ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: AUTOMATYKA z. 56 Nr kol. 652

Antoni Niederliński

Politechnika Śląska

WIELOWYMIAROWE STEROWANIE RUCHU RAMION REDUNDANTNYCH MANIPULATORÓW W ROBOTACH GENERACJI 2 I GENERACJI WYŻSZYCH

Streszczenie. Wyprowadzono nowy algorytm optymalnego wielowymiarowego sterowania ruchu ramion redundantnych manipulatorów, realizujący zadaną trajektorię ruchu chwytaka z omijaniem przeszkód przy równoczesnej minimalizacji chwilowej energii kinetycznej ramion.

1. Wstęp

Dla robotów generacji 2 i wyższych (por. [1]) trajektorie ruchu ramion manipulatora dla kolejnych manipulacji są różne, co wynika z przypadkowej zmiany położenia początkowego manipulowanych przedmiotów lub zmiany ich orientacji. W takiej sytuacji "sztywny" program manipulacji, wprowadzony do pamięci robota w trakcie uczenia, okazałby się bezużyteczny. Stąd konieczność:

- każdorazowego wyznaczania współrzędnych kartezjańskich końcowego położenia chwytaka przy wykorzystaniu przetworników obrazu
- wyznaczenia trajektorii chwytaka manipulatora dochodzącej do określonego punktu końcowego
- wyznaczenia trajektorii ruchu ramion realizującej zadaną trajektorię ruchu chwytaka.

W pracy przedstawiono nową próbę rozwiązania ostatniego z wymienionych problemów, różną od rozwiązań omawianych w literaturze (por. [2], [3], [4], [5]). Zakłada się w tym celu, że w najniższej warstwie hierarchicznego układu sterowania robota znajdują się elektryczne serwomechanizmy położenia, z których każdy umożliwia precyzyjną i szybką nastawę położenia dla danej osi ruchu na wartości zadanej tego położenia, z dynamiką pomijalną wobec dynamiki nadrzędnego układu wyznaczania trajektorii ruchu ramion.

Zadaniem omawianego sterowania jest określenie takich dopuszczalnych przebiegów czasowych współrzędnych naturalnych manipulatora, które zapewnią przemieszczenie chwytaka wzdłuż zadanej dopuszczalnej trajektorii chwytaka w przestrzeni 3-wymiarowej.

Współrzędnymi naturalnymi manipulatora nazywa się przesunięcia lub kąty obrotu jego poszczególnych osi ruchu. Współrzędne chwytaka w 3-wymiarowej przestrzeni kartezjańskiej nazywa się współrzędnymi zewnętrznymi chwytaka. Dopuszczalnymi przebiegami czasowymi współrzędnych naturalnych manipulatora nazywa się takie przebiegi czasowe, przy których:

- nie nastąpi przekroczenie granicznych położeń ramion,
- nie dojdzie do kolizji ramion z przedmiotami z otoczenia.

Dopuszczalną trajektoria chwytaka nazywa się trajektorię nie kolidującą z przedmiotami z otoczenia.

2. Stopień redundancji manipulatora względem zadanej trajektorii ruchu chwytaka

Rozwiązanie przedstawionego problemu zależy od stopnia redundancji manipulatora względem zadanej trajektorii ruchu chwytaka. Jeżeli manipulator posiada n stopni swobody, a trajektorię chwytaka można opisać za pomocą $m \leq n$ niezależnych współrzędnych, to liczbę $n-m$ nazywa się stopniem redundancji manipulatora względem zadanej trajektorii chwytaka. Jeżeli $n-m > 0$ dla określonej klasy trajektorii chwytaka, to manipulator nazywa się manipulatorem redundantnym dla tej klasy trajektorii. Podkreśla się, że redundancja jest definiowana dla określonej klasy trajektorii chwytaka. Np. manipulator przeznaczony do umieszczenia przedmiotu w dowolnym punkcie określonego obszaru przestrzeni trójwymiarowej i dowolnego zorientowania tego przedmiotu w tym punkcie musi posiadać conajmniej 6 stopni swobody. Jeżeli manipulator ten będzie wykorzystywany wyłącznie do przemieszczania przedmiotu z jednego punktu przestrzeni 2-wymiarowej do innego dowolnego punktu tej przestrzeni i zorientowania przedmiotu w tym punkcie, to będzie on miał względem tak zadanej trajektorii chwytaka, dającej się opisać 4 niezależnymi współrzędnymi, stopień redundancji równy 2.

