

ROZWÓJ KONSTRUKCJI I STEROWANIA PNEUMATYCZNEGO MANIPULATORA RÓWNOLEGŁEGO TYPU TRIPOD

Ryszard DINDORF*, Paweł ŁASKI**, Jakub TAKOSOGLU**

*Akademia Górniczo-Hutnicza, AL. Mickiewicza 30, 31-059 Kraków

**Politechnika Świętokrzyska, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

dindorf@agh.edu.pl, pawell@tu.kielce.pl, qba@tu.kielce.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono rozwój konstrukcji i sterowania pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod. Pneumatyczny manipulator równoległy składa się z podstawy, platformy roboczej i trzech pneumatycznymi napędów liniowych. Strukturę kinematyczną manipulatora tworzą trzy łańcuchy kinematyczne złożone z: uniwersalnego przegubu Kardana (U), przegubu pryzmatycznego (P) oraz przegubów obrotowych (R). Przegubami pryzmatycznymi są siłowniki pneumatyczne zastosowane jako osie napędowe. W pierwszej wersji manipulatora wykorzystano pneumatyczne siłowniki tłoczyskowe. Kolejna wersja manipulatora zbudowana została z pneumatycznych siłowników beztłoczyskowych. Ostateczna wersja pneumatycznego manipulatora równoległego o kinematyce 3-UPRR zbudowana została z trzech osi serwo-pneumatycznych złożonych z: siłowników beztłoczyskowych zintegrowanych z przetwornikami położenia i prędkości, serwozaworów, interfejsów osi, regulatora pozycjonowania i interfejsu Ethernet/CanBus.

1. WPROWADZENIE

W pracy przedstawiono etapy rozwoju prototypu pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod, zbudowanego w Zakładzie Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Pneumatyczny manipulator typu 3-UPRR składa się z podstawy umieszczonej na konstrukcji nośnej, ruchomej platformy roboczej, trzech osi serwo-pneumatycznych tworzących aktywne połączenia pryzmatyczne P, przegubów uniwersalnych Kardana U i przegubów obrotowych R. Zaproponowana struktura kinematyczna pneumatycznego manipulatora równoległego rozszerza dość liczną już architekturę tzw. przesuwanych manipulatorów równoległych (TPM, ang. *Translational Parallel Manipulator*) o trzech stopniach swobody (3-DoF, ang. *Degree of Freedom*). Uzyskane wyniki badań będą podstawą do budowy także innych struktur kinematycznych pneumatycznych manipulatorów równoległych typu tripod, hexapod, nanopod oraz szeregowo-równoległych typu tricept, których człony napędowe tworzyć będą osie serwo-pneumatyczne. Pneumatyczny manipulator równoległy typu tripod ma zastosowanie w manipulatorach i robotach montażowych oraz w manipulatorach rehabilitacyjnych i fizjoterapeutycznych. Na bazie platformy *Stewart-Gough'a* powstało wiele struktur kinematycznych równoległych (tripod i hexapod) oraz szeregowo-równoległych tzw. hybrydowych (tricept). Nazwy struktur kinematycznych manipulatorów równoległych wynikają z liczby stopni swobody oraz rodzaju połączeń par kinematycznych. W grupie manipulatorów równoległych o dwóch, trzech, czterech i sześciu stopniach swobody spotyka się architektury kinematyczne złożone z typowych połączeń przegubów: U (uniwersalny Kardana), R (obrotowy), P (pryzmatyczny), C (cylindryczny), S (sferyczny) i E (płaski). W grupie manipulatorów przesuwanych o trzech stopniach swobody 3-DoF TMP najczęściej spotka się struktury kinematyczne przestrzenne typu: 3-PUU,

3-UPU, 3-UPS, 3-CPU, 3-PUS, 3-PCRR oraz struktury kinematyczne płaskie typu: 3-RPR, 3-RRR, 3-PPR. Z przeglądu dostępnej literatury wynika, że występuje ponad 160 różnych rozwiązań kinematycznych manipulatorów równoległych (Merlet, 2000, Tsai, 1999).

