

## PROJEKT MANIPULATORA RÓWNOLEGŁEGO TYPU DELTA Z PNEUMATYCZNYMI AKTUATORAMI MIĘŚNIOWYMI

Paweł ŁASKI\*, Ryszard DINDORF<sup>\*,\*\*</sup>, Jakub TAKOSOGLU\*, Piotr WOŚ\*

\*Zakład Mechatroniki, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,  
Politechnika Świętokrzyska, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

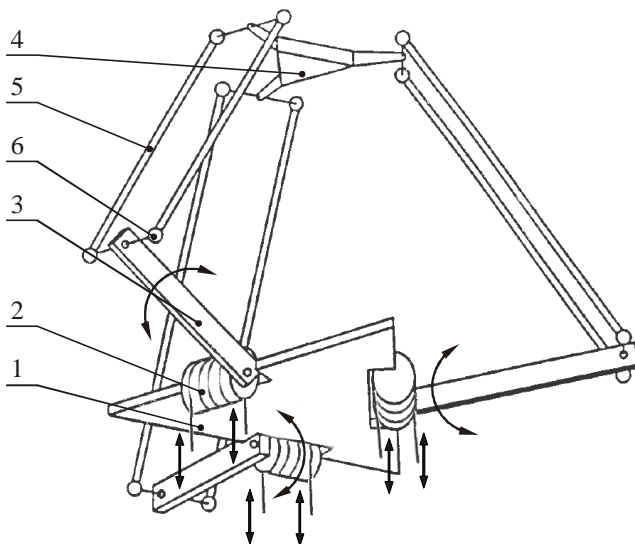
\*\*Katedra Maszyn Ciepłych i Przepływowych, Wydział Energetyki i Paliw,  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

[pawell@tu.kielce.pl](mailto:pawell@tu.kielce.pl), [dindorf@tu.kielce.pl](mailto:dindorf@tu.kielce.pl), [qba@tu.kielce.pl](mailto:qba@tu.kielce.pl), [wos@tu.kielce.pl](mailto:wos@tu.kielce.pl)

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono projekt elektropneumatycznego manipulatora równoległego o trzech stopniach swobody typu DELTA z pneumatycznymi aktuatorami mięśniowymi. Przedstawiono elementy składowe i konstrukcyjne, układ sterujący oraz wyniki prac projektowych.

### 1. WPROWADZENIE

W wielu ośrodkach naukowo-badawczych prowadzone są prace nad rozwojem równoległych (ang. *parallel*) lub szeregowo-równoległych (hybrydowych) struktur kinematycznych. Producenci robotów przemysłowych wystawiają je na imprezach targowych na równi z szeregowymi strukturami kinematycznymi. Zakres stosowania struktur równoległych jest dość szeroki. Stosowane są między innymi w maszynach technologicznych (obrabiarkach), robotach, manipulatorach, urządzeniach pomiarowych oraz symulatorach ruchu.



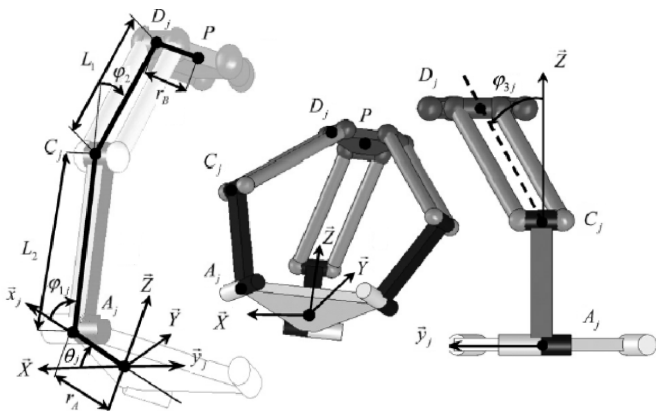
**Rys. 1.** Schemat kinematyczny manipulatora równoległego typu DELTA. 1 – podstawa, 2 – przeguby obrotowe, 3 – ramiona bierne, 4 – platforma robocza, 5 – ramiona czynne, 6 – przeguby kulowe

Łańcuchy kinematyczne manipulatorów składają się z kilku ogniw czynnych lub biernych umożliwiających przestrzenne przemieszczanie i orientację końcówki roboczej (efektora) związanej z narzędziem lub chwytakiem. Manipulatory równoległe zbudowane są z zamkniętych łańcuchów kinematycznych.

