ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992
Seria: *Mechanika* z. 112 Nr kol. 1182

Tadeusz SZKODNY
Instytut Automatyki
Politechnika Śląska

STEROWANIE ROBOTEM IRb-6

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę pozwalającą na komputerową analizę sterowań odpowiadających minimalnoczasowym trajektoriom zadanym ruchu chwytaka.

Summary. In this paper there was presented a method of planning minitimes trajectories. There considered a trajectories of moving task with definition and undefinition kinematics.

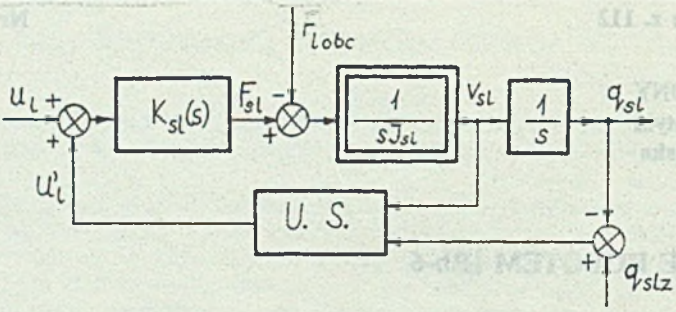
Zusammenfassung. Für Antrieb des Manipulators des Industrieroboters IRb-6 sind 5 elektrischen Servomotoren verwenden. Während der Teach-in-Programmierung des Roboters die Zeitverlaufe der Drehwinkel der Motoren werden im Steuerungssystem gespeichert. Mit Hilfe der kinematischen und dynamischen Modellen des Manipulators IRb-6 kann man die Steuerungen der Motoren zu bestimmen. Sie sollen das Zeit der Bewegung auf der Istbahn des Greifers minimalisieren. In diesem Beitrag ist die Methode der Planierung der Minimal-Zeit-Steuerungen für Industrieroboter IRb-6 vorgestellt.

1. WPROWADZENIE

Manipulator w robocie IRb-6 jest napędzany za pomocą 5 silników sterowanych przez 5 serwomechanizmów [2,3,5]. Przebiegi zadanych kątów obrotu silników q_{slz} są wprowadzane do pamięci systemu sterowania podczas uczenia robota zadanej trajektorii ruchu. Przebiegi q_{slz} są jedynymi znanymi sygnałami przed realizacją zadanej trajektorii. Na podstawie tych przebiegów serwomechanizmy w czasie realizacji zadanej trajektorii wypracowują odpowiednie sterowania u_l'.

Znając modele kinematyki i dynamiki manipulatora IRb-6 oraz równania wiążące sterowania u_l z momentem elektromagnetycznym F_{sl} rozwijanym przez silniki, jesteśmy w stanie obliczyć sterowania u_l dla poszczególnych silników przed realizacją zadanej trajektorii. Tak zaplanowane sterowania można w węźle sumacyjnym dodać do sterowań serwomechanizmów u_l'. Idea ta pozwala na "odciążenie serwomechanizmów", tzn. im dokładniej wyznaczymy u_l, tym mniejszy będzie udział serwomechanizmów w procesie sterowania. Rys.1 przedstawia schemat blokowy l-tego serwomechanizmu wspomaganego obliczonym sterowaniem u_l.

W niniejszej pracy przedstawiono metodę obliczania sterowań u_l minimalizujących czas ruchu chwytaka manipulatora IRb-6 między punktem początkowym i końcowym zadanej trajektorii.



Rys.1. Schemat blokowy l-tego serwomechanizmu. $K_{sl}(s)$-funkcja przejścia zespołu wzmacniacz mocy-silnik, J_{sl}-efektywny moment bezwładności l-tego silnika, US-układ sterowania l-tego silnika
Fig.1. Block diagram of l-th serwo-controller. $K_{sl}(s)$ - a transfer function of actuators , J_{sl}-effective inertia of l-th actuators, U.S.-control of l-th actuators

W drugim punkcie przedstawionio metodę planowania minimalnoczasowych sterowań u dla dowolnej i określonej kinematyki ruchu. W trzecim punkcie przedstawiono wyniki obliczeń, a w czwartym punkcie sformułowano wnioski końcowe.