Do obliczania liczby stopni swobody manipulatorów równoległych stosuje się następujący wzór (Dindorf, 2006, Łaski, 2006):

$$f = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

Korzystając ze wzoru (1) obliczono liczbę stopni swobody pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod:

$$f = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n d_i = 6(8 - 9 - 1) + 15 = 3 \quad (2)$$

gdzie: f – liczba stopni swobody manipulatora, l – liczba ruchomych członów manipulatora,

$$l = l_{po} + l_{pl} + l_{si} (l_{wz} + l_{ko}) = 1 + 1 + 3(1 + 1) = 8 \quad (3)$$

l_{po} – liczba podstaw, $l_{pl} = 1$, l_{pl} – liczba platform, $l_{si} = 3$, l_{wz} – liczba wózków na prowadnicy siłownika, $l_{wz} = 1$, l_{ko} – liczba przesuwanych korpusów siłownika, $l_{ko} = 1$, n – liczba połączeń przegubów i członów napędowych manipulatora,

$$n = l_{si} + l_{ppo} + l_{ppo} = 3 + 3 + 3 = 9 \quad (4)$$

l_{ppo} – liczba przegubów podstawy, $l_{ppo} = 3$, l_{ppl} – liczba przegubów platformy, $l_{ppl} = 3$, d – liczba odebranych stopni swobody,

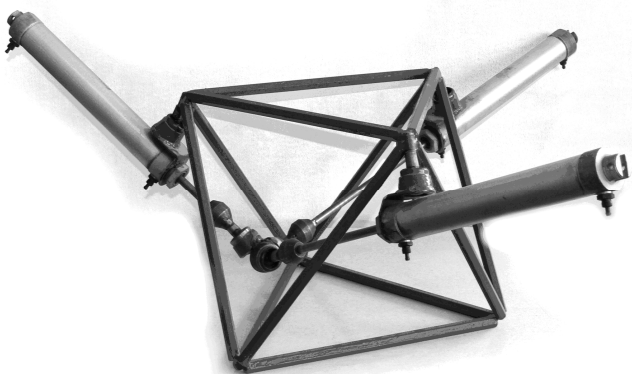
$$\sum_{i=1}^n d_i = l_{kpo} i_{ka} + l_{si} i_{si} + l_{opo} i_{ob} = 3 \cdot 2 + 3 \cdot 1 + 6 \cdot 1 = 15 \quad (5)$$

l_{kpo} – liczba przegubów kardana w podstawie, $l_{kpo} = 3$, i_{ka} – liczba stopni swobody przegubu kardana, $i_{ka} = 2$,

i_{si} – liczba stopni swobody siłownika, $i_{si} = 1$, l_{opl} – liczba przegubów obrotowych w platformie, $l_{opl} = 6$, i_{ob} – liczba stopni swobody przegubu obrotowego, $i_{ob} = 1$.

2. PROTOTYP PNEUMATYCZNEGO MANIPULATORA RÓWNOLEGŁEGO

W Zakładzie Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach prowadzone były prace konstrukcyjne nad budową pneumatycznego manipulatora równoległego. Pierwszy zbudowany prototyp manipulatora o trzech stopniach swobody wykonany został z siłowników pneumatycznych tłoczyskowych połączonych z konstrukcją nośną przegubami sferycznymi. Konstrukcję nośną wykonana została z prętów w kształcie krawędzi bocznych ośmiościanu foremego. Widok prototypu tego manipulatora przedstawiono na Rys. 1. Wersja uproszczona manipulator nie miała możliwości kontroli położenia punktu końcowego platformy roboczej, dlatego jego sterowanie było możliwe tylko przez teleoperatora. Te ograniczenia uniemożliwiały dalszy rozwój konstrukcji takiego manipulatora, ale jest on wykorzystywany do celów dydaktycznych.



