

**Amadeusz FEDUS, Rafał OSYPIUK**

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY, INSTYTUT AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ, ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin

## Architektura sterowania równoległym manipulatorem Hexa na bazie mikrokontrolerów rodziny SAM7S

Mgr inż. Amadeusz FEDUS

W latach 2003 – 2008 studiował Automatykę i Robotykę na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej. Jego głównym obszarem zainteresowań są systemy wizyjne czasu rzeczywistego, dedykowane dla autonomicznych stanowisk zrobotyzowanych. Obecnie jest doktorantem na kierunku Automatyka i Robotyka.



e-mail: fedus@zut.edu.pl

Dr inż. Rafał OSYPIUK

W latach 1994 - 1999 studiował Automatykę i Robotykę na Politechnice Szczecińskiej. W roku 2004 w tej samej dyscyplinie obronił pracę doktorską i został zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Automatyki Przemysłowej. W ramach odbytych dwóch stypendiów DAAD oraz obecnie realizowanego grantu MNiSW ściśle współpracuje z Institute for Robotics and Process Control w Braunschweig. Głównym obszarem jego badań są odporne systemy sterowania pozycją oraz siłą dla manipulatorów przemysłowych.



e-mail: rafal.osypiuk@zut.edu.pl

### Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono założenia projektowe oraz realizację otwartej architektury sterowania dla równoległego manipulatora Hexa, w oparciu o 32-bitowe mikrokontrolery z rdzeniem ARM7 TDMI. W projekcie sterownika o niewielkich gabarytach, niskim koszcie i wydajności zbliżonej do rozwiązań komercyjnych wzięto pod uwagę wydajność obliczeniową zastosowanych procesorów. Dla uzyskania lepszych osiągnięć proces sterowania został podzielony na kilka zadań realizowanych przez cztery procesory. Prezentowane wyniki prac mogą posłużyć jako interesujące wskazówki dla projektantów zarówno prostych jak i złożonych systemów sterowania w mechatronice.

**Słowa kluczowe:** Manipulator Hexa, zamknięty łańcuch kinematyczny, mikrokontrolery ARM, otwarte architektury sterowania, układy wbudowane.

### Hexa parallel robot control architecture based on SAM7S microcontrollers family

#### Abstract

In this paper was presented assumptions and implementation of Hexa parallel robot control architecture based on 32-bit microcontrollers with ARM7 TDMI core. In developing low-cost controller of small size, and performances similar to commercial solutions the processors capacity was took into account. For better performance process of control was divided into few tasks which were computed on four processors (Fig. 2). Furthermore there was presented implementation of angular position digital controller (Fig. 5) with respect to the noise influence for control quality. The most difficult problem was to find solution of inverse kinematics with respect to the limited processors capacity. Although the direct kinematics in closed-loop architecture is often complex, the inverse kinematics is very simple. In first step the transform matrices which describe transformation from coordinate systems combined with platform to coordinate systems combined with active joints were found. Last step demonstrates how to find angles in every active joint using geometrical method (Fig. 8). Presented results may be used as helpful hints in developing simple or more complex control systems in mechatronics.

**Keywords:** Hexa manipulator, closed kinematic chain, ARM microcontrollers, open control architectures, embedded systems.

### 1. Wstęp

Komercyjne systemy sterowania wysokodynamicznymi obiektami MIMO (Multiple Input Multiple Output) przechodzą w ostatnich latach znaczne przeobrażenie z zamkniętych sprzętowych (hardware) na otwarte programowe (software). Zjawisko to, nie tylko widoczne jest u producentów manipulatorów przemysłowych np. [1, 2], ale również w przypadku uniwersalnych systemów automatyki [3]. Chociaż zalety sterowników bazujących na PC są niepodważalne (błyskawiczna realizacja sprzętowa, łatwa ingerencja w funkcjonalność, możliwość szybkiej adaptacji do wymogów procesu, diagnostyka i update poprzez Internet, itp.), to jednak trudno oczekiwać, aby stanowiły one istotne zagrożenie dla