W Zakładzie Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach prowadzone są prace projektowe i badawcze nad elektropneumatycznymi manipulatorami równoległymi typu TRIPOD, DELTA oraz SCARA. Na rys 1. przedstawiono schemat kinematyczny manipulatora równoległego typu DELTA. Manipulator składa się z nieruchomej podstawy (1), trzech przegubów obrotowych (2), trzech ramion biernych (5) i trzech czynnych (3), platformy roboczej (4) oraz sześciu przegubów kulowych (6). Taka struktura zapewnia trzy stopnie swobody i ruch platformy roboczej w przestrzeni.

### 2. ANALIZA KINEMATYCZNA MANIPULATORA RÓWNOLEGŁEGO TYPU DELTA

Robot skonstruowany w oparciu o strukturę typu DELTA składa się z ruchomej platformy połączonej do nieruchomej podstawy przez trzy jednocześnie działające łańcuchy kinematyczne. Każdy łańcuch zawiera napędowe połączenie obrotowe uruchamiane przez parę mięśni pneumatycznych działających antagonicznie. Zakończenia mięśni połączone zostały z nieruchomą podstawą. Aby przekazać ruch do platformy roboczej zastosowano trzy równoległoboki zakończone przegubami sferycznymi (Rys. 2). Pojedynczy łańcuch kinematyczny manipulatora typu 3-RSS zawiera przeguby typu obrotowego (R) oraz przeguby typu sferycznego (S).



Rys. 2. Związki kinematyczna manipulatora typu DELTA

## 2.1. Sformułowanie zadania prostego i odwrotnego dla kinematyki manipulatora typu DELTA

Zakładając, iż wszystkie trzy łańcuchy kinematyczne robota są identyczne i rozmieszczone na podstawie trójkąta równobocznego można zapisać wiążące je związki kinematyczne. Geometryczne parametry  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $r_A$ ,  $r_B$ ,  $\theta_j$  ( $j = 1,2,3$ ) przedstawione na Rys. 2, oraz związki kątów  $\varphi_{1j}$ ,  $\varphi_{2j}$ ,  $\varphi_{3j}$  ( $j = 1,2,3$ ) łączą i definiują konfigurację łańcucha kinematycznego dla robota typu DELTA. Dla punktu P leżącego na ruchomej platformie roboczej można zapisać zależności kinematyczne:

$$X_P = \cos \theta_j (r_A + L_2 \cos \varphi_{1j} + L_1 \cos \varphi_{3j} \cos(\varphi_{1j} + \varphi_{2j}) - r_B) - L_1 \sin \theta_j \sin \varphi_{3j} \quad (1)$$

$$Y_P = \sin \theta_j (r_A + L_2 \cos \varphi_{1j} + L_1 \cos \varphi_{3j} \cos(\varphi_{1j} + \varphi_{2j}) - r_B) - L_1 \cos \theta_j \sin \varphi_{3j} \quad (2)$$

$$Z_P = L_2 \sin \varphi_{1j} + L_1 \cos \varphi_{3j} \sin(\varphi_{1j} + \varphi_{2j}) \quad (3)$$

przyjmując  $j = 1,2,3$ , dla których  $[X_P, Y_P, Z_P]$  jest współrzędną punktu P określonego przez wektory  $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ , a przedstawionego na Rys. 2.

