ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980
Seria: AUTOMATYKA z. 56 Nr kol. 652

Aleksander Staszulonek
Politechnika Śląska

SYMULACJA KOMPUTEROWA ROBOTA STEROWANEGO POŚLIZGOWO

Streszczenie. W artykule prezentowana jest struktura programowa przeznaczona do analizy własności dynamicznych manipulatora, oraz do testowania różnego rodzaju sterowań. Przedyskutowano kilka alternatywnych metod opisu dynamiki manipulatorów ze szczególnym uwzględnieniem metod nadających się do badań wspomaganych komputerowo. Wyprowadzono układ równań różniczkowych opisujących dynamikę manipulatora o trzech stopniach swobody. Do sterowania przedstawionym modelem zastosowano nieciągłe sterowanie wynikające z teorii systemów o zmiennej strukturze. Własności systemów o zmiennej strukturze oraz własności sterowania poślizgowego, a także możliwości zastosowania omawianej metody sterowania w rzeczywistych szybko działających systemach robot-komputer są dyskutowane w pracy.

1. Wprowadzenie

Projektowanie i testowanie złożonych robotów przemysłowych jest skomplikowaną, kosztowną i czasochłonną procedurą, nie zawsze dającą oczekiwane rezultaty. Wspomagane komputerowo projektowanie części manipulacyjnych robotów przemysłowych i symulacyjne testowanie sterowania posiada kilka zalet w porównaniu z tradycyjnym podejściem do problemu, szczególnie gdy stosuje się nowe rozwiązania kinematyczne lub gdy stosuje się nowe, nie sprawdzone dotąd w praktyce metody sterowania.
Przeprowadzenie badań symulacyjnych pozwala na łatwą optymalizację własności dynamicznych oraz umożliwia wybór najbardziej efektywnej metody sterowania w krótkim czasie i przy niewielkich nakładach finansowych.

Sterowanie robotami przemysłowymi przy wysokich wymaganiach na prędkość i precyzję ruchu jest problemem bardzo złożonym. Przyczyną tego są silnie nieliniowe równania ruchu systemów manipulacyjnych, zawierające nieliniowe sprzężenia między poszczególnymi stopniami swobody. Wyróżnia się kilka klasycznych metod projektowania algorytmów komputerowego sterowania robotami przemysłowymi [9], [4].
Większość z tych metod oparta jest o zlinearyzowane modele dynamiki, na podstawie których projektuje się algorytmy sterowania eliminujące sprzężenia.
Niektóre metody sterowania opierają się na kombinacji sprzężeń między stopniami swobody. Wymienione metody posiadają kilka niedogodności, które czynią je małowartościowymi do sterowania złożonymi robotami przemysłowymi o wysokich parametrach.

Sterowanie oparte na zlinearyzowanym modelu dynamiki traci efektywność w miarę wzrostu odchylenia między rzeczywistymi warunkami pracy a warun-

kami założonymi do linearyzacji. Algorytmy nieliniowe dają lepszą odpowiedź czasową manipulatora, ale są kosztowne, trudne do zastosowania w rzeczywistych systemach i powolne, przez co nie spełniają wymagań stawianych przed komputerowo sterowanymi robotami.

Interesującym przykładem nieliniowego algorytmu sterowania jest praca Freunda [4]. W pracy tej zastosowanie idei sterowania nieliniowego prowadzi do określenia silnie nieliniowych równań sterowania dla każdego z podsystemów związanych określonymi zmiennymi ruchu. Zastosowanie takich równań sterowania daje w konsekwencji zupełne wyeliminowanie sprzężeń między poszczególnymi stopniami swobody i pozwala sterować systemem tak jakby składał się on z kilku niezależnych podsystemów opisanych równaniami różniczkowymi drugiego rzędu. Jakkolwiek metoda prezentowana w [4] jest efektywna, to staje się ona jednak zbyt skomplikowana w porównaniu z metodą sterowania proponowaną w niniejszej pracy, szczególnie w odniesieniu do układów w dużej liczbie stopni swobody.

