

System programowania robota IRP-6, jego model oraz sprzężenie z czujnikami do pomiaru sił i momentów

Piotr Dutkiewicz Krzysztof Kozłowski
Andrzej Królikowski Waldemar Wróblewski

Katedra Automatyki, Robotyki i Informatyki
Politechnika Poznańska

W ramach realizowanego w 1992 roku projektu badawczego KBN nr 8 8512 9102 uzyskano wyniki dotyczące czterech zagadnień:

- systemu programowania robota IRp-6,
- modelu matematycznego oraz eksperymentalnej identyfikacji parametrów dynamicznych tego modelu,
- badań eksperymentalnych nad identyfikacją parametrów ładunku uchwyconego przez robot,
- propozycji algorytmu sterowania z wykorzystaniem wcześniej zdjętego modelu robota.

Wszystkie zadania zostały wykonane zgodnie z umową. Poniżej scharakteryzowano krótko uzyskane wyniki.

1 System programowania robota IRp-6 dla celów badawczych

W pracach badawczych związanych ze sterowaniem ruchem robota dużym problemem jest zamknięta konstrukcja sterownika robota przemysłowego. Sterowniki te są zaprojektowane zazwyczaj z przeznaczeniem do wykonywania prostych i powtarzalnych zadań, nie są więc uniwersalne i są mało przydatne dla celów badawczych. Aby rozwiązać ten problem, można zdecydować się na budowę nowego układu sterującego, co jest rozwiązaniem kosztownym i czasochłonnym. W efekcie końcowym okazuje się, że architektura nowego sterownika zawiera te same bloki funkcjonalne, a z biegiem czasu dezaktualizuje się również i ona. Lepszym rozwiązaniem wydaje się być stworzenie modularnej, otwartej struktury systemu sterowania i programowania robota, wykorzystującej już istniejący sterownik.

System sterujący robota, przeznaczony dla celów badawczych, składa się z komputera nadrzędnego, sterownika przemysłowego, modułu manipulacji ruchem robota oraz modułu sensorów [3, 15]. Zgodnie z tym, zbudowane zostało stanowisko dla robota IRp-6

przedstawione na rys. 1. Architektura sprzętowa systemu sterowania ma charakter modułarny i umożliwia dołączenie dowolnego dodatkowego urządzenia potrzebnego w badaniach.

Przyjęto, że główna część struktury sprzętowej, sterownik przemysłowy robota, pozostanie niezmienny. Ponieważ architektura sterownika ma zamknięty charakter, wykorzystano interfejs bezpośredniego dostępu komputera nadrzędnego kompatybilnego z PC/AT (w naszym przypadku PC/486-50MHz) do zasobów sterownika [12]. Prędkość transmisji danych przez interfejs jest równa 1.2MB.

W skład modułu sensorów wchodzi zewnętrzny układ pomiarowy oraz czujnik JR3 do pomiaru sił i momentów sił. Układ pomiarowy pozwala rejestrować takie wielkości jak położenia osi robota q_i , prędkości \dot{q}_i , momenty τ_i silników napędowych (przez pomiar proporcjonalnych do nich prądów sterujących) poszczególnych stopni swobody robota IRp-6. Czujnik sił i momentów sił zamocowany jest między nadgarstkiem robota i chwytakiem. Może on mierzyć składowe siły F_x , F_y , F_z i momenty siły N_x , N_y , N_z wywieranych na czujnik i odniesionych do układu współrzędnych z nim związanego. Akwizycją, filtracją i obróbką danych zajmuje się wyspecjalizowany mikrokomputer tego czujnika, przesyłający przetworzone dane do komputera nadrzędnego przez kanał DMA.

Moduł manipulacji położeniem robota tworzą trzy niezależne od siebie urządzenia: przemysłowy panel programujący, kulka sensoryczna oraz klawiatura komputera nadrzędnego. Zespół tych urządzeń służy do manipulacji położeniem robota podczas procesu uczenia. Panel programujący jest obsługiwany przez sterownik robota, a położenie robota może być zmieniane za pomocą joysticka znajdującego się na panelu. Można również zmieniać położenie robota za pomocą zwykłej klawiatury dołączonej do komputera nadrzędnego. Najciekawszym urządzeniem jest kulka sensoryczna, pozwalająca operatorowi na swobodne, łatwe przemieszczanie ramienia robota w przestrzeni roboczej. Jest ona liniowym przetwornikiem wywieranej siły i momentu siły na przemieszczenia, zamieniane na odpowiednie wartości wejściowe sterowników położenia osi. Operator odnosi wrażenie bezpośredniego oddziaływania dłońią na nadgarstek robota.

System oprogramowania składa się z trzech głównych części (rys. 2):

- oprogramowanie sterownika robota,
- oprogramowanie urządzeń pomiarowych,
- oprogramowanie komputera nadrzędnego.

Pierwsza część została opracowana przez producenta i stanowi zamkniętą całość, które przedstawiono w dokumentacji technicznej robota. Komputer nadrzędny ma bezpośredni dostęp do zasobów sterownika robota przez interfejs [12], co pozwala na przesyłanie programów z komputera nadrzędnego do pamięci operacyjnej sterownika i ich wykonywanie.

