

Maciej PETKO

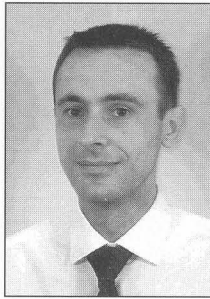
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI, KATEDRA ROBOTYKI I DYNAMIKI MASZYN

Szybkie prototypowanie sterowania manipulatorem równoległym typu tripod

dr inż. Maciej PETKO

Adiunkt w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH. Jego zainteresowania skupiają się na mechatronice, robotyce, zagadnieniach prototypowania i implementacji algorytmów przetwarzania sygnałów, głównie w sterowaniu i diagnostyce technicznej.

petko@agh.edu.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono mechatroniczne podejście do projektowania manipulatorów równoległych, na przykładzie manipulatora trójramiennego o trzech stopniach swobody, zbudowanego w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH. Szczególny nacisk został położony na szybkie prototypowanie sterowania. Pokazana została konstrukcja, jej kinematyka i dynamika, oraz propozycja algorytmu sterowania, który został zbadany symulacyjnie i eksperymentalnie.

Abstract

In the paper, a mechatronic approach toward designing of parallel manipulators is presented, on an example of three limbs, 3-DOF manipulator, built in Dept. of Robotics and Machine Dynamics, AGH. Special emphasis is placed on a fast prototyping of the controller. The construction, its kinematics and dynamics are shown, together with the proposal of the control algorithm that have been investigated by simulation and experiment.

1. Wstęp

W trakcie ostatniej dekady daje się zaobserwować wzrastające zainteresowanie robotami o kinematyce równoległej. Posiadają one właściwości, dające im pod pewnymi względami przewagę nad manipulatorami szeregowymi, w których narzędzie jest umieszczone na końcu otwartego łańcucha kinematycznego. Do najczęściej podkreślanych [10] należy wyższa sztywność, spowodowana obecnością wielu zamkniętych łańcuchów kinematycznych, i, w rezultacie, wyższe częstotliwości własne, duża obciążalność, duże prędkości ruchów i wysoka dokładność. Do wad manipulatorów równoległych należy zaliczyć trudności z uzyskaniem analitycznego rozwiązania zadania prostego kinematyki, co bywa przyczyną uciekania się do metod numerycznych, które są podatne na błędy numeryczne i wymagają dużego nakładu obliczeń, oraz ograniczona przestrzeń robocza, często wypełniona osobliwościami, co narzuca dalsze ograniczenia przestrzeni i powoduje dodatkowe problemy związane ze sterowaniem [11].

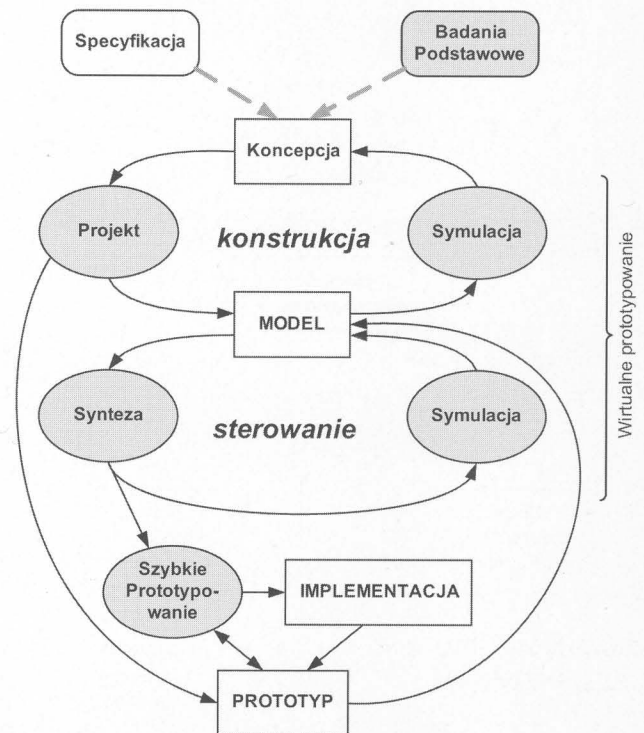
Opracowywanie nowych modeli manipulatorów równoległych jest klasycznym problemem projektowania mechatronicznego, gdzie bez takiego podejścia osiągnięcie sukcesu wydaje się niemożliwe. Zamknięte łańcuchy kinematyczne komplikują syntezę sterowania: nieliniowości wynikające z geometrii manipulatora są opisywane przez bardziej złożone równania i niemożliwe jest zastosowanie oddzielnych sterowników pozycji dla każdego napędu, ponieważ wszystkie łańcuchy działają bezpośrednio i jednocześnie na ruchomą platformę. Kolejny problem stanowi fakt, że nawet drobne zmiany kształtu połączeń mogą doprowadzić do zmiany postaci, a nie tylko parametrów równań kinematycznych. Dodatkowo napędy pełnią również rolę elementów konstrukcji manipulatora, w związku z czym własności mechaniczne ich obudów wpływają na dynamikę w znacznie większym stopniu niż w rozwiązaniach szeregowych, komplikując dobór napędów.