Nadmiar stopni swobody związany z redundancją manipulatora czyni robot bardziej uniwersalnym, umożliwiając np. ruch po trajektoriach omijających przeszkody. Redundancja sprawia jednak, że zagadnienia wyznaczenia trajektorii współrzędnych naturalnych (w liczbie n) na podstawie znajomości trajektorii współrzędnych zewnętrznych chwytaka (w liczbie $m<n$) nie posiada jednoznacznego rozwiązania: istnieje nieskończenie wiele trajektorii współrzędnych naturalnych dających tą samą trajektorię współrzędnych zewnętrznych chwytaka.

3. Równanie kinematyki chwytaka manipulatora

Oznaczając przez $\underline{x}$ wektor m-wymiarowy, którego elementami są współrzędne zewnętrzne chwytaka, a przez $\underline{q}$ wektor n-wymiarowy o elementach będących współrzędnymi naturalnymi ramion manipulatora, można zawsze sformułować funkcję:

$$\underline{x} = \underline{f}(\underline{q}) \tag{1}$$

określającą współrzędne zewnętrzne chwytaka w zależności od współrzędnych naturalnych ramion. Ponieważ (1) jest słuszne dla dowolnego momentu czasu, podkreśla się to zapisując ją w postaci:

$$\underline{x}(t) = \underline{f}(\underline{q}(t)) \tag{2}$$

zwanej równaniem kinematyki chwytaka manipulatora. Na mocy zrobionego w p.1 założenia można $\underline{q}(t)$ również uważać za wektor, którego elementami są wartości zadane położeń dla serwomechanizmów poszczególnych osi ruchu.

W przypadku manipulatorów nieredundantnych istnieje zależność odwrotna względem (2), zapisywana w postaci:

$$\underline{q}(t) = \underline{f}^{-1}(\underline{x}(t)) \tag{3}$$

i umożliwiająca określenie trajektorii współrzędnych naturalnych manipulatora, odpowiadającej zadanej trajektorii współrzędnych zewnętrznych chwytaka. Dla manipulatorów redundantnych zależność odwrotna (3) nie istnieje.

4. Optymalizacja trajektorii ruchu redundantnych manipulatorów

Ponieważ jednoznaczne określenie trajektorii ruchu współrzędnych naturalnych na podstawie zadanej trajektorii ruchu chwytaka nie jest dla redundantnych manipulatorów możliwe, nasuwa się idea wyboru spośród wszystkich możliwych trajektorii współrzędnych naturalnych takiej, która jest w określonym sensie optymalna. W dalszym ciągu poszukiwane będzie sterowanie $\underline{q}(t)$ dające taką trajektorię współrzędnych naturalnych $\underline{q}(t)$, która minimalizuje chwilową energię kinetyczną ramion manipulatora. Kryterium to jest uzasadnione powszechnym stosowaniem w omawianych manipulatorach silników wykonawczych prądu stałego z wirnikami drukowanymi, łatwo nagrzewającymi się z powodu małej pojemności cieplnej.

Chwilową energię kinetyczną ramion manipulatora można zapisać w postaci formy kwadratowej:

$$T(t) = \frac{1}{2}\, \underline{\dot{q}}^{T}(t)\, \underline{A}(\underline{q})\, \underline{\dot{q}}(t) \tag{4}$$

gdzie $\underline{A}(\underline{q}) = \underline{A}^{T}(\underline{q})$ jest macierzą bezwładności o wymiarach n x n i elementach będących funkcjami współrzędnych naturalnych $\underline{q}$. Wartości liczbowe elementów macierzy $\underline{A}(\underline{q})$ może na bieżąco wyznaczać komputer układu sterowania robota na podstawie znajomości współrzędnych $\underline{q}$. Przy minimalizacji (4) należy uwzględnić następujące ograniczenia:

1) ograniczenia wynikające z warunku realizacji zadanej trajektorii ruchu chwytaka (2). Ponieważ wyrażenie na energię kinetyczną zawiera wektor prędkości $\underline{\dot{q}}(t)$, wygodnie jest zapisać ograniczenia (2) w postaci prędkościowej:

$$\underline{\dot{x}}(t) = \underline{J}(\underline{q})\, \underline{\dot{q}}(t) \tag{5}$$

gdzie:

$$J_{ij}(\underline{q}) = \frac{\partial f_i(\underline{q})}{\partial q_j}, \quad i=1,\dots n, \quad j=1,\dots m \tag{6}$$

