

Jarosław WARCZYŃSKI
Politechnika Poznańska

METODA STEROWANIA PODATNOŚCIĄ EFEKTORA ROBOTA

Streszczenie. W pracy przedstawiono algorytm sterowania podatnością ruchu końcówki technologicznej robota z możliwością kontrolowania siły oddziaływania tej końcówki na powierzchnię ograniczającą jej ruch. Postulowana metoda sterowania bazuje na koncepcji sterowania impedancją mechaniczną manipulatora. Metoda ta wykorzystuje podstawową zaletę sterowania impedancyjnego, jaką stanowi możliwość ustalania dynamiki oddziaływań efektora robota ze środowiskiem, bez konieczności przełączania sterowań pomiędzy fazą ruchu swobodnego oraz fazą ruchu ograniczonego.

A METHOD TO CONTROL THE ROBOT END-EFFECTOR COMPLIANCE

Summary. An algorithm for controlling robot end effector compliance provided with the possibility to regulate forces acting on the surface constraining the end effector motion has been considered in the work. The proposed control method is based on the impedance control concept and therefore it takes advantage from that feature of impedance control which enables specifying dynamics of interactions between the manipulator end effector and its environment without any need of switching control modes while changing from free to constrained motion phases.

1. Wprowadzenie

Obszar potencjalnych zastosowań robotów można ogólnie podzielić na dwie klasy zadań: klasę, w której wykonanie zadania nie wiąże się z uwzględnianiem sił kontaktu manipulatora z otaczającym go środowiskiem (są to np. operacje typu pobierz i połóż lub operacje nie wymagające kontaktu z żadnymi obiektami, jak np. nakładanie powłok za pomocą pistoletu malarskiego) oraz klasę, w której poprawne wykonanie zadania nie jest praktycznie możliwe bez uwzględnienia w procesie sterowania sił wzajemnego oddziaływania pomiędzy końcówką technologiczną manipulatora oraz przedmiotami manipulacji w otoczeniu robota; do klasy tej należą, w dużej mierze, istotne z punktu widzenia praktyki przemysłowej, zadania związane z montażem zrobotyzowanym lub obróbką mechaniczną, takie jak np. frezowanie, szlifowanie czy gratowanie. W tej klasie zadań jedną z najbardziej pożądanых cech robotów jest właśnie zdolność dostosowywania ruchu do warunków zadania manipulacyjnego, które często, z wielu różnych przyczyn, nie mogą być do końca określone w fazie planowania

zadania. Charakterystyczną cechą zadań tego typu jest naprzemienne występowanie faz ruchu swobodnego, gdy ruch końcówki nie podlega ograniczeniu oraz faz ruchu ograniczonego, w trakcie których końcówka znajduje się w kontakcie z powierzchnią ograniczającą swobodę jej ruchu. W trakcie fazy ruchu ograniczonego konieczne jest, oprócz sterowania położeniem końcówki, regulowanie siły jej oddziaływania na powierzchnię kontaktu, gdyż w przypadku zbyt dużych sił mogłoby dojść do uszkodzenia końcówki lub zniszczenia obiektu, a w przypadku zbyt małych sił (np. w zadaniu gratowania) mogłoby ono zostać źle wykonane.

W niniejszej pracy postuluje się wykorzystanie algorytmu sterowania impedancyjnego (patrz np. [1,2,3]), który pozwala narzucić charakter dynamiki oddziaływania końcówki manipulatora z ograniczającą ruch powierzchnią. Jednocześnie jednak chcemy sterować siłą nacisku końcówki na wspomnianą powierzchnię, co w klasycznej metodzie sterowania impedancyjnego nie jest bezpośrednio możliwe.

W punkcie 2 niniejszej pracy przedstawiamy wyprowadzenie algorytmu oraz rozwiązania dotyczące stabilności proponowanej metody sterowania, w punkcie 3 zawarto wyniki eksperymentów symulacyjnych ze sterowaniem z wykorzystaniem przedstawionego algorytmu, natomiast punkt 4 zawiera wnioski końcowe.

