

# Nowe i ulepszone algorytmy sterowania robotów przemysłowych

Kierownik projektu: prof. dr hab. Anatol Gosiewski

Współautorzy: dr inż. Krystyna Szacka  
mgr inż. Andrzej Grodecki  
mgr inż. Wojciech Szykiewicz

Instytut Automatyki, Politechnika Warszawska

## 1 Wstęp

Niniejsze opracowanie odwołuje się w znacznej mierze do uzyskanych wyników badawczych wymienionych w materiałach Seminarium w PIAP w dniach 7 i 8 grudnia 1993 r. Zawiera ono stosunkowo obszerne streszczenia najważniejszych rezultatów

### 1. W zakresie algorytmów sterowania pozycyjnego:

- implementacja sprzężeń "feedforward" od prędkości i przyspieszenia w robocie IRp-6,
- wielowymiarowy zdecentralizowany regulator położenia robota,
- sterowanie czaso-optymalne dla robota IRp-6,
- sterowanie nadrzędne robotów przemysłowych z modyfikacją trajektorii zadanej w przestrzeni zewnętrznej.

### 2. W zakresie algorytmów sterowania w systemach wielorobotowych:

- planowanie skoordynowanych trajektorii ruchu dla dwóch współpracujących robotów.

### 3. W zakresie algorytmów sterowania siłowego:

- analiza porównawcza układów sterowania siłowego robotów przemysłowych,
- hybrydowy sterownik siły/położenia dla robota IRp-6.

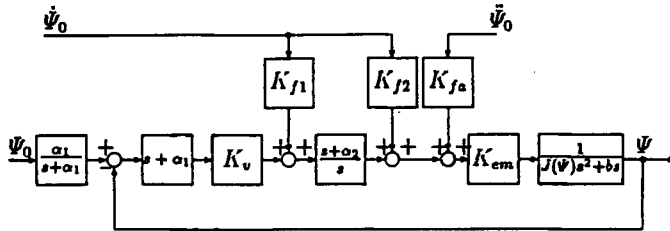
## 2 Implementacja sprzężeń "feedforward" od prędkości i przyspieszenia w robocie IRp-6

### A. Grodecki

W pracy przedstawione są wyniki eksperymentalne obejmujące algorytmy sterowania pozycyjnego robota IRp-6 z zastosowaniem sprzężeń typu "feedforward" od prędkości i

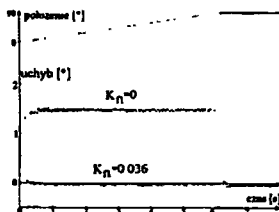
przyspieszenia zadanego. Podstawy teoretyczne algorytmów sterowania robota wykorzystujących pętle sprzężeń "feedforward" przedstawione zostały we wcześniejszych pracach.

Istota sprzężeń typu "feedforward" od pochodnych sygnału położenia zadanego polega na wprowadzeniu do transmitancji układu zamkniętego zer, które kompensując bieguny, znacznie zwiększają szybkość działania układu regulacji oraz wpływają na zmniejszenie uchybu położenia w trakcie śledzenia trajektorii odniesienia.

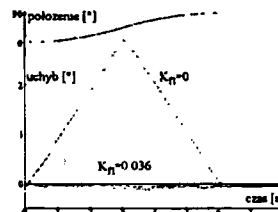


Rys. 1: Struktura układu regulacji ze sprzężeniem od prędkości i przyspieszenia zadanego

Eksperymenty przeprowadzone zostały przy użyciu robota IRp-6 dla kilku wariantów sprzężeń, w tym: tzw. silnych sprzężeń od prędkości redukujących uchyb położenia w stanie ustalonym dla wymuszeń w postaci wielomianów stopnia co najwyżej trzeciego oraz tzw. słabych sprzężeń od prędkości i przyspieszenia kompensujących dominujące bieguny.



Rys. 2: Odpowiedzi układu na wymuszenie "ramp" przy zastosowaniu silnego sprzężenia od prędkości zadaney  
 $K_{f1} = K_v$ ,  $K_{f1}^{eksp} = 0.036$



Rys. 3: Odpowiedzi układu na wymuszenie w postaci wielomianu drugiego stopnia przy zastosowaniu silnego sprzężenia od prędkości  $K_{f1} = K_v$ ,  $K_{f2} = 0$ .  
 $K_{f1}^{eksp} = 0.036$

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły duży wpływ sprzężeń „feedforward” na zmniejszenie uchybu regulacji. Szczególne znaczenie praktyczne może mieć zastosowanie wymuszenia drugiego stopnia w powiązaniu z silnymi sprzężeniami od prędkości zadaney i przyspieszenia. Sprzężenia „feedforward” poprawiają nie tylko jakość odzwierciedlania trajektorii zadanej, ale wpływają także na zmniejszenie czasu regulacji. Jednym

z pośrodkich rezultatów pracy jest implementacja trajektorii zadanych w postaci wielomianów drugiego i trzeciego stopnia.

W rezultacie przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono dodatkowo wpływ okresu zadawania przyrostów położenia do sterowników osi na uchyb regulacji. Okazało się również, że przy zastosowaniu nominalnych wzmocnień w pętłach „feedforward” uchyb regulacji może się zmieniać w funkcji prędkości ruchu ramienia.

### 3 Wielowymiarowy zdecentralizowany regulator położenia robota

#### A. Grodecki

W pracy przedstawiona jest metoda projektowania wielowymiarowego liniowego regulatora położenia ramion robota. Proponowana metoda może być zastosowana w odniesieniu do modelu dynamiki robota otrzymanego w wyniku lokalnej linearyzacji lub zastosowania algorytmu nieliniowej kompensacji modelu (*Computed Torque Scheme*). Prawo sterowania może być również zmodyfikowane dla potrzeb sterowania robotów przemysłowych, które posiadają niezależne serwomechanizmy dla każdej osi. Proponowana architektura zawiera wewnętrzny regulator PD, stabilizujący i odsprzęgający układ, oraz zewnętrzny regulator PI, który jest odpowiedzialny za śledzenie trajektorii zadanej. Prawo sterowania umożliwia linearyzację modelu w każdym kroku sterowania oraz dowolne kształtowanie położenia biegunów poprzez właściwy dobór macierzy PI i PD.