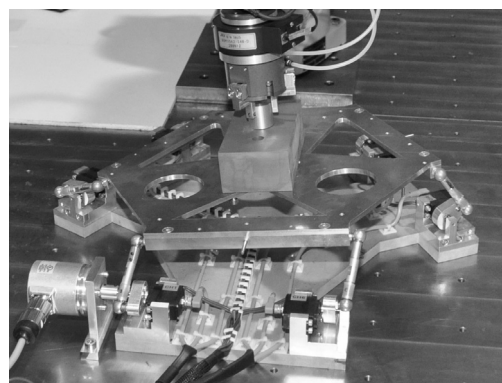
dedykowanych systemów hardware'owych. Ostatecznie na decyzję o wyborze docelowego rozwiązania ma wpływ wiele czynników, które nadal często przemawiają za rozwiązaniami klasycznymi, na co zwrócono uwagę w dalszej części artykułu.

W wyniku współpracy pomiędzy Instytutem Automatyki Przemysłowej w Szczecinie a Institute for Robotics and Process Control w Braunschweig (Niemcy) powstała równoległa platforma o kinematyce Hexa [4]. System ten stworzony został dla celów eksperymentalnych (rys. 1), jako aktuator sztywności 3D w badaniach algorytmów efektywnego sterowania siłą dla manipulatorów przemysłowych [5]. Między innymi z uwagi na konieczność szybkiej realizacji projektu zastosowano wstępnie software'ową architekturę sterowania MiRPA (Middleware for Robotic and Process Control Applications) [6], która umożliwiła szybkie prototypowanie oraz zapewniła łatwość wykorzystania sterownika platformy równoległej jako komponentu systemu nadrzędnego (hybrydowy proces sterowania pozycja/siła [7]).

Pomimo wymienionych powyżej zalet sterownika bazującego na PC, koszt samej części sprzętowej w opisywanym przypadku był stosunkowo wysoki (około 5000 Euro - komputer sterujący, komputer szybkiego prototypowania, karty I/O). Dodatkowo mobilność takiego systemu pozostawiała wiele do życzenia. W związku z powyższym zdecydowano już w fazie projektowej o wykorzystaniu dwóch rodzajów sterowań tj. programowej dla zastosowań badawczych oraz sprzętowej dla celów dydaktycznych. To właśnie drugie rozwiązanie, które powstało w ramach pracy dyplomowej [8] jest tematem niniejszego artykułu.

### 2. Komponenty architektury sterowania

Nowa architektura sterowania manipulatorem Hexa została zrealizowana w oparciu o 32-bitowe mikrokontrolery AT91SAM7S z rdzeniem ARM7.



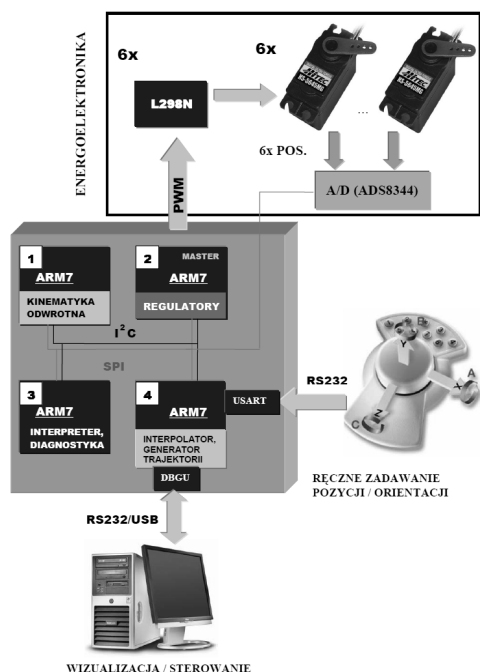
Rys. 1. Platforma Hexa na stanowisku eksperymentalnym  
Fig. 1. Hexa platform; experimental setup