2. Metody formułowania równań dynamiki manipulatorów dla badań symulacyjnych

Pierwszym krokiem w symulacji komputerowej jest wprowadzenie równań ruchu badanego systemu. Równania te można wyprowadzić wieloma metodami [3], lecz dla studiów komputerowych przydatnych jest zaledwie kilka.
W metodzie ciała swobodnego z silnymi więzami każdy,człon manipulatora jest traktowany jako ciało swobodne z siłami i momentami przyłożonymi do każdego z przegubów. Zwykle człon manipulatora posiada tylko jeden stopień swobody i moment lub siła przyłożona do takiego członu są zmieniane przez zewnętrzne sterowanie, które może być określane ręcznie lub automatycznie. Pozostałe siły i momenty są reakcjami występującymi z powodu ruchu więzów narzuconych przez strukturę manipulatora.
W metodzie z silnymi więzami reakcje te są otrzymywane przez wyrażenie położenia kartezjeńskiego każdego członu we współrzędnych uogólnionych oraz dwukrotne zróżniczkowanie w celu otrzymania wystarczającej liczby równań. Całkowity opis ruchu systemu tworzą równania II zasady dynamiki oraz pochodne równań więzów. Równania te są następnie rozwiązywane przez numeryczne odwrócenie macierzy i numeryczne całkowanie po współrzędnych uogólnionych.

W metodzie współrzędnych uogólnionych konieczne jest przede wszystkim znalezienie funkcji energii potencjalnej i kinetycznej.
Z funkcji tych następnie tworzymy tzw. funkcję potencjału kinetycznego Lagrange'a

$$L = T - V \qquad /1/$$

gdzie T - jest energią kinetyczną, a V - potencjalną.

W celu otrzymania równań ruchu należy wykonać różniczkowanie według każdej ze współrzędnych uogólnionych q_i oraz utworzyć relacje postaci:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_{q_i} \qquad /2/$$

gdzie Q_{q_i} jest uogólnionym wymuszeniem działającym we współrzędnej q_i.

Dla prostych systemów obliczenia związane z równaniami /1/ i /2/ nie są trudne i metoda Lagrange'a jest najbardziej skuteczna. Jednakże z drugiej strony nawet niewielki wzrost złożoności systemu, na przykład wzrost liczby stopni swobody lub dopuszczenie ruchów przestrzennych komplikuje te obliczenia tak znacznie, że konieczne jest zastosowanie komputerowych metod, zarówno tworzenia potencjału kinetycznego jak i symbolicznego różniczkowania.

Metodą pośrednią między dwoma wyżej wspomnianymi jest tak zwana metoda dodatkowych współrzędnych, zgodnie z którą wprowadza się pewne dodatkowe współrzędne mające uprościć zapis energii kinetycznej i potencjalnej bez rozważania każdego członu manipulatora jako ciała swobodnego. Oczywiście wprowadzenie takich współrzędnych pociąga za sobą konieczność podania dodatkowych równań więzów wyrażonych we współrzędnych uogólnionych. Równania ruchu systemu można w tej metodzie otrzymać stosując mnożniki Lagrange'a i równania Hamiltona.

Aby otrzymać równania manipulatora w postaci Hamiltona należy wyznaczyć wektor momentów uogólnionych w postaci wektora kolumnowego:

$$p = \frac{\partial L(x,\dot{x})}{\partial \dot{x}} \qquad /3/$$

gdzie x jest wektorem współrzędnych wybranych w celu uproszczenia zapisu potencjału kinetycznego L.
Uogólnione współrzędne osi manipulatora są również składnikami tego wektora. Hamiltonian można wtedy zdefiniować jako:

$$H(p,x) = p^T\dot{x} - L \qquad /4/$$

Ponieważ wektor x zawiera dodatkowe współrzędne, konieczne jest utworzenie mx1 wymiarowego wektora równań więzów postaci:

$$f(x) = 0 \qquad /5/$$

Równania ruchu można zapisać w postaci układu równań pierwszego rzędu postaci:

$$\begin{cases} \dot{x} = \dfrac{\partial H}{\partial p} & /6/ \\[2ex] \dot{p} = \dfrac{\partial H}{\partial x} + \left[\dfrac{\partial f}{\partial x}\right]^T \lambda + \dfrac{\partial W}{\partial x} & /7/ \end{cases}$$

gdzie $\partial W/\partial x_i$ są współczynnikami przy δx_i w funkcji pracy wirtualnej oraz λ jest mx1 wektorem mnożników Lagrange'a.
Zauważając, że z równania /5/:

$$\dot{f} = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\dot{x} = 0 \qquad /8/$$

oraz jeżeli:

$$z = (x,p)^T \qquad /9/$$

to:

$$\dot{f} = \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)\dot{z} = 0 \qquad /10/$$

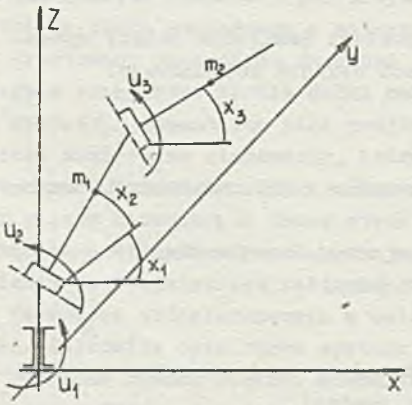
oraz:

$$f = \frac{d}{dt}\left[\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)\dot{z}\right] = 0 \qquad /11/$$

Ostatnie z równań pozwala wyznaczyć wektor λ. Ze względu na minimalny czas numerycznego rozwiązania równań ruchu do opisu dynamiki modelowanego manipulatora zastosowano metodę Lagrange'a.

3. Równania ruchu modelowanego manipulatora

Schematyczny widok modelowanego manipulatora wraz z siłami grawitacyjnymi i przyłożonymi momentami pokazano na rys.1.



Rys.1. Schemat modelowanego manipulatora

Struktura manipulatora jest zbliżona do struktury robota IRb firmy ASEA. W celu uproszczenia równań pominięto pozycjonowanie dłoni, dopuszczając jedynie ruchy ramion oraz ruch obrotowy całości. Funkcje energii potencjalnej i kinetycznej mają postać:

$$E_k = \frac{1}{2}\dot{x}_1^2\left(J_o + J_{1xx}\sin^2 x_2 + J_{1zz}\cos^2 x_2 + J_{2xx}\sin^2 x_3 + J_{2zz}\cos^2 x_3\right) +$$
$$+ \frac{1}{2}\dot{x}_1^2\left(m_1 a_1^2\cos^2 x_2 + m_2 l_1^2\cos^2 x_2 + m_2 a_2^2\cos^2 x_3\right) + \dot{x}_1^2 m_2 l_1 a_2 \cos x_2 \cos x_3 +$$
$$+ \frac{1}{2}\dot{x}_2^2\left(J_{1yy} + m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2\right) + \dot{x}_2 x_3 m_2 l_1 a_2 \cos(x_3 - x_2) + \frac{1}{2}\dot{x}_3^2\left(J_{2yy} + m_2 a_2^2\right)$$

/12/

$$E_p = m_1 g a_1 \sin x_2 + m_2 g (l_1 \sin x_2 + a_2 \sin x_3) \qquad /13/$$

gdzie x_i, $\dot{x}_i$, $\ddot{x}_i$, $i=1,2,3$ oznaczają położenie, prędkość i przyspieszenie kątowe odpowiednich stopni swobody. Potencjał kinetyczny Lagrange'a jest równy:

$$L = E_k - E_p \qquad /14/$$

Definiując wektor momentów przyłożonych do każdego przegubu jako wektor sterowania U otrzymujemy równania Lagrange'a:

$$\frac{\partial}{\partial t}\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} - \frac{\partial L}{\partial x_i} = u_i, \quad i=1,2,3 \qquad /15/$$