Upraszczając równania (1), (2) i (3), podnosząc do kwadratu oraz sumując otrzymujemy:

$$\begin{aligned} & \left[ (r + L_2 \cos \varphi_{1j}) \cos \theta_j - X_P \right]^2 + \left[ (r + L_2 \cos \varphi_{1j}) \cos \theta_j - Y_P \right]^2 \\ & + \left[ -L_2 \sin \varphi_{1j} - Z_P \right]^2 - L_1^2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie  $j = 1,2,3$  oraz  $r = r_A - r_B$ .

## 2.2. Zadanie proste kinematyki manipulatora typu DELTA

Zadanie proste kinematyki zdefiniowane zostało za pomocą równania (4), gdzie nieznanne jest położenie punktu  $P = [X_P, Y_P, Z_P]$  dla danych kątów  $\varphi_{1j}$ ,  $\varphi_{2j}$ ,  $\varphi_{3j}$  ( $j = 1,2,3$ ).

Rozwiązanie, zadania prostego kinematyki manipulatora dla współrzędnych punktu P, wymaga jednoczesnego rozwiązania trzech równań ( $j = 1,2,3$ ):

$$(X_P - X_j)^2 + (Y_P - Y_j)^2 + (Z_P - Z_j)^2 = L_1^2 \quad (5)$$

gdzie:

$$\begin{cases} X_j = r + L_2 \cos \varphi_{1j} \\ Y_j = r + L_2 \cos \varphi_{1j} \\ Z_j = -L_2 \sin \varphi_{1j} \end{cases} \quad (6)$$

Każde pojedyncze równanie (5) reprezentuje punkt środkowy sfery  $S_j[X_j, Y_j, Z_j]$  o promieniu  $L_1$ .

Rozwiązanie tego układu równań może zostać przedstawione jako przecięcie się trzech kul.

Ogólnie można uzyskać dwa rozwiązania konfiguracji manipulatora, przy których platforma robocza uzyskuje maksimum położenia względem podstawy (Kuhlbusch i Neumann, 2002; Łaski i Dindorf, 2005).

## 2.3. Zadanie odwrotne kinematyki manipulatora typu DELTA

Zadanie odwrotne kinematyki manipulatora zdefiniowane zostało w równaniu (4). Polega ono na wyznaczeniu kątów  $\varphi_{1j}$ ,  $\varphi_{2j}$ ,  $\varphi_{3j}$  ( $j = 1,2,3$ ) dla zadanego punktu  $P = [X_P, Y_P, Z_P]$ .

$$\begin{aligned} & (2rL_2 - 2L_2X_P \cos \theta_j - 2L_2Y_P \sin \theta_j) \cos \varphi_{1j} \\ & - 2rX_P \cos \theta_j + 2L_2Z_P \sin \varphi_{1j} - 2rY_P \sin \theta_j \\ & + X_P^2 + Z_P^2 + Y_P^2 + r^2 + L_2^2 - L_1^2 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

który może zostać napisany jako:

$$l_j \cos \varphi_{1j} + m_j \sin \varphi_{1j} - n_j = 0 \quad (8)$$

gdzie:

$$\begin{cases} l_j = 2rL_2 - 2L_2X_P \cos \theta_j - 2L_2Y_P \sin \theta_j \\ m_j = 2L_2Z_P \\ n_j = -2rX_P \cos \theta_j - 2rY_P \sin \theta_j + X_P^2 + Z_P^2 + Y_P^2 + r^2 + L_2^2 - L_1^2 \end{cases} \quad (9)$$

Równanie (8) może mieć wtedy i tylko wtedy rozwiązanie gdy:

$$\left| \frac{n_j}{\sqrt{l_j^2 + m_j^2}} \right| \leq 1 \Leftrightarrow n_j^2 - (l_j^2 + m_j^2) \leq 0 \quad (10)$$

## 3. ELEMENTY SKŁADOWE MANIPULATORA RÓWNOLEGŁEGO TYPU DELTA

Manipulator zaprojektowany w oparciu o strukturę typu DELTA składa się z czynnych, biernych członów napędowych oraz platformy roboczej. Na Rys. 3 przedstawiono oprawę łożyskową dla połączenia obrotowego wiążącego czynne człony napędowe z podstawą robota.