Z powyższych przyczyn, podczas projektowania manipulatorów równoległych, wszystkie aspekty, o różnej naturze fizycznej, razem

z zagadnieniami sterowania i implementacji, muszą być brane pod uwagę i traktowane równorzędnie od samego początku, poprzez wszystkie fazy procesu projektowania, co jest istotą podejścia mechatronicznego [1][2].

2. Projektowanie i prototypowanie manipulatorów równoległych

Iteracyjna procedura projektowania manipulatorów równoległych (rys. 1) rozpoczyna się od zdefiniowania założeń, które są wykorzystywane również do weryfikacji projektu. Konstrukcja mechaniczna i algorytm sterowania są rozwijane równocześnie, a działanie całego manipulatora i współpraca poszczególnych składników badane przez symulację ich modeli. Modyfikacje są wprowadzane aż do momentu spełnienia założeń. Etap ten nazywany jest wirtualnym prototypowaniem.

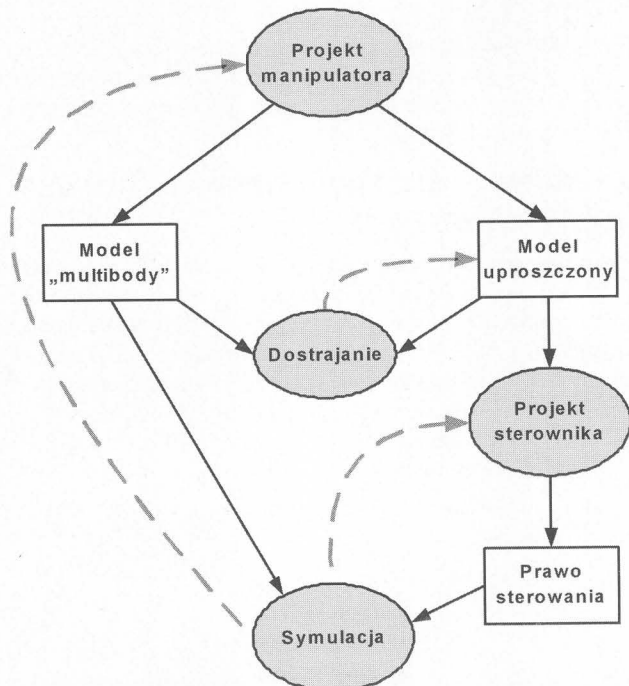


Rys. 1 Procedura mechatronicznego projektowania manipulatorów równoległych

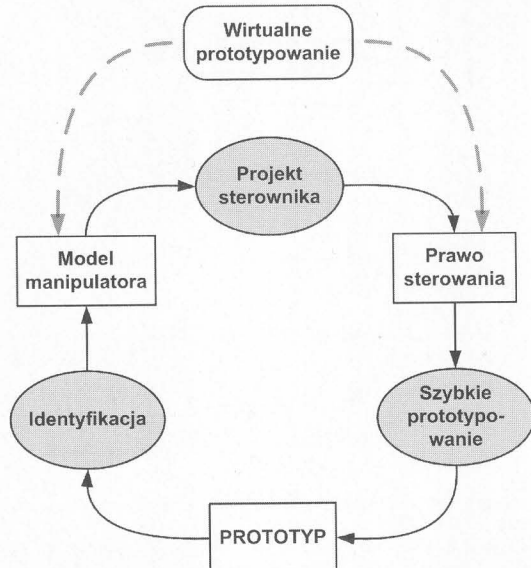
W przypadku obiektów o złożonej geometrii, jakimi są manipulatory równoległe, dla uzyskania wystarczającej dokładności, w procesie wirtualnego prototypowania stosuje się modele "multibody" konstrukcji mechanicznej, uzyskiwane na podstawie projektu elementów wykonanych w programach CAD. Ze względu na ich złożoność, modele takie są jednak nieodpowiednie do projektowania, na ich podstawie, sterowania. Do tego celu tworzone są prostsze modele analityczne. Ich parametry mogą być dopasowywane dla uzyskania lepszej zgodności z modelami "multibody" (rys. 2).

