

Podstawy sterowania siłowego w robotach

▶ Tomasz Winiarski
Cezary Zieliński

Pomiar sił w istotny sposób rozszerza możliwości wykonywania zadań przez tradycyjne roboty, korzystające jedynie z pomiarów położenia członów. Stąd duże zainteresowanie tego typu metodami. Artykuł przedstawia, w odniesieniu do popularnych dotychczas metod pozycyjnych, przegląd metod sterowania, korzystających z pomiarów sił i momentów sił powstających w interakcji robota z otoczeniem.

Wprowadzenie

Roboty usługowe znacznie różnią się od klasycznych robotów przemysłowych. Roboty przemysłowe pracują w środowisku dobrze uporządkowanym, jakie stanowią hale fabryczne, a więc generalnie mogą poruszać się „na ślepo” – nie wymagają ani dużej liczby czujników ani nadmiernej inteligencji, by realizować swoje zadania.

Natomiast roboty usługowe muszą radzić sobie w otoczeniu, w którym ludzie działają na co dzień. Jest to otoczenie mało uporządkowane, zmieniające się dynamicznie, stąd, by efektywnie się w nim poruszać, roboty muszą dysponować wieloma i to różnorodnymi czujnikami oraz znaczną zdolnością do przetwarzania informacji. Ludziom do efektywnego działania w środowisku naturalnym potrzebne są wszystkie zmysły, ale dominują dwa: wzrok i dotyk. Ponieważ roboty mają funkcjonować w takim samym otoczeniu, więc do zbierania informacji o jego stanie, muszą dysponować podobnymi zdolnościami. Dlatego intensywnie badane są algorytmy sterowania wykorzystujące czujniki wizyjne, a więc kamery, oraz sensory dotyku – czujniki siły. Trudno sobie wyobrazić robota, który nie mając zdolności wyczuwania kontaktu z przedmiotami bądź ludźmi, wykonuje prace kuchenne lub wspomaga zniedołężniałego staruszka w jego codziennych czynnościach. Stąd duże zainteresowanie metodami sterowania, korzystającymi z pomiaru sił kontaktu pomiędzy robotem a otoczeniem. Celem tego artykułu jest wprowadzenie Czytelnika w zagadnienia związane ze sterowaniem siłowym w robotach.

Pozycyjne i siłowe sterowanie manipulatorami

Jeżeli manipulator nie wchodzi w kontakt ze swym otoczeniem, to wystarczy sterowanie pozycyjne. W czysto pozycyjnym sterowaniu nie zadaje się i nie mierzy siły, a jedynie zadaje się i mierzy pozycję. Stąd w typowych

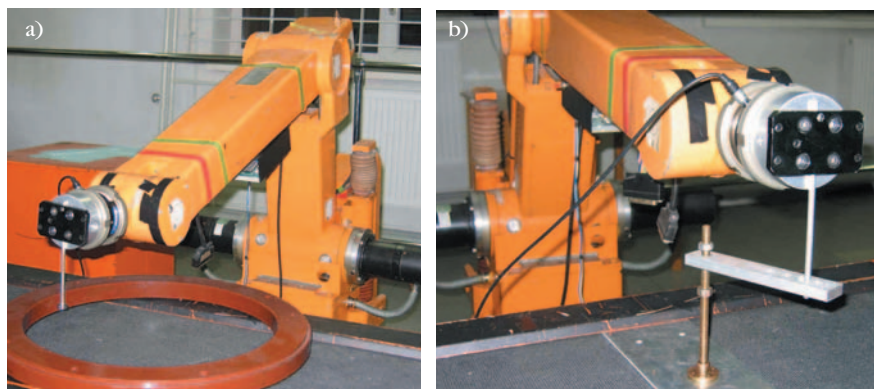
implementacjach przemysłowych położenie zadane dla regulatorów osi jest określane na podstawie rozwiązania odwrotnego zagadnienia kinematyki dla kolejnych pozycji końcówki na zdyskretyzowanej w czasie trajektorii zadanej. Regulatory osi kształtują prądy w silnikach na podstawie różnicy pomiędzy aktualnym położeniem wałów silników a położeniem zadany. Ową różnicę zwykło się zwać uchybem regulacji.