Mikrokontrolery te wybrano przede wszystkim ze względu na ich bogaty zasób urządzeń peryferyjnych (przetworniki AD, timery PWM, interfejsy urządzeń komunikacji szeregowej) oraz na wydajny rdzeń procesora. Rdzeń ARM7TDMI posiada architekturę RISC (Reduced Instruction Set), co oznacza, że lista instrukcji procesora jest niewielka [9]. Przekłada się to na mniejszą liczbę bramek logicznych wewnątrz struktury rdzenia i możliwości pracy przy większej częstotliwości zegara. Procesory ARM7 wzbogacono także o możliwość wykonania instrukcji arytmetycznych operujących na 32 i 64-bitowych danych [10]. Dzięki prostej budowie rdzenia ARM7 i ARM9 mikrokontrolery te coraz częściej znajdują zastosowanie w aplikacjach, które wymagały użycia procesorów DSP.

Między innymi dla uzyskania możliwie największej wydajności systemu, podzielono kompleksowe zadanie sterowania na pojedyncze procesy. Każdy z nich zaimplementowany został na odrębnym mikrokontrolerze, co w sposób poglądowy przedstawiono na rys. 2.

Poniżej wymieniono algorytmy realizowane przez nową architekturę sterowania oraz odpowiadające im wymagania:

- Regulatory pozycji sześciu serwonapędów – z uwagi na ich wysoką dynamikę, założono minimalny czas próbkowania w pętli na poziomie 1 ms.
- Zadanie kinematyki odwrotnej – w celu otrzymania zadowalającej dokładności w odwzorowywaniu trajektorii ruchu w przestrzeni kartezjańskiej ustalono minimalny czas dla obliczeń kątów konfiguracyjnych na poziomie 10 ms.
- Generator trajektorii – dla systemu zadawania gładkich funkcji czasu w każdym połączeniu ruchowym ustalono okres próbkowania również na poziomie 10 ms.
- Komunikacja z myszką o 6-ciu stopniach swobody, jako ręcznego systemu zadawania położenia w przestrzeni kartezjańskiej.
- Komunikacja z komputerem umożliwiającą wizualizację zmiennych procesowych.
- Interpreter języka programowania – dedykowany dla celów budowy stanowiska dydaktycznego.

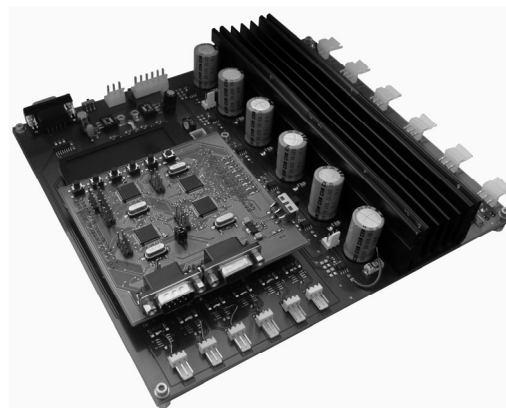


Rys. 2. Schemat blokowy architektury sterowania  
Fig. 2. Diagram of the control architecture

Rzeczywisty system przedstawiono na rys. 3, który osadzony jest na uniwersalnej płycie głównej. Uniwersalność ta polega na możliwości zamiennego wykorzystania architektur sterowania tj. software'owej [4] oraz prezentowanego tutaj systemu hardware-

owego. Jej głównym zadaniem jest sprzęgnięcie układu sterowania z aktuatorami manipulatora, co wymaga odpowiedniego dopasowania sygnałów.

Podział zadań i ich realizacja na odrębnych mikrokontrolerach zmusiła do opracowania efektywnej komunikacji pomiędzy procesami, co stanowiło krytyczny punkt systemu sterowania. Dla zapewnienia ww. czasów próbkowania wykorzystano szybkie interfejsy SPI oraz I<sup>2</sup>C.



Rys. 3. System rzeczywisty zamontowany na płycie głównej  
Fig. 3. Real system mounted on the motherboard

Do napędu platformy wybrano serwa dedykowane do zastosowań w robotyce typu HSR-5995TG firmy Hitec. Ważną informacją wydaje się fakt, iż wypięto elektronikę firmową i zastąpiono ją własnymi układami regulacji położenia, co zapewniło m.in. niezbędny dostęp do położen kątowych napędów.