2) ograniczenia nasycenia, wynikające z istnienia skończonego zakresu zmian każdej współrzędnej naturalnej i sprawiające, że po osiągnięciu wartości krańcowej j-tej współrzędnej, jej prędkość $\dot{q}_j(t) = 0$ tak długo, jak długo współrzędna ta posiada wartość krańcową. Stąd można ograniczenia nasycenia zapisać w postaci:

$$\underline{C}_s\, \underline{\dot{q}}(t) = \underline{0} \tag{7}$$

gdzie $\underline{C}_s = \mathrm{Diag}\left[c_1\ c_2\ \dots c_n\right]$ jest macierzą diagonalną o elementach:

$$c_j = \begin{cases} 0\ , \text{ jeżeli } q_{j\,min} < q_j < q_{j\,max} \\ 1\ , \text{ jeżeli } q_j = q_{j\,min} \text{ lub } q_j = q_{j\,max} \end{cases} \tag{8}$$

3) ograniczenia zewnętrzne wynikające z istnienia przeszkód zewnętrznych, wykrywanych przez czujniki zbliżenia i czujniki taktylne. W momencie zbliżenia się lub zetknięcia się ramion manipulatora z przeszkodą prędkości poszczególnych ramion nie mogą już zmieniać się w sposób niezależny od siebie, lecz zostają od siebie uzależnione. Ograniczenie takie można zapisać w postaci:

$$\sum_{k=1}^{m} c_k a_k \dot{q}_k(t) = 0 \tag{9}$$

gdzie:

$$c_k = \begin{cases} 0\ , \text{ jeżeli manipulator nie dotyka przeszkody} \\ 1\ , \text{ jeżeli manipulator dotyka przeszkodę w sposób ograniczający zmiany prędkości } \dot{q}_k(t) \end{cases}$$

są współczynnikami wyznaczanymi na drodze przetwarzania sygnałów czujników zbliżenia i czujników taktylnych, rozmieszczonych na ramionach i chwytaku manipulatora.

Podobieństwo opisu matematycznego ograniczeń 2) i 3) sprawia, że można je przedstawić za pomocą jednego równania macierzowego:

$$\underline{C}\,\dot{\underline{q}}(t) = \underline{0} \tag{10}$$

gdzie macierz $\underline{C}$ posiada wymiary $r \times n$ i zawiera każdorazowo wyłącznie niezerowe wiersze. Dzięki temu rząd macierzy $\underline{C}$ będzie równy r, gdzie r jest zmienne.

Reasumując: trajektorię współrzędnych naturalnych można określić w wyniku rozwiązania następującego problemu optymalizacyjnego:

$$\min_{\dot{\underline{q}}(t)} \frac{1}{2}\,\dot{\underline{q}}^T(t)\,\underline{A}(\underline{q})\,\dot{\underline{q}}(t) \tag{11}$$

przy ograniczeniach równościowych zapisanych w postaci jednego równania macierzowo-wektorowego:

$$\underline{b} - \underline{B}\,\dot{\underline{q}}(t) = \underline{0} \tag{12}$$

gdzie $\underline{B}$ jest macierzą blokową:

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \underline{J} \\ \hline \underline{C} \end{bmatrix} \tag{13}$$

o wymiarach $(m+r) \times n$ i rzędzie $m+r < n$, natomiast $\underline{b}$ jest wektorem blokowym:

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{x}}(t) \\ \hline \underline{0} \end{bmatrix} \tag{14}$$

o wymiarach $(m+r) \times 1$.

5. Wyznaczenie optymalnego sterowania

W celu wyznaczenia optymalnego sterowania definiuje się funkcję Lagrange'a

$$L = \frac{1}{2}\,\underline{\dot{q}}(t)\ \underline{A}(\underline{q})\ \underline{\dot{q}}(t) + \underline{\lambda}^T(\underline{b} - \underline{B}\,\underline{\dot{q}}(t)) \tag{15}$$

Warunkiem koniecznym istnienia minimum (11) jest zerowanie się wektora gradientu funkcji Lagrange'a

$$\frac{\partial L}{\partial \underline{\dot{q}}(t)} = \underline{0} \tag{16}$$

Ponieważ minimalizowana funkcja (energia kinetyczna) jest dodatnio określoną formą kwadratową, a ograniczenia równościowe są ograniczeniami liniowymi, to warunek konieczny istnienia minimum jest zarazem warunkiem wystarczającym, a wyznaczone minimum stanowi minimum globalne. Z (16) otrzymuje się:

$$\underline{A}\,\underline{\dot{q}}(t) - \underline{B}^T\underline{\lambda} = \underline{0} \tag{17}$$

a ponieważ macierz $\underline{A}$ jako macierz dodatnio określona jest nieosobliwa, to:

$$\underline{\dot{q}}(t) = \underline{A}^{-1}\,\underline{B}^T\,\underline{\lambda} \tag{18}$$

co po uwzględnieniu (12) daje:

$$\underline{b} = \underline{B}\,\underline{A}^{-1}\underline{B}^T\,\underline{\lambda} \tag{19}$$