Na oprogramowanie urządzeń pomiarowych składa się system obsługi układu do pomiaru i rejestracji wielkości q_i , \dot{q}_i , τ_i oraz oprogramowanie czujnika do pomiaru sił i momentów sił, zamontowanego w nadgarstku robota. Komputer nadrzędny może odczytywać dane przez interfejsy szeregowy i równoległy. Ta część oprogramowania została opracowana przez producentów urządzeń pomiarowych i nie będzie szerzej opisywana.

Najważniejszą częścią jest opracowane od podstaw oprogramowanie komputera nadrzędnego. Jego strukturę blokową przedstawiono na rys. 2. Do reprezentacji obiektów w przestrzeni roboczej zazwyczaj wykorzystuje się pojęcie ramki (ang. frame), tzn. sześciu współrzędnych, z których trzy reprezentują położenie początku układu współrzędnych związanego z obiektem a trzy opisują jego orientację. Ramka jest często reprezentowana

za pomocą macierzy transformacji jednorodnej 4×4 , opisującej jednocześnie rotację i translację. Choć taka reprezentacja położenia i orientacji jest nadmiarowa, jest atrakcyjna ze względu na prostotę operacji algebraicznych na macierzach.

Częstym problemem są trudności w określeniu ramki dla obiektu o dowolnym położeniu i orientacji względem bazowego układu współrzędnych. W systemie programowania zaimplementowano metodę wykorzystującą robot jako przyrząd pomiarowy w przestrzeni 3-wymiarowej przez użycie giętkiego wskaźnika (ang. bendy pointer), umocowanego w chwytaku robota. W procedurze tej, wprowadzonej przez Grossmana i Taylora [8], należy najpierw dokonać kalibracji wskaźnika aby znaleźć związaną z nim ramkę. Następnie, za pomocą wskaźnika, uchwyconego przez chwytak robota, należy wskazać kolejno początek nieznanego układu współrzędnych, punkt na jednej z osi tego układu oraz punkt na płaszczyźnie, na której leży ta oś oraz druga, wybrana oś wyznaczonego układu (ramki).

W prezentowanym systemie programowania zaimplementowano interaktywną metodę uczenia robota, opartą na ideach wprowadzonych przez Takase i współautorów [14]. Każde równanie ruchu powoduje takie zorientowanie robota, aby spełnione zostało równanie określające jego położenie za pomocą złożenia transformacji jednorodnych określających jego strukturę kinematyczną. Równanie położenia odzwierciedla przestrzenną strukturę zadania, niezależnie od wymaganego sterowania. Opis zadania zawiera pewną liczbę takich równań. Niektóre z transformacji są znane z opisu technicznego urządzeń, inne można otrzymać wykorzystując wskaźnik elastyczny. Metoda ta jest systematyczna i pozwala interpretować zadanie jako znajdowanie kolejnych transformacji. Ta część systemu programowania w sposób istotny rozwija oryginalne oprogramowanie producenta robota. Wprowadza elementy modelowania świata i reprezentacji obiektu w przestrzeni 3-wymiarowej. Pozwala to na programowanie w przestrzeni zewnętrznej, co jest bardzo użyteczne do wykonania skomplikowanych zadań przy nie w pełni zdefiniowanym otoczeniu.

Kolejny blok oprogramowania komputera nadrzędnego, generator trajektorii, umożliwia planowanie trajektorii w przestrzeni wewnętrznej i zewnętrznej. Dostępne jest m.in. generowanie trajektorii prostoliniowej w przestrzeni zewnętrznej. Ruch taki jest trudny do zrealizowania w praktyce gdyż robot IRP-6 ma jedynie 5 stopni swobody, a jego struktura kinematyczna ma charakter pantografowy. Powoduje to, że algorytm zagadnienia odwrotnej kinematyki jest bardziej skomplikowany. Zaimplementowane zostały dwa podejścia. W pierwszym, bardziej dokładnym, składowe wektora położenia i orientacji zmieniają się liniowo między dwoma punktami w przestrzeni co powoduje, że chwytak porusza się po trajektorii liniowej w przestrzeni zewnętrznej. Drugi rodzaj interpolacji wykorzystuje wielomiany 3-go i 5-go rzędu dla położenia i orientacji. Ta interpolacja okazała się niedokładna ze względu na osobliwości występujące w przestrzeni roboczej (nieosiągalne punkty pośrednie, duże prędkości złącz w pobliżu osobliwości, niejednoznaczne rozwiązanie zagadnienia odwrotnego kinematyki).

Oprogramowanie opisane powyżej jest ściśle związane z biblioteką instrukcji ruchu (rys. 2). Instrukcje ruchu są ważne z punktu widzenia języka programowania robotów. Można je rozważać w przestrzeni zewnętrznej i wewnętrznej, można rozpatrywać ruch pojedynczego ogniwa lub wszystkich ogniów, w tym samym lub w różnych czasach. Możliwości te są specyfikowane przez instrukcje ruchu z parametrami takimi, jak: prędkość, czas ruchu, położenie początkowe i końcowe. Po wykonaniu każdej instrukcji ruchu, końcowe położenie i orientacja są określane na podstawie danych odczytywanych z rezolwerów i porównywane z wartościami zadanymi.

Do systemu sterowania robotem dołączono standardowy panel programowania oraz 6-wymiarową kulkę sensoryczną. Ponadto wszystkie funkcje panelu programowania zaim-

plementowano na komputerze nadrzędnym. Opracowano prosty interpreter, pozwalający użytkownikowi programować robot w sposób zbliżony do panelu.