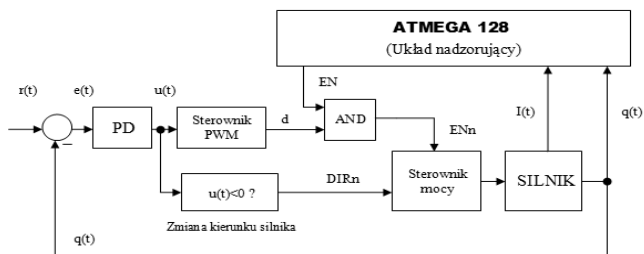
### 3. Implementacja algorytmów sterowania

#### Regulacja położenia

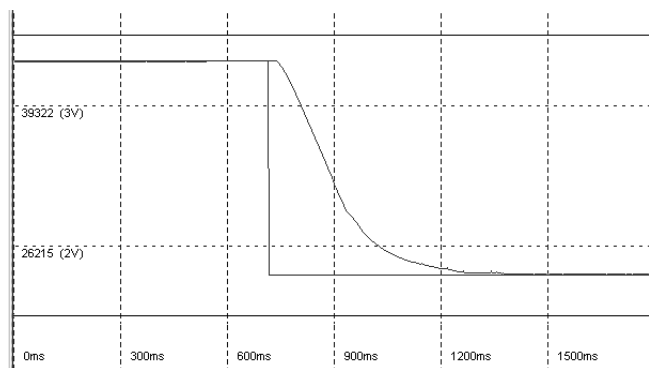
Niezależnie od rodzaju łańcucha kinematycznego, manipulator jest złożonym procesem o wielu wejściach/wyjściach (MIMO), który charakteryzuje się silnymi nieliniowościami statycznymi i dynamicznymi. Aby istniała możliwość stosowania klasycznej regulacji położenia PID, roboty poddawane są wyrównawaniu statycznemu i dynamicznemu [11], co traktować można jako „mechaniczną” linearyzację obiektu. W przypadku manipulatorów równoległych, masy w ruchu są wielokrotnie mniejsze w porównaniu do konstrukcji szeregowych, co istotnie redukuje nieliniowości statyczne (wpływ grawitacji). Problem stanowi natomiast zmienność dynamiki, która objawia się znaczną perturbacją inercji widzianej od strony napędu. Efekt ten zredukować można stosując odpowiednie przekładnie, co w przypadku kinematyki równoległej dedykowanej do zadań montażu (z uwagi na obniżenie dynamiki robota) jest rzadko spotykane [12] i wymaga stosowania zaawansowanych systemów sterowania [13].

Założenia konstrukcyjne prezentowanej platformy wpływały wprost z jej planowanego zastosowania i pozwoliły na wykorzystanie napędów z przekładniami. To z kolei dało możliwość (przynajmniej we wstępnej fazie) implementacji prostej, jednopętlowej regulacji PD. Jest sprawą jasną, iż dla tak prostego przypadku sterowania wystarczyłoby z powodzeniem mikrokontroler 8-bitowy. Zastosowanie w tym miejscu 32-bitowego uC z rdzeniem ARM miało na celu rezerwację mocy obliczeniowej dla implementacji bardziej zaawansowanych struktur sterowania jak np. feedforward.

Na rys. 4 przedstawiono blokowy schemat układu regulacji położenia kątowego dla pojedynczego napędu. Obok regulatora PD, sprzętowego modulatora PWM oraz układu zmiany kierunku ruchu napędu, w strukturze zastosowano system redundantnej kontroli położenia kątowego, co pozwoliło na efektywną ochronę przekładni w sytuacji niepoprawnej pracy głównej pętli sterowania.



