

doi:10.15199/48.2016.09.35

## Interaktywny manipulator typu platforma Stewarta sterowany w środowisku LabVIEW

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono konstrukcję sprzętu oraz realizację oprogramowania sterującego platformą Stewarta – manipulatora o sześciu stopniach swobody. Platformę wykonano w technice druku 3D, w roli siłowników użyto serwomechanizmów modelarskich, dodatkowo wprowadzono kanał zwrotny (interaktywny) w postaci panelu dotykowego. Do wyznaczenia właściwego sterowania platformą wyznaczono jej model, obliczono kinematykę odwrotną i wykorzystano regulator typu PID. Sterowanie zostało zrealizowane w środowisku LabVIEW firmy National Instruments. Sterowanie serwomechanizmami oraz odczyty panelu dotykowego zrealizowano poprzez moduły rodziny CompactDAQ. Wyniki przeprowadzonych pomiarów pokazały poprawne zachowanie się manipulatora, a dodatkowy panel dotykowy pozwolił na interakcję z urządzeniem.

**Abstract.** The paper presents the design and implementation of hardware and control software of platform Stewart - manipulator with six degrees of freedom. The base of platform was made as 3D print, RC servomechanisms were used as actuators. Additional touch panel offers a return (interactive) channel. To determine the appropriate control of the platform a proper model was performed, the inverse kinematics was calculated and the PID regulator was used. The control was implemented in National Instruments LabVIEW environment. To drive the servomechanisms and to read the touch panel two I/O modules in CompactDAQ was used. The results of the measurements showed the correct behavior of the manipulator, while the additional touch panel allows to interact with the device. (**An interactive Stewart platform controlled in LabVIEW environment**).

**Słowa kluczowe:** Platforma Stewarta, manipulator, regulator PID, serwomechanizm, LabVIEW, CompactDAQ.

**Keywords:** Stewart platform, manipulator, PID regulator, actuator, LabVIEW, CompactDAQ.

### Wprowadzenie

Platforma Stewarta (por. rys. 1) to manipulator o sześciu stopniach swobody umożliwiający ruch w trzech płaszczyznach ( $xy$ ,  $xz$ ,  $yz$ ) oraz obroty wokół trzech osi ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) [1]. Manipulator ten charakteryzuje się wieloma zaletami, którymi przewyższa np. manipulatory szeregowe: dużą dokładność pozycjonowania, sztywność konstrukcji, wysoki współczynnik przeniesionego obciążenia do wysokości konstrukcji [2, 3]. Stosowany jest w wielu dziedzinach nauki i przemysłu: od przyrządów do pozycjonowania stołów i narzędzi w medycynie, przez roboty kroczące, pozycjonery anten, aż do konstrukcji używanych w przemyśle ciężkim [4]. W większości realizacji praktycznych wykorzystywane jest aż sześć siłowników liniowych, co powoduje, że platforma Stewarta umożliwia przemieszczanie bardzo dużych i ciężkich obiektów, np. kokpitu pilota w symulatorach jazdy i lotu. Rozważania dotyczące modeli matematycznych i rozwiązania problemu sterowania platformą Stewarta są przedmiotem wielu prac naukowych. Dotyczą one przede wszystkim kinematyki prostej, odwrotnej oraz dokładności pozycjonowania [2, 3, 5, 6].

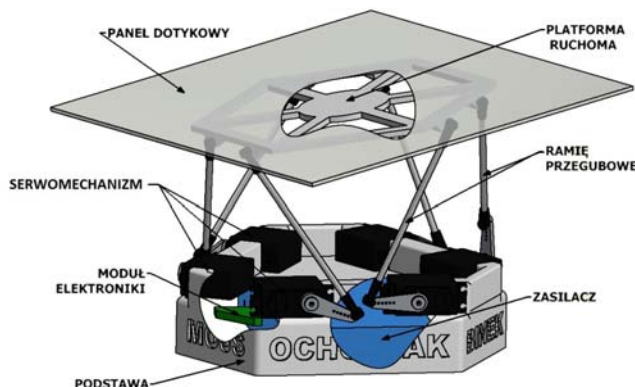
Prezentowany manipulator oprócz niekwestionowanych zalet w zastosowaniach przemysłowych ma cenne walory dydaktyczne. W niniejszej pracy przedstawiono projekt i wykonanie platformy Stewarta przeznaczonej do laboratorium systemów sterowania [7]. Przygotowane stanowisko laboratoryjne umożliwia zapoznanie się z modelem manipulatora, wprowadzenie regulacji nastaw sterowania, realizację regulatora PID oraz interakcję z urządzeniem za pomocą dodatkowego panelu dotykowego umieszczonego na platformie. W projekcie wykorzystano sprzęt i oprogramowanie firmy National Instruments, co z jednej strony pozwala na przejrzyste przedstawienie algorytmów sterujących, a drugiej strony na szybkie i dokładne sterowanie za pomocą typowych modułów stosowanych w badaniach i przemyśle.