Opracowano też procedury rozwiązujące zagadnienia kinematyki i dynamiki (rys. 2) oraz zoptymalizowano je pod względem liczby wykonywanych działań arytmetycznych. Algorytmy zagadnienia prostego i odwrotnego kinematyki są stosowane przez interaktywny system uczenia robota oraz przy realizacji instrukcji ruchu w przestrzeni zewnętrznej. Algorytm zagadnienia odwrotnego dynamiki robota opracowano dla pierwszych trzech ogniw przyjmując, że nadgarstek jest integralną częścią ostatniego ogniwa. Został wykorzystany przy identyfikacji parametrów dynamicznych pierwszych trzech ogniw robota.

Blok oprogramowania sensorów (rys. 2) zawiera programy integracji zewnętrznych czujników, tzn. urządzenia do pomiaru i rejestracji położenia, prędkości i prądów sterujących oraz czujnika JR3 do pomiaru przestrzennego rozkładu sił i momentów sił. Opracowane i przetestowane zostały instrukcje ruchu wzdłuż linii prostej i śrubowej w przestrzeni zewnętrznej z zadawanymi w każdym kierunku ograniczeniami na siłę i moment siły.

2 Eksperymentalna identyfikacja parametrów dynamicznych modelu robota

Ważnym zadaniem stawianym przed układami sterowania robotów jest zapewnienie znacznej prędkości ruchu przy dużej dokładności. W takim przypadku niezbędne jest stosowanie algorytmów sterowania wykorzystujących model matematyczny dynamiki manipulatora, a także wymagana jest znajomość jego parametrów dynamicznych.

Własności dynamiczne i -tego ogniwa manipulatora można opisać za pomocą macierzy inercji ${}^i I_i$, momentu statycznego I-go rzędu $m_i c_i$ i masy m_i . Macierz inercji ${}^i I_i$ i -tego ogniwa względem początku i -tego układu współrzędnych 0_i jest symetryczną macierzą (3×3) o postaci

$${}^i I_i = \begin{bmatrix} I_{ixx} & I_{ixy} & I_{ixz} \\ I_{ixy} & I_{iyy} & I_{iyz} \\ I_{ixz} & I_{iyz} & I_{izz} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Moment statyczny I-go rzędu i -tego ogniwa $m_i c_i$ względem 0_i ma postać

$$m_i c_i = [m_i c_{ix}, m_i c_{iy}, m_i c_{iz}]^T, \quad (2)$$

gdzie c_{ix} , c_{iy} , c_{iz} są współrzędnymi środka masy i -tego ogniwa względem i -tego układu współrzędnych, a $(\cdot)^T$ oznacza operację transpozycji. Przyjęto, że uogólniona siła tarcia, działająca w i -tym złączu, jest określona następująco

$$Q_i(\dot{q}_i) = F_{iv} \dot{q}_i + F_{is} \text{sign}(\dot{q}_i), \quad (3)$$

gdzie F_{is} , F_{iv} są odpowiednio współczynnikami tarcia suchego (niezależnego od wartości prędkości) i wiskotycznego.

Parametry inercyjne i współczynniki tarcia można przedstawić jako wektor X ($12n \times 1$) parametrów dynamicznych manipulatora

$$X = [I_{1xx}, I_{1xy}, I_{1xz}, I_{1yy}, I_{1yz}, I_{1zz}, m_1, m_1 c_{1x}, m_1 c_{1y}, m_1 c_{1z}, \dots, I_{nxx}, I_{nxy}, I_{nzz}, I_{nyy}, I_{nyz}, I_{nzz}, m_n, m_n c_{nx}, m_n c_{ny}, m_n c_{nz}, F_{1s}, \dots, F_{ns}, F_{1v}, \dots, F_{nv}]^T, \quad (4)$$

Przeprowadzonych zostało wiele eksperymentów mających na celu identyfikację tych parametrów. Najprostszym sposobem wydaje się zdemontowanie poszczególnych elementów manipulatora, a następnie pomiar parametrów każdego z nich [2]. Nie jest to możliwe

w większości przypadków, ale przeprowadzenie takich pomiarów dostarcza pożytecznych danych testowych. Bardziej użyteczne są metody nie wymagające demontażu robota, a wśród nich metody wykorzystujące ruch manipulator po zadanej trajektorii testowej [7, 11]. Jednocześnie mierzone są parametry ruchu, aby na ich podstawie wyliczyć parametry dynamiczne robota.

Jako metodę identyfikacji zastosowano metodę najmniejszych kwadratów w postaci rekurencyjnej. Zastosowanie tej metody wymaga odpowiednio dużej liczby równań określających energię manipulatora w różnych przedziałach czasu oraz kanoniczności modelu całkowego, tzn. takiego modelu, który jest reprezentowany przez minimalną liczbę parametrów, otrzymanych przez grupowanie (kategoryzację) parametrów dynamicznych poszczególnych ogniw.