Korzystając z ogólnych rezultatów otrzymanych dla układu wielowymiarowego, przedstawiono metodę projektowania niezależnego regulatora pojedynczej osi, odpornego na zmianę parametrów dynamicznych robota. W proponowanej metodzie projektowania nastaw zdecentralizowanego regulatora pojedynczej osi uwzględniono dominujący nieliniowy efekt zmiany momentu bezwładności ramienia. Proponowana struktura stanowi ulepszenie tradycyjnie stosowanych w robotach regulatorów klasy PID. W pracy wskazano na wady i ograniczenia typowych struktur stosowanych w robotach przemysłowych. Przedstawiono kilka układowych realizacji opracowanej struktury, jak również przedstawiono prace, w których zastosowano kompensatory o podobnej strukturze dla robotów przemysłowych.

### 4 Sterowanie czaso-optymalne dla robota IRp-6

#### A. Gosiewski

Propozycja sterowania czaso-optimalnego ruchem robota IRp-6 w warunkach PTPC została oparta na zastosowaniu w manipulatorze robota sprzężenia odsprzęgająco-linearyzującego, a następnie do tak odsprzęgniętego i zlinearyzowanego układu zastosowaniu algorytmu Neustadt'a sterowania czaso-optimalnego.

Sama koncepcja sprzężenia odsprzęgająco-linearyzującego dla nieliniowego układu dynamicznego, w szczególności manipulatora robota jest znana od dosyć dawna (jako jeden z wariantów „computed torque control” i omawiana jest nawet w monografiach książkowych (zob. np. [1]). Łatwo wykazać, że w przypadku idealnej identyfikacji parametrów manipulatora, sprzężenie takie prowadzi do elementarnego wektorowego układu podwójnie

całkującego  $\dot{\phi} = u$ . Istotą pracy jest symulacyjna analiza wrażliwości układu sterowania *czaso-suboptymalnego*, dla którego założono *nieidealną identyfikację*, lecz dla którego sterowaniem jest sterowanie *czaso- optymalne* wyznaczone dla układu odsprzęgniętego i zlinearyzowanego idealnie (zob. [2]).

W eksperymencie symulacyjnym założono maksymalne wartości bezwzględne sterowań  $\max |u_i| = 11$ , co z pewnym przybliżeniem odpowiada maksymalnym prądom sterującym w robocie IRp-6, oraz wartości graniczne

$$\phi_1(0) = 45^\circ, \phi_2(0) = 30^\circ, \phi_3(0) = -20^\circ, \dot{\phi}_i = 0, \phi_i(t_k) = 0, \dot{\phi}_i(t_k) = 0, i = 1, 2, 3$$

gdzie indeksy 1, 2, 3 odnoszą się odpowiednio do kolumny obrotowej i ramion dolnego i górnego, zaś indeks  $k$  odnosi się do chwili końcowej.

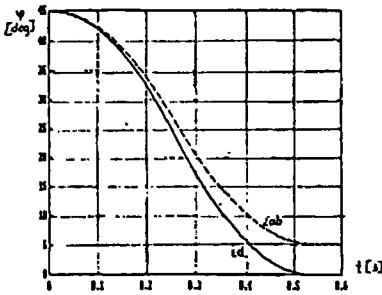
Istotą analizy wrażliwościowej było założenie odchylenia identyfikowanych podstawowych parametrów manipulatora (a co za tym idzie—parametrów sprzężenia odsprzęgającego) od ich wartości przyjętych za rzeczywiste. Parametrami tymi były momenty bezwładności  $J_i$  i współczynniki tarcia wiskotycznego  $b_i$ , zaś odchylenia  $\delta$  rozpatrywano w przedziale [0, 30%].

Konsekwencją odchylenia parametrów manipulatora od ich wartości przyjętych za rzeczywiste jest *błąd osiągnięcia położeń końcowych w stosunku do przypadku idealnego* ( $\delta = 0$ )  $\Delta\phi_i(t_k)$ , gdzie  $t_k$ —chwila osiągnięcia ustalonego położenia końcowego ( $\phi_i(t_k) = 0, i = 1, 2, 3$ ). Oczywiście porównywanie czasów osiągnięcia położeń końcowych dla przypadku idealnego i rzeczywistego jest w ogólnym przypadku bezprzedmiotowe (w szczególności gdy błędy  $\Delta\phi_i$  są duże).

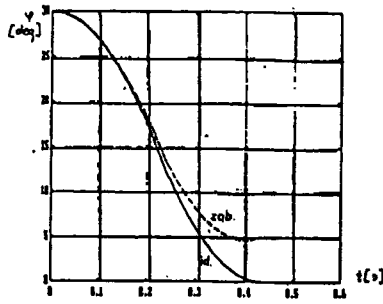
Okazało się, że układ (ściślej—kolumna i ramię dolne) jest najbardziej wrażliwy (błędy  $\Delta\phi_i$  są największe) na zmiany współczynników tarcia wiskotycznego  $b_1$  i  $b_2$ , czego należało do pewnego stopnia oczekiwać (współczynniki te są najtrudniejsze do zidentyfikowania). Podobną wrażliwość (kolumna) obserwuje się względem momentu bezwładności  $J_3$ . Wrażliwość względem pozostałych parametrów jest znacznie mniejsza lub wręcz znikoma. Na rysunkach 4, 5, przedstawiono przykładowe przebiegi położeń kolumny obrotowej i ramienia dolnego dla przypadku idealnego i rzeczywistego przy odchyleniu wartości wybranych parametrów  $J_3$  i  $b_2$  o 30% (celowo wybrano tak "karykaturalnie" duże odchylenie, ażeby uwydatnić zachodzące różnice).

