

## WYKONANIE I STEROWANIE PLATFORMĄ STEWARTA-GOUGHA

Kamil DOLNY, Michał WISZNIEWSKI, Robert PIOTROWSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,  
e-mail: kamil.dolny92@gmail.com; michwisz@10g.pl; robert.piotrowski@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Platforma Stewarta-Gougha, wynaleziona w 1965 roku, nadal jest popularnym tematem prac inżynierskich i naukowych. Publikacje dotyczą przede wszystkim kinematyki, dynamiki i projektowania platformy. Oryginalna wersja platformy opierała się na siłownikach hydraulicznych. Obecnie coraz częściej są one zastępowane serwomechanizmami. Dzięki temu zwiększono dynamikę górnej platformy.

Platforma Stewarta-Gougha z powodzeniem znajduje zastosowanie w różnego rodzaju symulatorach. Dzięki sześciu stopniom swobody jest w stanie symulować ruch pojazdu lub samolotu.

**Słowa kluczowe:** robot równoległy, platforma Stewarta-Gougha, projektowanie, robotyka, automatyka, mechatronika.

### 1. WSTĘP

Jednym z najpopularniejszych robotów równoległych jest platforma Stewarta-Gougha. Jej modelowanie i wykonanie jest tematem licznych prac [1,2,3]. Roboty tego rodzaju znajdują szerokie zastosowanie, ponieważ dzięki stosunkowo prostej budowie stanowią alternatywę dla klasycznych robotów przemysłowych. W artykule przedstawiono projekt, wykonanie i oprogramowanie platformy Stewarta-Gougha. Praca ma charakter multidyscyplinarny i obejmuje mechanikę, elektronikę, automatykę i informatykę.

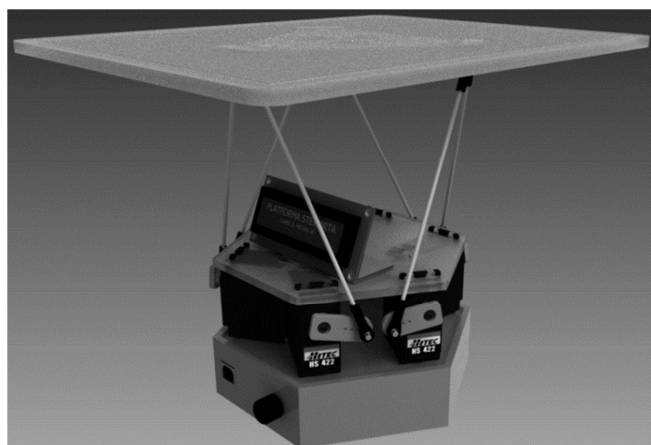
### 2. ZAŁOŻENIA DO PROJEKTU

Platforma Stewarta-Gougha jest przykładem robota równoległego [4]. Konstrukcja posiada sześć stopni swobody i dzięki temu ma zakres ruchów umożliwiający sterowanie zarówno położeniem środka górnej płaszczyzny we wszystkich trzech wymiarach przestrzeni jak i jej kątem nachylenia. Na potrzeby realizacji projektu, założono, że środek płaszczyzny roboczej platformy nie przemieszcza się, a steruje się wyłącznie jej kątem nachylenia względem osi  $x$  i  $y$  płaszczyzny poziomej. Dzięki temu modelowanie robota stało się łatwiejsze, a równania opisujące kinematykę platformy prostsze. Przełożyło się to z kolei na mniejszą ilość informacji przetwarzanych przez procesor sterujący platformą.

### 3. WYKONANIE URZĄDZENIA

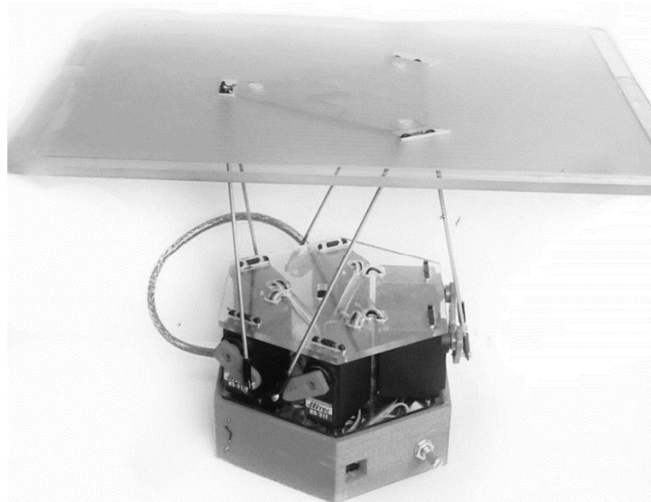
Proces budowy platformy rozpoczęto od szkiców koncepcyjnych, które następnie umieszczono w środowisku prototypowania Autodesk Inventor [5]. Zaprojektowano wszystkie elementy z jakich składa się platforma. Najważniejsze z nich to wykonane z poliwęglanu dolne