2. PLANOWANIE TRAJEKTORII MINIMALNOCZASOWYCH

Oryginalne modele kinematyki i dynamiki ruchu manipulatora IBb-6 autor przedstawił w pracy [4,5,6]. Momenty obrotowe F_{sl}, jakie muszą wytworzyć silniki dla zadanego ruchu opisanego za pomocą: kątów obrotów silników q_{sl}, prędkości kątowych silników v_{sl}, przyspieszeń kątowych $\dot{v}_{sl}$, można przedstawić w postaci:

$$F_{sl}=\sum_{j=1}^{5} D_{sljj}\dot{v}_{sj}+\sum_{j=1}^{5}\sum_{k=1}^{5} D_{sljk}v_{sj}v_{sk}+D_{svl}v_l+D_{sl} \ . \tag{1}$$

Współczynniki D_{sljj}, D_{sljk}, D_{sl} zależą tylko od q_{sl}, D_{svl}=const. Funkcję przejścia $K_{sl}(s)$ (rys.1) zespołu wzmacniacz mocy-silnik można przyjąć w postaci:

$$K_{sl}(s) = k_{sl} = const \ . \tag{2}$$

Zatem moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik jest równy:

$$F_{sl} = k_{sl}\, u_l(t) \ , \tag{3}$$

gdzie t-czas.
Dla określenia sterowań $u_l(t)$ oraz współrzędnych q_{sl}, v_{sl}, $\dot{v}_{sl}$ zapewniających ruch minimalnoczasowy, czyli minimalizujący czas ruchu, zastosujmy rachunek wariacyjny [1]. Matematyczny zapis minimalizowanego czasu t_k przedstawia całka:

$$T=\int_0^{t_k} dt \ . \tag{4}$$

Warunki uboczne opisują następujące równania:

$$g_l=\dot{q}_{sl}-v_{sl}=0 \ , \tag{5a}$$

$$g_{l+5}=F_{sl}(q_{s1},q_{s2},\ldots,q_{s5},v_{s1},v_{s2},\ldots,v_{s5},\dot{v}_{s1},\dot{v}_{s2},\ldots,\dot{v}_{s5})-k_{sl}u_l=0 \ . \tag{5b}$$

Warunki (5b) wynikają z równań (1) i (3). Po uwzględnieniu tych warunków otrzymamy:

$$T=\int_0^{t_k}\left(1+\sum_{l=1}^{10}\lambda_l(t)\,g_l(t)\right)dt=\int_0^{t_k}h(t)\,dt \ . \tag{6}$$

Równania Eulera-Lagrange'a dla powyższej całki mają postać [1]:

$$\sum_{l=1}^{10}\lambda_l\frac{\partial g_l}{\partial q_{si}}=0, \quad \sum_{l=1}^{10}\lambda_l\frac{\partial g_l}{\partial u_i}=0,$$

$$\sum_{l=1}^{10}\left\{\lambda_l\left[\frac{\partial g_l}{\partial v_{si}}-\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial g_l}{\partial \dot{v}_{si}}\right)\right]-\frac{d\lambda_l}{dt}\frac{\partial g_l}{\partial \dot{v}_{si}}\right\}=0 \ , \tag{6a}$$

gdzie i=1,...,5.
Ogólnym rozwiązaniem powyższych równań są zerowe wartości mnożników Lagrange'a $\lambda_l=0$.

Jeśli kinematyka trajektorii zadanej jest określona, wtedy w całce (6) należy uwzględnić dodatkowe warunki uboczne:

$$g_{10+l}=q_{sl}(\tau)-q_{slz}(\tau)=0 \ , \tag{7a}$$

gdzie τ jest parametrem kinematycznym.

