobiana od funkcije  $f$  u odnosu na  $\underline{\theta}$ :

$$[J(\underline{\theta})]_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial \theta_j} \quad (7)$$

Jednadžbu (6) možemo pisati

$$\Delta \underline{x} = J(\underline{\theta}) \Delta \underline{\theta} \quad (8)$$

Iz čega slijedi rješenje problema

$$\Delta \underline{\theta} = J^{-1}(\underline{\theta}) \Delta \underline{x} \quad (9)$$

Iterativni postupak pogodan za brzo rješavanje na elektroničkom računalu, kojim se do rezultata dolazi nakon relativno malog broja iteracija se sastoji u slijedećem:

zadamo neku početnu vrijednost vektora  $\underline{\theta}$  i označimo je sa  $\underline{\theta}_0$ , a zadanu vrijednost vektora  $\underline{x}$  označimo sa  $\underline{x}_f$ .

$$\underline{x}_k = f(\underline{\theta}_k)$$

$$\Delta \underline{x}_k = \underline{x}_f - \underline{x}_k$$

$$\Delta \underline{\theta}_k = J^{-1}(\underline{\theta}_k) \Delta \underline{x}_k \quad (10)$$

$$\underline{\theta}_{k+1} = \underline{\theta}_k + \Delta \underline{\theta}_k$$

$$\underline{x}_{k+1} = f(\underline{\theta}_{k+1})$$

gdje je  $k=0, 1, 2, \dots$  i  $\underline{\theta}_0$  zadano.

U svakom koraku ispitujemo razliku  $(x_f - x)$  i ukoliko je manje od neke unapred zadane vrijednosti dobili smo rješenje problema odnosno traženi  $\theta_f = \theta_k$ . Veličinu koraka iteracije određuje konstanta  $s$ . Optimalna vrijednost konstante  $s$  će biti ona za koju je kvadrat udaljenosti između točaka  $x(s)$  i  $x_f$  minimalan gdje je  $x(s)$  kandidat za točku  $x_{k+1}$ . Kriterij optimalnosti  $C$  možemo izraziti jednadžbom:

$$\min C = \min_s [x_f - x(s)]^T [x_f - x(s)] \quad (11)$$

Uobičajenim postupkom traženja minimuma kriterija  $C$  (deriviranjem po  $s$ -u i izjednačavanje s nulom) dobijemo zahtjev za optimalnu vrijednost  $s$  (označimo je sa  $s^*$ )

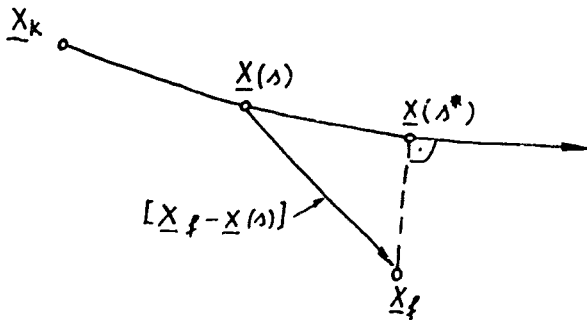
$$[x(s^*) - x_f]^T \frac{dx(s)}{ds} \Big|_{s=s^*} = 0 \quad (12)$$

Zahtjev (12) je zadovoljen ako je  $x(s^*) = x_f$  što znači da se proračun može zaustaviti ako je vektor  $[x_f - x(s^*)]$  normalan na tangentni vektor kroz trajektoriju  $x(s)$ . Tu situaciju prikazuje Sl.2.

Za primjenu na elektroničkom računalu pogodan je iterativni postupak traženja optimalne konstante  $s$  [3].

$$s_{k+1} = s_k + r \frac{[x_f - x(s_k)]^T [x(s_k) - x(s_{k-1})]}{\underbrace{[x_f - x(s_k)]^T [x(s_k) - x(s_{k-1})]}_{SP}} \quad (13)$$

Početna vrijednost konstante  $s_0$  i nove konstante  $r$  kojom određujemo veličinu koraka iteracije u postupku traženja  $s^*$  treba biti zadana. Ako  $s_k > s^*$  tada dio jednadžbe označen sa  $SP=0$ .



Sl.2. Shematski prikaz traženja optimalne vrijednosti konstante  $s$

U slučaju da je  $s_{k+1} > s^*$ ,  $SP < 0$ , tada je  $s_{k+2} < s_{k+1}$ , a ako je  $s_{k+1} < s^*$ ,  $SP > 0$ ,  $s_{k+2} > s_{k+1}$ . Iteraciju zaustavljamo kada  $DP$  postane manji ili jednak od neke male vrijednosti (npr.  $SP \leq 0,2$ ).