Rys. 4. Budowa sterownika położenia kąowego serwa  
 Fig. 4. Structure of the joint controller



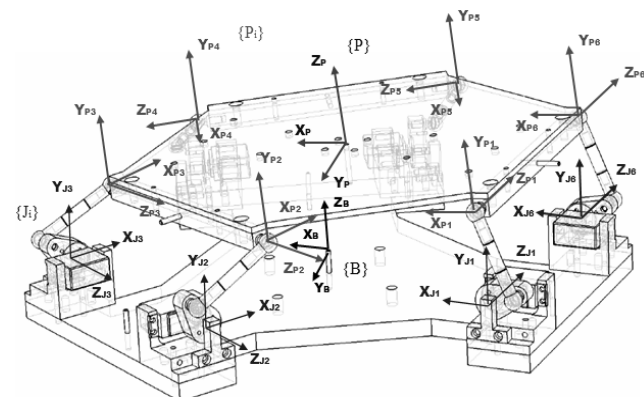
Rys. 5. Jakość sterowania dla pojedynczego kanału  
 Fig. 5. Control quality for 1DOF case

Silne nieliniowości obiektu wykluczyły bezpośrednie zastosowanie znanych metod identyfikacji dla celów strojenia regulatora PD, w związku z czym nastawy wyznaczono w sposób eksperymentalny. Na rys. 5 przedstawiono wynik regulacji położenia kąowego dla jednego z punktów pracy.

**Zadanie odwrotne kinematyki**

Tak jak w przypadku manipulatorów szeregowych sterowanie w przestrzeni zmiennych konfiguracyjnych oraz w przestrzeni zmiennych kartezjańskich wydaje się rzeczą naturalną, tak w przypadku robotów równoległych sensowne jest stosowanie sterowania wyłącznie w przestrzeni kartezjańskiej. Do tego celu konieczne jest wyznaczenie zadania odwrotnej kinematyki, które przy ograniczeniu kątów w członach aktywnych, posiada jedno rozwiązanie (złożoność zadań kinematyki łańcucha otwartego jest odwrotna w przypadku struktur równoległych [12]).

Punktem wyjścia do wyznaczenia zadania kinematyki odwrotnej jest odpowiednie przyporządkowanie układów współrzędnych przedstawiono na rys. 6:



Rys. 6. Powiązanie układów współrzędnych z konstrukcją  
 Fig. 6. Coordinate system combined with the Hexa platform

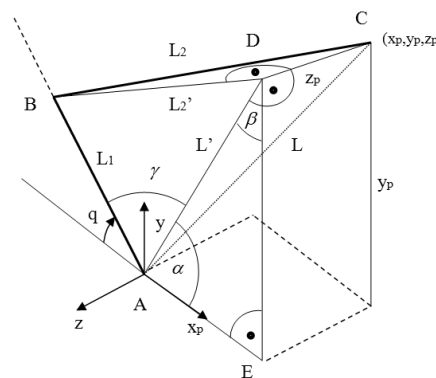
Układy współrzędnych zostały powiązane zgodnie z notacją Denavita-Hartenberga dla manipulatorów równoległych, której opis można znaleźć w pracy [14]. Układem odniesienia dla końcówki roboczej jest globalny układ współrzędnych {B} związany ze środkiem podstawy manipulatora. Platforma posiada sześć stopni swobody, co oznacza, że końcówka robocza może przyjąć dowolną pozycję w przestrzeni roboczej oraz dowolną orientację. Ponieważ odległości pomiędzy układami współrzędnych {P<sub>i</sub>}, a {J<sub>i</sub>} determinują położenie i orientację platformy ruchomej manipulatora należy wyznaczyć macierze transformacji układów {P<sub>i</sub>} do {J<sub>i</sub>}:

$$T_{P_i}^{J_i} = T_B^{J_i} T_P^B T_{P_i}^P \quad (1)$$

Macierze  $T_B^{J_i}$  opisują transformacje układu {B} do układów współrzędnych związanych z serwami, natomiast macierze  $T_{P_i}^P$  opisują transformacje układów {P<sub>i</sub>} do układu współrzędnych {P}, związanego ze środkiem platformy ruchomej. Układy współrzędnych {J<sub>i</sub>} są nieruchome względem układu bazy podobnie jak układy {P<sub>i</sub>} względem układu współrzędnych {P}. Macierz  $T_P^B$  opisuje transformację układu {P} do układu {B} i uwzględnia ona rotację układu {P} o zadane kąty ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) i wektor przesunięcia D. Macierz tą można zapisać w następującej postaci:

$$T_P^B = \begin{bmatrix} R_X(\alpha)R_Y(\beta)R_Z(\gamma) & D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Macierze  $R_X(\alpha), R_Y(\beta), R_Z(\gamma)$  symbolizują obroty wokół osi x, y, z. Wynikiem obliczeń na tym etapie są położenia układów współrzędnych {P<sub>i</sub>} w układach {J<sub>i</sub>}. Kolejny krok w wyznaczeniu zadania kinematyki odwrotnej to obliczenie kątów konfiguracyjnych. Pomocny w tym celu może okazać się rys. 7, który rozwiązuje problem w sposób geometryczny.



Rys. 7. Geometryczny sposób wyznaczenia kąta q dla pojedynczego członu  
 Fig. 7. Geometrical method for calculating an angle in configuration space

Pomimo braku informacji w przegubach kulkowych (pasywnych) rozwiązanie jest dość proste i ma następującą postać:

$$q = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{L_2^2 + L_1^2 - L_2'^2}{2L_1\sqrt{x_p^2 + y_p^2}} + \arctan \frac{x_p}{y_p} \quad (3)$$

Poniżej przedstawiono ilość funkcji i operacji matematycznych wykonywanych w trakcie obliczania zadania kinematyki odwrotnej:

- ilość operacji pierwiastkowania: 18
- funkcje trygonometryczne: 12
- operacje mnożenia/dzielenia/dodawania: 244/12/19

Pomimo dużej złożoności algorytmu mikrokontroler z taktowaniem rdzenia 48MHz wyznaczał poszukiwane kąty konfiguracyjne w czasie około 2.1 milisekundy.

### Ręczne zadawanie trajektorii

Dla celów demonstracyjnych poszukiwano metody zadawania trajektorii dla platformy Hexa w sposób ręczny. Ponieważ jak już wcześniej wspomniano, sterowanie odbywa się w przestrzeni zmiennych kartezjańskich, system zadawania położenia musiał pracować w ww. układzie. Warunki te spełnia mysz o 6-ciu stopniach swobody, której koncepcja powstała w 1970 roku w niemieckim DLR (Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt). System ten posiada interfejs RS232 (obecnie tylko USB) i wysyła zakodowane współrzędne z częstotliwością około 50 Hz. Ze względu na zbyt mały czas z jakim zadawane były wartości współrzędnych zdecydowano dodać funkcję interpolacji, dzięki której wyeliminowano drgania konstrukcji podczas sterowania ręcznego. Pod adresem [15] opublikowano filmy demonstrujące prace platformy z pierwotnym sterowaniem software'owym.

### 4. Wnioski

W artykule przedstawiono konstrukcję sterownika opartego o 32-bitowe mikrokontrolery z rodziny ARM. Obok niewielkich gabarytów systemu oraz niskiego kosztu realizacji wykazano jego przydatność w zastosowaniu do sterowania manipulatorem o sześciu stopniach swobody. Chociaż jego ogólna funkcjonalność nie odbiega znacznie od systemów komercyjnych, to jest on dedykowany głównie dla celów dydaktycznych i ma stanowić pomoc w zrozumieniu zagadnień sterowania specyficznych dla zamkniętych łańcuchów kinematycznych.