### Platforma Stewarta

Zaprojektowana i wykonana konstrukcja platformy Stewarta (rys. 1) składa się z podstawy, sześciu siłowników połączonych przegubowymi ramionami z ruchomą platformą.

Podstawę oraz platformę ze względu na wymaganą sztywność i precyzję wykonania zrealizowano w formie

druku 3D. Zastosowano technikę FDM (ang. *fused deposition modeling*) polegającą na warstwowym nakładaniu uplastycznionego materiału, w tym przypadku tworzywa ABS [8]. Materiał ten wraz z użytą techniką druku zapewniają dostateczną wytrzymałość wydrukowanego elementu oraz dokładność wydruku na poziomie 0,1 mm. Modele drukowanych części zostały wykonane w programie *Autodesk Inventor*, następnie, za pomocą oprogramowania *Slic3r* przekonwertowane do postaci rozkazów *G-code* i ostatecznie przesłane do drukarki programem *Pronterface*. Wydruk podstawy, ze względu na stosunkowo duże gabaryty (długość boku podstawy około 20 cm) został podzielony na kilka części, a następnie sklejony w całość.



Rys. 1. Model interaktywnego manipulatora typu platforma Stewarta

W podstawie, w specjalnie przygotowanych do tego celu gniazdach, osadzono sześć serwomechanizmów modelarskich służących jako siłowniki. Użycie serwomechanizmów zamiast siłowników liniowych jest co prawda rzadziej spotykane w praktycznych realizacjach platformy Stewarta [2, 9, 10], zdecydowano się jednak na ten wariant z kilku powodów. Serwomechanizmy modelarskie są relatywnie tanie, szybkie, oferują stosunkowo duży moment obrotowy i trzymający oraz mogą być sterowane cyfrowym sygnałem PWM (ang. *pulse-width modulation*). Do wad serwomecha-

nizmów w rozważanym manipulatorze należy zaliczyć bardziej złożony model kinematyki oraz mniejszy od siłowników liniowych zakres roboczy platformy. Wybrano serwomechanizmy MG996R firmy TowerPro [11]. Zapewniają one duży, w stosunku do swoich rozmiarów, moment trzymający wynoszący 1,08 Nm przy zasilaniu 6 V oraz prędkość kątową równą 0,14 s/60° w zakresie pracy 0° – 120° [11]. Dodatkowymi zaletami są wewnętrzna cyfrowa jednostka sterująca oraz podwójne łożyskowanie. Orczyki serwomechanizmów połączono z platformą ramionami zakończonym przegubami kulowymi.

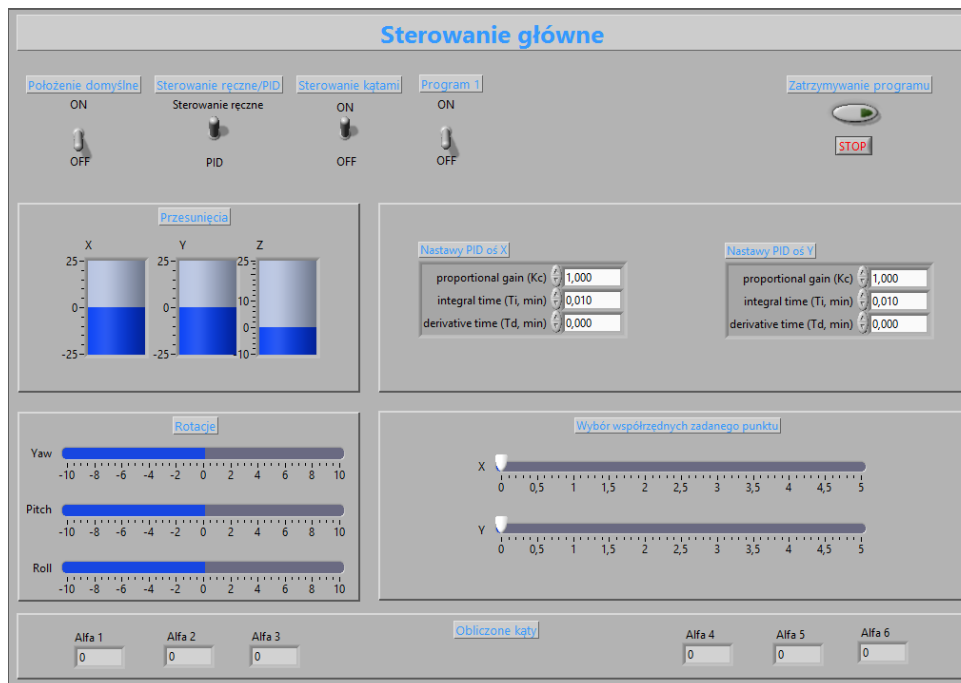
Aby w pełni wykorzystać możliwości techniczne serwomechanizmów konieczne było zapewnienie wydajnego i stabilnego zasilania. Według dokumentacji serwomechanizm MG996R może chwilowo pobierać prąd o natężeniu do 2,5 A [11], w praktyce okazało się, że prąd ten nie przekracza 1,5 A. Wybrano zasilacz RSP-100-7,5 firmy Mean Well (7,1 V – 8,25 V/ 13,3 A), który został umieszczony w podstawie platformy, co korzystnie zwiększyło jej masę.