Zadaniem regulatora jest doprowadzenie, w kolejnych kwantach czasu, uchybu regulacji do wartości minimalnej – najlepiej do zera. Jeżeli wartość uchybu osiąga zero, to końcówka wiernie śledzi trajektorię zadaną. Najczęściej wyzerowanie tego uchybu w trakcie ruchu jest niemożliwe – dąży się więc do uczynienia go jak najmniejszym. Sterowanie pozycyjne jest stosowane wszędzie tam, gdzie ewentualny kontakt pomiędzy robotem a otoczeniem nie wpływa na planowanie ruchu robota. Będą to więc zadania, podczas których robot nie styka się z żadnymi przeszkodami, np. lakierowanie, oraz zadania, w których z góry wiadomo, gdzie przeszkody te się znajdują, np. paletyzacja.

Sytuacja ulega drastycznej zmianie, jeżeli końcówka wchodzi w interakcję z otoczeniem. Jeżeli jakiś obiekt znajduje się w innej pozycji niż przewidywana, to w istocie staje się przeszkodą na drodze manipulatora. W tej sytuacji dążenie do zredukowania uchybu między wartością zadaną a wartością aktualną pozycji końcówki będzie powodowało wzrost prądu w silniku, aby zwiększyć siłę oddziaływania silnika na człon, a w konsekwencji i na końcówkę. Kończówka będzie więc naciskała na obiekt z coraz większą siłą, aż obiekt albo robot ulegną zniszczeniu. Dlatego w układach sterowanych czysto pozycyjnie stosuje się zabezpieczenia, które wyłączają silniki, gdy płynie w nich nadmierny prąd. Jest to działanie awaryjne, które oczywiście ratuje system przed katastrofą, ale nie zapewnia zrealizowania zadania.

Sterowanie siłowe ma zapewnić zrealizowanie zadania, nawet gdy robot natrafi na przeszkody. W sterowaniu siłowym wyróżnia się dwa podstawowe mechanizmy: pasywny i aktywny. Mechanizm pasywny to zestaw podatnych elementów mechanicznych, który odkształca się w ograniczonym stopniu podczas zderzenia końcówki manipulatora z obiektami. Wówczas niewielkie niedokładności we wzajemnym położeniu

▶ mgr inż. Tomasz Winiarski, prof. dr hab. Cezary Zieliński – Wydział Elektroniki i Techniki Informacyjnych, Politechnika Warszawska



(a) Śledzenie konturu

(b) Kręcenie korbą

Rys. 1. Aplikacje robota IRp6 wykorzystujące regulator pozycyjno-siłowy

końcówki manipulatora i obiektów nie muszą wpływać na poprawność wykonywania zadania. Niestety, taki system jest ściśle dostosowany do określonego zadania, np. wkręcania śrub o określonej długości. W mechanizmie pasywnym pomiary siły nie są wykorzystywane w sterowniku. W przeciwieństwie do metody pasywnej, w metodzie aktywnej wartość siły jest mierzona i wykorzystywana w regulatorach, co m.in. pozwala na uzyskanie zmiennej podatności manipulatora.

Na podstawie pomiaru siły można zmodyfikować ruch manipulatora – nie ma wszak potrzeby, by się upierać przy realizacji niewykonalnej trajektorii. Aktywne sterowanie siłowe umożliwia m.in. pchanie bądź ciągnięcie przedmiotów z zadaną siłą. Największe możliwości mają wielowymiarowe regulatory pozycyjno-siłowe, które, na przykład, mogą posłużyć [2, 17, 18] do realizacji zadań śledzenia konturu (rys. 1a), kręcenia korbą (rys. 1b), a nawet rysowania (rys. 2a) bądź układania kostki Rubika (rys. 2b).

W przemyśle stosuje się niekiedy pasywny bądź aktywny mechanizm sterowania siłowego. Niektóre operacje technologiczne, takie jak polerowanie i gratowanie, wymagają wprowadzenia pewnej podatności (sterowanej bądź nie) w kontakcie narzędzia z obrabianym obiektem. Niestety, aktywne sterowanie siłowe, pomimo faktu, że jest przydatne, jak na razie nie rozprószyło się szeroko w robotyce przemysłowej.