Ponieważ B jest macierzą o wymiarach $(m+r)\times n$ i rzędzie $m+r<n$, to macierz $\underline{B}\,\underline{A}^{-1}\underline{B}^T$ jest również nieosobliwa i stąd:

$$\underline{\lambda} = (\underline{B}\,\underline{A}^{-1}\underline{B}^T)^{-1}\underline{b} \tag{20}$$

Uwzględniając (18),(20) oraz (14) otrzymuje się:

$$\underline{\dot{q}}(t) = \left[\underline{K}_1 \mid \underline{K}_2\right]\begin{bmatrix}\underline{\dot{x}}(t)\\ \hline \underline{0}\end{bmatrix} = \underline{K}_1\,\underline{\dot{x}}(t) \tag{21}$$

gdzie:

$$\left[K_1 \mid K_2\right] = A^{-1}B^T(B\,A^{-1}B^T)^{-1}. \tag{22}$$

A więc zgodnie z (21) <u>optymalne prędkości zmian współrzędnych naturalnych ramion</u> (a na mocy poczynionego założenia również optymalne prędkości zmian wartości zadanych serwomechanizmów) <u>$\dot{q}_j(t)$, $j=1,\dots,m$, są kombinacjami liniowymi zadanych prędkości zmian współrzędnych zewnętrznych chwytaka $\dot{x}_i(t)$, $i=1,\dots,n$.</u> Podkreśla się, że elementy macierzy $\underline{K}_1$ z (21) są funkcjami współrzędnych q_i oraz sygnałów przetworników położeń krańcowych ramion, przetworników zbliżenia i przetworników taktylnych. Wyznaczenie wartości elementów macierzy $\underline{K}_1$ wymaga więc zastosowania komputera, do którego wprowadza się sygnały wymienionych przetworników. Ze względu na konieczność zmiany wartości zadanych serwomechanizmów wyłącznie w dyskretnych momentach czasu, algorytm sterowania (21) należy stosować w wersji różnicowej:

$$\underline{\Delta q_k} = \underline{K}_1(\underline{q}_k)\ \underline{\Delta x_k} \tag{23}$$

zawierającej przyrosty współrzędnych dla okresu dyskretyzacji Δt.

LITERATURA

[1] Heginbotham, W.B.: Where goes industrial robot technology?. The Production Engineer, March 1976, pp.126-130.

[2] Paul,R.: Modelling,trajectory calculation and servoing of a computer controlled arm. Stanford Artificial Intelligence Memo No.11, November 1972, przekład rosyjski Izd.Nauka, Moskwa 1976.

[3] Raibert,M.H.: Manipulator control using the configuration space method. The Industrial Robot, June 1978, pp.69-73.

[4] Taylor,R.H.: Planning and execution of straight line manipulator trajectories. IBM J.Res.and Dev., vol.23,no.4,July 1979, pp.424-436.

[5] Popov,E.P.,Vereshtshagin,A.F., Senkevitch,C.L.: Manipulatsionnye roboty. Izd.Nauka, Moskwa 1978.

[6] Kobrinsky,A.E.: The State-of-the-Art in the Field of Robots and Manipulators. IFToMM Symposium on Robots and Manipulators, Udine, Springer Verlag, Berlin, 1974, vol.I,pp.IX-XVI.

[7] Niederliński,A.: Układy wielowymiarowe automatyki. WNT,Warszawa 1974

[8] Hill,J.,Park,W.T.: Real Time Control of a Robot with a Mobile Camera. 9th International Symposium on Industrial Robots, March 13-15, 1979 Washington D.C.,Proceedings, Soc.of Manufacturing Engineers,Dearbon, 1979,pp.233-246.

МНОГОУРОВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПЛЕЧ РЕДУНДАНТНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ РОБОТОВ ВТОРОЙ И ВЫСШИХ ГЕНЕРАЦИЙ

Р е з ю м е

Введено новый алгоритм оптимального многомерного управления движением плеч редундантных манипуляторов, осуществляющий заданную траекторию движения тисков обоймы минуя препятствия с одновременной минимализацией мгновенной кинетической энергии плеч.

MULTIVARIABLE ARM'S TRAJECTORIES CONTROL OF THE REDUNDANT MANIPULATORS IN CASE OF THE SECOND AND HIGHER GENERATION ROBOTS

S u m m a r y

A new algorithm for optimum multivariable control of arms'trajectories of the redundant manipulators is presented. The kinetic energy of the manipulator's arm is minimized and at the some time the internal and external constraints of arm's motion are satisfied. The algorithm has a form of a linear nonstationary control law which determines the set-points of all arm's servomechanisms.