Pokazalo se [3] da je broj iteracije kod traženja optimalne vrijednosti  $s^*$  već dovoljno mali ako se uzme  $s_0 = 0,4$  i  $r = 0,3$ .

Prema tome program za rješavanje nelinearne vektorske jednadžbe oblika (5) sadrži dva iterativna postupka: osnovnu iteraciju zadanu jednadžbama (10) i u svakoj toj iteraciji, iterativno traženje optimalne vrijednosti konstante  $s$  zadanu jednadžbom (13).

Kako se početni položaj manipulatora ne mora uvijek podudarati sa Sl.1., odnosno grana manipulatora se ne mora poklapati sa osi  $x$ , prije proračuna kinematike i dinamike potrebno je izračunati nove vektore smjera osi rotacije  $\underline{l}_{10}, \underline{l}_{20}, \underline{l}_{30}$  i  $\underline{l}_{40}$  i položaje težišta pojedinih segmenata manipulatora. Pri tome sukcesivno koristimo

Rodrigovu formulu:

$$\underline{P}_i = \underline{P}_{i0} \cos \alpha + (1 - \cos \alpha) (\underline{e}_i \cdot \underline{P}_{i0}) \underline{e}_i + (\underline{e}_i \times \underline{P}_{i0}) \sin \alpha \quad (14)$$

gdje je

$\underline{P}_{i0}$  - osnovni početni položaj težišta manipulatora i tog segmenta

$$\underline{P}_{10} = (0, 0, 0)$$

$$\underline{P}_{20} = (l_1, 0, 0)$$

$$\underline{P}_{30} = (l_2 + l_3, 0, 0)$$

$$\underline{P}_{40} = (l_2 + l_3 + l_4, 0, 0)$$

$\alpha \in \{\theta, \phi, q_3, \psi\}$ , a  $\underline{e}_i$  se također dobije sukcesivnom primjenom Rodrigove formule (14) uz zamjenu  $\underline{P}_{i0}$  sa  $\underline{e}_{i-1}$ .

### 2.3. Proračun brzina i ubrzanja

Na kraju svakog diskretnog intervala vremena  $\Delta t$  računaju se translacijske i rotacijske brzine i ubrzanja prema jednadžbama [1,2]:

$$\underline{\omega}_{i+1} = \underline{\omega}_i + \underline{l}_{i+1} \cdot \dot{\alpha}_{i+1} \quad (15)$$

$$\dot{\underline{\omega}}_{i+1} = \dot{\underline{\omega}}_i + \underline{l}_{i+1} \cdot \ddot{\alpha}_{i+1} + (\underline{\omega}_i \times \underline{l}_{i+1}) \cdot \dot{\alpha}_{i+1} \quad (16)$$

Ako je zglob  $i+1$  translacijski:

$$\underline{v}_{i+1} = \underline{l}_{i+1} \cdot \dot{\alpha}_{i+1} + \underline{\omega}_{i+1} \times \underline{P}_{i+1} + \underline{v}_i \quad (17)$$

$$\dot{\underline{v}}_{i+1} = \underline{l}_{i+1} \cdot \ddot{\alpha}_{i+1} + \dot{\underline{\omega}}_{i+1} \times (\underline{\omega}_{i+1} \times \underline{P}_{i+1}) + 2\underline{\omega}_{i+1} \times (\underline{l}_{i+1} \cdot \dot{\alpha}_{i+1}) + \dot{\underline{\omega}}_{i+1} \times \underline{P}_{i+1} + \dot{\underline{v}}_i \quad (18)$$

Ako je zglob  $i+1$  rotacijski

$$\underline{v}_{i+1} = \underline{\omega}_{i+1} \times \underline{P}_{i+1} + \underline{v}_i \quad (19)$$

$$\dot{\underline{v}}_{i+1} = \dot{\underline{\omega}}_{i+1} \times \underline{P}_{i+1} + \underline{\omega}_{i+1} \times (\underline{\omega}_{i+1} \times \underline{P}_{i+1}) + \dot{\underline{v}}_i \quad (20)$$

gdje je  $\underline{P}_{i+1} = \underline{P}_{i+1} - \underline{P}_i$ , a  $\underline{P}_i$  je vektor koji određuje položaj  $i$ -tog segmenta.

Za RRTR konfiguraciju manipulatora vrijedi:

$$\alpha_1 = \theta, \alpha_2 = \phi, \alpha_3 = q_3 \text{ i } \alpha_4 = \psi.$$

Brzine i ubrzanja se računaju od prvog prema četvrtom segmentu.