które po znalezieniu odpowiednich pochodnych przyjmują postać:

$$D(x)\ddot{x} = G(x,\dot{x}) + Q(x)g + U \qquad /16/$$

gdzie $D(x)$ jest symetryczną macierzą o wymiarach 3x3, $G(x,\dot{x})$, $Q(x)$, $U, x, \dot{x}, \ddot{x}$ są wektorami 3x1 oraz g jest stałą grawitacyjną.
Elementy macierzy D nie leżące na przekątnej reprezentują sprzężenia między poszczególnymi stopniami swobody.
W rozpatrywanym manipulatorze elementy macierzy D mają postać:

$$d_{11} = J_o + J_{1xx}\sin^2 x_2 + J_{1zz}\cos^2 x_2 + J_{2xx}\sin^2 x_3 + J_{2zz}\cos^2 x_3 + m_1 a_1^2 \cos^2 x_2 + m_2 a_2^2 \cos^2 x_3 + 2m_2 l_1 a_2 \cos x_2 \cos x_3 + m_2 l_1^2 \cos^2 x_2 \qquad /17/$$

$$d_{12} = d_{21} = 0 \qquad /18/$$

$$d_{13} = d_{31} = 0 \qquad /19/$$

$$d_{22} = J_{1yy} + m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2 \qquad /20/$$

$$d_{23} = d_{32} + m_2 l_1 a_2 \cos x_3 - x_2 \qquad /21/$$

$$d_{33} = J_{2yy} + m_2 a_2^2 \qquad /22/$$

Elementy macierzy G są równe:

$$g_1 = \dot{x}_1\dot{x}_2\left[2m_2 l_1 a_2 \sin x_2 \cos x_3 - 2(J_{1xx} - J_{1zz})\sin x_2 \cos x_2 + 2(m_1 a_2^2 + m_2 l_1^2)\sin x_2 \cos x_2\right] + \dot{x}_1\dot{x}_3\left[m_2 l_1 a_2 \cos x_2 \sin x_3 - 2(J_{2xx} - J_{2zz})\sin x_3 \cos x_3 + 2m_2 a_2^2 \sin x_3 \cos x_3\right] \qquad /23/$$

$$g_2 = \dot{x}_1^2\left[(J_{1xx} - J_{1zz})\sin x_2 \cos x_2 - (m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2)\sin x_2 \cos x_2 - m_2 l_1 a_2 \sin x_2 \cos x_3\right] + \dot{x}_3^2 m_2 l_1 a_2 \sin(x_3 - x_2) \qquad /24/$$

$$g_3 = \dot{x}_1^2\left[(J_{2xx} - J_{2zz})\sin x_3 \cos x_3 - m_2 a_2^2 \sin x_3 \cos x_3 - m_2 l_1 a_2 \cos x_2 \sin x_3\right] - \dot{x}_2^2 m_2 l_1 a_2 \sin(x_3 - x_2) \qquad /25/$$

Natomiast elementy wektora Q:

$$q_1 = 0 \qquad /26/$$

$$q_2 = -\left(m_1a_1+m_2l_1\right)\cos x_2 \qquad /27/$$

$$q_3 = -m_2a_2\cos x_3 \qquad /28/$$

Po numerycznym odwróceniu macierzy D oraz pomnożeniu (16) przez macierz $B = D^{-1}$ równania ruchu manipulatora przyjmą postać:

$$\ddot{x} = D^{-1}(x)\left[G(x,\dot{x}) + Q(\dot{x})g\right] + B(x)U \qquad /29/$$

Zależności (29) reprezentują układ trzech nieliniowych, sprzężonych ze sobą równań drugiego rzędu, które mogą być sprowadzone do równań przestrzeni stanu.