Na Rys. 4 przedstawiono bębenek nawojowy przy użyciu, którego zamieniany jest ruch postępowy napędów mięśniowych na ruch obrotowy czynnych członów napędowych (ramion). Na bębenek nawojowy nawinięto naprzemiennie stalowe linki i unieruchomiono ich końce.

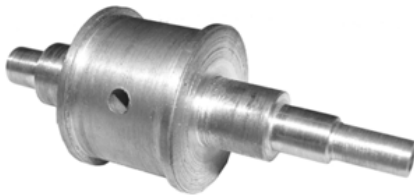
W celu przekazania ruchu na platformę roboczą z czynnych członów napędowych zastosowano przeguby kulowe

połączone sztywnym ciągnem (bierne człony napędowe) przedstawione na Rys. 5.

Napęd manipulatora stanowią sztuczne mięśnie pneumatyczne napędowe typu DMSP firmy Festo przedstawione na Rys. 6. Skrócenie wynosi około 20% długości nominalnej przy ciśnieniu zasilania 0,6MPa co stanowi skrócenie ~60mm dla pojedynczego napędu.



Rys. 3. Oprawa łożyska manipulatora



Rys. 4. Bębenek nawojowy manipulatora



Rys. 5. Bierne ramie napędowe z przegubami kulowymi



Rys. 6. Muskuł pneumatyczny typu DMSP-10-300 firmy Festo

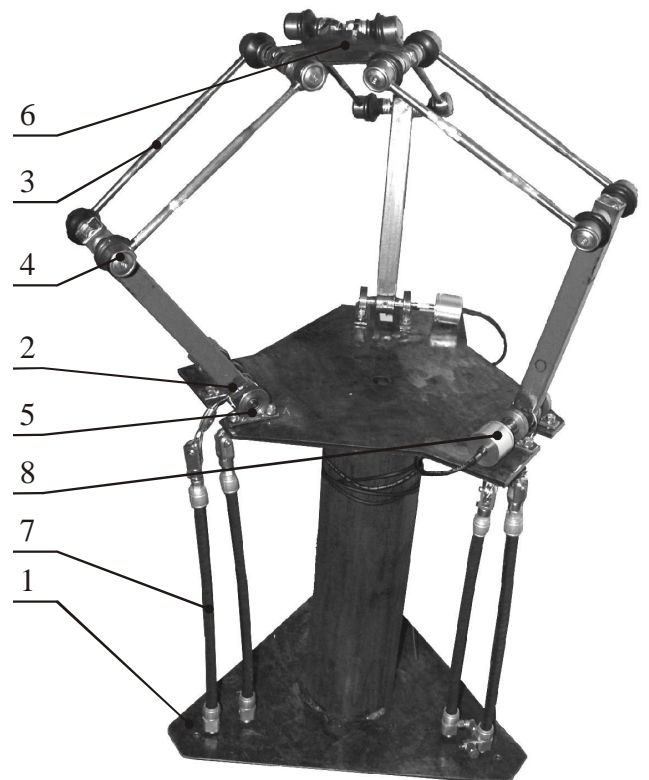
W zaproponowanym układzie sterowania konieczny jest sygnał zwrotny położenia kąowego czynnych członów napędowych. W tym celu zastosowano przetwornik pomiarowy z wyjściem analogowym 0-10V przedstawiony na Rys.7.