Po modyfikacji całki (6) nadal ogólnym rozwiązaniem równań Eulera-Lagrange'a są zerowe wartości wszystkich mnożników Lagrange'a. Takie rozwiązanie jest nieużyteczne.

Wobec nieużyteczności ogólnych rozwiązań spróbujmy rozwiązać problem minimalnoczasowych sterowań dla przypadku uproszczonego. Pominiemy oddziaływania dynamiczne na wirnik silnika pochodzące od innych elementów manipulatora i przyjmiemy, że jego moment bezwładności $J_{sl} = D_{sll}$ = const (patrz równanie (1)).

Uwzględnimy także ograniczenia sterowań $|u_l|\le u_{lm}$. Dla tych uproszczeń równania ruchu mają postać:

$$F_{sl}=J_{sl}\dot{v}_{sl} \quad . \tag{7b}$$

Teraz będziemy mieć dwa warunki uboczne:

$$g_1 = \dot{q}_{sl}-v_{sl} = 0 \quad , \tag{8a}$$

$$g_2 = v_{sl}-\left(\frac{k_{sl}}{J_{sl}}\right)u_l = 0 \quad . \tag{8b}$$

Zatem będziemy minimalizować całkę (6), w której funkcja h ma postać:

$$h = 1+\lambda_1(\dot{q}_{sl}-v_{sl})+\lambda_2\left(\dot{v}_{sl}-\frac{k_{sl}}{J_{sl}}u_l\right)$$

Równania Eulera-Lagrange'a mają postać:

$$0-\dot{\lambda}_1 = 0, \qquad -\lambda_1-\dot{\lambda}_2 = 0 \quad , \tag{9a}$$

$$\frac{\partial h}{\partial u_l} = 0 \quad . \tag{9b}$$

Równanie (9b) możemy traktować jako warunek konieczny dla minimum $h(u_l)$. Minimum $h(u_l)$ otrzymamy dla:

$$u_l = \begin{cases} u_{lm} & dla \quad \lambda_2>0 \\ -u_{lm} & dla \quad \lambda_2<0 \end{cases} \quad . \tag{10}$$

Z równań (9a) wynika:

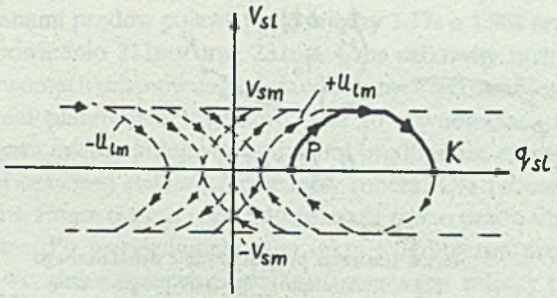
$$\lambda_1 = C_1, \qquad \lambda_2 = -C_1*t+C_2 \quad ,$$

gdzie: C_1, C_2 - stałe całkowania.

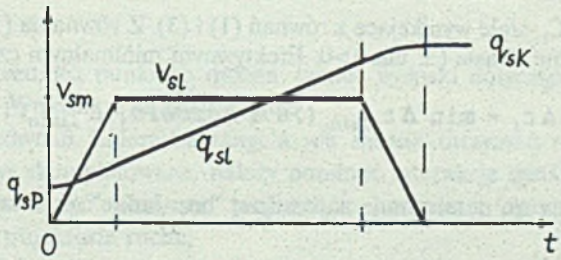
Z równań (8a,b) wynika:

$$\frac{dq_{sl}}{dv_{sl}} = \pm\frac{J_{sl}}{u_{lm}k_{sl}}v_{sl}, \qquad q_{sl}\pm\frac{J_{sl}}{u_{lm}k_{sl}}v_{sl}^2 = const \tag{11}$$

Rys. 2 i 3 ilustrują trajektorie $v_{sl}(q_{sl})$ odpowiadające równaniu (11). Zaznaczono tu maksymalne prędkości v_{lm}, jakie może osiągnąć wirnik silnika. Punkt P ilustruje początek trajektorii, punkt K - koniec trajektorii $v_{sl}(q_{sl})$.