Jako wektor stanu przyjęto $X_s^T = p_1,p_2,p_3,\ v_1,v_2,v_3$; gdzie p_i i v_i oznaczają położenie i prędkość kątową stopnia i.
Równania ruchu mogą być zatem zapisane w postaci:

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i & /30/ \\ \dot{v}_i = f_i + B_i u, \quad i=1,2,3 & /31/ \end{cases}$$

gdzie f_i są elementami wektora $F=D^{-1}(x)\left[G(x,\dot{x})+Q(x)g\right]$ oraz B_i są wektorami wierszowymi macierzy B.

4. Sformułowanie problemu sterowania

Problem sterowania modelowanym manipulatorem jest określony w następujący sposób: przy danych warunkach początkowych $p_i(t_o)$, $v_i(t_o)$ oraz zadanym położeniu p_d oraz prędkości $v_d=0$ należy znaleźć sterowanie $u(p,v)$ takie, że $p(t)\to p_d$ oraz $v(t)=0$.
Definiując błąd pozycjonowania jako:

$$e(t) = p(t) - p_d \qquad /32/$$

oraz przyjmując nowy wektor współrzędnych stanu $X_e^T=\left[e,v\right]$ otrzymujemy układ równań stanu postaci:

$$\begin{cases} \dot{e}_i = v_i \\ \dot{v}_i = f_i + B_i u \end{cases} \qquad /33/$$

W celu znalezienia wektora sterowań u stosuje się teorię systemów o zmiennej strukturze vss [5] ,[7],[8] .

5. Właściwości systemów o zmiennej strukturze

Systemy automatycznego sterowania ze zmienną strukturą tworzą szczególną klasę nieliniowych układów regulacji. Główną cechą wyróżniającą systemy vss jako oddzielną klasę systemów sterowania jest występowanie

zmian struktury systemu w czasie stanu nieustalonego. Struktura systemu jest zmieniana w sposób zamierzony zgodnie z określonym algorytmem lub równaniem zmian strukturalnych. Chwile, w których następują zmiany w strukturze systemu są determinowane przez bieżącą wartość sygnału błędu i jej pochodne, co odróżnia tę klasę od sterowników programowych. Przyjmuje się przy tym, że dwa systemy różnią się strukturą, jeżeli różnią się znakiem sprzężenia między co najmniej dwoma elementami lub jeśli elementy te są ze sobą połączone w jednej strukturze i nie połączone w drugiej.

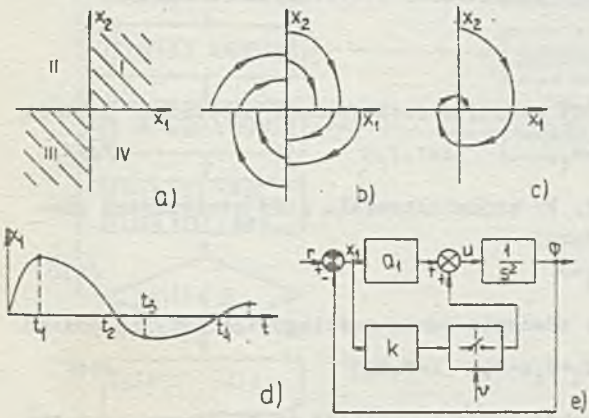
Właściwości i zalety systemów vss zostaną omówione na przykładzie układu równań pierwszego rzędu postaci:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 & /35/ \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_1 - u & /36/ \end{cases}$$

ze sterowaniem nieciągłym:

$$u = \begin{cases} kx_1 & \text{jeżeli } x_1 x_2 > 0 \\ 0 & \text{jeżeli } x_1 x_2 < 0 \end{cases} \qquad /37/$$

Formuła (37) dzieli płaszczyznę fazową na cztery części rozdzielone osiami współrzędnych /rys.2a/.



Rys.2. Trajektorie fazowe układu.