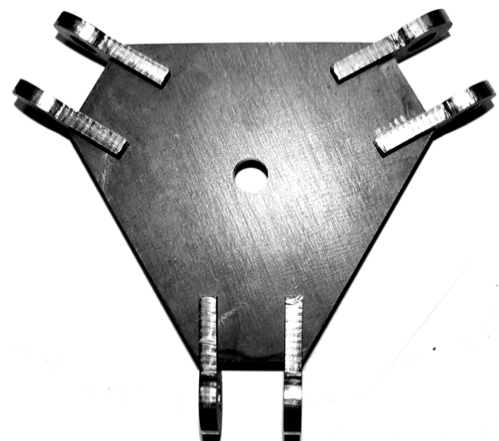
Rys. 7. Przetwornik położenia kąowego MAB36A firmy MEGA MOTIVE

#### 4. KONSTRUKCJA MANIPULATORA RÓWNOLEGŁEGO TYPU DELTA

Muskuły pneumatyczne przytwierdzono do podstawy za pomocą przegubów kulowych natomiast po przeciwnej stronie połączono je linkami stalowymi nawiniętymi na bębneki. Ramiona napędowe połączone są z bębenkami w sposób nierozłączny przekazując ruch z mięśni (ruch obrotowy) do platformy roboczej. Osie obrotu bębenków połączono z przetwornikiem położenia kąowego. Widok ogólny manipulatora przedstawiono na Rys. 8 i 9. Wysokość konstrukcji wraz z podstawą to 850mm a szerokość 550mm.



Rys. 8. Widok manipulatora równoległego typu DELTA: 1- podstawa, 2 - przeguby obrotowe, 3 - ramiona bierne, 4 - przeguby kulowe, 5 - obudowy łożyskowe, 6 - platforma robocza, 7 - muskuły napędowe, 8 - czujniki położenia kąowego.

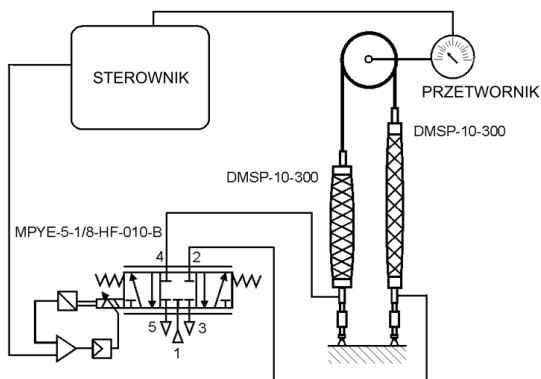


Rys. 9. Platforma robocza manipulatora typu DELTA

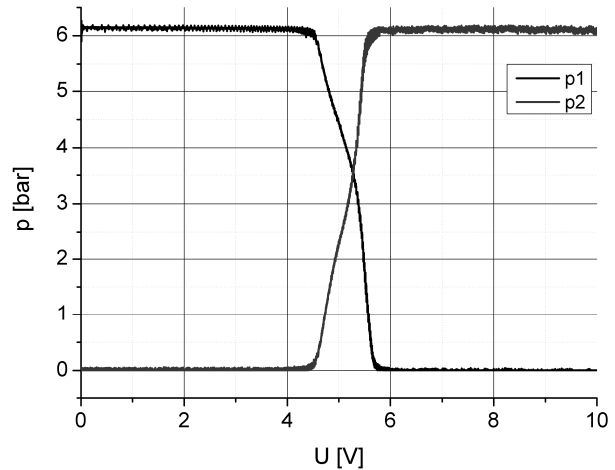
## 5. UKŁAD STEROWANIA MANIPULATORA TYPU DELTA