Rys. 1. Widok prototypu pneumatycznego manipulatora równoległego z siłownikami tłoczyskowymi

2.1. Manipulator typu 3-UPU

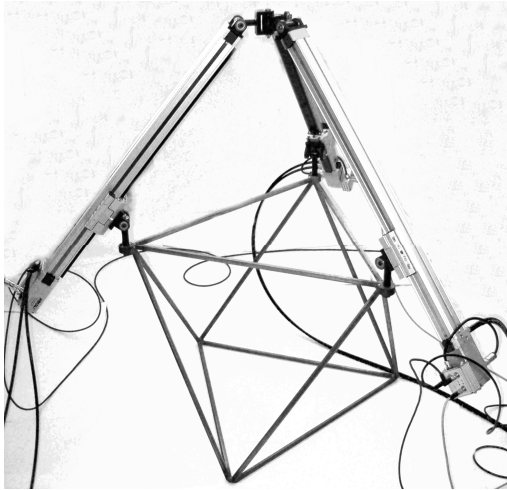
Podjęto prace nad kolejnym prototypem manipulatora równoległego typu tripod zbudowanego z siłowników bez-tłoczyskowych z wewnętrznym pomiarem położenia, połączonych z podstawą i platformą roboczą przegubami Kardana. Suwaki przesuwne siłowników zostały połączone z podstawą, natomiast końce siłowników połączone zostały z platformą roboczą za pomocą przegubów uniwersalnych Kardana. Utworzona w ten sposób konstrukcja ma strukturę kinematyczną równoległą typu 3-UPU (gdzie: U - przegub uniwersalny Kardana, P – przegub pryzmatyczny). Platforma robocza utworzona z przegubów Kardana przemieszcza się równoległe do podstawy. Na Rys. 2 przedstawiona została konstrukcja takiego prototypu manipulatora zbudowanego z pneumatycznych siłowników bez-tłoczyskowych jako osi napędowych. Konstrukcja tego manipulatora oparta została na lekkiej i sztywnej konstrukcji w postaci krawędzi bocznych ośmiościanu foremego.



Rys. 2. Prototyp pneumatycznego manipulatora równoległego typu 3-UPU

2.2. Manipulator typu 3-UPRR

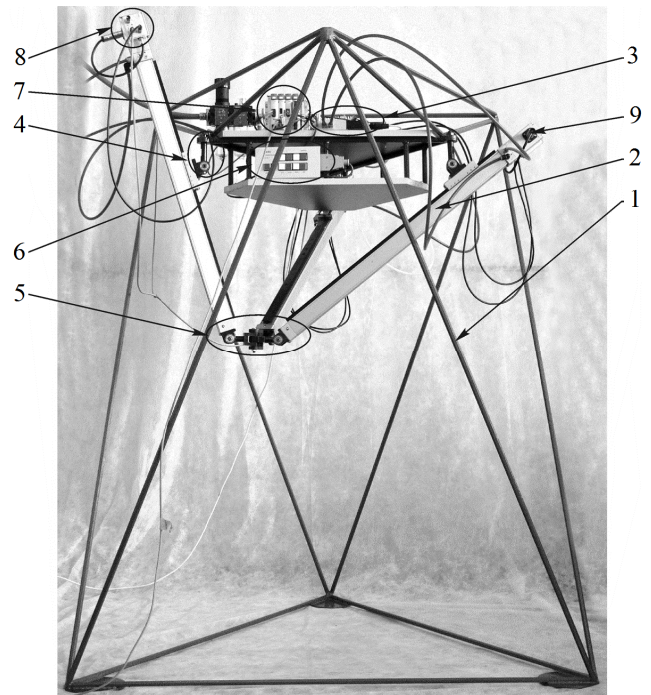
Konstrukcja pneumatycznego manipulatora równoległego typu 3-UPU nie spełniła oczekiwań ze względu na problem z kontrolą obrotu platformy względem jej pionowej osi. Wobec tego podjęto dalsze prace nad usprawnieniem konstrukcji manipulatora równoległego. Konstrukcja ta została zmodyfikowana przez zmianę struktury kinematycznej platformy roboczej po zastosowaniu wspólnej osi obrotu za pomocą przegubów obrotowych R. W wyniku zmian konstrukcyjnych manipulatora trzy przeguby Kardana U (o dwóch stopniach swobody) zastąpiono czterema przegubami obrotowymi R (o jednym stopniu swobody) (Łaski i inni, 2005, 2006, 2007). Manipulator z tak zaprojektowaną platformą roboczą przedstawiono Rys. 3, przy czym konstrukcja nośna (podstawa) nie uległa zmianie. Ostateczną wersję konstrukcji prototypu manipulatora równoległego typu tripod o strukturze kinematycznej 3-UPRR przedstawiono na Rys. 4. Prototyp pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod składa się z podstawy umieszczonej na konstrukcji nośnej, ruchomej platformy roboczej, trzech osi serwopneumatycznych tworzących aktywne połączenia pryzmatyczne P, przegubów uniwersalnych Kardana U i przegubów obrotowych R (Dindorf i inni, 2002, 2005, 2006). Jeden serwonapęd manipulatora tworzą: bez-tłoczyskowy siłownik pneumatyczny DGPIL zintegrowany z magnetostrykcyjnym pomiarem położenia typu MTS Temposonic, serwozawór proporcjonalny 5/3 typu MPYE-5-1/8-HF, interfejs SPC-AIF-MTS sieci komunikacyjnej CAN-BUS oraz regulator osi ze sterownikiem programowalnym SPC-200. Do sterowania osi serwopneumatycznych manipulatora równoległego zastosowano przemysłowy sterownik SPC-200, a do akwizycji danych pomiarowych wykorzystano program *WinPisa*.