Trajektorie fazowe są częściami elips różniących się między sobą długością półosi (rys.2b). Na rys.2c pokazano portret fazowy odpowiedzi systemu na skok jednostkowy. Jak widać, dzięki przełączeniu struktury zgodnie z (37) otrzymuje się układ asymptotycznie stabilny skomponowany z dwóch struktur niestabilnych. Przebieg czasowy x_1 oraz schemat blokowy systemu pokazano na rys.2d, 2e. Bardziej interesujący przypadek otrzymujemy stosując sterowanie postaci:

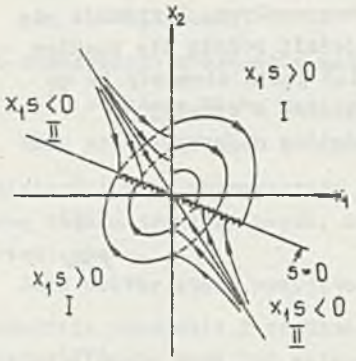
$$u = \psi x_1 \qquad /38/$$

gdzie współczynnik ψ jest nieciągły.

$$\psi = \begin{cases} \alpha & \text{jeżeli } x_1 s > 0 \\ -\alpha & \text{jeżeli } x_1 s < 0 \end{cases} \qquad \alpha > 0 \qquad /39/$$

do układu $\dot{x}_1 = x_2$; $\dot{x}_2 = ax_2 - bu$, $a,b > 0$ /40/

Otrzymane w wyniku trajektorie fazowe są trajektoriami poślizgowymi (rys.3).



Rys.3. Trajektorie poślizgowe

Równanie s=0 określa linię przełączeń

$$s = cx_1 + x_2 = 0, \quad c > 0 \qquad /41/$$

Wybór dodatnich wartości c gwarantuje stabilność asymptotyczną systemu. Możliwe jest zaprojektowanie takiego sterowania, że zjawisko poślizgu wystąpi w czasie stanu nieustalonego. System znajdujący się w poślizgu porusza się w kierunku początku układu, oscylując wokół linii przełączeń. W idealnym przypadku częstotliwość oscylacji jest nieskończenie wielka. W rzeczywistości dzięki inercji układu i opóźnieniu przełączania częstotliwość oscylacji jest ograniczona. Trajektorie poślizgowe posiadają pewne zalety, które predystynują ten rodzaj sterowania do stosowania w komputerowo sterowanych robotach.

6. Opis sterowania modelem.

Dla układu równań (33), (34) przyjęto powierzchnie przełączeń postaci:

$$s_i = c_i e_i + v_i, \qquad i=1,2,3 \qquad /42/$$

gdzie c_i są dodatnimi stałymi. Po zróżniczkowaniu (42) otrzymujemy równanie ruchu poślizgowego systemu:

$$\dot{s}_i = c_i \dot{e}_i + \dot{v}_i = 0 \qquad /43/$$

Podstawiając w (43) $\dot{v}_i$ z (34) równania ruchu poślizgowego przyjmą postać