i górne mocowania napędów, oraz górna platforma. Ponadto zaprojektowano obudowę na elektronikę, którą przygotowano w technologii druku 3D. Komponenty te wykonano samodzielnie. Pozostałe części takie jak: serwomechanizmy, przeguby kulowe, dźwignie i popychacze to części, które zakupiono bezpośrednio u producentów i zamontowano w platformie. Trójwymiarowy model platformy Stewarta-Gougha pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Trójwymiarowy model platformy

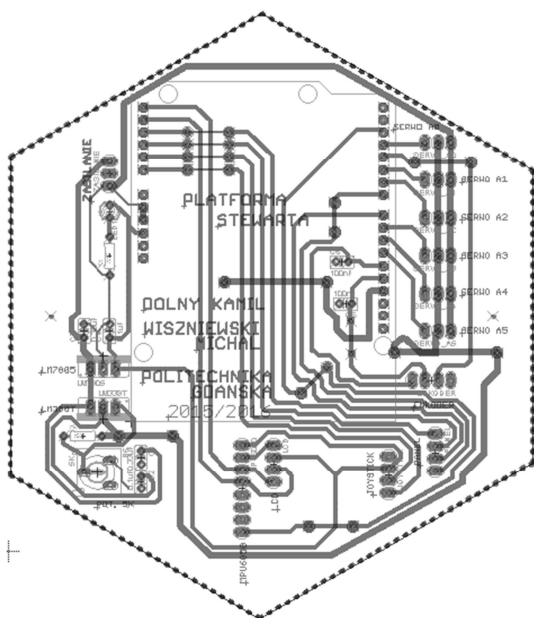
Rzeczywisty układ po montażu przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Platforma Stewarta-Gougha po montażu elementów

Po zaprojektowaniu części mechanicznej, rozpoczęto prace nad elektroniką sterującą. Zdecydowano, że jednostką sterującą ruchem platformy będzie Arduino UNO (rys. 3). Jest to platforma programistyczna oparta na projekcie Open Hardware przeznaczonym dla mikrokontrolerów [6]. Argumenty przemawiające za wykorzystaniem tej platformy to prostota i szybkość programowania dzięki dużej bazie gotowych bibliotek przystosowanych do obsługi zewnętrznych podzespołów elektronicznych.

Pozostałe istotne elementy elektroniczne to: stabilizator liniowy LM7805 do zasilania Arduino, regulowany stabilizator liniowy LM338T do zasilania serwomechanizmów, wyświetlacz LCD HD44780 pracujący na protokole i2c, 3-osiowy żyroskop i akcelerometr MPU6050. Do zasilania elektroniki wybrano zasilacz jednonapięciowy 12V/3.5A. Projekt obwodu drukowanego PCB (ang. Printed Circuit Board), którego celem jest skomunikowanie jednostki sterującej z pozostałymi elementami elektronicznymi zrealizowano w środowisku Eagle [7] (rys. 3).



Rys. 3. Zaprojektowana płytką drukowaną

Kolejnym etapem prac było wykonanie obwodu drukowanego oraz umieszczenie na nim wszystkich potrzebnych elementów (rys. 4).