Po spełnieniu założeń przez wirtualny model manipulatora, budowany jest fizyczny prototyp, po czym algorytm sterowania jest testowany w czasie rzeczywistym z użyciem techniki szybkiego prototypowania [4]. Szybkie prototypowanie sterowania, poprzez uwolnienie projektanta od konieczności zajmowania się czasochłonnymi problemami związanymi z implementacją, pozwala na szybkie, eksperymentalne sprawdzenie wielu różnych wariantów prawa sterowania. Ma to szczególne znaczenie w przypadku złożonych obiektów, takich jak manipulatory równoległe, dla których wymagane jest przeprowadzenie eksperymentu identyfikacyjnego, pozwalającego

na otrzymanie danych niezbędnych dla identyfikacji tych parametrów modelu, używanego do projektowania sterowania, które są trudne do ustalenia na drodze czysto teoretycznej, jak współczynniki tarcia i sprężystości, czy niedokładności wykonania i montażu, jak luzy.



Rys. 2 Modelowanie manipulatora równoległego



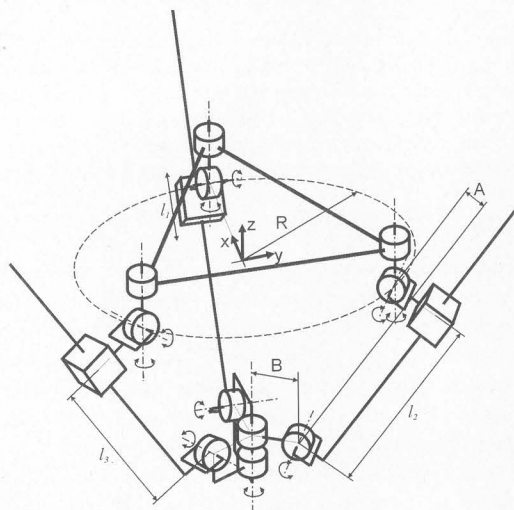
Rys. 3 Szybkie prototypowanie w procesie opracowywania sterownika manipulatora równoległego

Dodatkowo, przeprowadzanie eksperymentów ze sterowaniem w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego jest, ze względu na szybkość ruchów, niebezpieczne, a czasami, ze względu na problemy ze stabilnością, w ogóle niemożliwe. W takich przypadkach eksperymenty identyfikacyjne należy przeprowadzać z pewnym, wstępnie zaprojektowanym w wybrany sposób, sterownikiem, pracującym w układzie ze sprzężeniem zwrotnym. Podejście takie narzuca wiele ograniczeń i dodatkowych wymogów [9], co często prowadzi do konieczności wielokrotnego powtarzania eksperymentu identyfikacyjnego, z różnymi wersjami sterownika stabilizującego. Pomimo problemów z właściwym wymuszeniem obiektu, w przypadku identyfikacji modelu do celów sterowania, niektóre źródła [7] wręcz zalecają postępowanie iteracyjne (rys. 3), w którym, na podstawie kolejnego, dokładniej zidentyfikowanego modelu, projektowany jest kolejny, lepszy sterownik, stosowany w kolejnym ekspe-

rymencie identyfikacyjnym. Postępowanie takie jest zalecane wtedy, gdy sterowany obiekt ma pracować po niewielkiej liczbie znanych z góry trajektorii, w zastosowaniach obejmujących tylko wybrane reżimy pracy, tak jak w przypadku manipulatorów równoległych stosowanych jako konstrukcje wsporcze obrabiarek.