$$c_i v_i + f_i + B_i u = 0, \quad i=1,2,3 \qquad /44/$$

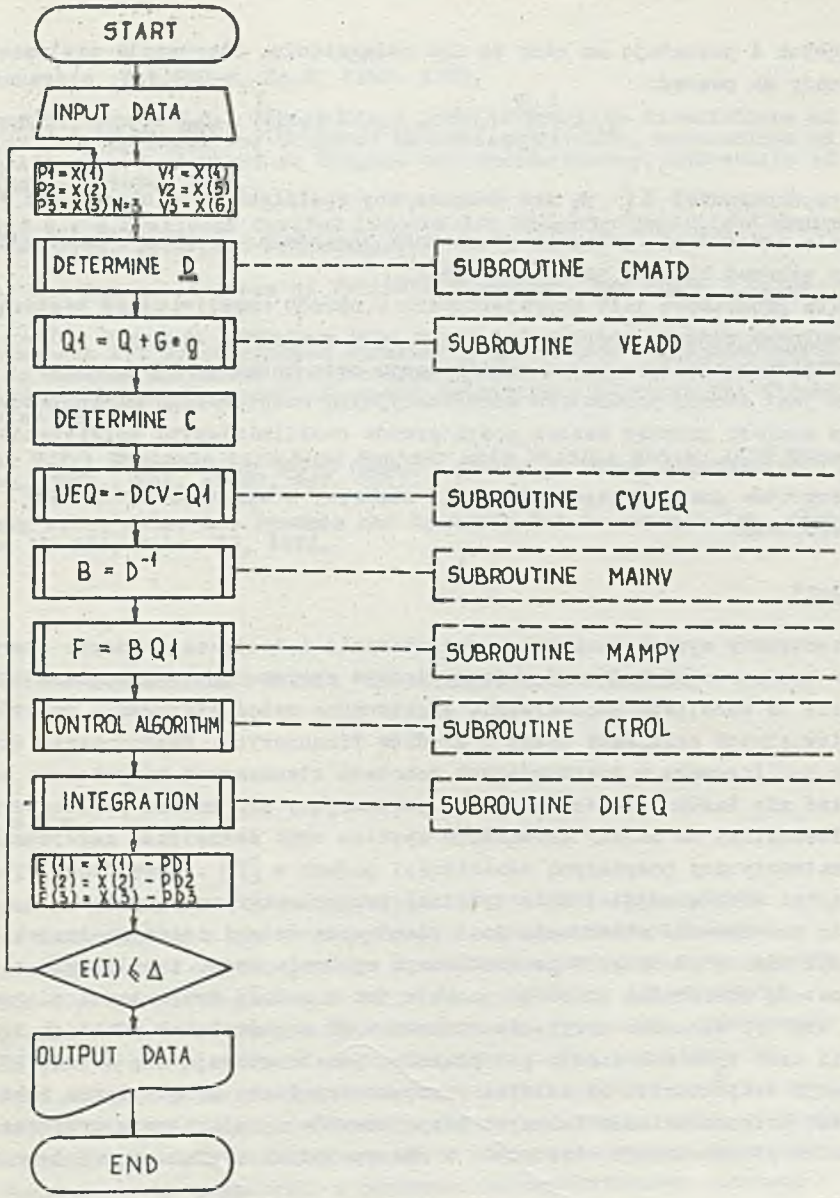
Rozwiązując równania (44) algebraicznie ze względu na u, otrzymujemy tzw. wektor sterowania ekwiwalentnego

$$u_{eq} = -D[Cv+F] \qquad /45/$$

gdzie C jest diagonalną macierzą współczynników c_i oraz znaczenie pozostałych symboli jest takie samo jak powyżej.
Podstawiając wektor u_{eq} zamiast u i ograniczając go tak, aby był spełniony warunek:

$$s\dot{s} < 0 \qquad /46/$$

otrzymujemy sterowanie zastosowane w modelu. Spełnienie warunku (46) gwarantuje, że trajektorie systemu zdążają w kierunku powierzchni prze-



Rys.4. Schemat blokowy programu symulacyjnego.

łączających i pozostają na nich po ich osiągnięciu. Sterowanie zastosowane w pracy ma postać:

$$u_i = -\left[\sum_{j=1}^{3}\left(\alpha_i^j\,|e_j| + \beta_i^j\,|v_j|\right)\right]\ \mathrm{sgn}\,(s_i) \qquad /47/$$

gdzie współczynniki α_i^j są tak dobrane, aby spełniona była nierówność /46/

W celu przebadania podanego sterowania opracowano program symulacyjny, którego schemat blokowy podano na rys.4.
Struktura programowa jest zaprojektowana w sposób umożliwiający testowanie dowolnego rodzaju sterowania. W tym celu wystarczy zastąpić podprogram CTROL innym podprogramem zawierającym opis badanego sterowania. Możliwa jest zmiana parametrów konstrukcyjnych modelowanego manipulatora. Program zawiera również zestaw podprogramów umożliwiających rozwiązanie równań różniczkowych ruchu za pomocą różnych metod numerycznych [6] . W podprogramie numerycznego odwracania macierzy D wykorzystano metodę Gaussa-Jordana.