Na platformie ruchomej umieszczono duży (322 x 247 mm) rezystancyjny, czteroprzewodowy panel dotykowy o

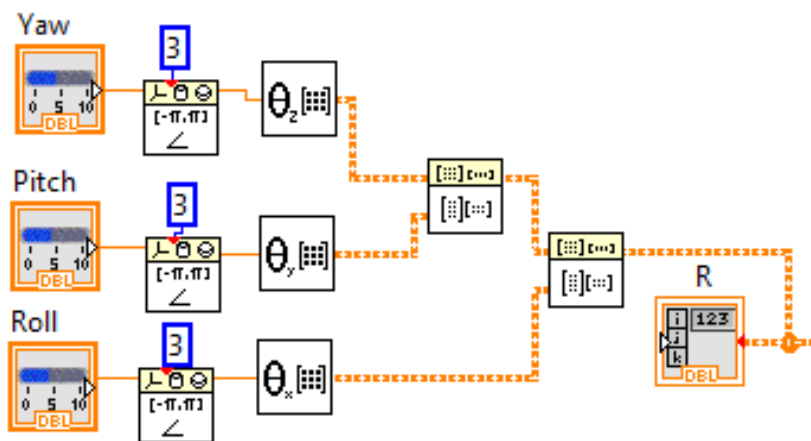
przekątnej 15" (stosunek długości boków 4:3). Panel może służyć do interaktywnego sterowania platformą, a także być elementem sprzężenia zwrotnego w układzie automatycznej regulacji, przy pozycjonowaniu elementów ruchomych umieszczonych na platformie (np. kulki). Do odczytu położenia platformy można wykorzystać także system wizyjny, jednak wybrane rozwiązanie gwarantuje wysoką dokładność odczytu pozycji rzędu 0,1 mm oraz prostotę obsługi.

### Konstrukcja interfejsu sterującego

Do sterowania prezentowanego manipulatora użyto sprzętu i oprogramowania firmy National Instruments. W warstwie sprzętowej wykorzystano sterownik (chassis) CompactDAQ z dwoma modułami wejścia-wyjścia: cyfrowym NI 9401 i analogowym NI 9215. Moduł cyfrowy NI 9401 [12] posiada 8 kanałów wejściowo/wyjściowych działających na poziomie 5V/TTL, natomiast moduł analogowy to cztery przetworniki analogowo-cyfrowe o rozdzielczości 16 bitów. Kanały cyfrowe posłużyły do sterowania serwomechanizmami i panelem dotykowym, natomiast kanały analogowe do odczytu pozycji z panelu dotykowego.