Jeżeli przez  $\kappa$  oznaczymy stosunek wartości parametru odchylnego do rzeczywistego, to przy dokładniejszej analizie okazuje się, że błędy  $\Delta\phi_i(t_k)$  narastają wraz z  $\kappa$  *liniowo* począwszy od  $\kappa = 1.05$  [2], przy czym *największa wrażliwość* cechuje dokładność ruchu kolumny względem współczynnika  $b_1$  i wynosi  $0^\circ 11' 13''/1\%$  odchylenia, co stanowi 0.42% wartości początkowej  $\phi_1(0)/1\%$  odchylenia. Natomiast *najmniejsza wrażliwość* odnosi się do ruchu ramienia dolnego względem współczynnika  $b_3$ , która wynosi  $0^\circ 00' 26''/1\%$  odchylenia, co stanowi 0.02% wartości początkowej  $\phi_2(0)/1\%$  odchylenia (zaobserwowano oczywiście jeszcze niższe wrażliwości np. ruchu ramienia górnego względem momentu bezwładności  $J_1$ —są to jednak przypadki trywialne i tu nie odnotowywane).

Okazało się również (czego, rzecz jasna, należało oczekiwać), że wrażliwość układu na odchylenia wartości parametrów sprzężenia odsprzęgającego od wartości parametrów manipulatora zależy w istotny sposób od warunków początkowych. Ponadto okazało się, (co jest już mniej oczywiste), że przy *jednoczesnym* odchyleniu *wszystkich* wymienionych



Rys. 4: Kolumna,  $\delta J_3 = 30\%$



Rys. 5: Ramię dolne,  $\delta b_2 = 30\%$

parametrów błędy osiągnięcia położenia końcowych są na ogół *mniejsze* w porównaniu z przedstawionymi wyżej. Wskazuje to na swoistą kompensację błędów (różne znaki!) odnoszących się do poszczególnych "stopni swobody" manipulatora. Potwierdza to również analiza interakcji dynamicznych zachodzących między elementami nieidealnie odsprzęgniętego manipulatora przeprowadzona podobnie do analizy przedstawionej w pracy [3]: *jednoczesne odchylenie wszystkich parametrów prowadzi na ogół do zmniejszenia interakcji.*

Chcąc porównać sterowanie czaso-optimalne ze sterowaniem w układzie "klasycznym" PD+I należy mieć na uwadze po pierwsze, że idealnie odsprzęgnięty i zlinearyzowany manipulator nie jest globalnie sterowalny. W wyniku tego należałoby przyjąć, że minimalnym czasem osiągnięcia stanu końcowego  $\phi_i(t_k) = 0, \dot{\phi}_i(t_k) = 0, i = 1, 2, 3$  jest  $t_k = \max(t_{k_i}, i = 1, 2, 3)$ . Mimo to porównano czasy osiągnięcia stanów końcowych w obu układach przez poszczególne elementy manipulatora, co może lepiej zobrazować całokształt zagadnienia. Po drugie, ważniejsze, o ile czas osiągnięcia stanu końcowego przy sterowaniu czaso-optimalnym jest, teoretycznie, skończony, o tyle w układzie klasycznym (liniowym) stan końcowy osiągnany jest asymptotycznie. Po trzecie wreszcie, jest oczywiste, że czas dostatecznie bliskiego zbliżenia się do stanu ustalonego w układzie klasycznym zależy od prędkości  $\omega_{z_i}, i = 1, 2, 3$  narastania sygnału zadanego  $\phi_{z_i}(t), i = 1, 2, 3$ , którą należało w jakiś sposób ustalić.

W pracy [2] wymieniono założenia, przy których dokonano porównania czasów osiągniętych dla obu sterowań. Wyniki tych porównań przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Z tabel 1 i 2 widać wyraźnie, że sterowanie czaso-optimalne prowadzi do znacznie szybszego osiągnięcia stanu końcowego niż układ klasyczny, czego należało oczekiwać. Trzeba jednak zwrócić uwagę na fakt, że efekt sterowania czaso-optimalnego wyraźnie się *zmniejsza* wraz ze *zmniejszaniem się* odległości (tu-kątowej) między położeniem początkowym  $\phi_i(0)$  i końcowym  $\phi_k = 0, i = 1, 2, 3$ . Jednocześnie należy wyraźnie zaznaczyć, iż prędkości kątowe  $\omega_i(t)$  w obu porównywanych układach przekraczają lub nawet znacznie przekraczają  $90^\circ/s$  tj. maksymalną prędkość narastania sygnału zadanego w robocie URp-6 (prędkości te nie zostały uwidocznione w tabelach 1 i 2). Stanowiło to przesłankę do dalszej analizy porównawczej obu układów, która została dokonana właśnie przy uwzględ-

$i$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$\phi_i(0)$	$45^0$	$30^0$	$-20^0$
$t_{k_i}^{opt}$	0.533s	0.436s	0.357s
$t_{k_i}^{klas}$	0.690s	0.954s	0.726s
$t_{k_i}^{klas} / t_{k_i}^{opt}$	1.29	2.19	2.03

Tabela 1: Porównanie czasów  $t_{k_i}$  (I)

$i$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$\phi_i(0)$	$22.5^0$	$15^0$	$-10^0$
$t_{k_i}^{opt}$	0.380s	0.310s	0.260s
$t_{k_i}^{klas}$	0.440s	0.449s	0.341s
$t_{k_i}^{klas} / t_{k_i}^{opt}$	1.16	1.45	1.31

Tabela 2: Porównanie czasów  $t_{k_i}$  (II)

nieniu takiego ograniczenia prędkości, co oczywiście implikowało znacznie ostrzejsze (i przy tym różne) ograniczenia nakładane na sterowania  $u_i$ , niż opisane wyżej. Okazało się, że i w tych warunkach sterowanie czaso-optymalne pozwala szybciej osiągnąć położenia końcowe niż w układzie klasycznym, chociaż w tym przypadku różnice między obu układami były mniejsze, niż przytoczone wyżej. Różnice te zmniejszają się jeszcze bardziej, gdy w układzie klasycznym dodane zostaną sprzężenia typu "feedforward" (zob.[5]).