Eksperymentalna identyfikacja parametrów dynamicznych została przeprowadzona dla trzech pierwszych stopni swobody robota IRp-6, opisanego z zastosowaniem zmodyfikowanej notacji Denavita-Hartenberga. Warunkami koniecznymi powodzenia eksperymentu są model kanoniczny robota oraz spełnienie przez trajektorie warunku ciągłego pobudzania. Grupowanie parametrów modelu całkowego prowadzi do 13 zagregowanych parametrów X_1, \dots, X_{13} [5], np.

$$\begin{aligned} X_1 &= I_{1zz} + I_{a1}n_1^2 + I_{2zx} + I_{3yy} & d_1 &= \frac{1}{2}\dot{q}_1^2 \\ X_2 &= I_{2yy} - I_{2zx} + m_3l_2^2 - I_{3yy} + I_{3xx} & d_2 &= \frac{1}{2}\dot{q}_1^2 \sin^2 q_2 \\ X_{10} &= F_{3s} & d_{10} &= \int |\dot{q}_2 + \dot{q}_3| dt \\ X_{13} &= F_{3v} & d_{13} &= \int (\dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 dt \end{aligned}$$

gdzie I_{a1} i n_1 są momentem bezwładności i przłożeniem zespołu napędowego 1-go ogniwa. Identyfikacja 13 parametrów w jednym ruchu zakończyła się niepowodzeniem, zarówno przy zastosowaniu całki krótkiej jak i długiej. Zidentyfikowano prawidłowo tylko 10 parametrów, natomiast wyrażenia d_i dla pozostałych parametrów okazały się liniowo zależne ze względu na pantografową strukturę manipulatora.

W związku z powyższą sytuacją zdecydowano się na ruchy pojedynczych ogniw oraz ruchy wybranymi dwoma ogniwami. Wykonując niezależne ruchy 1-ym, 2-im lub 3-im ogniwem otrzymuje się odpowiednio 3, 4 lub 4 zgrupowane parametry. Równoczesny ruch 1-go i 3-go ogniwa pozwala na identyfikację 8 zgrupowanych parametrów. Wyniki trzech niezależnych ruchów pojedynczych ogniw umożliwiają identyfikację wszystkich 13-tu zgrupowanych parametrów manipulatora [5].

Przykładowo, dane zmierzone w trakcie ruchu 2-go ogniwa umożliwiły obliczenie następujących parametrów X_i i wyrażen d_i :

$$\begin{aligned} X_1 &= m_2c_{2x} + m_3l_2^2 & d_1 &= g \cos q_2 \\ X_2 &= I_{2zx} + \left(\frac{dF_2}{d\phi_2}\right)^2 I_{a2} + m_3l_2^2 & d_2 &= \frac{1}{2}\dot{q}_2^2 \\ X_3 &= F_{2v} & d_3 &= \int \dot{q}_2^2 dt, \\ X_4 &= F_{2c} & d_4 &= \int |\dot{q}_2| dt. \end{aligned}$$

gdzie $\frac{dF_2}{d\phi_2}$ jest funkcją opisującą przłożenie zespołu napędowego 2-go ogniwa. Na rys. 3 przedstawiono przebiegi estymat $\hat{X}_1, \hat{X}_2, \hat{X}_3, \hat{X}_4$ zgrupowanych parametrów. Testowa trajektoria jest wynikiem sklejenia kilku wielomianów 5-go stopnia. Estymaty ustalają się po czasie 1 ÷ 1.5s i wynoszą odpowiednio $\hat{X}_1 = 8.125\text{kgm}$, $\hat{X}_2 = 5.5\text{kgm}^2$, $\hat{X}_3 = 26\text{Nm}$ s oraz $\hat{X}_4 = 28.75\text{Nm}$. W trakcie ruchu mierzono 8000 próbek.

Powyższe rezultaty uzyskano z zastosowaniem całki krótkiej (z kwantem 5ms). Wyniki całki długiej były gorsze, gdyż w takim przypadku były kumulowane błędy pomiarów q i τ [4]. Potwierdzają te spostrzeżenia autorzy pracy [1].

Parametr	Wart. oblicz.	Wart. estym.	Parametr	Wart. oblicz.	Wart. estym.
m [kg]	1.910	1.916	I_{xy} [kgm ²]	0.00094	-0.00083
mc_x [kgm]	0.0573	0.0568	I_{xz} [kgm ²]	-0.00450	-0.00751
mc_y [kgm]	-0.0210	-0.0207	I_{yy} [kgm ²]	0.01635	0.01567
mc_z [kgm]	0.1394	0.1396	I_{yz} [kgm ²]	0.00169	0.00001
I_{xx} [kgm ²]	0.01050	0.01186	I_{zz} [kgm ²]	0.00520	0.00449

Tablica 1: Parametry dynamiczne ładunku oraz ich estymaty

3 Eksperymentalna identyfikacja parametrów ładunku uchwyconego przez robot

Właściwości dynamiczne uchwyconej przez robot bryły sztywnej są w pełni opisane za pomocą 10 parametrów, tzn. jej masy, współrzędnych momentu statycznego I-go rzędu (lub współrzędnych środka masy) oraz sześciu elementów górnego trójkąta macierzy inercji. Parametry te nazywane są często parametrami inercyjnymi lub masowymi.