3. Manipulator równoległy typu tripod

Opracowany manipulator [5][6] o trzech translacyjnych stopniach swobody, przeznaczony jest zarówno do pracy jako konstrukcja wsporcza obrabiarki (wiercenie i frezowanie), jak i do zadań manipulacyjnych. Charakteryzuje się stosunkowo dużą przestrzenią roboczą, dużą obciążalnością i osiąganymi dużymi przyspieszeniami. W jego budowie nie występują drogie i kłopotliwe w wykonaniu i eksploatacji złącza sferyczne i uniwersalne. Manipulator składa się z nieruchomej podstawy o kształcie trójkąta równoramiennego i ruchomej platformy, do której mocowane jest narzędzie. Platforma połączona jest z podstawą za pomocą trzech ramion o strukturze RR-PRR (dwa bierne złącza obrotowe złącza pryzmatyczne napędzane liniowymi elektrycznymi silnikami bezpośrednimi, i dwa złącza obrotowe). Strukturę kinematyczną manipulatora ilustruje rys. 4. l_i oznacza długości napędzanych członów pryzmatycznych, R promień okręgu opisanego na trójkącie podstawy, a A i B odległości pomiędzy osiami obrotu odpowiednich złączy obrotowych. Kartezjański układ współrzędnych (x, y, z) jest umieszczony w ten sposób, że oś y jest skierowana w kierunku ramienia nr 1.



Rys. 4 Struktura kinematyczna manipulatora

Dominującym źródłem nieliniowości manipulatora jest jego geometria, powodująca duże wahania, w obrębie przestrzeni roboczej, zredukowanych ("widzianych" przez napędy) mas i sił grawitacyjnych. Zaniedbując pozostałe nieliniowości, równania dynamiki manipulatora przyjmują postać:

$$M(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}} + G(\mathbf{x}) = \mathbf{F} \quad (1)$$

gdzie M jest macierzą mas zredukowanych, G wektorem zredukowanych sił grawitacyjnych (ciężkości), F wektorem sił wywieranych przez napędy, $l = [l_1, l_2, l_3]^T$ wektorem współrzędnych złączonych narzędzia, a $x = [x, y, z]^T$ wektorem jej współrzędnych w układzie kartezjańskim (x, y, z) . Równanie (1) można zapisać w postaci rozszerzonej:

$$\begin{bmatrix} M_1(\mathbf{l}) & 0 & 0 \\ 0 & M_2(\mathbf{l}) & 0 \\ 0 & 0 & M_3(\mathbf{l}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{l}_1 \\ \ddot{l}_2 \\ \ddot{l}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(\mathbf{x}) \\ G_2(\mathbf{x}) \\ G_3(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Zredukowane masy manipulatora M_i , można wyrazić jako funkcje długości członów pryzmatycznych, które są mierzone bezpośrednio, jednakże do obliczenia zredukowanych sił grawitacyjnych G_i niezbędne są współrzędne narzędzia w kartezjańskim układzie współrzędnych. Można je otrzymać rozwiązując zadanie proste kinematyki. Dla mechanizmów równoległych prostsze do wyprowa-

dzenia są równania kinematyki odwrotnej, które dla przedmiotowe-
go manipulatora przyjmują postać:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= \sqrt{\left(\sqrt{(x)^2 + (y-R)^2} - B\right)^2 + z^2 - A^2} \\
 l_2 &= \sqrt{\left(\sqrt{\left(x - \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + \left(y + \frac{1}{2}R\right)^2} - B\right)^2 + z^2 - A^2} \\
 l_3 &= \sqrt{\left(\sqrt{\left(x + \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + \left(y + \frac{1}{2}R\right)^2} - B\right)^2 + z^2 - A^2}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Próby znalezienia analitycznej formy rozwiązania problemu ki-
nematyki prostej (rozwiązania równań (3) ze względu na współ-
rzędne kartezjańskie) nie powiodły się, dlatego podczas symulacji
stosowane były iteracyjne metody numeryczne, które jednak nie
nadają się do stosowania w przypadku sterowania w czasie rzeczy-
wistym. Z tego względu, w algorytmie sterowania stosowane jest
uproszczenie kinematyki manipulatora, poprzez przyjęcie, że $B=0$.
stosując dodatkowe podstawienie, równania kinematyki odwrotnej
przyjmują postać:

$$\begin{aligned}
 l_{n1} &= \sqrt{(x)^2 + (y-R)^2 + z^2} \\
 l_{n2} &= \sqrt{\left(x - \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + \left(y + \frac{1}{2}R\right)^2 + z^2} \\
 l_{n3} &= \sqrt{\left(x + \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + \left(y + \frac{1}{2}R\right)^2 + z^2}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

która pozwala na wyznaczenie analitycznego rozwiązania zadania
prostego kinematyki:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{\sqrt{3} \cdot (l_{n3}^2 - l_{n2}^2)}{6R} \\
 y &= \frac{(l_{n2}^2 + l_{n3}^2 - 2l_{n1}^2)}{6R} \\
 z &= \frac{-\sqrt{S}}{3R} \\
 S &= -l_{n1}^4 - l_{n2}^4 - l_{n3}^4 + l_{n1}^2 l_{n2}^2 + l_{n2}^2 l_{n3}^2 \\
 &\quad + l_{n1}^2 l_{n3}^2 + 3R^2(l_{n1}^2 + l_{n2}^2 + l_{n3}^2 - 3R^2)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Umożliwia to obliczenie, z pewnym błędem, wszystkich wyra-
zów równania dynamiki (2), co wykorzystywane jest w sterowniku.

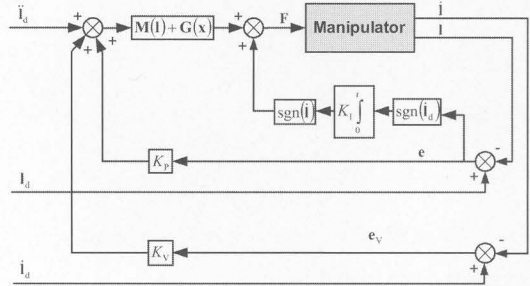
Postać macierzy G w równaniu dynamiki (2) powoduje, że daje
ona efekt podobny do dodatniego sprzężenia zwrotnego pomiędzy
położeniem a zredukowanymi siłami ciężkości, który nie może być
skompensowany przez sterownik pracujący w układzie otwartym,
a tym bardziej niemożliwe jest przeprowadzenie eksperymentu
identyfikacyjnego w klasycznej postaci, gdzie obiekt jest wymu-
szany przebiegami o zadanej charakterystyce czasowej, bez sterow-
nika. Dlatego, do przeprowadzenia identyfikacji zaprojektowano
wstępny sterownik w oparciu o model dynamiki (2).

Do sterowania położeniem manipulatora l , w celu śledzenia za-
danej trajektorii l_d , zostało zaproponowane następujące prawo ste-
rowania z linearyzacją w pętli sprzężenia zwrotnego [3][8]:

$$\begin{aligned}
 F(t) &= M(l(t))(\ddot{l}_d(t) + K_p e(t) + K_v e_v(t)) \\
 &\quad + G(x) \\
 &\quad + K_I \operatorname{sgn}(\dot{l}(t)) \int_0^t e(\tau) \operatorname{sgn}(\dot{l}_d(\tau)) d\tau
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

gdzie $e = l_d - l$, $e_v = \dot{l}_d - \dot{l}$, a K_p , K_v , K_I są stałymi. Strukturę ste-
rownika pokazuje rys. 5. Część linearyzująca ($M(l)+G(x)$) zawiera
wyraz związany z grawitacją, wymagający rozwiązania zagadnienia
kinematyki prostej w każdym kroku czasowym. Ponieważ rozwią-
zanie dokładne pociąga za sobą intensywne obliczenia iteracyjne,
stosowany jest model uproszczony, opisany równaniami (5). Prowa-
dzi to do pewnych niedokładności, które muszą być kompensowa-

ne, przynajmniej w pewnym stopniu, przez wprowadzenie członu
całkującego do prawa sterowania. Postać członu całkującego zosta-
ła zaproponowana w [8], gdzie udowodniono, że jest ona również
prostym, lecz skutecznym, adaptacyjnym kompensatorem tarcia Co-
ulomba. Jego wyjście w stanie ustalonym odzwierciedla wielkość
tarcia Coulomba, tak więc, przy zmianie znaku prędkości, pełni rolę
sprężenia do przodu, kompensującego tarcie, zachowując przy
tym własności klasycznego sterownika całkującego, co pozwala na
kompensację innych zakłóceń oraz niedokładności modelu.