W projektowanym robocie elementami napędowymi są sztuczne mięśnie pneumatyczne. Muskuly (mięśnie) pneumatyczne są stosunkowo nowym rodzajem napędu pneumatycznego, który naśladuje zasadę działania naturalnego mięśnia. W porównaniu z tradycyjnym siłownikiem pneumatycznym, mięsień pneumatyczny ma znacznie większą siłę początkową, która zależy od ciśnienia panującego wewnątrz muskułu, długości początkowej i stopnia skrócenia muskułu oraz jego właściwości materiałowych. Wzrost ciśnienia powoduje pęcznienie muskułu i w następstwie skrócenie oraz zmianę siły ciągnącej. Mięsień pneumatyczny ma do 10 razy większą siłę początkową w porównaniu z siłownikiem tłokowym tej samej średnicy i jest szczelny ze względu na zastosowane materiały konstrukcyjne. Charakteryzuje się także wysoką dynamiką, brakiem efektu ruchu skokowego (zjawisko *stick-slip*). Położenia pośrednie muskułu pneumatycznego można prosto uzyskać przez regulację ciśnienia. Aktuatory mięśniowe znajdują zastosowanie jako elementy napędowe w robotach mobilnych, antropomorficznych, bionicznych i humanoidalnych, manipulatorach fizjoterapeutycznych, protezach, ortezach i egzoskieletonach, a także w automatyzacji produkcji.

W projekcie robota użyto trzy pary mięśni pracujących przeciwobnie i są to muskuly pneumatyczne typu DMSP-10-300 (Festo) (o średnicy 10mm i długości 300mm). Natomiast elementami sterującymi są zawory proporcjonalne typu MPYE-5-1/8-HF-010-B (Festo). Do pomiaru położenia kąтового pojedynczego ramienia zastosowano przetworniki położenia kąтового typu MAB36A (MEGA MOTIVE) o zakresie pomiarowym  $0\div 360^\circ$  z wyjściem analogowym (0-10V). Zawór proporcjonalny przepływowy MPYE-5-1/8-HF-010-B jest zaworem 5/3 (pięciopozycyjnym) sterowanym napięciowo (0-10V). Jest to zawór o przepływie nominalnym 700 l/min i częstotliwości przełączania około 75Hz. Pomimo tego że muskuly pneumatyczne są elementami sterowanymi przez zmiany ciśnienia w badaniach zastosowano proporcjonalny zawór przepływowy ze względu na jego charakterystykę ciśnieniową  $p=f(U)$  (Rys. 11) oraz stosunkowo krótki czas przełączania (tab. 1). Na rys. 10 przedstawiono schemat sterowania dla jednej pary napędowej manipulatora.



Rys. 10. Schemat sterowania dla jednej pary napędowej manipulatora typu DELTA



Rys. 11. Charakterystyka zaworu proporcjonalnego MPYE-5-1/7-HF-010-B

W zakresie napięć sterujących 4,4÷5,6V proporcjonalny zawór przepływowy MPYE-5-1/8-HF-010-B ma charakterystykę ciśnieniową zbliżoną do liniowej. Tą interesującą częścią charakterystyki zaworu wykorzystano w sterowaniu muskulami pneumatycznymi.

Tab. 1. Czasy odpowiedzi i czasy jałowe zaworu proporcjonalnego MPYE-5-1/7-HF-010-B

zadawane napięcia	czasy odpowiedzi	czasy jałowe	zadawane napięcia
10V→0V	14,4 ms	2,0 ms	10V→0V
0V→10V	15,1 ms	1,3 ms	0V→10V

Aby zaistniał kontrolowany ruch platformy roboczej konieczne jest więc sterowanie trzema parami mięśni ze sprzężeniem zwrotnym położenia kąтового ramion. W tym celu zaproponowano użycie systemu czasu rzeczywistego dSPACE z oprogramowaniem Matlab/Simulink.