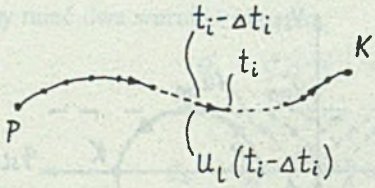
Rys.2. Ilustracja trajektorii opisanych równaniem (10)
Fig.2. Illustration of trajectories described by Equation (10)



Rys.3. Ilustracja $v_{sl}(t)$ i q_{sl} (t) odpowiadająca trajektorii PK na rys.2
Fig.3. Illustration v_{sl} (t) and $q_{sl}(t)$ adequates to trajectories PK in Fig.2

Powyższy sposób pozwala określić wstępnie kinematykę trajektorii minimalnoczasowej dla dowolnej trajektorii ruchu chwytaka między punktami P i K. Po dyskretyzacji trajektorii możemy zastosować programowanie dynamiczne [7], które umożliwi obliczenie sterowania u_l z wykorzystaniem nieuproszczonych równań dynamiki (1).

Programowanie dynamiczne sterowań u minimalizujących czas ruchu manipulatora polega na wyznaczeniu takich sterowań, które minimalizują czas przejścia od stanu poprzedniego do aktualnego, począwszy od stanu końcowego. Rys. 4 ilustruje to programowanie.



Rys.4. Ilustracja programowania dynamicznego
Fig.4. Illustration of dynamic programming

Sterowania stanu i-1 w chwili t_i-Δt_i można opisać w postaci analitycznej jak poniżej:

$$u_l(t_i-\Delta t_i) = \frac{A_l}{(\Delta t_i)^2}+\frac{B_l}{\Delta t_i}+C_l \quad , \tag{12}$$

gdzie: A_l ,B_l ,C_l -stałe wynikające z równań (1) i (3). Z równania (12) możemy wyznaczyć czasy minimalne Δt_{lmin} ($\pm$ u_{lm})>0. Efektywnym minimalnym czasem Δt_i będzie:

$$\Delta t_i = \min \Delta t_{ilmin} \ (>0 \ i \ kazde \ |u_j(\Delta_{ilmin})| \le u_{jm}) \ .$$

Minimalny czas Δt_i determinuje najbardziej "bezwładne" sterowanie.

3. PRZYKŁADY

Stosując programowanie dynamiczne wyznaczono sterowania minimalnoczasowe dla trajektorii zadanej z określoną kinematyką między punktem początkowym P i punktem końcowym K. Sterowaniem jest tu prąd sterownika, $u_l=I_{sl}$ z ograniczoną amplitudą. Punkty P i K opisują trzy współrzędne położenia i trzy kąty Eulera w układzie bazowym x_o y_o z_o [5,6]. x_p=-60 cm, y_p=60 cm, z_p=100 cm, $\phi_p=135^o$, $\Theta_p=180^o$, $\psi_p=360^o$, x_k=-65 cm, y_k=60 cm, z_k=100 cm, $\phi_k=137.29^o$, $\Theta_k=0^o$, $\psi_k=180^o$.

Do obliczeń przyjęto, że manipulator IRb-6 ma przykładowy pusty chwytak [4] oraz $|I_{sl}|\le 11A$.

Rys. 5 ilustruje kinematykę trajektorii zadanej. Jest to linia prosta o długości 5 cm., równoległa do osi x_o.

Do wyznaczenia tak zadanej kinematyki zastosowano komputerowy generator trajektorii manipulatora IRb-6 [4]. Generator ten po zadeklarowaniu odpowiednich

parametrów wejściowych wyznaczył 256 punktów dodatkowych, mieszczących się wewnątrz walca o promieniu 0.1 cm i osi stanowiącej odcinek PK.