2. Algorytm sterowania

Metoda sterowania impedancyjnego bardzo dobrze nadaje się do zadań manipulacyjnych, w których występują fazy ruchu swobodnego oraz ruchu ograniczonego, gdyż nie wymaga ona zmiany trybu sterowania w poszczególnych fazach. Jej wadą jest jednak brak możliwości bezpośredniego zadawania pożądanej siły nacisku na powierzchnię reakcji. Wynika to z faktu, że jest ona przeznaczona do sterowania impedancją mechaniczną manipulatora, a więc nie kontroluje siły, lecz stosunek siły i położenia.

Pokażemy teraz zależności określające algorytm sterowania robota, zapewniający zadaną impedancję jego efektora z jednoczesnym kontrolowaniem siły nacisku efektora na powierzchnię reakcji.

Załóżmy, że dynamikę manipulatora można opisać za pomocą równania postaci (1) (porównaj np. [1,2]):

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau - J(q)^T f, \quad (1)$$

gdzie:

q - wektor współrzędnych kinematycznych manipulatora;

$D(q)$ - macierz inercji manipulatora;

- $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ - wektor sił odśrodkowych i Coriolisa;
 $G(\mathbf{q})$ - wektor sił grawitacyjnych;
 τ - wektor sił uogólnionych, węzłowych;
 $J(\mathbf{q})$ - jacobian manipulatora;
 \mathbf{f}_r - siła reakcji powierzchni kontaktu na nacisk końcówki manipulatora.

Załóżmy, też że impedancja zadana manipulatora określona jest następującą zależnością:

$$\mathbf{f} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{e}}_x + \mathbf{B}\dot{\mathbf{e}}_x + \mathbf{K}\mathbf{e}_x, \quad (2)$$

przy czym

$$\mathbf{e}_x = \mathbf{x}_z - \mathbf{x},$$

gdzie: \mathbf{x}_z - położenie zadane końcówki manipulatora, a \mathbf{x} położenie rzeczywiste;

\mathbf{f} - siła, będąca odpowiedzią na błąd położenia;

$\mathbf{M}, \mathbf{B}, \mathbf{K}$ - macierze diagonalne, określające elementy impedancji końcówki (odpowiedniki bezwładności, tłumienia i sprężystości).

Wyberzmy następujące prawo sterowania, które pozwala zlinearyzować i odsprzężyć układ (porównaj np. [1,3]):

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{u} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{f}_r, \quad (3)$$

gdzie \mathbf{u} jest wektorem sterowań.

Zachodzi pytanie: jaki powinien być wektor sterowań \mathbf{u} , aby manipulator wykazywał impedancję określoną zależnością (2)? Zauważmy, że podstawiając prawo sterowania (3) do równania dynamiki manipulatora (1) otrzymujemy:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{u}, \quad (4)$$

co oznacza, że sterowanie \mathbf{u} ustala wektor przyspieszeń kątowych. Zatem należy go tak wybrać, aby uwzględniał narzucaną, pożądaną impedancję, określoną zależnością (2).

Z równania (2) można wyznaczyć wektor przyspieszeń $\ddot{\mathbf{x}}$, który pozwala wyznaczyć przyspieszenia konfiguracyjne, a tym samym sterowania:

$$\ddot{\mathbf{x}} = \ddot{\mathbf{x}}_z + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}\mathbf{e} - \mathbf{f}). \quad (5)$$

Ponieważ

$$\ddot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}, \quad (6)$$

co wynika z podstawowej zależności $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ (7)

zatem, na podstawie równań (4) i (6):

$$\mathbf{u} = \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}], \quad (8)$$

a po podstawieniu (5) otrzymujemy sterowanie

$$\mathbf{u} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{x}}_z + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}\mathbf{e} - \mathbf{f}) - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}]. \quad (9)$$

Sterowanie u zapewnia zachowanie efektora zgodne z narzuconą dynamiką opisaną równaniem (2). Nie oznacza to jednak, że możemy bezpośrednio regulować wartości siły nacisku na powierzchnię reakcji.

W celuysterowania pożądaných wartości sił kontaktu f , postuluje się objęcie przedstawionego układu sterowania impedancją pętlą dodatkowego sprzężenia zwrotnego, której zadaniem będzie regulacja sił f . Regulacja ta będzie dokonywana poprzez kształtowanie wartości sygnału x_z , który stanowi wejście regulatora impedancji.