Rys. 3. Prototyp pneumatycznego manipulatora równoległego typu 3-UPRR

Sterownik SPC-200 z programem *WinPisa* należą do standardowego wyposażenia serwonapędów pneumatycznych firmy Festo. Sterowniki SPC-200 realizują regulację ze sprzężeniem od zmiennych stanu, ich struktura znacznie utrudnia samoidentyfikację serwonapędów pneumatycznych i automatyczny dobór nastaw regulatora. Sterownik SPC-200 ma ograniczone możliwości sterowania pneumatycznym manipulatorem równoległym, ograniczony tylko do sterowania od punktu do punktu PTP (ang. Point to Point). W konsekwencji prowadzi to do ograniczenia zakresu ruchu, mniejszej dokładności pozycjonowania i niezadowalających właściwości dynamicznych manipulatora równoległego. Program *WinPisa* uniemożliwia w prosty sposób zapisanie danych eksperymentalnych i ich dalszą analizę z użyciem innych programów komputerowych. Utrudniło to w znaczny sposób analizę wyników badań doświadczalnych manipulatora równoległego oraz ich porównanie z wynikami symulacyjnymi. Ponieważ w wieloosiowych manipulatorach pneumatycznych występują problemy z dokładnością pozycjonowania punktu TCP (ang. Tool Center Point), dlatego istnieje potrzeba zastosowania ich kompleksowego sterowania przy wykorzystaniu wyrafinowanych metod obliczeniowych.

W programie *SolidWorks* zbudowano model bryłowy manipulatora, który posłużył do jego analizy geometrycznej i kinematycznej. Badania symulacyjne manipulatora przeprowadzono na modelu zastępczym wykonanym przy wykorzystaniu biblioteki *SimMechanics* w środowisku programu *Matlab-Simulink*. Badania modelowe ukierunkowane zostały na wyznaczenie położenia i orientacji oraz odwzorowania trajektorii ruchu punktu środkowego TCP platformy roboczej manipulatora równoległego na podstawie przemieszczeń beztłoczkowych siłowników pneumatycznych sterowanych serwowaworami. Analizując animację ruchu manipulatora równoległego wielokrotnie zmieniano i modyfikowano jego konstrukcję w celu uzyskania możliwie jak największej przestrzeni roboczej oraz unikania kolizji elementów napędowych – siłowników pneumatycznych. Badania przeprowadzone na modelach wirtualnych pozwoliły na wyciągnięcie wniosków dotyczących optymalizacji konstrukcji, własności kinematycznych i dynamicznych oraz regulacji manipulatora równoległego.