Termin „regulator pozycyjno-siłowy” nie jest do końca konsekwentnie używany w literaturze. Mamy bowiem do czynienia z różnego rodzaju zależnościami pomiędzy pozycją a siłą w części regulatora. Typowo mianem pozycyjno-siłowego określa się regulator, w którym w sformułowaniu zadania występują kierunki ruchu sterowane pozycyjnie i – ortogonalne do nich – kierunki ruchu sterowane siłowo. Te pierwsze jako wartość zadaną mają pozycję bądź prędkość, a te drugie – siłę, bądź moment siły. Warto sobie jed-

nak uświadomić, że można też stworzyć regulator pozycyjno-siłowy dla jednego kierunku ruchu, tzn. tak skonstruować pętlę regulacji, aby wykorzystywała zarówno informacje o pozycji, jak i sile. Założenie to spełnia w szczególności regulator sztywności, który zostanie opisany nieco dalej.

Metody pomiaru sił

Chcąc mierzyć siły, najczęściej mierzymy odkształcenia elementu, na który te siły bezpo-

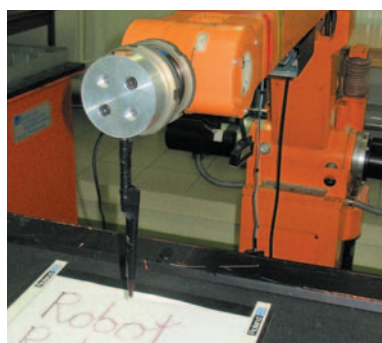
średnio działają. Można też szacować moment siły na wale silnika na podstawie prądu płynącego przez silnik.

Element ulegający odkształceniu może mieć właściwości piezoelektryczne i wówczas jego odkształcaniu towarzyszy gromadzenie się, na przeciwnych ścianach, ładunków elektrycznych. Niestety czujniki siły skonstruowane na bazie materiałów piezoelektrycznych mają niekorzystne charakterystyki i znajdują zastosowanie głównie w miniaturowych urządzeniach [6, 8], gdzie atutem jest ich wielkość.

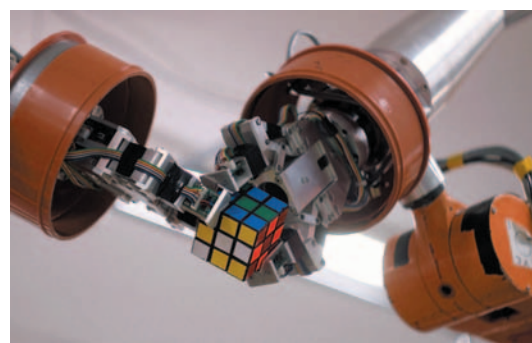
Odształcenie można też mierzyć wykorzystując do tego wiązkę światła i matrycę światłoczułą. System ten zastosowano w mikroskopach służących do pomiaru sił wiązań atomowych [11], a także w specjalnie skonstruowanych przegubach manipulatorów, w których mierzony jest moment siły [13].

Najczęściej pomiary sił wykonywane są za pomocą mostków tensometrycznych, które mogą być montowane w różnych miejscach manipulatora. Przyłożenie siły powoduje odkształcenie, które prowadzi do zmiany odległości pomiędzy dwoma wybranymi punktami, leżącymi na elemencie ulegającym temu odkształceniu. Na odcinku, którego długość zmienia się, jest naklejonny tensometr, czyli element, którego rezystancja zależy od jego długości. Pomiar rezystancji następuje w układzie elektronicznego mostka połączonego ze wzmacniaczem.

Moment siły w silniku elektrycznym można wyznaczyć pośrednio z prądu płynącego przez silnik, gdyż ge-



(a) Rysowanie



(b) Układanie kostki Rubika

Rys. 2. Zaawansowane aplikacje robota IRp6 wykorzystujące regulator pozycyjno-siłowy

neralnie moment siły jest w pewnym zakresie wprost proporcjonalny do płynącego prądu. W praktyce mechanizm ten służy do wykrycia nadmiernego obciążenia silnika, ale i siły ścinającej [12], i momentów sił w stawach manipulatora [5].