Z rys.6 widać, że prądy I zmieniają się co około 2ms. Maksymalne odstępy czasu między kolejnymi zmianami prądów pojawiają się między 1.77s a 1.98s oraz między 1.98s a 2.22s i wynoszą odpowiednio 211ms oraz 231ms. Czas całkowity ruchu wynosi 3.88s. Quasi–statyczność serwomechanizmów względem obliczonych sterowań jest podstawowym warunkiem poprawności planowania trajektorii. Jest to równoważne stwierdzeniu, że maksymalny odstęp czasu między kolejnymi zmianami prądu może co najwyżej stanowić 10% minimalnej stałej czasowej serwomechanizmów robota. Dla robota IRb-6 te stałe czasowe są rzędu 100ms, zatem maksymalny odstęp czasu zmian prądu silników nie może przekraczać rzędu 10ms. Po uwzględnieniu tego faktu i ograniczeń prędkości kątowej silników wspomniany wcześniej generator trajektorii wyznaczył między punktami P i K 2517 dodatkowych punktów. Przy sterowaniu minimalnoczasowym tak opisanej trajektorii, ruch trwa 11.556 s [4].

4. WNIOSKI

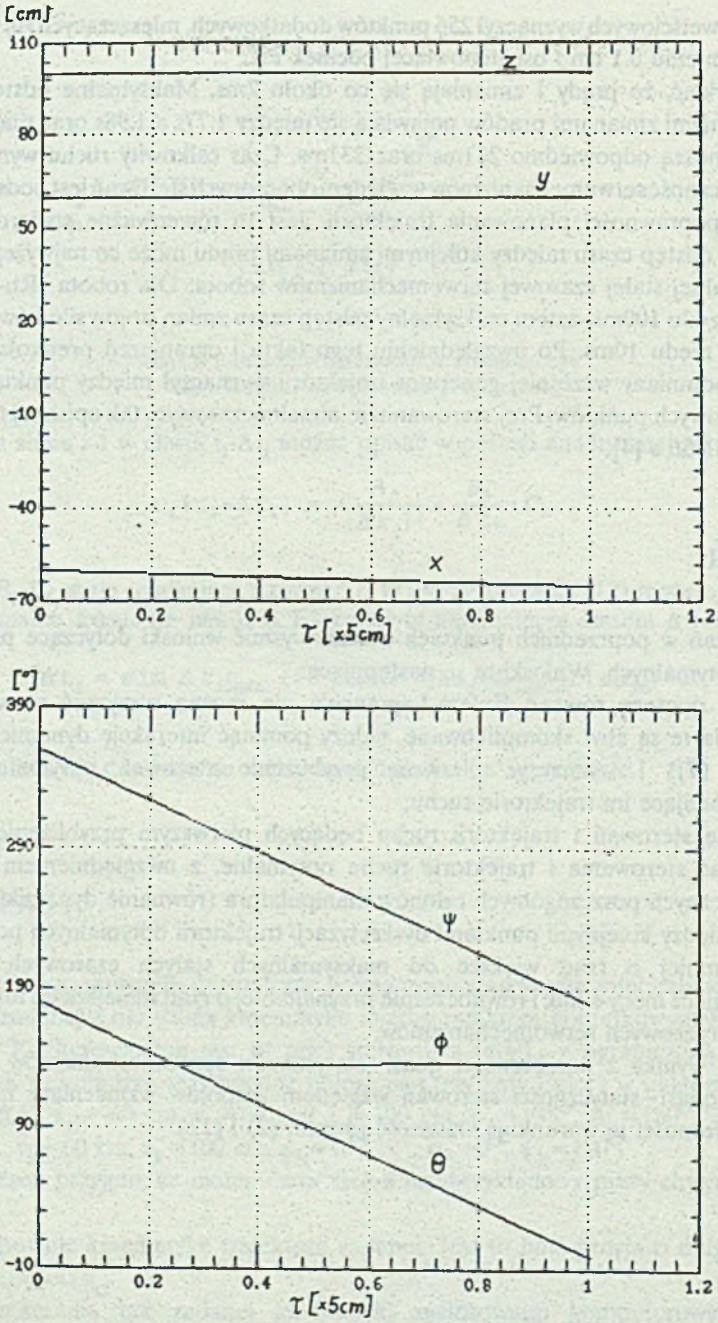
Z rozważań w poprzednich punktach można wysnuć wnioski dotyczące planowania sterowań optymalnych. Wnioski te są następujące:

a) jeśli za pomocą równań Eulera-Lagrange'a nie można otrzymać rozwiązań lub równania te są zbyt skomplikowane, należy pominąć interakcje dynamiczne ruchu (równ. (7)) i wyznaczyć pierwsze przybliżenie sterowań optymalnych oraz odpowiadające im trajektorie ruchu;