Rys. 2. Główne okno sterowania manipulatorem w środowisku LabVIEW

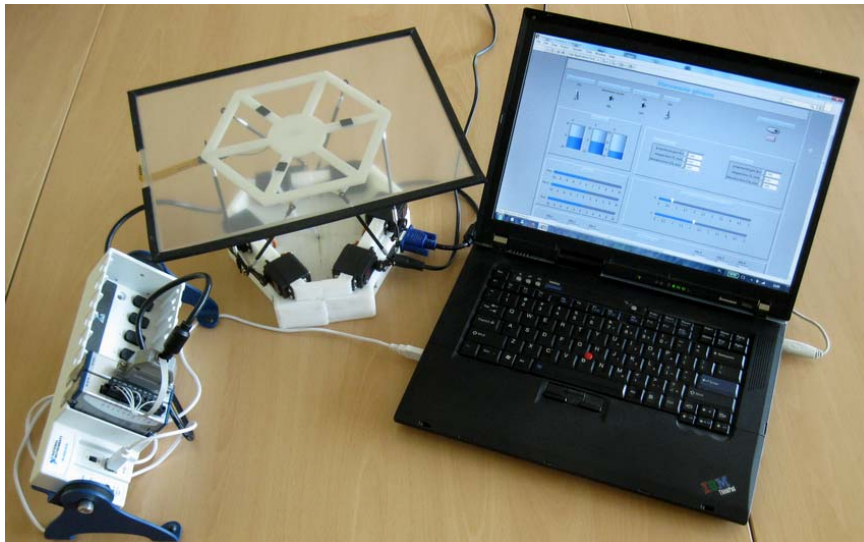


Rys. 3. Fragment programu w LabVIEW obliczający macierze rotacji

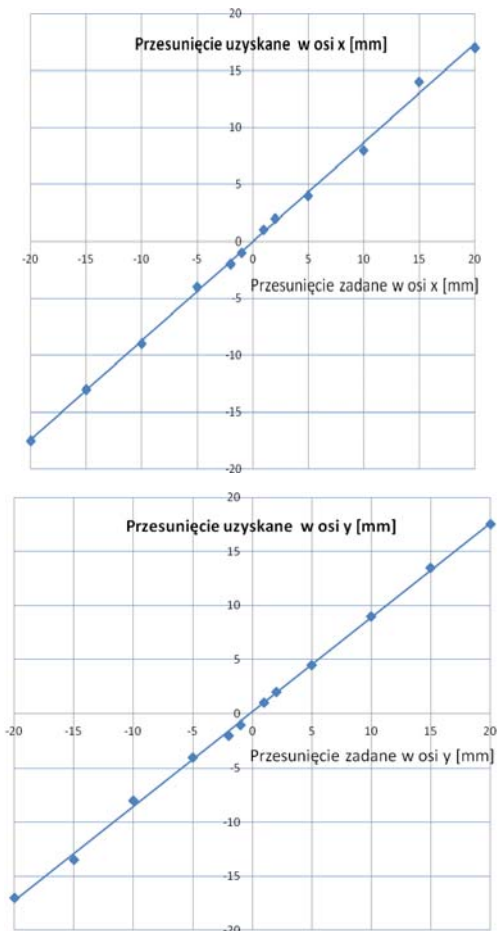
Program do sterowania manipulatorem za pomocą sterownika CompactDAQ został przygotowany w środowisku LabVIEW. Realizuje on następujące funkcje: panel użytkownika (sterujący), obsługa sprzętu (serwomechanizmy, ekran), obliczanie kinematyki odwrotnej oraz regulator PID. Funkcje te zostały podzielone na cztery oddzielne ekrany. Możliwe jest także sterowanie ruchami platformy za pomocą ekranu dotykowego.

Przykładowy ekran sterujący (panel użytkownika) przedstawia rysunek 2, natomiast rysunek 3 pokazuje fragment programu LabVIEW obliczający macierze rotacji. W celu utworzenia macierzy rotacji posłużono się blokami bibliotecznymi dostępnymi po zainstalowaniu rozszerzenia LabVIEW Robotics Module.

Cały zestaw platformy Stewarta wraz osprzętem interfejsowym, komputerem z programem sterującym w środowisku LabVIEW przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Interaktywny manipulator typu platforma Stewarta sterowany w środowisku LabVIEW



Rys. 5. Uzyskane przesunięcia platformy Stewarta przy zadanych przesunięciach w osiach x, y

Tabela 1. Pomiary uzyskanych kątów obrotu, kołysania i toczenia (yaw, pitch, roll)

Obrót zadany [°]	Obrót uzyskany [°]		
	obracanie (yaw), oś x	kołysanie (pitch), oś y	toczenie (roll), oś y
-20,0	-20,5	-	-
-15,0	-15,0	-	-
-10,0	-10,5	-9,0	-15,0
-5,0	-5,0	-2,0	-8,0
-2,0	-2,0	-3,0	-3,0
-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
1,0	1,0	1,0	1,0
2,0	2,0	3,0	2,0
5,0	4,0	7,0	5,0
10,0	8,0	8,0	8,0
15,0	14,0	-	-
20,0	18,5	-	-

#### Pomiary regulacji położenia platformy

Po wykonaniu i oprogramowaniu manipulatora przeprowadzono szereg badań kalibracyjnych i testujących jego zachowanie. Uzyskano precyzyjne pozycjonowanie podczas przesunięć w kierunku pojedynczych osi układu współrzędnych oraz mniej dokładne w zakresie większych kątów podczas obrotów wokół tych osi (6 stopni swobody). Rysunek 5 i tabela 1 prezentują wybrane wyniki pomiarowe.