W sytuacji, kiedy manipulator pozostaje w spoczynku (pomiaru statyczne) możliwe jest wyznaczenie masy oraz środka masy na podstawie danych pomiarowych [1]. W efekcie pomiarów dynamicznych, tzn. wykonywanych w trakcie ruchu manipulatora wzdłuż zadanej trajektorii, możliwa jest identyfikacja wszystkich dziesięciu parametrów inercyjnych ładunku. Najczęściej dokonywana jest najpierw rejestracja położenia, prędkości i przyspieszeń uogólnionych oraz sił i momentów sił, a następnie off-line przeprowadzana identyfikacja parametrów. Zazwyczaj nie ma możliwości pomiaru przyspieszeń początku układu współrzędnych związanego z głowicą tensometryczną, dokonuje się więc formalnego różniczkowania sygnału prędkości, czego efektem są błędy. W takim przypadku mówi się o modelu różniczkowym [1]. Aby tego uniknąć stosuje się całkowanie układu równań opisujących związek między przyspieszeniami, siłami i momentami sił oraz parametrami inercyjnymi. Operację całkowania przeprowadza się wtedy w układzie współrzędnych związanym z głowicą tensometryczną [7, 9]. Mówi się wtedy o modelu całkowym. Całkowanie równań ruchu, ale w odniesieniu do całego manipulatora, stosują też autorzy pracy [13].

Badania przeprowadzono na omówionym wcześniej stanowisku eksperymentalnym. Do pomiaru Ponadto robot sił i momentów sił wywieranych na końcówkę robota został wykorzystany czujnik JR3, umocowany między końcówką a chwytakiem. Umożliwia on pomiar trzech składowych siły i trzech składowych momentu siły, wywieranych na czujnik w układzie współrzędnych kartezjańskich, o początku umiejscowionym w wybranym punkcie. W osiach X oraz Y mierzone są siły w zakresie od -25kG do 25kG , natomiast w osi Z w zakresie od -50kG do 50kG . Momenty sił we wszystkich osiach mogą być mierzone w zakresie od -200kGcm do 200kGcm . Dokładność czujnika JR3 wynosi $\pm 5\text{ g}$, a częstotliwość akwizycji danych pomiarowych wynosi około 250 Hz .

Jako metodę identyfikacji parametrów na podstawie danych uzyskanych w trakcie ruchu ramienia robota zastosowano metodę najmniejszych kwadratów w postaci rekurencyjnej w połączeniu z faktoryzacją Agee-Turnera.

W tabeli 1 zestawiono obliczone i estymowane parametry inercyjne ładunku, stalowej bryły prostopadłościennej, wyznaczone w lokalnym układzie współrzędnych związanym z głowicą tensometryczną. Ruch każdej osi jest określony wielomianem 5-go stopnia w przestrzeni wewnętrznej z maksymalną prędkością. Czas ruchu wszystkich osi wynosił 1.83 s . Przykładowo, na rys. 4 przedstawiono przebiegi estymat masy m (a), współrzędnych momentu statycznego I-go rzędu mc_x , mc_y , mc_z (b), głównych momentów bezwładności

(c) oraz momentów dewiacyjnych (d), otrzymywanych na podstawie pomiarów w trakcie równoczesnego ruchu wszystkich ogniów manipulatora wzdłuż trajektorii określonych wielomianami 5-go rzędu w przestrzeni wewnętrznej. Z porównania estymat z wartościami obliczonymi (tabela 1) wynika, że masa, współrzędne momentu statycznego I-go rzędu oraz momenty główne estymowane są dokładnie. Momenty dewiacyjne, które są mniejsze od momentów głównych, są estymowane gorzej, chociaż ich wartości nie odbiegają w sposób znaczny od obliczonych. Jest to w zasadzie zgodne z podobnymi wynikami zamieszczonymi w pracy [1].

Przy wykorzystaniu modelu całkowego wystąpiły duże błędy związane z zakłóceniami pomiarowymi o niskiej częstotliwości, kumulowanymi w trakcie całkowania, co jest również zgodne ze spostrzeżeniami zawartymi w pracy [1].

4 Koncepcja sterowania adaptacyjnego w oparciu o model robota IRp-6

Zagadnienie sterowania adaptacyjnego robotami jest obecnie obszarem bardzo intensywnych badań. W ostatnich kilkunastu latach pojawiło się bardzo dużo różnorodnych publikacji prezentujących wyniki teoretyczne oraz wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych dotyczących projektowania regulatorów adaptacyjnych dla robotów. Układy sterowania adaptacyjnego powinny uwzględniać rzeczywistą dynamikę robota. Potrzeba wprowadzenia mechanizmu estymacji parametrów w układzie adaptacyjnego sterowania podyktowana jest niepełną znajomością parametrów dynamiki robota w tym w szczególności parametrów związanych z chwytaniem nieznanego ładunku.

W przeprowadzonych badaniach rozważano dwie koncepcje sterowania adaptacyjnego [5, 6]:

- Układ sterowania typu bezpośredniego, gdzie mechanizm adaptacji parametrów pobudzany jest błędem śledzenia $\tilde{q} = q - q_d$. Uwzględnia się możliwość sterowania typu mieszanego, gdzie mechanizm adaptacji pobudzany jest dodatkowo błędem predykcji.
- Układ sterowania typu zdecentralizowanego, gdzie sterowanie odbywa się niezależnie dla każdego ogniwa.