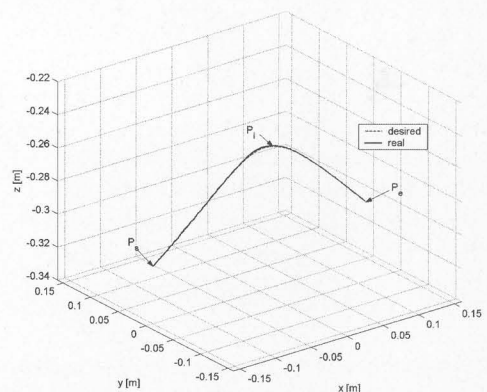
Rys. 5 Struktura sterownika

Działanie tego wstępnego sterownika zostało sprawdzone z rze-
czywistym manipulatorem w czasie rzeczywistym, jako element pro-
cedury identyfikacji wg rys. 3, z wykorzystaniem techniki szybkiego
prototypowania. W tym podejściu, program wykonujący obliczenia
prawa sterowania jest generowany automatycznie w Simulinku i wy-
konywany na specjalizowanym sprzęcie o dużej mocy obliczenio-
wej, przystosowanym do działania w czasie rzeczywistym i wyposa-
żonym w odpowiednie układy peryferyjne, umożliwiające odbiór
sygnałów z różnego typu czujników oraz sterowanie układami wyko-
nawczymi. Daje to możliwości szybkiego sprawdzenia algorytmu
sterowania i wprowadzenia w nim niezbędnych modyfikacji bez zaj-
mowania się problemami związanymi z implementacją.

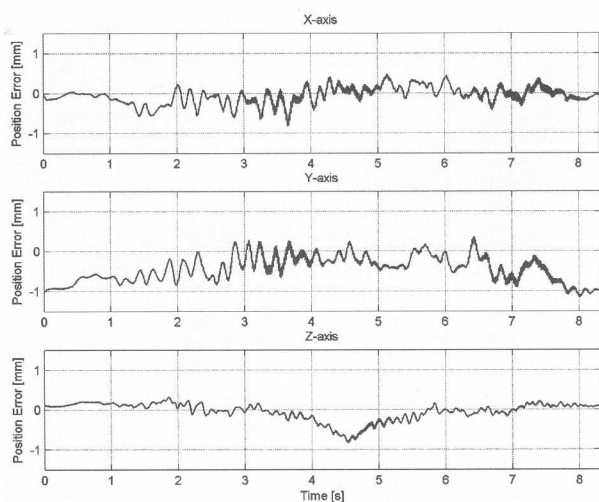
Zadanie realizowane w trakcie eksperymentu polegało na śledze-
niu uprzednio przygotowanej trajektorii (rys. 6), typowej dla zasto-
sowań związanych z manipulacją przedmiotami. Trajektoria
w przestrzeni złączkowej, w postaci wielomianów sklejanych rzę-
dów 4-3-3-4 dla zapewnienia odpowiedniej gładkości, została za-
projektowana przez opracowany generator trajektorii, biorący pod
uwagę ograniczenia geometryczne, kinematyczne i dynamiczne.
Ograniczenia geometryczne pozwalają m.in. na planowanie trajek-
torii bezkolizyjnych. Obejmuje to zarówno możliwe kolizje pomię-
dzy elementami manipulatora, jak też z obiektami zewnętrznymi
znajdującymi się w przestrzeni roboczej.

Okazało się, że sterownik pracuje najlepiej z dokładnie takimi
samymi parametrami, jakie zostały dobrane na etapie wirtualnego
prototypowania, co wskazuje na wysoką dokładność modelu "mul-
tobody" manipulatora.

Wyniki eksperymentu, pokazane na rys. 6 i rys. 7 świadczą
o przyzwoitej dokładności śledzenia trajektorii, więcej niż wystar-
czającej dla wstępnego sterownika przewidzianego tylko dla prze-
prowadzenia pierwszych eksperymentów identyfikacyjnych.



Rys. 6 Porównanie trajektorii kartezjańskiej realizowanej podczas symulacji
i eksperymentu



Rys. 7 Błędy realizacji trajektorii podczas symulacji i eksperymentu

4 Podsumowanie

W artykule przedstawiono mechatroniczną procedurę projektowania manipulatorów równoległych ze szczególnym uwzględnieniem roli szybkiego prototypowania. Procedura została zaprezentowana na przykładzie manipulatora trójramiennego o trzech stopniach swobody. Przeanalizowana została kinematyka i dynamika manipulatora. Uwypuklone zostały problemy związane z projektowaniem sterownika. Czas i koszty wykonania tego zadania zostały znacznie obniżone dzięki wykorzystaniu szybkiego prototypowania.