Zauważalna jest duża liniowość pracy przy przesunięciach. Podczas obrotów największy zakres pracy uzyskano w osi z (pionowej), co wynika z konstrukcji użytych siłowników.

Badanie zużycia zasobów procesora wykazało, że program działa stabilnie zarówno na komputerach stacjonarnych (Intel i7 2.2GHz, Windows 7, LabVIEW 2015), jak i przenośnych (Intel Core 2 Duo 2.2GHz, Windows 7, LabVIEW 2015).

## Walory dydaktyczne i podsumowanie

Zaprezentowany projekt manipulatora równoległego o sześciu stopniach swobody (platforma Stewarta) wraz ze sprzętem CompactDAQ i oprogramowaniem do sterowania w środowisku LabVIEW porusza wiele aspektów nowoczesnej automatyki i robotyki. Dodatkowe zastosowanie ekranu dotykowego znacznie zwiększa możliwości wykorzystania prezentowanej platformy i umożliwia wprowadzenie pętli sterowania lub interakcji z użytkownikiem.

Od samego początku powstawania projektu jednym z nadrzędnych celów było przygotowanie platformy do celów dydaktycznych. Stanowisko to może służyć nauce działania i strojenia regulatora PID. Panel sterowania umożliwia dowolne ustawianie parametrów odpowiednich wzmacnień regulatora, przez co studenci mogą doświadczalnie sprawdzić, jaki wpływ na układ regulacji ma dobór tych nastaw. Przykładowym zadaniem dla studentów może być takie dostrojenie regulatora PID, aby układ osiągał zadaną wartość jak najszybciej lub z jak najmniejszym przeregulowaniem.

Ponadto na panelu sterowania oprócz pól do wpisywania nastaw znajdują się wykresy przedstawiające odpowiedzi układu na zadane położenie obiektu na platformie oraz inne dane, takie jak: rotacja, czy kąty położenia serwo mechanizmów. Dzięki temu możliwa jest analiza działania nie tylko regulatora PID, ale także kinematyki odwrotnej platformy Stewarta.

*Badania zostały sfinansowane ze środków projektu PUEPS DS-2016.*

**Autorzy:** dr inż. Paweł Pawłowski, inż. Radosław Binek, inż. Damian Mojs, inż. Jakub Ochowiak, Politechnika Poznańska, Wydział Informatyki, Katedra Sterowania i Inżynierii Systemów, Pracownia Układów Elektronicznych i Przetwarzania Sygnałów, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [pawel.pawlowski@put.poznan.pl](mailto:pawel.pawlowski@put.poznan.pl).

## LITERATURA

- [1] Stewart D., A Platform With Six Degree of Freedom, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineering*, vol. 180, (1965), no. 15, 371-386
- [2] Szufnarowski F., Stewart platform with fixed rotary actuators: a low cost design study, *Advances in Medical Robotics (Postępy robotyki medycznej)*, red. Lucyna Leniowska, Zbigniew Nawrat, Chapter 4, 1st Ed., Uniwersytet Rzeszowski, Rzeszow, 2013
- [3] Masory O., Wang J., Zhuang H., On the accuracy of a Stewart platform. II. Kinematic calibration and compensation, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, USA, 725-731 vol.1, 1993
- [4] Sugahara Y. i in., Walking up and down stairs carrying a human by a biped locomotor with parallel mechanism, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)*, (2005), 1489-1494
- [5] Davliakos I., Papadopoulos E., Invariant Error Dynamics Controller for a 6-dof Electrohydraulic Stewart Platform, *Proc. of 6th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control*, (ROMANSY '06), Warszawa, 2006
- [6] Zhang Y., Gao F., A calibration test of Stewart platform, *Proc. of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 297-301, 2007
- [7] Binek R., Mojs D., Ochowiak J., Platforma Stewarta sterowana w środowisku LabVIEW, praca inżynierska, Politechnika Poznańska, 2016
- [8] Palermo E., Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method, <http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>, dostęp 4.03.2016
- [9] Hersan T., Stewart Platform, <http://www.instructables.com/id/Stewart-Platform/?ALLSTEPS>, dostęp 4.03.2016
- [10] Lou J.H., Tseng S.P., Developing a real-time serial servo motion control system for electric Stewart platform, *Proc. of IEEE International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*, 66-71, 2014
- [11] MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo, [http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R\\_Tower-Pro.pdf](http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf), dostęp 4.03.2016