## 5 Sterowanie nadrzędne robotów przemysłowych z modyfikacją trajektorii zadanej w przestrzeni zewnętrznej

*K. Szacka*

Celem pracy badawczej było sformułowanie i weryfikacja układu sterowania nadrzędnego dla robotów przemysłowych, wyposażonych w typowe serwomechanizmy, niezależne dla każdego stopnia swobody. Układ sterowania nadrzędnego ma na celu poprawienie dokładności ruchu końcówki robota realizującego zadanie podążania wzdłuż zadanego toru z zadaną prędkością (np. prace typu spawanie łukowe, malowanie natryskowe itp.).

Schemat ogólny, wyjaśniający działanie proponowanego układu sterowania przedstawiono na rys. 6. W układzie tym generowane jest takie odkształcenie trajektorii zadanej we współrzędnych zewnętrznych, aby tor realizowany przez końcówkę robota zbliżył się do toru zadanego. Wyznaczanie odkształcenia trajektorii zadanej może być realizowane w strukturze "off-line" na podstawie modelu robota albo ruchu próbnego robota lub też w strukturze "on-line" na podstawie bieżących pomiarów dokładności realizacji zadania.

Badania wstępne obejmowały zarówno eksperymenty symulacyjne pracy układu sterowania w strukturze "off-line" jak i w strukturze "on-line". W dalszym ciągu ograniczono się do badań szczegółowych układu w strukturze "off-line". Po przeprowadzeniu analizy teoretycznej działania układu oraz sformułowania kryteriów oceny dokładności ruchu końcówki robota zostały wytypowane algorytmy, na podstawie których wyznaczane jest odkształcenie trajektorii zadanej. Po wstępnej ocenie, z punktu widzenia skuteczności poprawy dokładności ruchu, przeprowadzono szereg eksperymentów symulacyjnych przy zastosowaniu pięciu algorytmów: 1, 2, 3, 4, 6.

Eksperymenty te prowadzone były dla torów będących odcinkiem prostej oraz okręgiem w przestrzeni kartezjańskiej zakreślanych z prędkościami od 0.2 m/s do 0.8 m/s. W

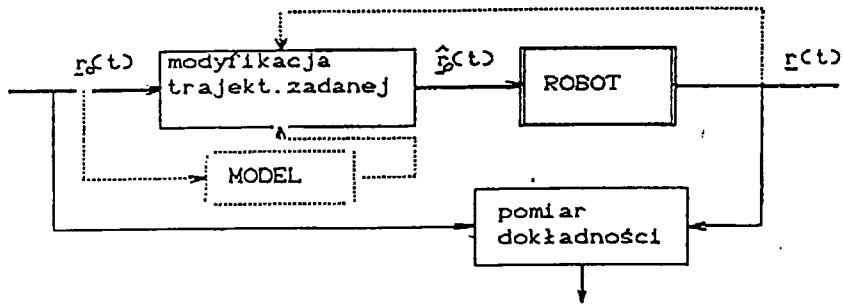
symulacjach działania układu wykorzystano model robota IRb-6, opracowany w Instytucie Automatyki P.W., reprezentujący zarówno robota rzeczywistego jak i jego model stosowany w strukturze "off-line". Badania te wykazały znaczną poprawę dokładności ruchu robota, szczególnie przy zastosowaniu algorytmów 3, 4 i 6 – patrz rys. 7. Dokładność tę oceniano za pomocą wskaźnika  $|d(t)|$ , odpowiadającego odległości geometrycznej punktu  $r(t)$  na trajektorii realizowanej przez końcówkę robota od toru zadanego  $r$ .

Sprawdzono wpływ wahań parametrów takich jak moment obciążenia ramienia górnego i współczynniki tarcia lepkiego na jakość układu sterowania.

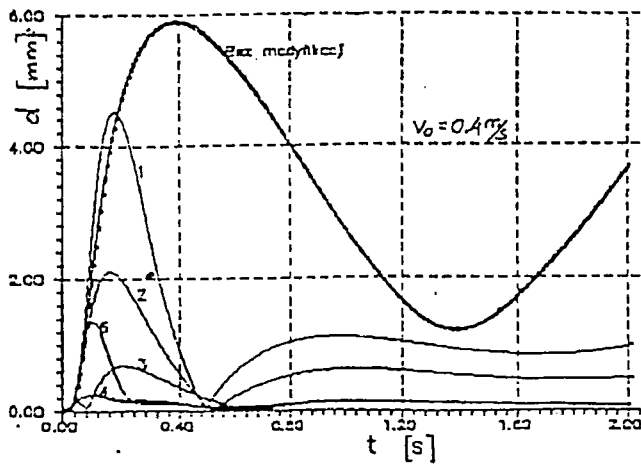
Następnie przystąpiono do weryfikacji skuteczności proponowanego układu nadrzędnego przy sterowaniu robota IRp-6. Dzięki sprzęgnięciu komputera ze sterownikiem robota IRp-6 za pomocą szybkiego interfejsu, wykonanego w Instytucie Automatyki PW, komputer może służyć zarówno do zadawania nowych położeń oś silników manipulatora i odczytu ich rzeczywistych wartości, jak i jako układ sterowania nadrzędnego generujący odkształcenie trajektorii zadanej w różnych strukturach sterowania i w/g różnych algorytmów.

Przeprowadzono badania układu sterowania nadrzędnego w strukturze "off-line" zastosowanego do robota IRp-6 – rys. 8. Wykorzystano wspomniany model robota IRp-6 do celów generacji odkształcenia trajektorii zadanej. Eksperymenty obejmowały badanie dokładności ruchu robota bez odkształcenia trajektorii zadanej i z jej odkształceniem, wyznaczanym przez proponowany układ sterowania. Wyniki porównywano z wynikami otrzymanymi na drodze symulacji. Jak wykazały badania właściwości dynamiczne zastosowanego modelu robota różnią się jednak na tyle od właściwości robota rzeczywistego, że trudno oczekiwać aby model ten mógł być wykorzystany w strukturze "off-line" nadrzędnego układu sterowania. Wobec tego nie uzyskano spodziewanej poprawy dokładności ruchu robota. Jednak pomimo tego szczegółowa analiza przeprowadzonych doświadczeń potwierdza celowość sterowania nadrzędnego z odkształceniem (modyfikacją) trajektorii zadanej. Warunkiem poprawnego działania układu jest zastosowanie odpowiednio dokładnego modelu dynamicznego robota lub wykorzystanie ruchu próbnego robota w celu wyznaczenia odkształcenia trajektorii zadanej. Można również zastosować strukturę "on-line".