7. Wnioski.

Prezentowany system umożliwia projektowanie i testowanie nowych sterowań bez konieczności budowania rzeczywistego systemu robot-komputer. Podejście to umożliwia poszukiwanie efektywnych metod sterowania robotów przy niewielkich nakładach czasu i środków finansowych. Zastosowanie sterowania poślizgowego w rzeczywistych robotach sterowanych komputerowo może okazać się bardzo skuteczne. Układ poruszający się ruchem poślizgowym jest niewrażliwy na zmiany parametrów systemu oraz zewnętrzne zakłócenia. Dowód matematyczny powyższych właściwości podano w [5] . Prawidłowy wybór powierzchni przełączającej może wydatnie przyspieszyć ruch systemu. Mimo że zastosowane sterowanie jest nieciągłe, dzięki inercjom trajektorie systemu są gładkie. W prezentowanym systemie można zrealizować zarówno metodę sterowania punkt po punkcie, jak i metodę trajektorii ciągłej. Wydaje się być wskazane przyjęcie warunku $v_i \neq 0$ w pośrednich punktach trajektorii oraz $v_i = 0$ w końcowym jej punkcie, jeżeli stosuje się metodę PTP realizacji trajektorii. Jakkolwiek pierwsze rezultaty są pozytywne, wskazane jest przeprowadzenie dalszych eksperymentów symulacyjnych przed zastosowaniem proponowanego sterowania w rzeczywistych systemach robot-komputer.

LITERATURA

[1] Young K.-K.D.: Asymptotic Stability of Model Reference Systems with Variable Structure Control. IEEE Trans.Automat.Contr., vol.AC-22, Apr.1977.

[2] Young K.-K.D.: Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems. IEEE Transactions on Systems, Man and

Cybernetics, Vol.SMC-8, No.2, Febr. 1978.

[3] Hemani.H., Jaswa V.C., McGhee R.B.: Some Alternative Formulations of Manipulator Dynamics for Computer Simulation Studies, Proceedings of 13th Allerton Conference on Circuit and System Theory, University of Illinois, October 1975.

[4] Freund E.: A.Nonlinear Control Concept for Computer Controlled Manipulators, Proc. 1978 IFAC Conference.

[5] Itkis U.: Control Systems of Variable Structure. New York: J.Wiley, 1976.

[6] Staszulonek A.: Wykorzystanie struktur programowych i urządzeniowych KMC do badania własności dynamicznych wybranej klasy urządzeń. Praca dyplomowa (niepublikowana). Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, Gliwice 1976.

[7] Utkin V.I.: Variable Structure Systems with Sliding Modes, IEEE Trans. Autom. Cont., vol. AC-22, Apr. 1977.

[8] Bejczy A.K.: Robot Arm Dynamic and Control, Jet Propulsion Lab.,Techn. Memo. 33-669, Febr. 12, 1974.

КОМПЮТЕРНОЕ СИМУЛИРОВАНИЕ РОБОТА УПРАВЛЯЕМОГО СО СКОЛЬЖЕНИЕМ

Р е з ю м е

В работе дается програмная структура для анализа динамических свойств манипулятора и для тестирования различных видов управлений. Оговорено несколько смежных методов для описания динамики манипуляторов особенно подчеркивая те, которые могут быть применены для машинного эксперимента. Показана система диффиренциальных уравнений, описывающих динамику манипулятора с тремя степенями свободы. Для управления по указанной модели применено прерывное управление из теории систем с переменной структурой. Свойства систем с переменной структурой и прерывного управления (управления со скольжением). а также возможности применения оговоренного метода управления в реальных быстродействующих системах – робот – компютер – дискутируются в работе.

THE COMPUTER SIMULATION OF ROBOT ARM WITH THE SLIDING MODE CONTROL

S u m m a r y

A software system for dynamic properties of manipulators analysis and control law examinations has been developed. Some formulations of manipulator dynamics for computer studies are discussed. Diffirential equations of three joint manipulator are carried out and variable structure system control law is applied to the considered manipulator. Properties of sliding mode control and further possibilities of presented method are discussed in the paper.