Podamy teraz zależność x_z od pożądaney wartości siły f_z . Skorzystamy tutaj z równań określających impedancje środowiska oraz manipulatora. Siła reakcji środowiska (powierzchni reakcji) w dziedzinie zmiennej zespolonej może być przedstawiona następującym równaniem:

$$F_r(s) = I_{ir}(s)[X(s) - X_r(s)], \quad (10)$$

w którym $X_r(s)$ oznacza transformatę położenia powierzchni reakcji x_r , $X(s)$ - transformatę położenia końcówki, a $I_{ir}(s)$ - impedancję środowiska. Obecnie ograniczamy się do rozpatrywania środowisk, których impedancja jest tylko sztywnością, tzn.:

$$I_{ir}(s) = K_{ir}. \quad (11)$$

Z drugiej strony, mamy:

$$F_r(s) = I_m(s)[X_z(s) - X(s)], \quad (12)$$

gdzie $I_m(s)$ jest impedancją manipulatora

$$I_m(s) = Ms^2 + Bs + K. \quad (13)$$

Wyznaczamy $X(s)$ z równania (10): $X(s) = I_{ir}^{-1}F_r + X_r$ (14)

oraz podstawiamy do równania (12), skąd otrzymujemy równanie

$$I_m(s)[X_z(s) - X_r(s)] = I_m(s)I_{ir}^{-1}(s)F_r(s) + F_r(s) \quad (15)$$

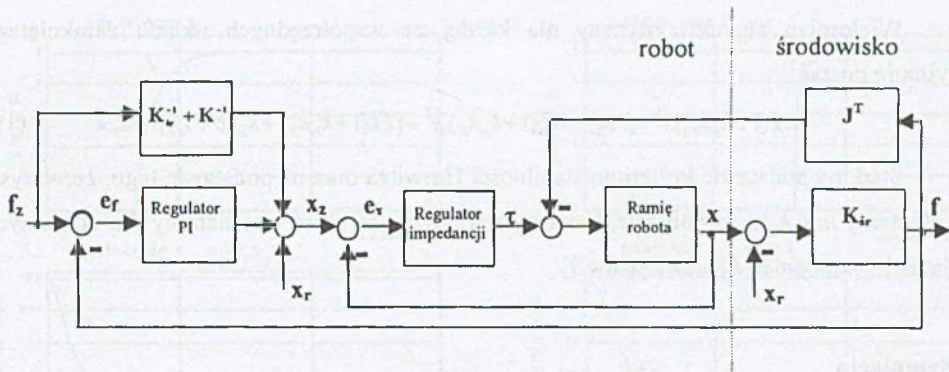
oraz ostatecznie:

$$X_z(s) = X_r(s) + [I_{ir}^{-1}(s) + I_m^{-1}(s)]F_r(s). \quad (16)$$

Stąd, uwzględniając zależności (11) oraz (13) można otrzymać dla stanu ustalonego następujące równanie:

$$x_z = x_r + (K_{ir}^{-1} + K^{-1})f_z. \quad (17)$$

Ze względu na fakt, iż parametry modelu środowiska, jak i modelu robota są zwykle znane tylko z pewnym przybliżeniem i różnią się od wartości rzeczywistych, co może prowadzić do powstania błędów nadążania i uchybu ustalonego siły, dlatego w pętli zewnętrznej wprowadzamy regulator PI, który ma za zadanie regulowanie siły oddziaływań z powierzchnią kontaktu, zregulowując błędy wynikające z niedokładności przyjętych modeli oraz innych zakłóceń mogących się pojawić w procesie sterowania.



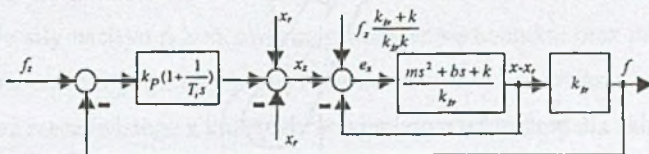
Rys. 1. Schemat układu sterowania
Fig. 1. The scheme of the control system

Schemat układu sterowania odpowiadający wyprowadzonym zależnościom przedstawiony jest na rysunku 1. Schemat ten odnosi się do sterowania siłą. Jeśli istnieją kierunki, które nie wymagają specyfikowania siły, to dla tych współrzędnych nie następuje modyfikacja wektora x_z , co oznacza, że działa tutaj tylko regulator impedancji.