Przeprowadzono wstępne badania nadrzędnego układu sterowania robota z wykorzystaniem ruchu próbnego. Uzyskano znaczną poprawę dokładności ruchu końcówki w warunkach sterowania CP. Zachęca to do prowadzenia dalszych badań nad proponowanym układem sterowania nadrzędnego robotów przemysłowych.

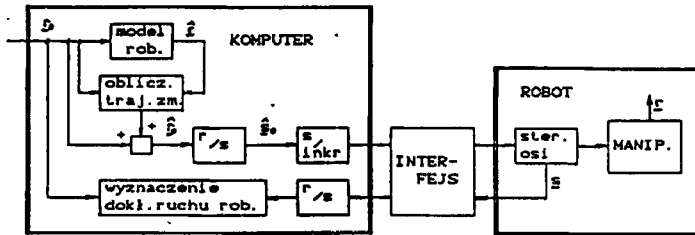


Rys. 6: Schemat sterowania nadrzędnego z modyfikacją trajektorii zadanej



Rys. 7: Symulacja układu sterowania nadrzędnego z modyfikacją trajektorii zadanej





Rys. 8: Schemat blokowy układu sterowania nadrzędnego z modyfikacją trajektorii zadanej

## 6 Planowanie skoordynowanych trajektorii ruchu dla dwóch współpracujących robotów

W. Szynkiewicz

W ramach projektu badawczego prowadzone były również prace nad algorytmami planowania ruchu w układach wielorobotowych. Opracowano m.inn. oryginalny algorytm planowania trajektorii ruchu dla dwóch robotów wspólnie przenoszących obiekt [9], [10]. Istotą prezentowanego podejścia jest heurystyczna, aczkolwiek całkowicie naturalna dekompozycja problemu planowania trajektorii na dwa podproblemy:

1. Planowania dopuszczalnych ścieżek ruchu jako krzywych geometrycznych.
2. Planowania prędkości wzdłuż uprzednio zaplanowanych ścieżek.

Powyzsza dekompozycja może być dokonana przy założeniu, iż nie zachodzi konieczność istotnej zmiany kształtu ścieżki w trakcie wykonywania ruchu. Taka konieczność może pojawić się np. w przypadku kolizji z ruchomymi przeszkodami.

### 6.1 Planowanie dopuszczalnych ścieżek ruchu

Opracowano algorytm wyznaczania *dopuszczalnych* ścieżek ruchu, który charakteryzuje się następującymi cechami:

- Może być stosowany przy dowolnej liczbie stopni swobody całego układu (zamkniętego łańcucha mechanicznego).
- Nie wymaga rozwiązywania odwrotnego zadania kinematyki.
- Otrzymane ścieżki ruchu są ciągłe, co jest warunkiem koniecznym ich praktycznej realizowalności.

- Synteza algorytmu oparta jest jedynie na kinematyce zamkniętego łańcucha mechanicznego.

Po uchwyceniu obiektu przez chwytaki manipulatorów – przy założeniu, że obiekt jest sztywny i sztywno uchwycony – powstaje zamknięty łańcuch kinematyczny (ramiona robotów + obiekt + podłoże). Od chwili uchwycenia obiektu na układ nałożone są więzy geometryczne (holonomiczne). Z punktu widzenia użytkownika głównym celem jest przemieszczenie obiektu do zadanej pozycji końcowej, przy czym w większości praktycznych przypadków tor, po jakim porusza się obiekt, nie jest ściśle narzucony. Warunkiem koniecznym realizowalności zadania jest jednakże wymaganie, aby tor obiektu był *dopuszczalny* tzn. muszą być spełnione wszystkie ograniczenia. Wynikają one zarówno z więzów holonomicznych nałożonych na system, jak też mechanicznych ograniczeń zakresów ruchu poszczególnych ogniw manipulatorów. Tor ruchu obiektu zdefiniowany jest jako funkcja  $\eta : [0, s_f] \rightarrow \mathbb{R}^6$  zmiennej skalarnej  $s$ , ( $s \in [0, s_f]$ ,  $s_f > 0$ ) określająca długość drogi przebytej przez obiekt. Wektor  $q_i = [q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in_i}]^T$ ,  $i = 1, 2$ , opisuje współrzędne wewnętrzne  $i$ -tego robota. Zakres zmian współrzędnych  $q_i$  dla pojedynczego robota wynika z ograniczeń konstrukcyjnych manipulatora

$$q_{i,\min} \leq q_i \leq q_{i,\max}, \quad q_{i,\min}, q_{i,\max} \in \mathbb{R}^{n_i}, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