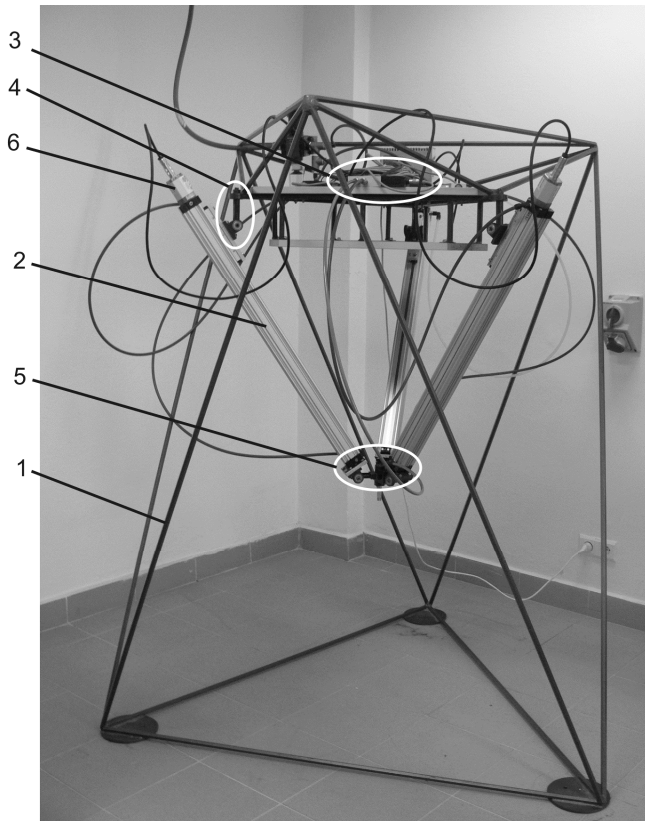
Rys. 4. Konstrukcja i sterowanie pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod o kinematyce 3-UPRR:
1 – podstawa, 2 – pneumatyczny siłownik beztłoczkowy, 3 – zawory proporcjonalne, 4 – przeguby Kardana, 5 – platforma robocza, 6 – panel sterowania, 7 – sterownik SPC-200, 8 – interfejs komunikacji sieciowej

2.3. Manipulator typu 3-UPRR z systemem sterowania dSPACE i procesorem DSP

Efektom końcowym rozwoju konstrukcji i sterowania manipulatora pneumatycznego typu tripod jest prototyp z siłownikami beztłoczkowymi z bezpośrednim wewnętrznym pomiarem położenia i prędkości tłoka oraz z układem sterowania opartym na systemie dSPACE i procesorze sygnałowym DSP (Dindorf i inni, 2010). Na Rys. 5 przedstawiono widok ogólny ostatecznego prototypu manipulatora równoległego typu tripod z nowymi serwowpneumatycznymi osiami napędowymi. Jednostki napędowe manipulatora stanowią beztłoczkowe siłowniki pneumatyczne typu D32x600 b/tł ZS sp firmy Prema. W celu poprawy jakości sterowania wewnątrz siłowników beztłoczkowych zabudowano przetworniki bezpośredniego pomiaru położenia i prędkości tłoka siłownika firmy Balluff. Układ sterowania w czasie rzeczywistym stanowi zaawansowany system czasu rzeczywistego dSPACE do szybkiego prototypowania i symulacji HIL (ang. Hardware-in-the-Loop). Głównym celem technologii szybkiego prototypowania jest synteza i testowanie projektowanych algorytmów regulacji zanim regulator zostanie zrealizowany sprzętowo.

Na etapie prototypowania funkcje regulatora spełnia specjalna architektura sprzętowa dSPACE. Na Rys. 6 przedstawiono widok ogólny systemu czasu rzeczywistego dSPACE. System dSPACE składa się z głównej karty DS1006 Processor Board przeznaczonej do złożonych i czasochłonnych operacji w czasie rzeczywistym, karty 32 wejść analogowych DS2002 Multi Channel A/D Board,