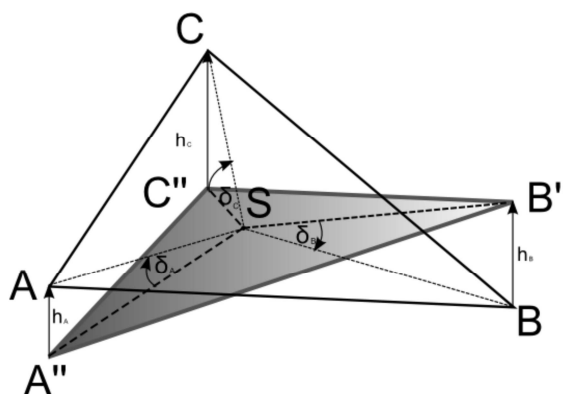
Rys. 4. Płytką drukowaną po montażu

### 3. KINEMATYKA URZĄDZENIA

Aby możliwe było sterowanie platformą, konieczne jest opracowanie równań kinematyki prostej. Opisują one matematyczną zależność między jej wejściem (zadane kąty przechyłu płaszczyzny roboczej platformy), a wyjściem (położenie katowe  $\omega$  wału każdego z sześciu serwomechanizmów).

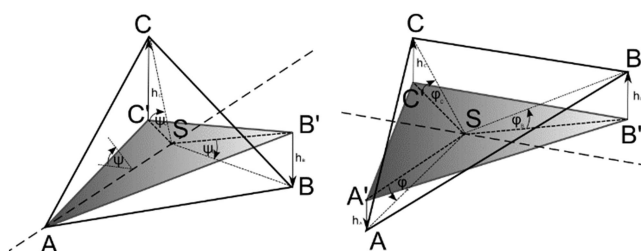
W oparciu o założenia projektowe, kinematykę platformy Stewarta-Gougha wyznaczono posługując się funkcjami trygonometrycznymi. Celem było wyznaczenie zależności, które związałyby ze sobą wielkości kąta nachylenia górnej powierzchni platformy względem płaszczyzny poziomej, a także położenia katowego wałów każdego serwomechanizmu. Podchodząc do problemu wyznaczenia kinematyki zastosowano metodę „małych kroków”. Polegała ona na uproszczeniu rzeczywistej platformy do wirtualnego urządzenia odpowiadającego postawionym założeniom projektu. W szczególności były to: reprezentacja górnej płaszczyzny platformy jako trójkąt równoboczny (choć w istocie jest to sześciokąt nieforemny) czy przybliżenie miary jednego z kątów innym, odpowiadającym mu a będącym zarazem jego rzutem na płaszczyznę pionową.

Przyjmując, że górna powierzchnia urządzenia jest trójkątem równobocznym ABC, a trójkąt A''B''C'' jest jego rzutem na płaszczyznę poziomą uzyskuje się sytuację przedstawioną na rys. 5.



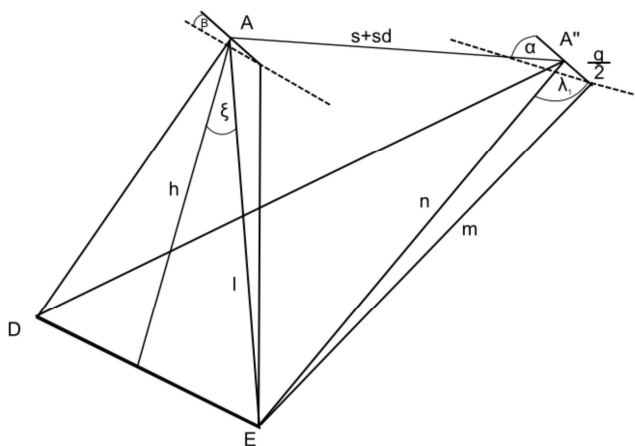
Rys. 5. Reprezentacja górnej płaszczyzny

Oznaczone na rys. 5 kąty  $\delta$  zostały przez autorów nazwane kątami „sumarycznymi”, gdyż są efektem złożenia kątów „składowych” wynikających z obrotu względem osi x i y. Wyznacza się ich wartość poprzez operacje matematyczne typowe dla trójkątów. Kąty składowe zostały oznaczone jako  $\varphi$  (pochodzący od obrotu względem osi x) i  $\psi$  (od obrotu względem osi y) (rys. 6).