Czujniki siły w manipulatorach

Ogólną zasadą jest umieszczanie elementu pomiarowego jak najbliżej źródła powstania siły, którą chce się mierzyć. W manipulatorach są trzy miejsca, gdzie typowo mierzy się siły:

- Z punktu widzenia sterowania interesujące są siły, wywierane przez końcówkę na obiekty znajdujące się w jej otoczeniu. Aby zmierzyć te siły, czujnik pomiarowy umieszcza się typowo w nadgarstku robota. Taki czujnik jest najczęściej zestawem specjalnie ukształtowanych belek metalowych, z odpowiednio naklejonymi tensometrami [1]. Pomiar siły w nadgarstku manipulatora pozwala robotowi np. na mycie szyb, wymagające zachowania odpowiedniej siły docisku końcówki myjącej do powierzchni szkła.
- Można też mierzyć oddziaływania pomiędzy poszczególnymi członami manipulatora, ale wtedy, zamiast wykorzystania tensometrów, dokonuje się albo pomiaru bezpośredniego z wykorzystaniem wiązki światła, o czym pisano już wcześniej, albo pomiaru pośredniego, badając, jaki prąd płynie przez silnik.
- W manipulatorach mierzy się także siły występujące pomiędzy szczękami chwytaków. Mierzona jest siła normalna wywierana przez szczęki na obiekt, a także, rzadziej, siła ścinająca związana bezpośrednio z wyslizgiwaniem się przedmiotu spomiędzy palców. Dzięki pomiarowi siły w szczękach chwytaka jest możliwe uniesienie przedmiotu bez ryzyka jego uszkodzenia. Chwytak może zacisnąć się wystarczająco lekko, aby nie zmiażdżyć przedmiotu (np. jajka), ale i wystarczająco mocno, aby nie dopuścić do jego wyslizgnięcia.

Można też pokusić się o wyznaczenie sił działających na końcówkę manipulatora na podstawie sił działających w jego stawach. W praktyce tak wykonany pomiar jest obarczony dużym błędem, gdyż końcówkę manipulatora i jego stawy dzieli długi i nie do końca sztywny łańcuch kinematyczny. Teoretycznie można także wyznaczyć siły działające w końcówce manipulatora na podstawie znanego modelu sztywności manipulatora i znanego odchylenia pozycji osiągniętej przez końcówkę od pozycji zadanej. W podejściu tym można wykorzystać: pozycję odczytaną z enkoderów stawów i proste zagadnienie kinematyki, bądź np. system wizyjny. Generalnie im większe ugięcie i sztywność, tym większa siła. W praktyce metoda ta jest mało przydatna, gdyż w mechanizmach manipulatorów występują luzy, a tak wykonywany pomiar ugięcia jest bardzo niedokładny.

W dalszej części artykułu skoncentrujemy się na pomiarze siły wywieranej przez narzędzie na otoczenie, a pochodzącej od członów manipulatora. Źródłem tej siły są zarówno silniki, jak i grawitacja.

Sztywność, tłumienie, bezwładność, impedancja i admitancja mechaniczna

Sztywność to wielkość fizyczna określająca zdolność ciała do przeciwstawiania się odkształceniu wywołanemu przez siłę zewnętrzną. Podatność zaś jest odwrotnością sztywności. Najprostszym przykładem ciała charakteryzującego się małą sztywnością jest sprężyna. Zależność pomiędzy siłą F wywieraną na sprężynę o charakterystyce liniowej, a odkształceniem sprężyny X wyraża wzór:

$$F = KX \quad (1)$$

gdzie K jest współczynnikiem proporcjonalności, zwanym sztywnością.

Tłumienie B wiąże z kolei siłę i prędkość:

$$F = B\dot{X} \quad (2)$$

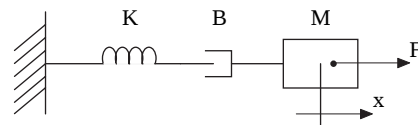
Występowanie tłumienia powoduje w szczególności gaśnięcie niepodtrzymywanych drgań mechanicznych. Zjawisko to jest wykorzystywane w zawieszeniu samochodowym, gdzie rolę elementów tłumiących drgania zwykle pełnią stawiające opór amortyzatory.