Przeprowadzimy teraz analizę stabilności przedstawionego powyżej układu sterowania, który ze względu na zastosowanie linearyzującego prawa sterowania (3) potraktujemy jako układ liniowy. Ponadto, biorąc pod uwagę fakt, iż macierze określające impedancje manipulatora oraz środowiska są macierzami diagonalnymi, możemy analizę stabilności wykonać oddzielnie dla każdej współrzędnej. Na rysunku 2 przedstawiono równoważny schemat blokowy, odnoszący się do jednej współrzędnej, który wynika z uwzględnienia linearyzującego prawa sterowania (3), równań (10-17) oraz wprowadzenia regulatora PI. Z przedstawionego schematu wynika, że transmitancja układu otwartego dla każdej współrzędnej może być przedstawiona w postaci:

$$G(s) = \frac{k_{ir} m k_p T_i s^3 + k_{ir} (m + b k_p T_i) s^2 + k_{ir} (b + k k_p T_i) s + k_{ir} k}{m T_i s^3 + b T_i s^2 + (k + k_{ir}) T_i s}, \quad (18)$$

gdzie k_p - wzmocnienie regulatora, a T_i jego czas zdwojenia, m, b, k - elementy macierzy M, B i K , określających impedancję robota k_{ir} - elementy macierzy sztywności środowiska K_{sr} .



Rys. 2. Równoważny schemat blokowy dla jednej współrzędnej
Fig. 2. Equivalent scheme for one coordinate

Wielomian charakterystyczny dla każdej ze współrzędnych układu zamkniętego przyjmuje postać:

$$mT_i(1+k_{i_r}k_p)s^3 + [mk_{i_r} + bT_i(1+k_{i_r}k_p)]s^2 + [T_i k(1+k_{i_r}k_p) + k_{i_r}(b+T_i)]s + k_{i_r}k \quad (19)$$

Stąd, na podstawie kryterium stabilności Hurwitza oraz na podstawie tego, że wszystkie elementy m, b, k, k_{i_r} są dodatnie, możemy stwierdzić, że układ jest stabilny dla dowolnych dodatnich wzmocnień k_p oraz czasów T_i .

3. Symulacja

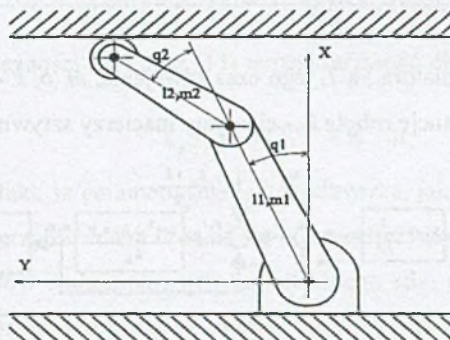
Poniżej zamieszczono wyniki eksperymentów symulacyjnych z przedstawionym algorytmem sterowania. W eksperymentach tych wykorzystano hipotetyczny manipulator płaski o dwóch stopniach swobody, przedstawiony na rysunku 2, gdzie

$l_1 = l_2 = 50 \text{ cm}$ - długości ogniw manipulatora;