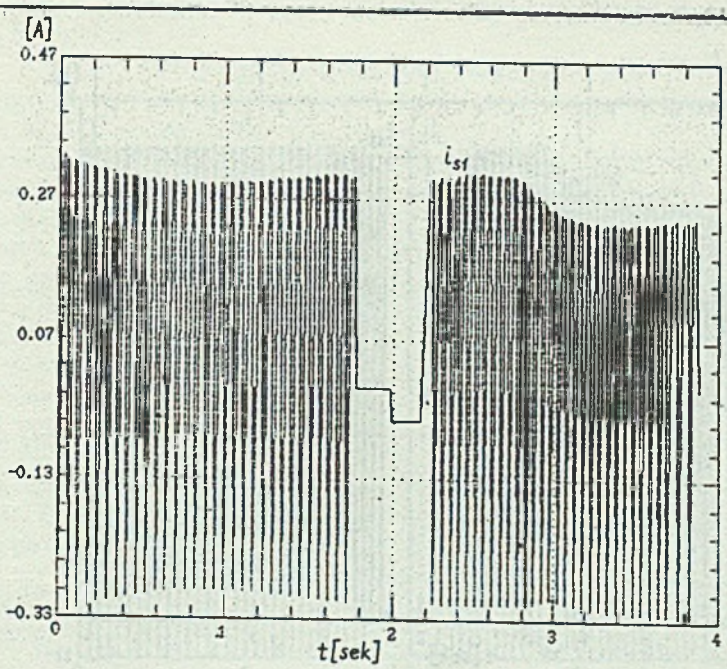
b) na bazie sterowań i trajektorii ruchu będących pierwszym przybliżeniem można planować sterowania i trajektorie ruchu optymalne, z uwzględnieniem interakcji dynamicznych poszczególnych członów manipulatora (równanie dynamiki (1)) ;

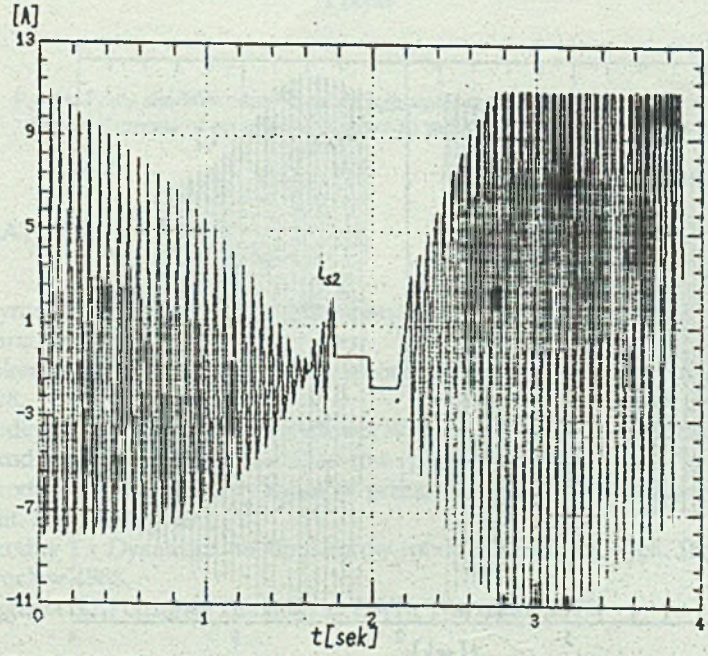
c) czasy między kolejnymi punktami dyskretyzacji trajektorii optymalnych powinny być przynajmniej o rząd większe od maksymalnych stałych czasowych zespołów wzmacniacz mocy-silnik i równocześnie przynajmniej o rząd mniejsze od minimalnych stałych czasowych serwomechanizmów.