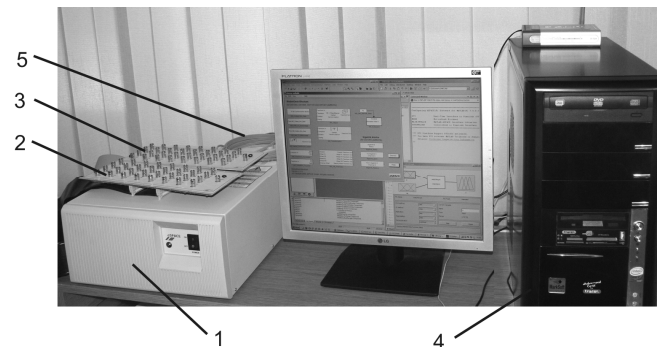
karty 32 wyjść analogowych DS2103 Multi Channel D/A Board. Wszystkie karty (moduły) mieszczą się w obudowie PX10 Expansion Box, która wyposażona jest w zasilacz oraz światłowodową kartę komunikacyjną DS814 z komputerem PC, gdzie budowany jest algorytm sterowania np. w środowisku Matlab/Simulink.



Rys. 5. Elementy konstrukcji manipulatora typu tripod:
1 – podstawa, 2 – siłowniki, 3 – serwozawory 5/3,
4 – przeguby Kardana, 5 – platforma robocza, 6 – przetwornik pomiaru położenia i prędkości tłoka siłownika

Do kart wejść i wyjść analogowych przeznaczone są panele przyłączeniowe służące do fizycznego podłączenia urządzeń i czujników sterowanych systemem dSPACE. W ten sposób skonfigurowany system dSPACE można będzie w przyszłości rozszerzyć o dodatkowe moduły np. wejść i wyjść cyfrowych, interfejsy komunikacji CAN, szeregowy np. typu RS, PROFIBUS, FlexRay. Karty dSPACE mogą być instalowane w komputerach PC, komputerach przemysłowych oraz w obudowach zwanych „autobox”, dołączonych do szyn ISA, PCI, ME lub poprzez sieć CAN-BUS, Ethernet i inne. Program symulacyjny czasu rzeczywistego i obsługa interfejsów są realizowane przez oprogramowanie zbudowane z karty prototypowej. Zmiany algorytmu sterowania odbywają się na zasadzie wymiany programu sterującego kartą dSPACE. Program sterujący przygotowuje się w środowisku Matlab-Simulink lub innym na podstawie schematów blokowych. Działające w otoczeniu Matlaba-Simulinka zintegrowane oprogramowanie i sprzęt dSPACE tworzą uniwersalne środowisko do szybkiego prototypowania (ang. rapid prototyping): dSPACE Control Development System, MLIB (Matlab

DSP Interface Library), MTRACE – Realtime data acquisition directly from MATLAB, RTI-Real-Time Interface/Multiprocessor. Przetworniki położenia i prędkości oraz przetworniki zaworów proporcjonalnych są fizycznie podłączone do systemu dSPACE. Algorytm sterowania wraz z interpolatorem zbudowano w środowisku Matlab-Simulink. Skompilowany algorytm sterowania dzięki dostarczonemu kompilatorowi systemu dSPACE jest wysyłany do głównej karty DS1006 Processor Board. Tak przygotowany system stanowi system sterowania czasu rzeczywistego trójosiowego pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod.



Rys. 6. System sterowania manipulatora typu tripod: 1 – stacja bazowa dSPACE, 2 – panel wejść, 3 – panel wyjść, 4 – komputer z oprogramowaniem dSPACE oraz Matlab/Simulink, 5 – przewód światłowodowy kart komunikacyjnych

3. PODSUMOWANIE

W Zakładzie Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach prowadzone są prace naukowo-badawcze dotyczące rozwoju równoległych struktur kinematycznych w manipulatorach pneumatycznych sterowanych serwonapędami pneumatycznymi. W ramach tych prac analizowano możliwości zastosowania przemysłowych serwonapędów pneumatycznych jako czynnych osi napędowych w wieloosiowych manipulatorach pneumatycznych o kinematyce szeregowej (manipulatorach kartezyjskich jedno- dwu- i trójosiowych) oraz o kinematyce równoległej (manipulatorach typu tripod, hexapod). W ramach przeprowadzonych prac badawczych opracowano oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne oraz zbudowano prototyp pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod, który charakteryzuje się nową strukturą kinematyczną 3-UPRR. Zaproponowana struktura kinematyczna pneumatycznego manipulatora równoległego rozszerza dość liczną już architekturę tzw. przesuwnych manipulatorów równoległych o trzech stopniach swobody. W projekcie badawczym przeprowadzono badania modelowe, symulacyjne i doświadczalne manipulatora równoległego typu tripod z serwonapędami pneumatycznymi. Wykonano analizę dynamiki, badania symulacyjne oraz badania eksperymentalne pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod. Osie serwonapędowe były sterowane sterownikiem SPC-200 z oprogramowaniem *WinPisa*, regulatora rozmytym PLC oraz układem sterowania opartym na systemie dSPACE i procesorze