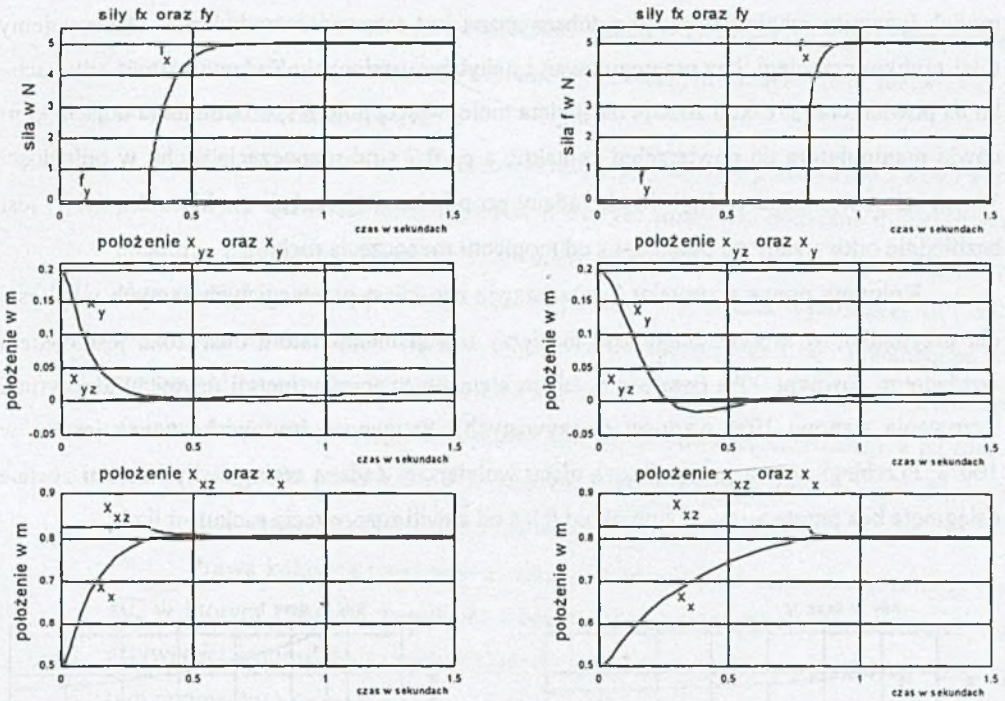
$m_1 = m_2 = 1 \text{ kg}$ - masy poszczególnych ogniw.

Manipulator ten działa w płaszczyźnie prostopadłej do wektora grawitacji, co pozwala uprościć sterowanie, gdyż siła grawitacji nie musi być uwzględniana.

W przeprowadzonym doświadczeniu manipulator powinien wywierać końcówką siłę $f_z = 5 \text{ N}$ na płaszczyznę kontaktu, umieszczoną prostopadle do osi x , w odległości 80 cm od osi y , przy jednoczesnym przesuwaniu tej końcówki wzdłuż płaszczyzny kontaktu. Zakładamy, że ruch wzdłuż płaszczyzny kontaktu może odbywać się bez tarcia. Ruch manipulatora rozpoczyna się od pozycji $\mathbf{x}=[0,5 \ 0,2]^T$, czyli od fazy ruchu swobodnego, która następnie, po osiągnięciu powierzchni kontaktu, przechodzi w fazę ruchu ograniczonego. Przyjęta sztywność środowiska (powierzchni kontaktu) jest określona macierzą \mathbf{K}_{st} , gdzie



Rys.3. Struktura manipulatora użytego w eksperymentach
Fig.3. Structure of the manipulator used in experiments



Rys.4. Przebiegi sił i położeń dla przypadku idealnego oraz przy ograniczonej znajomości modelu dynamiki manipulatora

Fig.4. Time trends of forces and positions for the ideal case and for the case of constrained knowledge of the manipulator dynamics model

$$K_{tr} = \begin{bmatrix} 10^4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

co oznacza, że siła reakcji powstaje tylko w kierunku normalnym do powierzchni reakcji.