Wniosek c) wynika z konieczności quasi–statyczności serwomechanizmów względem sterowań i quasi–statyczności sterowań względem zespołów wzmacniacz mocy-silnik. Quasi–statyczności te warunkują słuszność równań (2) i (12).

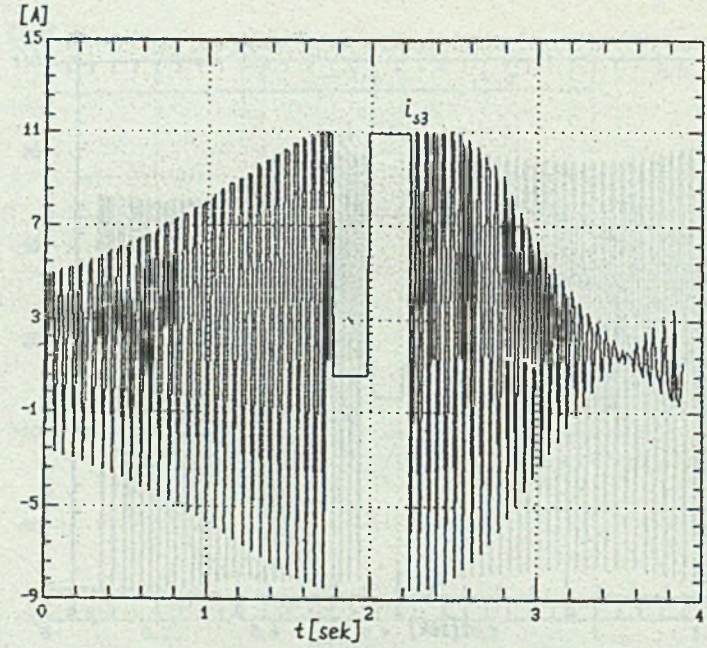


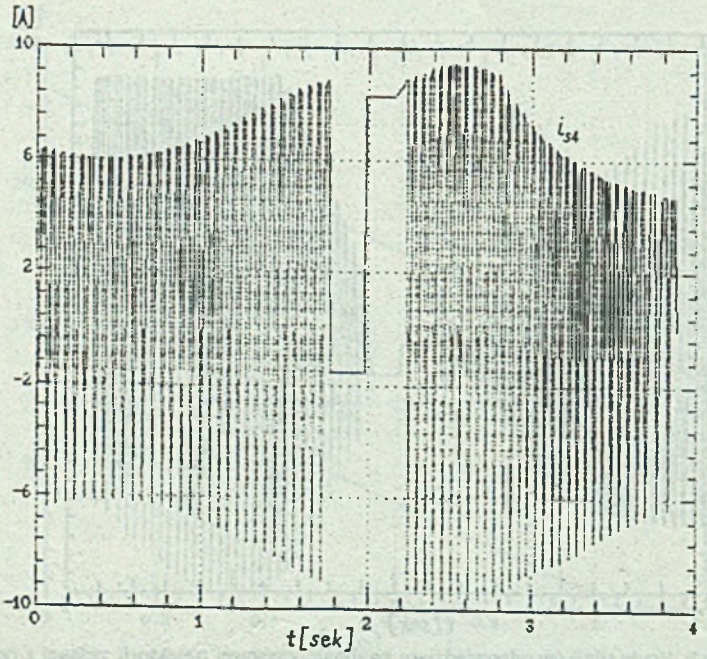
Rys.5a,b. Ilustracja kinematyki trajektorii zadanej
Fig.5a,b. Ilustration of kinematics a required trajectories