Więzy geometryczne nałożone na system można zapisać w postaci [9]

$$T_1 A_1(q_1(s)) H_1 = T_2 A_2(q_2(s)) H_2 \quad \forall s \in [0, s_f] \quad (2)$$

gdzie  $T_i$ ,  $A_i(q_i(s))$ ,  $H_i$ ,  $i = 1, 2$  macierze przekształcenia jednorodnego opisujące położenie i orientację odpowiednich układów współrzędnych (zob. rys. 9). Równanie więzów (2) można również wyrazić jako [9]

$$e(s) = \eta_1(s) - \eta_2(s) = 0 \quad \forall s \in [0, s_f] \quad (3)$$

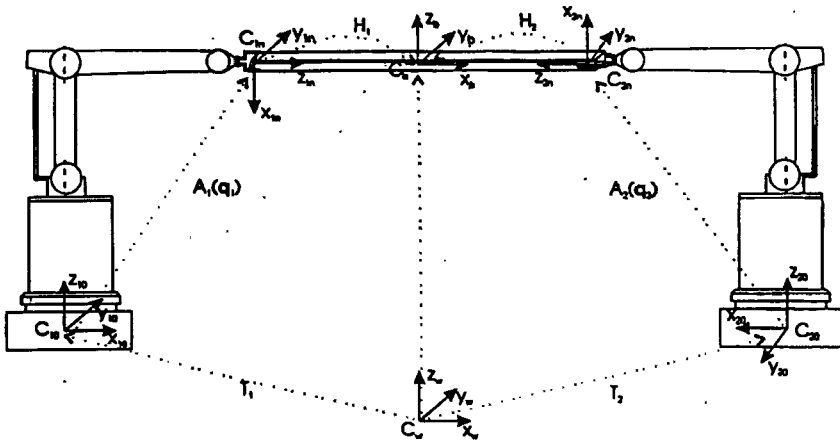
gdzie  $\eta_i = \eta(q_i(s))$  przedstawia pozycję obiektu jako funkcję współrzędnych wewnętrznych  $q_i$ .

Idea prezentowanego podejścia jest następująca: Określa się w przestrzeni zadaniowej pewien *pożądany* tor ruchu  $\eta^d = [\eta_1^d, \dots, \eta_n^d]^T$  (np. najkrótszy tor między położeniem początkowym i końcowym) dla obiektu. Arbitralnie zadany tor ruchu, w rozważanym przypadku, nie musi być i z reguły nie jest dopuszczalny. Należy wyznaczyć dopuszczalną ścieżkę przejścia we współrzędnych wewnętrznych pomiędzy konfiguracją początkową i końcową dla obu manipulatorów. Odpowiadający im tor ruchu obiektu powinien być "najbliższy" torowi zadanemu w sensie minimum wskaźnika jakości (funkcjonału) określonego następująco

$$J = \int_0^{s_f} (\eta_i(q_i(s)) - \eta^d(s))^T W (\eta_i(q_i(s)) - \eta^d(s)) ds, \quad i = 1 \vee i = 2, \quad (4)$$

gdzie  $W = W^T \geq 0$  – macierz wagowa. Funkcjonał (4) minimalizowany jest względem  $q = [q_1^T, q_2^T]^T$ , przy ograniczeniach (1) i (3) oraz warunkach brzegowych na  $q_i$  w postaci

$$q_{i0} = q_i(0), \quad q_{if} = q_i(s_f), \quad i = 1, 2. \quad (5)$$



Rys. 9: Struktura kinematyczna układu dwóch robotów wspólnie przenoszących obiekt.

Problem wyznaczania *dopuszczalnych* ścieżek ruchu formułowany jest jako zadanie wariacyjne "z ustalonymi końcami". Zadanie polega na poszukiwaniu minimum funkcjonału określonego w pewnej klasie krzywych dopuszczalnych. Zakłada się, iż funkcje (krzywe) dopuszczalne spełniają warunki brzegowe oraz dodatkowe ograniczenia wynikające z więzów nałożonych na system.

Ze względu na nieliniowość zarówno funkcjonału jak też ograniczeń analityczne rozwiązanie tego zadania jest praktycznie niewykonalne. Zadanie rozwiązywane jest numerycznie, w tym celu zastosowano jedną z metod przybliżonego rozwiązywania zagadnień wariacyjnych zwaną metodą *Ritza*. Metoda ta polega na aproksymacji problemu poszukiwania minimum funkcjonału w przestrzeni o nieskończonej liczbie wymiarów poprzez zadanie minimalizacji funkcji skończonej liczby zmiennych. Zbiór funkcji dopuszczalnych  $q$  zawęza się do dowolnych kombinacji liniowych typu

$$q^{(N)}(s) = \sum_{j=0}^N c_j \varphi_j(s) \quad (6)$$

gdzie  $c_j$  jest wektorem poszukiwanych współczynników, natomiast  $\varphi_j$  są znanymi funkcjami bazowymi. Postać funkcji  $\varphi_j$  i wymiar  $N$  przestrzeni funkcji bazowych ma decydujący wpływ na dokładność aproksymacji. W celach porównawczych przebadano kilka wybranych rodzajów funkcji bazowych m.inn.: liniowe, sześciennie i trygonometryczne funkcje sklejane [11].

## 6.2 Planowanie prędkości wzdłuż wyznaczonych ścieżek

Planowanie prędkości polega na odpowiedniej parametryzacji czasowej (skalowaniu) uprzednio wyznaczonych dopuszczalnych ścieżek ruchu. W rozważanym podejściu zastosowano skalowanie liniowe, czyli czas  $t$  jest funkcją liniową zmiennej  $s$

$$t = \lambda s$$

Jeżeli  $\mu^d$  jest arbitralnie wybraną prędkością wzdłuż wcześniej wyznaczonego toru ruchu obiektu, wówczas prędkości uogólnione odpowiadające  $\mu^d$  obliczane są jako

$$\dot{q}_{ik}^d = \frac{d}{ds} \left( \sum_{j=0}^N c_{jk} \varphi_j(s) \right) \frac{ds}{dt} = \sum_{j=0}^N c_{jk} \frac{d\varphi_j(s)}{ds} \mu^d \quad k = 1, \dots, n_i, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

gdzie  $d\varphi_j(s)/ds$  jest pierwszą pochodną funkcji bazowej.

Współczynnik skalujący określany jest ze wzoru

$$\lambda = \max_k \left( \frac{|\dot{q}_{ik}^d|}{|\dot{q}_{ik,max}^d|} \right) \quad i = 1, 2, \quad k = 1, \dots, n_i \quad (8)$$

gdzie  $\dot{q}_{ik,max}$  prędkość maksymalna  $k$ -tego ogniwa robota  $i$ . Można łatwo pokazać [10], że tak obliczone prędkości zapewniają spełnienie więzów na wzajemne prędkości chwytaków i umożliwiają skoordynowane ruchy obu robotów.