sygnałowym DSP. Badano odporność manipulator na zmiany masy ruchomej obciążającej efektor manipulatora w szerokim zakresie zadanych położeni i prędkości siłowników pneumatycznych, analizowano także możliwość realizacji dowolnych trajektorii ruchu efektora platformy roboczej (Dindorf i inni, 2010). Prototyp pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod o kinematyce 3-UPRR prezentowany był na Międzynarodowych Targach Poznańskich ITM Polska 2006 – „Innowacje Technologie Maszyny Polska”, w salonie ENERGIA i parku tematycznym PNEUMA – „Pneumatyka dla przemysłu” oraz był tematem licznych publikacji krajowych i zagranicznych.

LITERATURA

1. **Dindorf R., Łaski P., Takasoglu J.** (2005), Control of electro-pneumatic 3-DOF parallel manipulator using fuzzy logic, *Hydraulika a Pneumatyka* (Slovak Republic), No. 1-2.
2. **Dindorf R., Łaski P., Takasoglu J.** (2006), Vývoj prototypů pneumatických paralelních manipulator. (Prototyping of pneumatic parallel manipulator), *AUTOMA – Časopis pro Automatizační Techniku* (Czech Republic), No. 1.
3. **Dindorf R., Łaski P.** (2002), Manipulatory z kinematyką równoległą, *Pneumatyka*, nr 6.
4. **Dindorf R., Łaski P.** (2005), Badania modelowe prototypu pneumatycznego manipulatora równoległego, *Mechanik*, nr 8-9.
5. **Dindorf R., Łaski P., Takasoglu J.** (2010), Raport końcowy z projektu badawczego nr N50203032/2350 finansowanego przez MNiSW. Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Kielce 2010.
6. **Łaski P., Dindorf R.** (2007), Prototype of pneumatic parallel manipulator, *Hydraulika a Pneumatika* (Slovak Republic), No. 1.
7. **Łaski P.** (2006), Badanie własności kinematycznych i dynamicznych wieloosiowego manipulatora elektropneumatycznego o strukturze platformy Stewarta, *Praca doktorska*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2006.
8. **Łaski P., Dindorf R.** (2005), Badanie modelowe manipulatora elektropneumatycznego typu tripod, *KKA'2005 - XV Krajowa Konferencja Automatyki*, Warszawa 27-30 czerwca 2005, t.II.
9. **Merlet J. P.** (2000), *Parallel robot*, Springer, Verlag, New York, London.
10. **Tsai L-W.** (1999), *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons, New York.

DESIGN AND CONTROL DEVELOPMENT OF A PNEUMATIC PARALLEL MANIPULATOR OF TRIPOD TYPE

Abstract: The paper deals with design and control development of pneumatic parallel manipulator of tripod type. Pneumatic parallel manipulator consists of fixed base, moving platform and three pneumatic linear motions. Kinematic structure of manipulator is composed of three kinematic chains containing universal joint (U), prismatic joint (P) and revolute joints (R). Prismatic joints are pneumatic cylinders used as axis drives. In the first version of manipulator rod pneumatic cylinder was applied. The next version contained rodless pneumatic cylinder. The final version of pneumatic parallel manipulator of 3-UPRR kinematic structure with servo-pneumatic axis consists of: rodless pneumatic cylinder with integral position and velocity transducer, servo-valves, axis interfaces, positioning axis sub-controller and Ethernet/Can Bus interface.