Impedancja zadana manipulatora określona jest macierzami M , B , K , przy czym

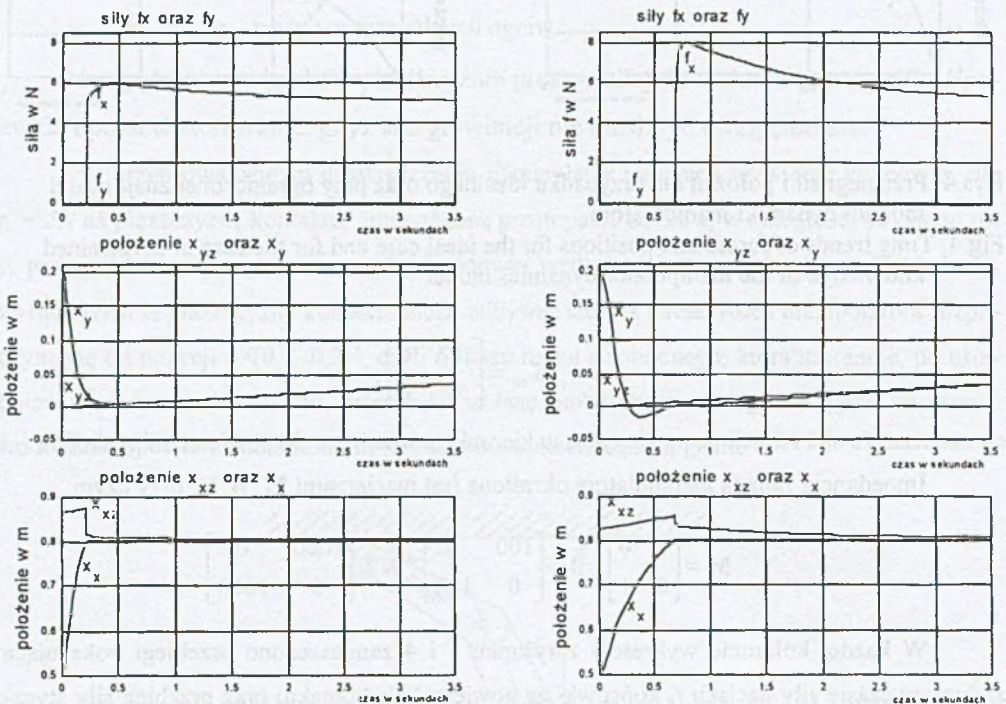
$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}.$$

W każdej kolumnie wykresów z rysunku 3 i 4 zamieszczono przebiegi pokazujące zmiany w czasie siły nacisku f_x końcówki na powierzchnię kontaktu oraz przebieg siły stycznej f_y do tej powierzchni (wykres górny). Ponadto pokazano też zmiany w czasie położenia zadanego x_z oraz rzeczywistego x końcówki manipulatora oddzielnie dla składowej $y - x_{yz}$ i x_y (wykres środkowy) oraz dla składowej $x - x_{xz}$ i x_x (wykres dolny).

Pierwsza od lewej kolumna wykresów z rysunku 3 przedstawia przebiegi wymienionych powyżej wielkości dla przypadku idealnego, tzn. takiego, w którym znany jest dokładny

model dynamiki manipulatora oraz dobrze znana jest sztywność środowiska. Obserwujemy tutaj szybkie przebiegi, bez przeregulowań i uchybów ustalonych. Zadana wartość siły nacisku na powierzchnię reakcji zostaje osiągnięta mniej więcej po 0,3 s, od momentu dojścia końcówki manipulatora do powierzchni kontaktu, a po 0,7 s od rozpoczęcia ruchu w odległości 30 cm od powierzchni reakcji. Ruch zadany po powierzchni reakcji (w kierunku osi y) jest bezbłędnie odtwarzany po około 0,4 s od momentu rozpoczęcia ruchu.

Kolumna prawa z rysunku 3 przedstawia natomiast przebiegi tych samych wielkości dla przypadku, w którym znajomość macierzy inercji manipulatora obciążona jest błędem względnym równym 90% (wartość każdego elementu macierzy inercji użytej w algorytmie sterowania stanowi 10% wartości rzeczywistych). Sztywność środowiska znana jest tu w 100%. Przebiegi w tym przypadku są nieco wolniejsze. Zadana wartość siły nacisku zostaje osiągnięta bez przeregulowania po około 0,8 s od chwili rozpoczęcia ruchu.



Rys.5. Siły i położenia przy ograniczonej znajomości sztywności środowiska oraz przy ograniczonej jej znajomości i ograniczonej znajomości modelu dynamiki manipulatora
 Fig.5. Time trends of forces and positions for the cases of constrained knowledge of environment stiffness and of both stiffness and manipulator dynamics model

Odtwarzanie ruchu po powierzchni reakcji w kierunku osi y jest praktycznie bezbłędne w stanie ustalonym, natomiast w stanie dynamicznym obserwujemy niewielkie przeregulowanie nie przekraczające 2%.