Bezwładność (inercja) to zdolność ciała materialnego do zachowania swego stanu ruchu mechanicznego. Miarą bezwładności w ruchu postępowym jest masa M , a w ruchu obrotowym – moment bezwładności. Wzór wiążący siłę z przyspieszeniem, z masą jako współczynnikiem proporcjonalności, to drugie prawo dynamiki Newtona:

$$F = M\ddot{X} \quad (3)$$

Impedancja mechaniczna Z_M to związek między siłą a położeniem, zawierający wszystkie trzy opisane wcześniej elementy: sztywność, tłumienie i bezwładność. Impedancję mechaniczną obrazuje szeregowy blok oscylacyjny (rys. 3). Związek między przyłożoną siłą F , a przemieszczeniem X masy M można zapisać jako:

$$F(t) = M \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + B \frac{dX(t)}{dt} + KX(t) \quad (4)$$



Rys. 3. Mechaniczny, szeregowy układ oscylacyjny

Po zastosowaniu transformaty Laplace'a, przy zerowych warunkach początkowych, otrzymujemy wyrażenie:

$$F(s) = Ms^2X(s) + BsX(s) + KX(s) \quad (5)$$

W dziedzinie zmiennej zespolonej impedancję mechaniczną $Z_M(s)$ definiuje się jako:

$$sZ_M(s) = \frac{F(s)}{X(s)} \quad (6)$$

Wyrażenia (5), (6) dają:

$$Z_M(s) = Ms + B + \frac{K}{s} \quad (7)$$

Warto nadmienić, że impedancja mechaniczna używała swą nazwę dzięki podobieństwu do impedancji elektrycznej [10].

Mechaniczną admitancję [9] definiuje się jako:

$$AF = \dot{X} \quad (8)$$

Admitancja jest odwrotnością impedancji. Generalnie o obiekcie typu admitancyjnego można mówić, kiedy siła czynna na wejściu generuje przepływ (prędkość) na wyjściu. Z kolei obiekt impedancyjny to taki, w którym przepływ na wejściu generuje siłę na wyjściu. W praktyce klasyfikacja na obiekty typu admitancyjnego i impedancyjnego jest często trudna, np. dla wspólnej manipulacji obiektami przez zespół manipulatorów.

Regulacja jednowymiarowa

W tej części skoncentrujemy się na modelu sterowania dla pojedynczego kierunku, dla zachowania ogólności rozważań nie uściślając dokładnej struktury regulatora, a jedynie konsekwentnie przyjmując, że w jego wnętrzu znajduje się serwomechanizm pozycyjny.

Struktura układu sterowania zależna jest od zachowania, jakiego oczekujemy od robota. Generalnie można wyszczególnić trzy elementarne zachowania:

- swobodny ruch z założeniem braku możliwości kontaktu z przeszkodami
- kontakt – wywieranie zadanej siły na przeszkody
- faza przejściowa – swobodny ruch ze spodziewanym kontaktem z przeszkodami.

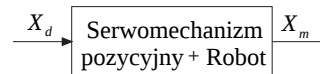
Przykładem aplikacji robota przemysłowego, w której występują wszystkie powyższe zachowania jest frezowanie. Najpierw końcówka robota przemieszcza się w okolice detalu i podczas ruchu praktycznie nie ma możliwości kontaktu z otoczeniem. W ostatniej fazie zbliżania wykonywany jest ruch po zadanej trajektorii, ale system musi być przygotowany na ewentualny kontakt z obiektem, którego początkowe wymiary nie są dokładnie znane. Po osiągnięciu kontaktu dalszy ruch realizowany jest w reżimie odpowiednich sił, jakie frez ma wywierać na obrabiany detal. Warto nadmienić, że tego rodzaju zachowania uzyskiwano po części, dzięki odpowiedniej konstrukcji mechanicznej narzędzia, a nie – regulacji siłowej.

Swobodny ruch bez kontaktu z otoczeniem

Pierwsze zachowanie realizowane jest przez regulator czysto pozycyjny (serwomechanizm pozycyjny), którego nie będziemy szczegółowo omawiać. Wzmiankowano już, że użycie takiego regulatora powinno być, ze względów bezpieczeństwa, wspomagane chociażby sprzętowym mechanizmem wykrywającym zderzenia, który zapobiega zniszczeniu manipulatora (w szczególności przegrzaniu silników w wyniku przepływu zbyt dużych prądów).

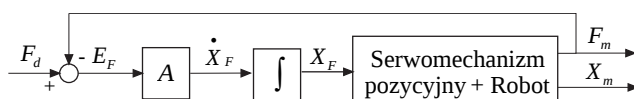
Kontakt

W takim przypadku stosuje się najczęściej czystą regulację siłową, tzn. taką, która wykorzystuje sprzężenie od siły wywieranej na otoczenie, a pozostałe wielkości zadane są konsekwencją siły zadanej. Regulacja ta pozwala na zadanie niezerowej siły.