Efektywność algorytmu planowania sprawdzona została na przykładzie dwóch robotów IRp-6 wspólnie przenoszących sztywną belkę. W tym przypadku całkowita liczba stopni układu równa jest cztery, co w istotny sposób komplikuje problem poszukiwania dopuszczalnych ścieżek ruchu. Uzyskano ciągłe i dopuszczalne ścieżki ruchu [9], które przy odpowiedniej parametryzacji czasowej zapewniają przemieszczenie obiektu wspólnie przez dwa roboty.

## 7 Analiza porównawcza układów sterowania siłowego robotów przemysłowych

### A. Grodecki

W pracy dokonano krytycznego przeglądu wybranych metod sterowania siłowego robotów uwzględniając osiągnięcia w tej dziedzinie do 1992 roku.

Opracowanie ma charakter raportu o aktualnym stanie wiedzy na temat sterowania siłowego robotów. Korzystając z wielu ważniejszych koncepcji sterowania siłowego robotów zaproponowano w efekcie strukturę układu regulacji siły i położenia, która może być zastosowana w robotach przemysłowych sterowanych pozycyjnie.

O złożoności zagadnienia sterowania siłowego robotów świadczy fakt, iż zaproponowano wiele różniących się koncepcyjnie od siebie metod, wykazujących stosunkowo zadowalające rezultaty w badaniach eksperymentalnych. Jednocześnie prawie każda z proponowanych metod posiada określone wady czy ograniczenia i nie może być traktowana jako uniwersalne narzędzie do realizacji szerokiej gamy zadań wymagających sprzężenia

od czujnika siły. Różnorodność struktur i metod wynika z naturalnej złożoności problemu sterowania siłowego.

Klasyfikacja metod sterowania siłowego robotów nie jest łatwa, gdyż kryteria podziału metod mają często charakter subiektywny, bądź opierają się na pozornych różnicach traktując pewne rozwiązania układowe jako nowe algorytmy, pomimo iż stanowią one szczególne przypadki ogólniejszej metody. Podobieństwo metod może być również ukryte w wyniku zastosowania odmiennej kolejności przekształceń czy sposobu transformacji modelu dynamiki i kinematyki pomiędzy układem współrzędnych kartezjańskich i wewnętrznych. W niniejszym opracowaniu przedstawiono klasyfikację metod sterowania siłowego według trzech istotnych kryteriów.

1. Podział metod na *admitancyjne*, w których regulowana jest bezpośrednio siła oraz *impedancyjne*, w których utrzymywana jest relacja dynamiczna między uchybem położenia a siłą.
2. Podział metod na *hybrydowe*, w których rozróżnia się kierunki sterowane pozycyjnie i siłowo oraz metody *niehybrydowe*, w których sterowanie we wszystkich kierunkach operacyjnych ma jednolity charakter.
3. Podział metod na *kinematyczne*, w których nie jest wykorzystywany model dynamiki oraz *dynamiczne*, w których dokonywana jest kompensacja nieliniowej dynamiki, a prawo sterowania wyrażone jest w przestrzeni operacyjnej zorientowanej na zadanie.

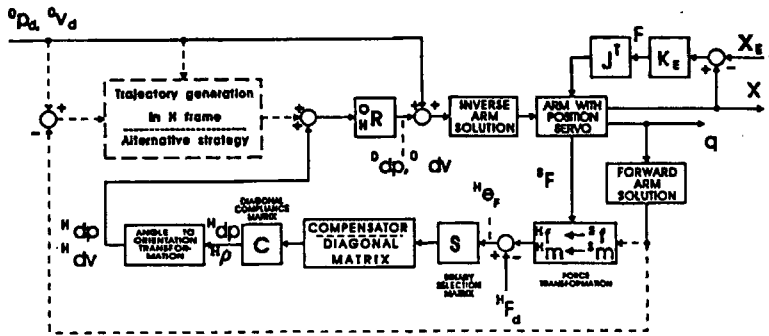
Wskazano na wady i zalety poszczególnych metod w odniesieniu do typowych zadań sterowania siłowego.

## 8 Hybrydowy sterownik siły/położenia dla robota IRp-6. Część I: opis kinematyczny. Część II: struktura układu i wyniki eksperymentalne

A. Grodecki

W pracy przedstawiona jest koncepcja struktury układu sterowania siłą i położeniem dla robota IRp-6 o pięciu stopniach swobody. Struktura ta ma charakter hybrydowy i umożliwia regulację siły i położenia w przestrzeni zadania, tj. w przestrzeni kartezjańskiej związanej z narzędziem. Ze względu na zredukowaną liczbę stopni swobody możliwa jest tylko regulacja pięciu składowych uogólnionego wektora sił kartezjańskich, podobnie, jak możliwe jest zadawanie tylko pięciu składowych uogólnionego wektora położenia. Konsekwencją ograniczonej liczby stopni swobody jest wprowadzenie narzędzia osiowo symetrycznego oraz zawężenie klasy wykonywanych zadań do takich, w których nie jest wymagane wywieranie momentu siły wzdłuż osi narzędzia.

Proponowane w literaturze metody sterowania siłowego, wśród których na największą uwagę zasługuje metoda pozycyjna *impedance control* w połączeniu z koncepcją sterowania hybrydowego, dzielącego przestrzeń roboczą na podprzestrzeń regulacji siły i położenia, wymagają bezpośredniego dostępu do wielkości wejściowej (momentu sterującego), a ponadto oparte są na kompensacji nieliniowej dynamiki robota. Czynniki te decydują o



Rys. 10: Struktura hybrydowego sterownika siły/położenia dla robota IRp-6.

ograniczonym zastosowaniu rozważanych metod w odniesieniu do większości robotów – zwłaszcza przemysłowych. Wynika to z faktu, iż roboty te są typowo sterowane pozycyjnie w układzie współrzędnych wewnętrznych. Stosowane w nich regulatory położenia mają z reguły zamkniętą strukturę sprzętową, a wielkością wejściową jest położenie i prędkość zadana we współrzędnych wewnętrznych. Metody sterowania siłowego typu impedancyjnego i metody bazujące na kompensacji nieliniowej dynamiki manipulatora wymagają bezpośredniego dostępu do momentu sterującego, czyli w rezultacie pozbycia się regulatorów położenia. Dodatkową wadą tych metod jest konieczność wyznaczania modelu dynamiki układu manipulatora z narzędziem.