Pierwsza od lewej kolumna wykresów z rysunku 4 przedstawia z kolei przebiegi rozpatrywanych wielkości dla przypadku, w którym znany jest dokładny model dynamiki manipulatora, natomiast znajomość sztywności środowiska obarczona jest błędem względnym równym 90%, tzn. przy rzeczywistej sztywności środowiska wynoszącej 10^4 , do algorytmu sterowania wprowadzono wartość o jeden rząd mniejszą, czyli 10^3 . Przebiegi te pokazują, że znajomość sztywności środowiska ma bardzo duże znaczenie dla jakości sterowania. Obserwujemy tutaj 20% przeregulowanie siły nacisku na powierzchnię reakcji, a jej zadana wartość zostaje osiągnięta po czasie 3,5 s. Śledzenie zdanej trajektorii ruchu wzdłuż powierzchni reakcji jest stosunkowo dobre – nie obserwujemy tutaj przeregulowania.

Prawa kolumna wykresów z rysunku 4 przedstawia natomiast przebiegi dla przypadku, w którym zarówno znajomość macierzy inercji modelu manipulatora, jak i znajomość sztywności środowiska są ograniczone do 90% ich wartości rzeczywistych. Czas regulacji w tym przypadku wynosi 3,5 s, tzn. po tym czasie zarówno zadana siła nacisku na powierzchnię reakcji, jak i trajektoria ruchu wzdłuż niej są odtwarzane praktycznie bezbłędnie. Obserwujemy jednak stosunkowo duże przeregulowanie siły nacisku po uzyskaniu kontaktu z powierzchnią reakcji oraz około 2,5% przeregulowania położenia.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę sterowania podatnością końcówki technologicznej manipulatora z możliwością regulacji siły nacisku końcówki na powierzchnię ograniczającą jej ruch. Zaproponowana metoda bazuje na koncepcji sterowania impedancyjnego, wykorzystując jej podstawową zaletę, która pozwala na stosowanie tego samego algorytmu sterowania w fazie ruchu swobodnego oraz ruchu ograniczonego. Objęcie układu sterowania impedancją dodatkową pętlą sprzężenia zwrotnego pozwala na bezpośrednią regulację siły.

W pracy zamieszczono też wyniki eksperymentów symulacyjnych, których celem było przetestowanie działania metody w sytuacji ograniczonej znajomości modelu dynamiki manipulatora oraz sztywności środowiska, na które wywierana jest siła podlegająca regulacji. Wyniki tych testów pokazały, że nawet przy stosunkowo dużym ograniczeniu znajomości wspomnianych parametrów jakość sterowania może być uznana za zadowalającą.

LITERATURA

1. Craig, J.J.: Wprowadzenie do robotyki. Mechanika i sterowanie. WNT, Warszawa 1993.
2. Hogan, N.: Impedance control: An approach to manipulation: Part I – Theory; Part II – Implementation; Part III – Applications. ASME Journal of Dynamic Systems Measurements and Control, vol.107, 1985, pp.1-24.
3. Spong, M.W., Vidyasagar, M.: Dynamika i sterowanie robotów. WNT, Warszawa 1997.

Recenzent: Dr inż. T.Szkodny

Abstract

The ability of proper handling dynamic interactions between robot manipulators and their environments is one of the most desirable features of robots because it is prerequisite for successful applying robots to manipulation tasks involving contact or performing work on the environment. In order to handle contact with the environment in such contact tasks as grinding, deburring or assembling it is indispensable to perform the compliance control ensuring compliant motion, i.e. the motion of a robot with variable stiffness, from rigid to soft. The specified control problem refers to situations when the robot end-effector should comply with geometric constraints of a manipulation task on exerting, in the same time, desired contact forces which means there are both forces and positions to be controlled and monitored.

In the paper a new control algorithm to provide the manipulator with compliance when performing constrained motions has been proposed. This control method is based on the impedance control scheme which means controlling the force-position relationship. The presented method takes advantage of the main virtue of the impedance control algorithm: it can be used to control both free and constrained motion of the manipulator without any need to detect the motion changes from free, unconstrained to constrained motion and vice versa which is typical in performing contact tasks. On the other hand, however pure impedance control does not enable direct specification of desired contact forces to be exerted on the contact surface as it accounts rather for the impedance than for the force. In our algorithm an impedance controller is a part of the control loop which accounts for the desired force by controlling the position input to the impedance controller.

The method was tested by simulation and results of these experiments has been attached to the paper. The demonstrated experiments comprised simultaneous following force and position commands by the robot end effector. The obtained results show good control performance of the proposed method.