Rys. 4. Pozycyjny układ regulacji

Przykładem regulacji siłowej jest regulacja admitancyjna, gdzie odpowiedź manipulatora na siłę wywieraną na jego końcówkę kształtowana jest przez dobór admitancji A i określenie siły zadanej F_d .



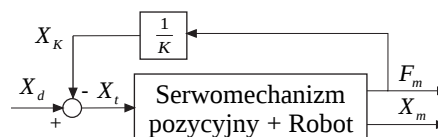
Rys. 5. Regulator admitancyjny

Ruch ze spodziewanym kontaktem z otoczeniem

Tutaj pojawia się cała rozmaitość podejść, które łączy jedna wspólna cecha. Regulator ma za zadanie osiągać pozycję bądź prędkość zadaną, o ile nie ma kontaktu z przeszkodami. Jeżeli taki kontakt nastąpi, to trajektoria zadana jest modyfikowana o wartość zależną od siły wywieranej na otoczenie. W fazie przejściowej między ruchem swobodnym a kontaktem, siła zadana zawsze musi być równa zero. W przeciwnym razie, przy braku siły reakcji od przeszkody, siła zmierzona byłaby równa zero, a uchyb stanowiący różnicę między siłą zadaną a zmierzoną byłby równy właśnie tej sile zadanej, a więc układ przyspieszałby zgodnie z drugim prawem Newtona, a dokładniej rzecz ujmując – zgodnie ze swoją charakterystyką impedancyjną (4). W literaturze odnajdziemy przegląd kilku typowych struktur regulatorów [16, 19], odpowiadających takim założeniom.

Regulator sztywności

Sztywność nie odnosi się jedynie do sprężyn. W robotyce można dążyć do osiągnięcia pożądanej sztywności manipulatora. Dla zrozumienia sposobu działania regulatora sztywności (rys. 6) można wyróżnić dwa tryby jego pracy. W sytuacji, w której końcówka chwytaka nie styka się z otoczeniem, siła zmierzona F_m jest

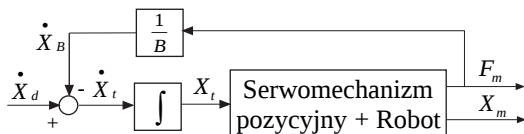


Rys. 6. Regulator sztywności

równa zero. Wówczas regulator śledzi zadane pozycje na ścieżce X_d , tak jak czyni to proporcjonalny regulator położenia. W momencie, gdy manipulator zetknie się z przeszkodą, wartość bezwzględna siły F_m wzrośnie, co poprzez sztywność K wpłynie na modyfikację wartości X_K . Regulator zacznie więc odchodzić od śledzenia trajektorii zadanej, gdyż manipulator „poddaje” się sile wywieranej na jego końcówkę, co pozwala na uniknięcie sytuacji charakterystycznej dla regulatorów pozycyjnych, w której robot musiałby być awaryjnie wyłączony ze względu na przekroczenie dopuszczalnego prądu w silniku.

Regulator tłumienia

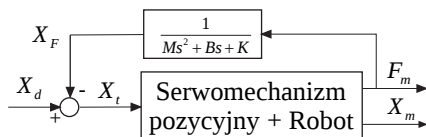
Regulator tłumienia (rys. 7) jest analogiem regulatora sztywności, z tym, że zamiast pozycji zadanej, mamy prędkość zadaną, a zamiast sztywności w pętli siłowej – tłumienie.



Rys. 7. Regulator tłumienia

Regulator impedancyjny

Zasadniczym zadaniem, jakie spoczywa na regulatorze impedancyjnym (rys. 8) jest osiągnięcie i utrzymywanie założonej mechanicznej impedancji manipulatora [15]. Regulator impedancyjny jest syntezą (uogólnieniem) regulatorów sztywności i tłumienia z dodanym składnikiem związanym z inercją. Taki schemat regulacji określa się mianem regulacji impedancyjnej bazującej na położeniu. Wówczas można uzyskać złożoną odpowiedź manipulatora na wywieraną siłę, kształto-