Przyjęto ogólną postać modelu matematycznego dla dynamiki robota opisaną następującym równaniem

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + H(\dot{q}) = \tau, \quad (5)$$

gdzie q jest $(n \times 1)$ wektorem współrzędnych uogólnionych, τ jest $(n \times 1)$ wektorem przyłożonych momentów, $M(q)$ jest $(n \times n)$ symetryczną, dodatnio określoną macierzą bezwładności robota, $N(q, \dot{q})\dot{q}$ jest $(n \times 1)$ wektorem momentów sił odśrodkowych i Coriolisa, $G(q)$ jest $(n \times 1)$ wektorem momentów sił grawitacyjnych zaś $H(\dot{q})$ jest $(n \times 1)$ wektorem momentów sił tarciovych.

Przyjęte koncepcje sterowania adaptacyjnego są koncepcjami sterowania typu bezpośredniego i charakteryzują się prostotą struktury układu sterowania. Pierwsza koncepcja umożliwia realizację algorytmu uwzględniając znajomość modelu dynamiki robota IRp-6. Struktura układu sterowania ma charakter układu scentralizowanego, tj. jeden komputer steruje wszystkimi ogniwami robota. Druga koncepcja umożliwia realizację algorytmu przy słabo znanej dynamice robota. Struktura układu sterowania ma tutaj charakter

układu zdecentralizowanego, tj. każde ogniwo jest sterowane niezależnie. Obecny etap analizy i symulacji obu koncepcji ma dostarczyć informacji co do przydatności obu koncepcji w fazie implementacji algorytmu na robocie. Wybór jednej z koncepcji bądź ich modyfikacji uzależniony byłby również od możliwości i sposobu bezpośredniego dostępu do sterowników prądowych silników wykonawczych.

Cytowana literatura

- [1] Ch.H. An, Ch.G. Atkeson, J.M. Hollerbach; *Model-Based Control of a Robot Manipulator*. The MIT Press, 1988.
- [2] B. Armstrong, O. Khatib, J. Burdick; *The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm*. Proceedings of the IEEE International Conference on SMC, 1986, s. 510-518.
- [3] P. Dutkiewicz, K. Kozłowski, W. Wróblewski; *Robot Programming System for Research Purposes*. Proceedings of the COMPEURO'93, Paris-Evry, maj 1993, s. 94-101.
- [4] P. Dutkiewicz, K. Kozłowski, W. Wróblewski; *Experimental Identification of Robot and Load Dynamic Parameters*. Proceedings of the 2-nd IEEE Conference on Control Applications, vol. 2, Vancouver, Kanada, wrzesień 1993, s. 767-776.
- [5] P. Dutkiewicz, K. Kozłowski, A. Królikowski, W. Wróblewski; *System programowania robota IRp-6, jego model oraz sprzężenie z czujnikami do pomiaru sił i momentów*. Raport z realizacji projektu KBN, Poznań, 1992.
- [6] P. Futro, A. Królikowski; *Koncepcja sterowania adaptacyjnego w oparciu o model robota IRp-6*, Materiały III Krajowej Konferencji Robotyki, Wrocław, wrzesień 1993.
- [7] M. Gautier; *Identification of Robot Dynamics*. Proceedings of the IFAC/IFIP/IMACS Intl. Symposium on Theory of Robots, Wiedeń, 1986, s. 351-356.
- [8] D.D. Grossman, R.H. Taylor; *Interactive Generation of Object Models with a Manipulator*. IEEE Trans. on SMC, vol. 8, 1978, s. 667-679.
- [9] K. Kozłowski; *Modele matematyczne dynamiki robotów oraz identyfikacja parametrów tych modeli*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Seria: Rozprawy, nr 260, Poznań, 1992.
- [10] K. Kozłowski; *Identification of Model Parameters of Robotic Manipulators*. Systems Science, vol. 18, nr 2, 1992.
- [11] K. Kozłowski, M. Prüfer; *Parameter Identification of an Experimental 2-Link Direct Drive Arm*. Proceedings of the IASTED International Conference, Control and Robotics, Vancouver, 1992, s. 313-316.
- [12] U. Kręglewska; *Interfejs bezpośredniego dostępu IBM/AT do zasobów sterownika robota IRp-6*. Materiały III KKR, Prace Naukowe ICT Politechniki Wrocławskiej, nr 37, Wrocław, 1990, s. 90-95.

- [13] W. Szynkiewicz, A. Gosiewski, D. Janecki; *Weryfikacja doświadczalna modelu dynamiki manipulatora IRb-6*. Materiały III Krajowej Konferencji Robotyki, Prace Naukowe ICT Politechniki Wrocławskiej, nr 37, Wrocław, 1990, s. 255-260.
- [14] T. Takase, R.P. Paul, E.J. Berg; *A Structured Approach to Robot Programming and Teaching*. IEEE Trans. on SMC, vol. 11, 1981, s. 514-529.
- [15] C. Zieliński, A. Grodecki, U. Kręglewska, A. Śluzek, T. Zielińska; *Koncepcja sterownika robotów przeznaczonego do celów badawczych*. Materiały III KKR, Prace Naukowe ICT Politechniki Wrocławskiej, nr 37, Wrocław, 1990, s. 336-341.