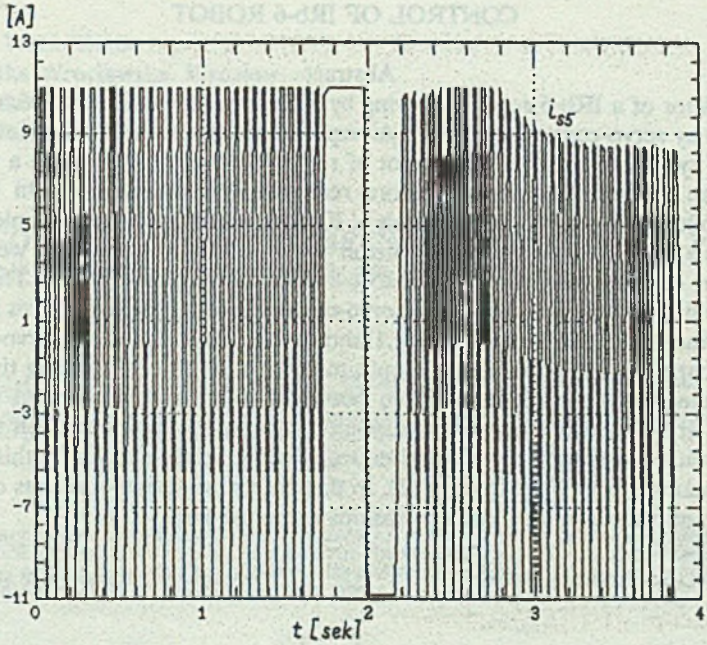


Rys.6a,b. Prądy silników odpowiadające minimalnoczasowej trajektorii zadanej z rys. 5
Fig.6a,b. Currents of actuators adequates to minitimes trajectories shown in Fig.5





Rys.6c,d. Prądy silników odpowiadające minimalnoczasowej trajektorii zadanej z rys. 5
Fig.6c,d. Currents of actuators adequates to minitimes trajectories shown in Fig. 5



Rys.6e. Prądy silników odpowiadające minimalnoczasowej trajektorii zadanej z rys. 5
Fig.6e. Currents of actuators adequates to minitimes trajectories shown in Fig.5

LITERATURA

[1] Bayron F.W., Fuller R.W.: Matematyka w fizyce klasycznej i kwantowej, PWN, Warszawa 1973.

[2] Dokumentacja techniczno-ruchowa robotów IRB-6 i IRb-60, MERA PIAP, Warszawa 1978.

[3] Niederliński A.: Roboty przemysłowe, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1981.

[4] Szkodny T.: Dynamika manipulatorów (praca niepublikowana).

[5] Szkodny T.: Manipulatory robotów przemysłowych. Modele matematyczne. Skrypt Polit. Śl. Gliwice 1990.

[6] Szkodny T.: Dynamika manipulatorów robotów przemysłowych. II K. K. Robotyki, Wrocław 1988.

[7] Węgrzyn S.: Podstawy automatyki. PWN, Warszawa 1978.

CONTROL OF IRb-6 ROBOT

Abstract

Manipulator of a IRb-6 robot is moving by 5 electric direct current actuators , which are control by servo-controllers [2,3,5]. A required actuators angle q are introducted to memory of system control, teach a robot of required trajectories motion a task during. Only q are determinate systems before realizatin the trajectories. On base the q, servocontrollers giving adequates controls u. Known: kinematics and dynamics models of manipulators IRb-6, equations binds controls u and torque of actuators , we may for all actuators to compute a controls u , before realization the trajectories. Thus planning controls we may to add to controls u of servo-control in summing point. This idea indulge to relieve the servo-controllers. In Fig.1 shown block diagram l-th servo-controller , relieving control u. In the work a compute method control u minimizing time move of task for manipulators of IRb-6 robots, between initial and final point of required trajectories are presented. In the second points planning minitimes controls method , for define and undefine kinematics of required trajectories, are presented. In this method we applied Equations (1), (7), (11) and (12). In this points the example results compute are presented, and fourth points final conclusions are presented.

Recenzent: Doc. Andrzej Buchacz Wpłynęło do redakcji w styczniu 1992