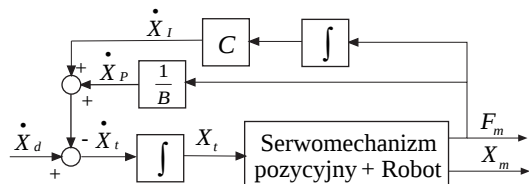


Rys. 8. Regulator impedancyjny

waną przez dobór, nie samej sztywności lub samego tłumienia, a całej impedancji mechanicznej. Na przykład, wywierana siła może powodować przemieszczanie manipulatora, który stawia przy tym określony opór. Opór ten kształtowany jest przez tłumienie – B , a wartość K można przyjąć jako zero, aby opór nie zależał od odchylenia od punktu początkowego. Z kolei dobór „masy” M pozwala na uwzględnienie dynamiki, poprzez ograniczenie przyrostu prędkości zadanej (przyspieszenia manipulatora) zależnego od przyłożonej siły.

Równoległa regulacja pozycyjno-siłowa

Równoległy regulator pozycyjno-siłowy (prędkościowo-siłowy) – rys. 9 – jest rozwinięciem regulatora tłumienia, z tym, że do tłumienia B w pętli siłowej, które może być utożsamiane ze składnikiem P omawianego regulatora, dochodzi całkowanie, ze współczynnikiem C , co w sumie daje sprzężenie typu PI w pętli siłowej. Dodanie całkowania powoduje, że uchyb siły będzie zerowany w sytuacji kontaktu, nawet wówczas, gdy prędkość zadana będzie niezerowa (o ile jej wartość bezwzględna nie będzie rosła).

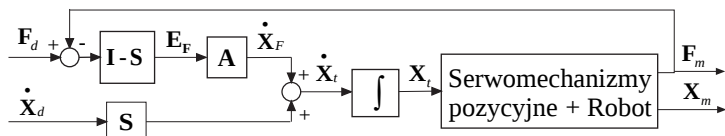


Rys. 9. Równoległy regulator pozycyjno-siłowy

Regulacja wielowymiarowa

W regulacji wielowymiarowej definiuje się pewną przestrzeń odniesienia (układ zadania) najczęściej we współrzędnych operacyjnych [7]. Składa się ona typowo z 6 kierunków: 3 związanych z translacją (liniowych) i 3 związanych z rotacją (obrotowych). Dla każdego z kierunków z osobna można dobrać któreś z podstawowych praw sterowania. Najczęściej realizowany jest model hybrydowy, w którym dla każdego kierunku alternatywnie wybiera się czystą regulację pozycyjną (prędkościową) bądź czystą regulację siłową. Można też pokusić się o podejście zunifikowane, w którym w każdym kierunku obowiązuje to samo prawo sterowania, jego parametryzacja decyduje o tym, czy jest to regulacja pozycyjna, siłowa czy jakaś regulacja równoległa (superpozycja regulacji pozycyjnej i siłowej). Takie podejście doczekało się skutecznych realizacji m.in. w systemie z regulacją bezpośrednią, z pełnym modelem dynamiki i momentami zadanymi w przestrzeni konfiguracyjnej [3] oraz systemie z regulacją pośrednią, a więc nie momentami zadanymi, lecz pozycją zadaną w przestrzeni konfiguracyjnej.

Przykładem regulacji wielowymiarowej jest hybrydowy regulator pozycyjno-siłowy, a właściwie prędkościowo-siłowy, składający się z dwóch torów sterowania: prędkościowego i siłowego (rys. 10).



Rys. 10. Hybrydowy regulator prędkościowo-siłowy

W omawianym regulatorze podejmowana jest decyzja, w którym kierunku ruchu będzie zadana prędkość, a w którym – siła. O podziale decyduje diagonalna, kwadratowa macierz S , nazywana macierzą selekcji. Elementy macierzy leżące na diagonalu przyjmują wartości 0 lub 1 w zależności od tego, do którego toru regulacji przyporządkowany jest odpowiadający im kierunek ruchu. W torze siłowym o relacji pomiędzy uchybem siły E_F a prędkością $\dot{X}_F$ decyduje macierz admitancji A .

Regulator prędkościowo-siłowy pozwala na wykonanie szeregu zadań, których przykłady przedstawiono we wprowadzeniu do artykułu. Ostatnio popularne stają się metody sterowania prędkościowo-siłowego, bazujące na koncepcji *Task Frame Formalism* [4], w której pozycyjne i siłowe kierunki ruchu wyszczególnia się w zdefiniowanym specjalnie dla zadania zewnętrznym układzie współrzędnych.