Wstępny sterownik został zbadany praktycznie, a jego osiągi są wystarczające do przeprowadzenia eksperymentów identyfikacyjnych, do których był przeznaczony. Eksperymenty te pozwolą na otrzymanie dokładniejszego modelu manipulatora, co umożliwi lepsze rozwiązanie problemu sterowania nieliniowego, również z wykorzystaniem innych metod niż zaprezentowane w niniejszej pracy.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych jako projekt badawczy 4 T07B 077 26

Literatura

- [1] Auslander, D.M., C.J. Kempf, *Mechatronics: Mechanical System Interfacing*. Prentice Hall, 1996.
- [2] Bishop, R.H. (ed.), *The Mechatronics Handbook*. CRC Press, 2002.
- [3] Craig, J.J., *Wprowadzenie do robotyki: Mechanika i sterowanie*. WNT, 1995.
- [4] Glesner, M., A. Kirschbaum, F.-M. Renner, B. Voss, *State-of-the-art in rapid prototyping for mechatronic systems*, *Mechatronics*, 12:987-998, 2002.
- [5] Karpel G., Petko M., Uhl T., *Manipulator równoległy trzyramienny*, Zgłoszenie patentowe nr P-363255
- [6] Karpel G., Petko M., *Przegub obrotowy potrójny*, Zgłoszenie patentowe nr P-363254
- [7] Norgaard, M., Ravn, O., Poulsen, N. K., Hansen, L. K. *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*. Springer-Verlag, London, 2000.
- [8] Ryu, J.-H., J. Song, D.-S. Kwon, *A nonlinear friction compensation method using adaptive control and its practical application to an inparallel actuated 6-DOF manipulator*. *Control Engineering Practice*, 9:159-167, 2001.
- [9] Söderström, T., P. Stoica, *Identyfikacja systemów*. PWN, 1997.
- [10] Tsai, L.-W., *Robot Analysis: the Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. John Wiley & Sons, 1999.
- [11] Tzafestas, S.G. and G.Schmidt (ed.), *Progress in system and robot analysis and control design*. Springer, 1999.

Title: Fast prototyping of the control of the tripod type parallel manipulator

Artykuł recenzowany

ZAPRASZAMY do PRENUMERATY czasopisma PAK w 2004 roku

PRENUMERATĘ I KOLPORTAŻ PROWADZĄ:

Redakcja POMIARY-AUTOMATYKA-KONTROLA,
ul. Świętokrzyska 14A p. 535, 00-050 Warszawa
tel./fax: (0-22) 827-25-40, e-mail: pak@data.pl, marketing: dorpak@data.pl

GARMOND PRESS S.A.	ul. Nakielska 3	01-106 Warszawa
KOLPORTER S.A.	ul. Strycharska 6	25-659 Kielce
AS PRESS Andrzej Szlachciuk	Nowa Iwiczna, ul. Krasickiego 11	05-500 Piaseczno
CZASOPISMO POLSKIE PRESS	ul. Forsycji 6	05-077 Warszawa
ARS POLONA S.A.	ul. Krakowskie Przedmieście 7	00-950 Warszawa
G.L.M. GAJEWSKI & MORAWSKI Sp.J.	ul. Uprawną 3	02-967 Warszawa
INMEDIO Sp. z o.o.	Al. Kościuszki 132	90-146 Łódź
RUCH S.A., Oddział w Krakowie	Al. Pokoju 5	31-548 Kraków
RUCH S.A., Oddział w Gdańsku	ul. Tkacka 9/10	80-836 Gdańsk
RUCH S.A., Oddział w Lublinie	ul. Zamojska 24	20-950 Lublin
RUCH S.A., Oddział Dolnośląski	ul. Wspólna 8	45-837 Opole
RUCH S.A., Oddział Dolnośląski	ul. Kwidzyńska 3	51-415 Wrocław

Indywidualną sprzedaż prowadzi Centralna Księgarnia Techniczna, 00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A oraz bezpośrednio Redakcja