## 6. WNIOSKI

W pracy opisano projekt manipulatora równoległego typu DELTA z pneumatycznymi aktuatorami mięśniowymi. Przedstawiono konstrukcję wraz z opisem zależności geometrycznych. Manipulator tego typu powinien cechować się dużą dynamiką, łagodnym startem i zatrzymaniem. O cechach manipulatora można wnioskować na podstawie własności zaproponowanych napędów. Struktura posiada trzy stopnie swobody. Przedstawiono także koncepcję sterowania muskulami za pomocą proporcjonalnych zaworów przepływowych. Zaletą takiego rozwiązania jest zastosowanie tylko jednego elementu sterującego parą mięśni oraz możliwość sterowania pozycyjnego (kąтового). Cechą negatywną zastosowanych napędów mięśniowych typu DMSP jest możliwość uzyskania wstępnego rozciągnięcia w niewielki zakresie nie przekraczającym 1% długości nominalnej muskułu. Ta negatywna cecha wymusza sprawdzanie i odpowiednie ustawianie linek nawojowych na bębenkach

po włączeniu zasilania pneumatycznego. Do sterowania ciśnieniowego mięśniów pneumatycznych wykorzystano pewną część charakterystyki ciśnieniowej proporcjonalnego zaworu przepływowego. Manipulatory o takiej konstrukcji mogą znaleźć zastosowanie w procesach pakowania, paletyzacji, montażu oraz jako manipulatory rehabilitacyjne. Obecnie wykorzystywane są podobne konstrukcje lecz z elektrycznymi członami napędowymi. W dalszym etapie rozwoju konstrukcji autorzy wykonują badania eksperymentalne dokładności pozycjonowania przy różnych obciążeniach masywych manipulatora.

## PROJECT OF PNEUMATIC PARALLEL MANIPULATOR TYPE DELTA WITH PNEUMATIC MUSCLE ACTUATORS

**Abstract:** In the paper a design of electro-pneumatic parallel 3-DOF manipulator type of DELTA with pneumatic muscle actuator are presented. The solid model, construction, control system and design work are performed. Positioning control of pneumatic bi-muscular driving system was designed and constructed by means of xPC Target software of Matlab-Simulink package for rapid prototyping and hardware-in-the-loop simulation.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego nr N514 217038 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

### LITERATURA

1. **Dindorf R., Łaski P., Takosoglu J.** (2006), Vývoj prototypů pneumatických paralelních manipulator, (Prototyping of pneumatic parallel manipulator), *AUTOMA – Časopis pro Automatizační Techniku*, 1 (Czech Republic).
2. **Dindorf R., Łaski P.** (2006), Prototype of pneumatic parallel manipulator, *8<sup>th</sup> International Conference New Ways in Manufacturing Engineering*, Prešov 22–23 (Slovak Republic).
3. **Dindorf R., Łaski P.** (2005), Badania modelowe pneumatycznego manipulatora równoległego, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 6.
4. **Dindorf R., Łaski P.** (2005), Badania modelowe prototypu pneumatycznego manipulatora równoległego, *Mechanik*, 8-9. 2005.
5. **Dindorf R., Łaski P.** (2006), Symulacja ruchu pneumatycznego manipulatora równoległego, *Napędy i Sterowanie*, 6.
6. **Hirai S., Shimizu K., Kawamura S.**, *Vision-based Motion Control of Pneumatic Group Actuators*, Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ., Kusatsu., Japan.  
<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~hirai/>.
7. **Kuhlbusch W., Neumann R.** (2002), *Virtual Prototyping of a Parallel Robot actuated by Servo-Pneumatic Drives using ADAMS/Controls*, MSC.ADAMS European User Conference.
8. **Łaski P., Dindorf R.**: Badanie modelowe manipulatora elektropneumatycznego typu tripod. KKA'2005 – XV Krajowa Konferencja Automatyki. Warszawa 27-30 czerwca 2005.
9. **Merlet J. P.** (2000), *Parallel robot*, Springer Verlag, New York, London.
10. **Takeda Y., Funabashi H., Niwa Y., Higuchi M.** (2001), *Motion Control of In-Parallel Actuated Mechanisms Driven by Pneumatic Rubber Muscles*, Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan.
11. **Tsai L-W.** (1999), *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons, New York.