Podsumowanie

W artykule dokonano przeglądu oraz klasyfikacji metod regulacji wykorzystywanych w sterowaniu manipulatorami. Szczególny nacisk został położony na sprzężenie siłowe. Zaproponowano nowatorski podział algorytmów ze względu na oczekiwane zachowanie manipulatora. Dodatkowo opisano metody pomiaru sił, a także miejsca wykonywania pomiarów sił w manipulatorach. Wskazano też zaawansowane aplikacje, wykorzystujące wielowymiarowe regulatory pozycyjno-siłowe [2, 17, 18].

Praca finansowana przez Uczelniany Program Badawczy Politechniki Warszawskiej. Pragniemy podziękować dr Adamowi Woźniakowi za cenne wskazówki.

Bibliografia

- ATI Industrial Automation, www.ati-ia.com.
- Witryna Zespołu Programowania Robotów i Systemów Rozpoznających IaiIS PW, <http://robotics.ia.pw.edu.pl>.
- M.H. Ang Jr. Towards Pervasive Robotics: *Compliant Motion In Human Environments*. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering (IJSEKE), 15, April 2005.
- H. Bruyninckx, J. De Schutter. *Specification of force-controlled actions in the Task Frame Formalism: A Synthesis*. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 12(4):581–589, August 1996.
- X. Chunshan, W. Jianping, C. Guang, Z. Xifang. *Design of a new current sensing device for joint torque force control of the precision assembly robot*. Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004., 5, 2004.
- A. Daniele, S. Salapaka, M.V. Salapaka, M. Dahleh. *Piezoelectric scanners for atomic force microscopy: Design of lateral sensors, identification and control*. Proceedings of the American Control Conference, San Diego, CA, p. 253–257, 1999.
- J. De Schutter, H. Bruyninckx, W.H. Zhu, M.W. Spong. *Force control: a bird's eye view*. *Control Problems in Robotics and Automation*. Springer-Verlag, London, 1998.
- N. Delic, A. Vujanic, H. Detter, Z. Djuric, N. Simicic, R. Petrovic. *Piezoresistive force sensor developed for use in handling of microparts*. International Conference on Microelectronics, 1997. Proceedings, 1997 21st, 2, 1997.
- S. Huang, J.M. Schimmels. *Admittance selection for force-guided assembly of polygonal parts despite friction*. IEEE Transactions on Robotics, 20(5):817–829, October 2004.
- E. Jezierski. *Dynamika robotów*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne WNT, Warszawa, 2006.
- J. Lekki, U. Voss, M. Sowa (M. Lekka), B. Cleff, Z. Stachura. *Construction and First Experiments Using Scanning Force Microscope*. IFJ (Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie) Report, (1690/AP), 1995.
- X. Li. *Development of current sensor for cutting force measurement in turning*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 54(1):289–296, 2005.
- LE Pfeffer, O. Khatib, J. Hake. *Joint torque sensory feedback in the control of a PUMA manipulator*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 5(4):418–425, 1989.
- B. Siciliano, L. Villani. *Robot Force Control*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, K. Hara. *Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task*. Proceedings of the 2002 IEEE Conference on Robotics and Automation, volume 1, p. 644–650, May 2002.
- D. Whitney. *Historical perspective and state of the art in robot force control*. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings, 2, 1985.
- T. Winiarski, C. Zieliński. *Stanowisko do badania algorytmów sterowania pozycyjno-siłowego robotów*. K. Tchoń, redaktor, VIII Krajowa Konferencja Robotyki – Postępy Robotyki: Sterowanie robotów z percepcją otoczenia, wolumen 1, s. 85–94. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005.
- W. Szykiewicz, C. Zieliński, W. Czajewski, T. Winiarski. *Control Architecture for Sensor-Based Two-Handed Manipulation*. T. Zielińska, C. Zieliński, redaktorzy, CISM Courses and Lectures – 16th CISM – IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, RoManSy'06, number 487, s. 237–244. Springer, Wien, New York, June 20–24, 2006.
- G. Zeng, A. Hemami. *An overview of robot force control*. Robotica, 15:473–482, 1997.