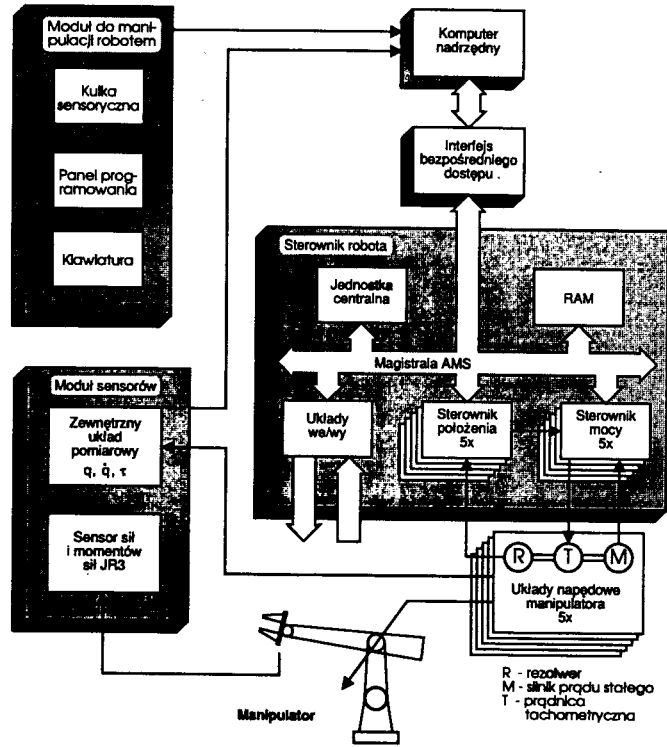
WYKAZ RYSUNKÓW

Rys. 1. Architektura systemu sterującego robota IRp-6

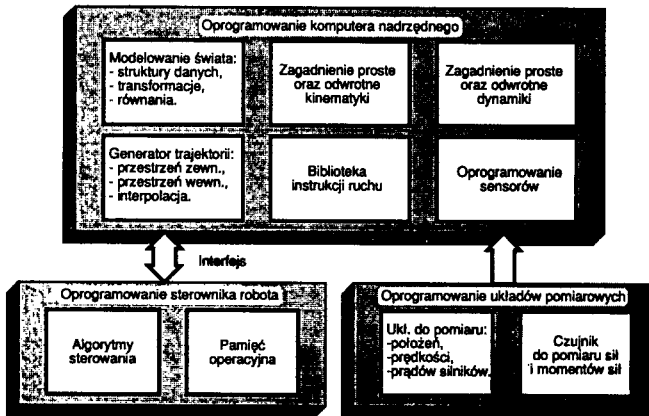
Rys. 2. Struktura oprogramowania

Rys. 3. Przebiegi czasowe estymat parametrów X_1, X_2, X_3, X_4

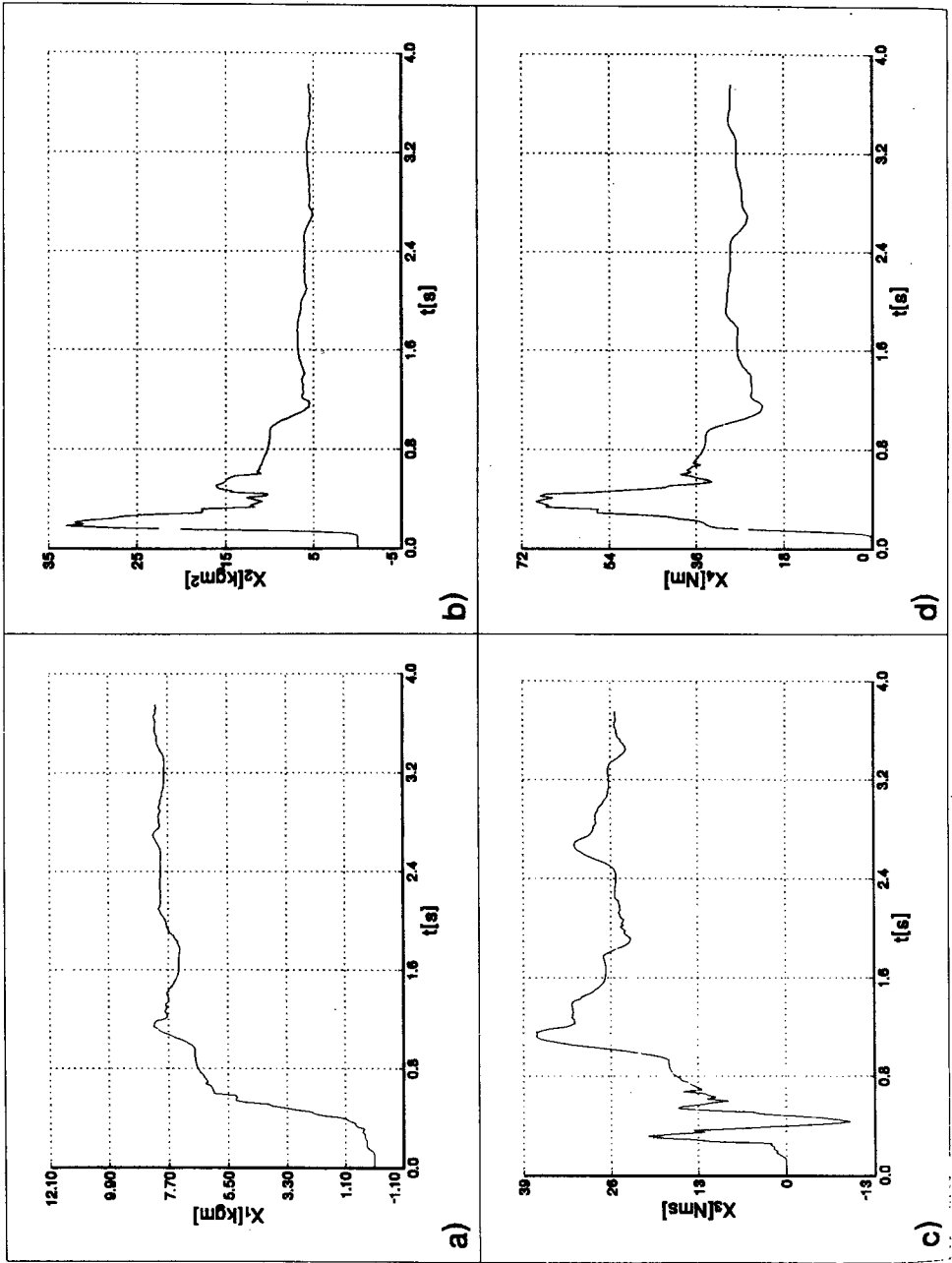
Rys. 4. Przebiegi czasowe estymat parametrów inercyjnych ładunku