### 2.4. Proračun sila i momenata

U ulaznim podacima zadajemo momente inercije segmenata oko osi koje prolaze kroz težište svakog pojedinog segmenta. Zbog toga je najprije potrebno proračunati momente inercije segmenata manipulatora oko osi  $x, y$  i  $z$ .

Sile i momenti se računaju unatrag od četvrtog prema prvom segmentu na kraju svakog diskretnog intervala vremena  $\Delta t$ .

Najprije se izračuna translacijsko ubrzanje težišta segmenata u odnosu na zglobove uz korekciju ubrzanja zbog gravitacije  $\underline{g}$ :

$$\underline{\ddot{v}}_i = \underline{\omega}_i \times (\underline{\omega}_i \times \underline{d}_i) + \dot{\underline{\omega}}_i \times \underline{d}_i + \underline{\ddot{v}}_i + \underline{g} \quad (21)$$

gdje je  $\underline{d}_i = \underline{P}_{i+1} - \underline{r}_i$ ,  $\underline{P}_{i+1}$  je vektor koji određuje položaj težišta  $i+1$  segmenta, a  $\underline{r}_i$  je vektor koji određuje položaj zgloba između segmenta  $i$  i segmenta  $i-1$ .

Totalnu vanjsku silu i totalni vanjski moment računamo prema jednadžbama:

$$\underline{F}_i = m_i \underline{\ddot{v}}_i \quad (22)$$

$$\underline{N}_i = \underline{J}_i \cdot \dot{\underline{\omega}}_i + \underline{\omega}_i \times (\underline{J}_i \cdot \underline{\omega}_i) \quad (23)$$

gdje je  $\underline{J}_i$  tenzor inercije  $i$ -tog segmenta. Ukupnu silu i ukupni moment u zglobu između segmenta  $i$  i segmenta  $i-1$  računamo prema jednadžbama:

$$\underline{f}_i = \underline{f}_{i+1} + \underline{F}_i \quad (24)$$

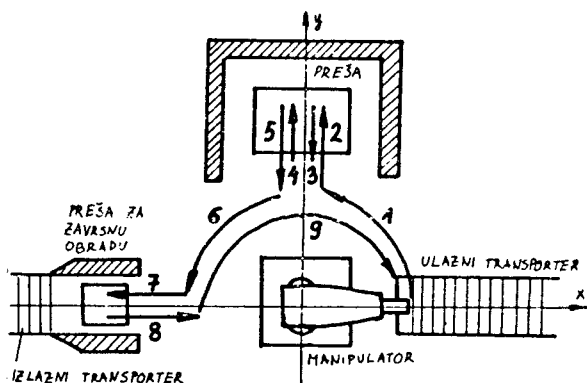
$$\underline{n}_i = \underline{n}_{i+1} + \underline{r}_{i+1} \times \underline{f}_{i+1} + \underline{N}_i + \underline{d}_i \times \underline{F}_i \quad (25)$$

gdje je  $\underline{r}_{i+1}^* = \underline{r}_{i+1} - \underline{r}_i$ , a značajno za  $\underline{r}_i$  i  $\underline{d}_i$  smo dali ispod jednadžbe (21).

### 3. PRIMJER PRORAČUNA KINEMATIKE I DINAMIKE MANIPULATORA

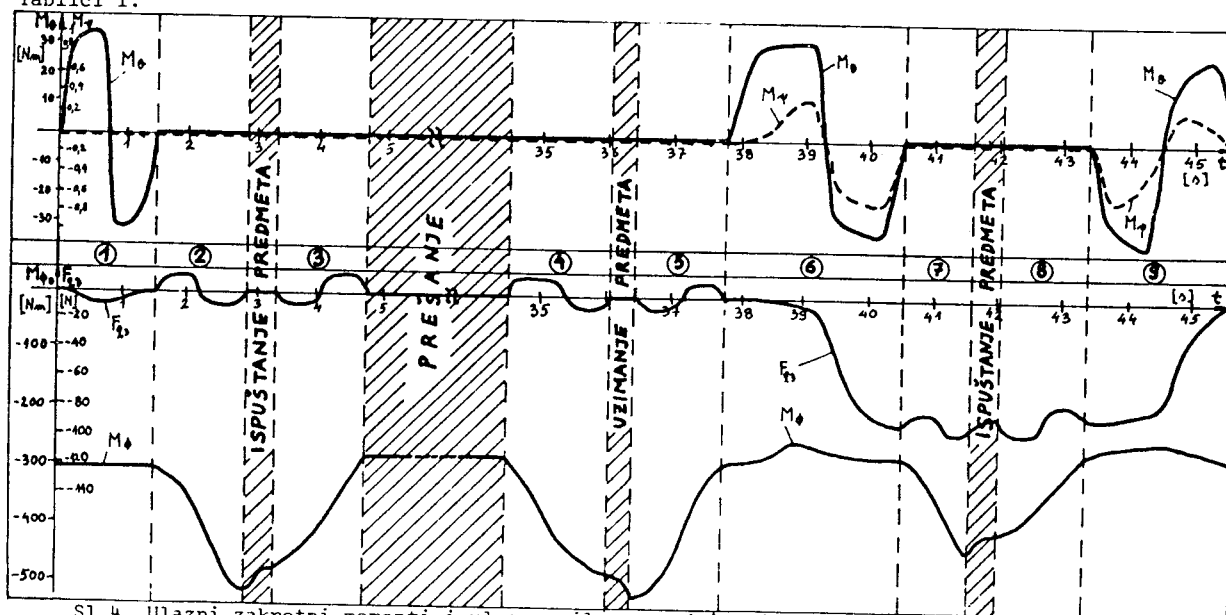
Pogledajmo na jednom primjeru rezultate proračuna kinematike i dinamike manipulatora za jedan karakterističan radni zadatak u pogonima za prešanje i kovanje. Radi se o pogonu za prešanje u kalupima. Sl.3. shematski prikazuje radni zadatak koji se sastoji od slijedećih manipulacijskih pokreta:

- 1 - uzimanje predmeta sa ulaznog transportera i rotacija grane za 90°,
- 2 - unošenje i ostavljanje predmeta u prešu,
- 3 - povlačenje grane manipulatora dok se izvrši operacija prešanja,
- 4,5- ponovo uzimanje djelomično obradjenog predmeta,
- 6 - rotacija grane za 90° do preše za završnu obradu i rotacije hvataljke za 90°,
- 7 - unošenje i ostavljanje predmeta u preši za završnu obradu,
- 8 - povlačenje grane manipulatora iz preše za završnu obradu, i
- 9 - vraćanje grane manipulatora u početni položaj.



Sl.3. Operacija prešanja u kalupima

Mehaničke karakteristike manipulatora su dane u Tablici I.



Sl.4. Ulazni zakretni momenti i ulazne sile za radni zadatak prešanje u kalupima

Tablica I: Mehaničke karakteristike manipulatora

Segment (i)	1	2	3	4
masa ( $m_i$ ) kg	30	20	10	1
momenti inercije oko osi kroz te- žište segmenta ( $J_{io}$ ) $\text{kgm}^2$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1,35 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,5 \\ 4 \\ 5,5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,858 \\ 0,05 \\ 0,858 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,001 \\ 0,001 \\ 0,001 \end{bmatrix}$

Masa predmeta kojim se manipulira je 2 kg, a maksimalno dozvoljeno ubrzanje segmenata je:

$$\theta_M = \phi_M = \psi_M = 3,1415 \text{ rad/sek}^2, \quad q_{3M} = 1,2 \text{ m/sek}^2$$

Sl.4. prikazuje ulazne zakretno momente aktuatora koji vrše zakret  $\theta$ ,  $\phi$  i  $\psi$  ( $M_\theta$ ,  $M_\phi$  i  $M_\psi$ ) i ulaznu silu koja vrši pomak  $q_3$  ( $F_{q_3}$ ).

### 4. ZAKLJUČAK

Strojno rješavanje problema proračuna kinematike i dinamike manipulatora na elektroničkom računaru važno je, kako u fazi projektiranja manipulatora, tako i u fazi njegove primjene.

U pogonima za kovanje i prešanje najpogodnija je RRTR konfiguracija manipulatora. Opisan je program za proračun kinematike i dinamike manipulatora te konfiguracije na osnovi Paulove metode sukcesivnih transformacija.

Najvažniji rezultati programa su sile i momenti u svim zglobovima manipulatora. Njih koristimo, kako kod projektiranja (za izbor motora aktuatora, korekciju mehaničke konstrukcije itd) tako i za formiranje zakona upravljanja u fazi korištenja industrijskog manipulatora.

### 5. LITERATURA

- [1] Mandić, I.: "Kritička usporedba metoda za izračunavanje dinamičkih jednadžbi industrijskog robota", magistarska naloga, Fakulteta za elektrotehniku, Ljubljana, 1981.
- [2] Paul, R. i ostali: "Advanced Industrial Robot Control Systems", First Report (May 1978) i Second Report (July 1979), Purdue University, W.Lafayette, U.S.A.
- [3] Whitney, D.E.: "Optimum Step Size Control for Newton-Raphson Solution of Nonlinear Vector Equations", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-14, No.5, Oct,1969, str.572-574.