W pracy zaproponowano metodę sterowania siłowego, która polega na modyfikacji oryginalnej trajektorii położenia pod wpływem mierzonych sił lub ściślej – pod wpływem uchybu siły. W efekcie pojawiającego się uchybu siły wytwarzany jest wektor korekcji położenia w kierunkach regulacji siły, który sumowany jest z wektorem przyrostu położenia w kierunkach sterowanych pozycyjnie, dając w rezultacie wypadkowy wektor położeniaadanego do sterowników osi.

W pierwszej części pracy przedstawiony jest sposób opisu kinematycznego zadania sterowania siłą i położeniem dla robota IRp-6 o pięciu stopniach swobody. Struktura układu sterowania bazująca na prezentowanym opisie oraz wyniki eksperymentalne przedstawione są w drugiej części pracy.

Zaproponowana metoda może być wykorzystana w robotach o nieznanym modelu dynamiki i zamkniętej strukturze układu sterowania, tj. zawierającej tradycyjne regulatory położenia o dużej sztywności. Metoda stanowi realizację sterowania admitancyjnego, w którym oryginalny układ regulacji położenia objęty jest jawnym sprzężeniem od siły. Prawo sterowania siłą realizowane jest w naturalnym układzie współrzędnych związanych z zadaniem (w przestrzeni kartezyjańskiej). W układzie tym dokonywana jest selekcja kierunków sterowania siłą zgodnie z filozofią sterowania hybrydowego opartą na koncepcji formalnego opisu więzów zadania. Regulacja położenia odbywa się w tradycyjny sposób w układzie współrzędnych wewnętrznych, jednakże położenie zadane generowane jest w

układzie zorientowanym na zadanie w przestrzeni kartezjańskiej. Położenie zadane jest modyfikowane wyłącznie w kierunkach, w których nie może być wywierana siła (naturalnych więzów siły).

Atrakcyjność przedstawionej metody można scharakteryzować w następujących punktach:

- Metoda nie wymaga sprzętowej modyfikacji sterowników osi i może być zastosowana w robotach sterowanych pozycyjnie.
- Nie jest wykorzystywany model dynamiki manipulatora. Układ regulacji ma strukturę czysto kinematyczną.
- Transformacja współrzędnych dokonywana jest poprzez rozwiązywanie prostego i odwrotnego zagadnienia kinematyki. Nie korzysta się z macierzy jacobianowej ani jej odwrotności. Nie pojawiają się zatem problemy związane z kinematyczną niestabilnością metod hybrydowych bazujących na zależnościach jacobianowych.
- Metoda może być łatwo implementowana w przypadku robotów o liczbie stopni swobody mniejszej od sześciu, w których macierz jacobianowa nie ma struktury diagonalnej. Przykładem tego typu robota jest IRp-6.
- W kierunkach zadawania położenia, tj. w kierunkach sztucznych więzów prędkości, realizowana jest klasyczna regulacja położenia, dzięki czemu układ nie jest podatny na działanie sił tarcia, tak jak w wielu algorytmach sterowania siłowego.

Algorytm sterowania siłą/położeniem został implementowany na robocie IRp-6 wyposażonym w kartezjański czujnik siły firmy LORD. Wstępne wyniki eksperymentalne potwierdziły stosowność zaproponowanej metody w odniesieniu do zrealizowanych zadań.

## Literatura

- [1] Craig, J. J., *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [2] Gosiewski, A., Hajdukiewicz, M., "Układ sterowania czaso-optimalnego dla robota URp-6", *Materiały 4-tej Krajowej Konferencji Robotyki*, Wrocław, 1993.
- [3] Gosiewski, A., Wieczorek, W., "Dynamic Interactions in IRb Robot", *Control and Cybernetics*, vol.15, No.3-4, pp. 462-472, 1986.
- [4] Grodecki, A., „Multivariable Decentralized Robot Control”, MELECON'94 (Mediterranean Electrotechnical Conference), Antalya, Turcja, kwiecień 1994.
- [5] Grodecki, A., "Implementacja sprzężeń typu "feedforward" od prędkości i przyspieszenia w robocie IRp-6", *Materiały 4-tej Krajowej Konferencji Robotyki*, Wrocław, wrzesień 1993.
- [6] Grodecki, A., „Analiza porównawcza układów sterowania siłowego robotów przemysłowych”, przygotowane do druku.

- [7] Grodecki, A., Gosiewski, A., „Hybrydowy sterownik siły/położenia dla robota IRp-6, cz. I: Opis kinematyczny”, *Materiały 4-tej Krajowej Konferencji Robotyki*, Wrocław, wrzesień 1993.
- [8] Grodecki, A., „Hybrydowy sterownik siły/położenia dla robota IRp-6, cz. II: Struktura układu i wyniki eksperymentalne”, *Materiały 4-tej Krajowej Konferencji Robotyki*, Wrocław, wrzesień 1993.
- [9] W. Szyrkiewicz, A. Gosiewski, “Constraints Satisfaction Approach to Admissible Path Determination for Two Cooperating Robot Arms”, *Archives of Control Sciences*, No.1, 1993.
- [10] W. Szyrkiewicz, A. Gosiewski, “Trajectory Planning for Two Cooperating Robot Arms”, przygotowane do druku.
- [11] W. Szyrkiewicz, “Zastosowanie funkcji sklepanych do aproksymacji ścieżek ruchu dla dwóch współpracujących robotów”, IV Krajowa Konferencja Robotyki, Wrocław 1993.
- [12] W. Szyrkiewicz, “Admissible Path Planning for Two Cooperating Robot Arms”, MELECON'94 (IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference), Antalya, Turcja, kwiecień 1994.