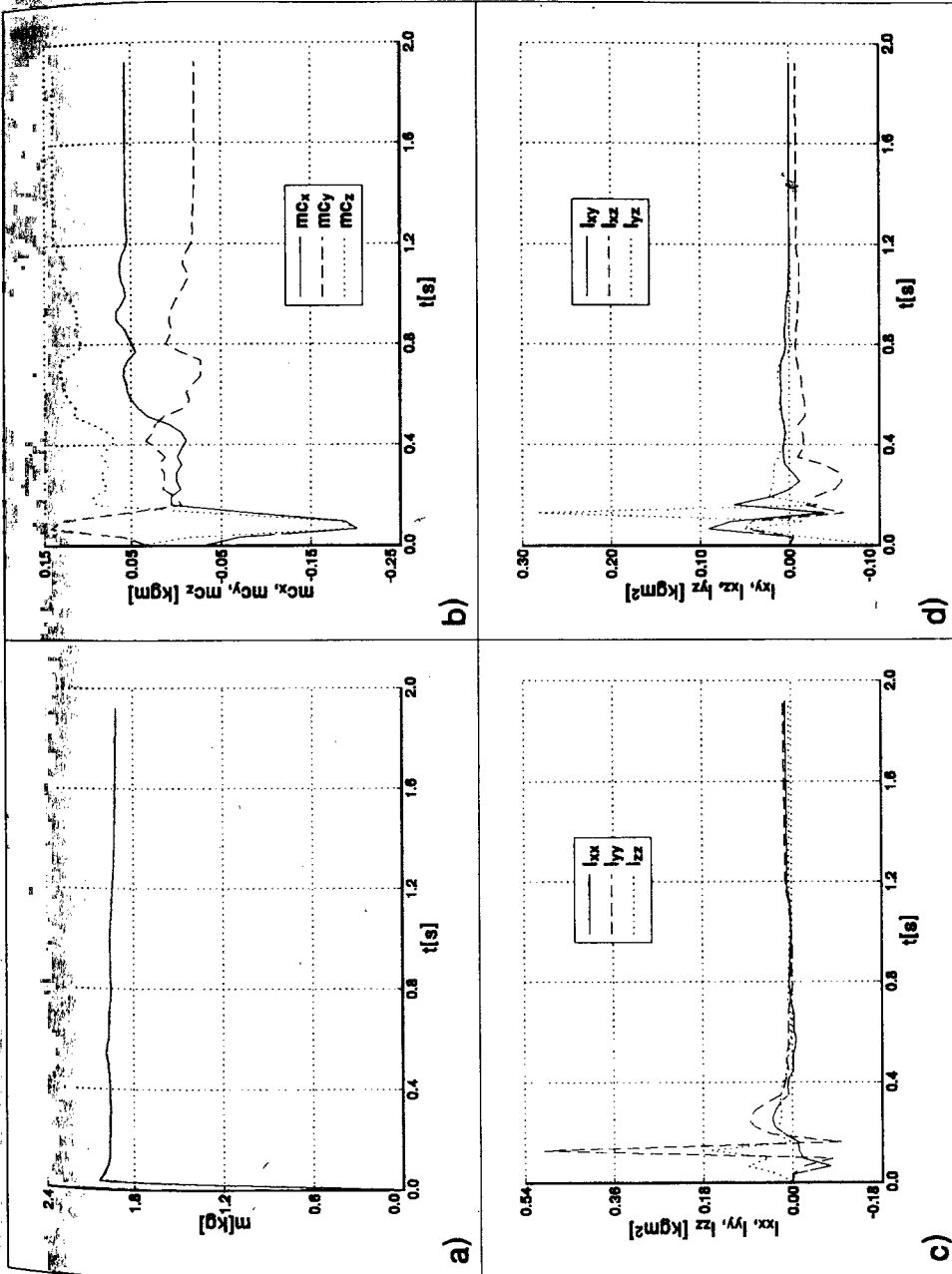
Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4