### 5. Literatura

[1] <http://www.kuka-robotics.com/en/products/controllers/>

- [2] <http://www.staubli.com/en/robotics/products/robot-controller/>  
 [3] <http://www.beckhoff.com/>  
 [4] Osypiuk R., Kroeger T.: A Low-Cost Hexa Platform for Efficient Force Control Systems with Industrial Manipulators, Solid State Phenomena, vol. 147-149, pp. 1-6, 2009.  
 [5] Osypiuk R.: Hexa Platform as Active Environment System, Int. Workshop on Robot Motion and Control, Czerniejewo, Poland, 2009.  
 [6] Finkemeyer B.: Robotersteuerungsarchitektur auf der Basis von Aktionsprimitiven. Fortschritte in der Robotik, Volume 8, Shaker-Verlag, 2004.  
 [7] Craig J.: Wprowadzenie do robotyki. WNT, Warszawa 1993.  
 [8] Fedus A.: Projekt i konstrukcja równoległego manipulatora o 6-ciu stopniach swobody. Pol. Szczecińska, Praca dyplomowa, 2008.  
 [9] Augustyn J.: Projektowanie systemów wbudowanych na przykładzie rodziny SAM7S z rdzeniem ARM7TDMI, Wyd. IGSMiE PAN, 2007.  
 [10] <http://www.atmel.com/>  
 [11] Tomaszewski K.: Roboty Przemysłowe. Projektowanie układów mechanicznych. WNT, Warszawa, 1993.  
 [12] Marlete J. P.: Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers.  
 [13] Hesselbach J., Bier C., Campos A., Loewe H.: Direct kinematic singularity detection of a hexa parallel robot. In Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 3249- 3254 (2005).  
 [14] Thomas U. and Wahl F.: A General and Uniform Notation for any Kinematic Structure. Mechatronics and Robotics Aachen, Germany, 2004, Part II, pp. 175-180.  
 [15] <http://www.rob.cs.tu-bs.de/research/projects/hexa>

otrzymano / received: 01.08.2009

przyjęto do druku / accepted: 04.05.2010

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Informacje dla Autorów

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, nie publikowane wcześniej w innych czasopiśmie. Redakcja nie zwraca materiałów nie zamówionych oraz zastrzega sobie prawo redagowania i skracania tekstów oraz streszczeń.

Artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie PAK są formatowane jednolicie zgodnie z ustaloną formatką zamieszczoną na stronie redakcyjnej [www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl). Dlatego artykuły przekazywane redakcji należy przygotowywać w edytorze Microsoft Word 2003 (w formacie DOC) z zachowaniem:

- wielkości czcionek,
- odstępów między wierszami tekstu,
- odstępów przed i po rysunkach, wzorach i tabelach,
- oznaczeń we wzorach, tabelach i na rysunkach zgodnych z oznaczeniami w tekście,
- układu poszczególnych elementów na stronie.

Osobno należy przygotować w pliku w formacie DOC notki biograficzne autorów o objętości nie przekraczającej 450 znaków, zawierające podstawowe dane charakteryzujące działalność naukową, tytuły naukowe i zawodowe, miejsce pracy i zajmowane stanowiska, informacje o uprawianej dziedzinie, adres e-mail oraz aktualne zdjęcie autora o rozmiarze 3,8 x 2,7 cm zapisane w skali odcieni szarości lub dołączone w osobnym pliku (w formacie TIF).

Wszystkie materiały:

- artykuł (w formacie DOC),
- notki biograficzne autorów (w formacie DOC),
- zdjęcia i rysunki (w formacie TIF lub CDR),

prosimy przysyłać w formie plików oraz dodatkowo jako wydruki na białym papierze (lub w formacie PDF) na adres e-mail: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl) lub pocztą zwykłą, na adres: Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola, Asystent Redaktora Naczelnego mgr Agnieszka Skórkowska, ul. Akademicka 10, p.21A, 44-100 Gliwice.

Wszystkie artykuły naukowe są dopuszczane do publikacji w czasopiśmie PAK po otrzymaniu pozytywnej recenzji. Autorzy materiałów nadesłanych do publikacji są odpowiedzialni za przestrzeganie prawa autorskiego. Zarówno treść pracy, jak i wykorzystane w niej ilustracje oraz tabele powinny stanowić dorobek własny Autora lub muszą być opisane zgodnie z zasadami cytowania, z powołaniem się na źródło cytatu.

Przedrukowywanie materiałów lub ich fragmentów wymaga pisemnej zgody redakcji. Redakcja ma prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i udostępniania dowolną techniką, w tym też elektroniczną oraz ma prawo do rozpowszechniania go dowolnymi kanałami dystrybucyjnymi.