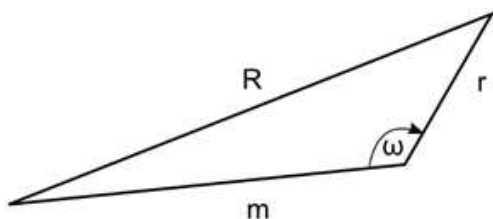
Rys. 6. Umiejscowienie kątów składowych

Przy założeniu, że zadane są kąty obrotu powierzchni względem osi  $x$  oraz  $y$  wyznacza się kąty sumaryczne  $\delta$  odpowiadające poszczególnym wierzchołkom. Dla wyliczonych wartości oraz znanych wymiarów urządzenia możliwe jest wyznaczenie zmiany położenia wierzchołków względem pozycji wyjściowej (horyzontalnej). W oparciu o te informacje, wyznacza się wysokości  $h$ , długości rzutów pryzm na płaszczyznę pionową  $l$ , oraz długości pryzm  $n$  dla poszczególnych wierzchołków. Znajomość tych wielkości jest niezbędna, aby umożliwić wyznaczenie dokładniejszego modelu, jakim jest robot z sześciokątną powierzchnią roboczą (rys. 7).



Rys. 7. Przejście z modelu uproszczonego do modelu uwzględniającego przechylenie płaszczyzny na której znajdują się popychacze

Korzystając z twierdzenia cosinusów możliwe jest otrzymanie zależności między długościami  $m$ ,  $n$  oraz kątami  $\lambda$  dla każdego z wierzchołków. Z kolei kąty niezbędne do wykonania obliczeń wyznacza się w oparciu o podstawowe zasady geometrii płaskiej. Założono podobieństwo kątów  $\alpha$  i  $\lambda$  do odpowiadających im rzutów na płaszczyznę pionową. Ostatnim etapem obliczeń było ponowne skorzystanie z twierdzenia cosinusów, dzięki czemu możliwe stało się wyznaczenie kątów, o jakie poszczególne serwomechanizmy należy obrócić, aby płaszczyzna robocza platformy znalazła się pod zadaniem kątem (rys. 8).



Rys. 8. Trójkąt odzwierciedlający wykorzystanie serwomechanizmów

Ostatecznie uzyskano dwa nieliniowe równania, których wyliczenie pozwala wyznaczyć równania kinematyki prostej jak i odwrotnej:

$$m_{1,2} = \sqrt{h^2 + \frac{d^2 + g^2}{4}} - g \cos \lambda_{1,2} \sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4} + s + p(1 - \cos \delta_x)} \quad (1)$$

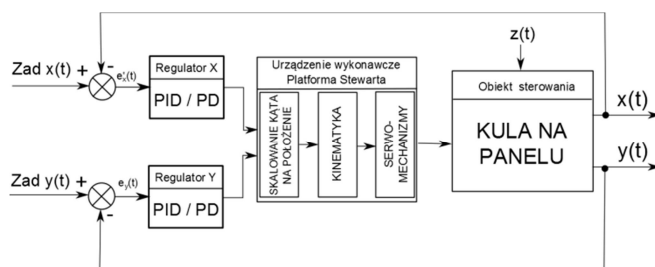
$$\omega = \arccos\left(\frac{m^2 + r^2 - R^2}{2mr}\right) \quad (2)$$

gdzie:  $s$  jest zmierzoną odległością wierzchołka górnej płaszczyzny do krawędzi podstawy,  $d$  oznacza znaną odległość między osiami pary serwomechanizmów,  $g$  jest długością krawędzi między wierzchołkami,  $h$  oznacza wysokość wierzchołków platformy dla pozycji wyjściowej,  $p$  jest odcinkiem łączącym wierzchołek wyidealizowanej płaszczyzny ze środkiem,  $R$  oznacza długość popychacza,  $r$  reprezentuje długość dźwigni serwomechanizmu,  $m$  jest wyznaczoną długością pryzmy.

Implementując równania (1)-(2) w języku C uzyskano gotowe narzędzie do sterowania przechyłem platformy. Dzięki temu możliwe stało się zaprojektowanie sterowania obiektem typu ball & plate, w którym urządzeniem wykonawczym była platforma.

#### 4. PROJEKTOWANIE ALGORYTMU STEROWANIA

Po zweryfikowaniu poprawności działania kinematyki przystąpiono do realizacji algorytmu sterowania. Strukturę układu regulacji pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Struktura układu regulacji

gdzie:  $Zad\ x(t)$ ,  $Zad\ y(t)$  – zadane położenie kuli na panelu;  $x(t)$ ,  $y(t)$  – położenie kuli na panelu w każdej osi;  $z(t)$  – sygnały zakłócające, np. drżenie serwomechanizmów.

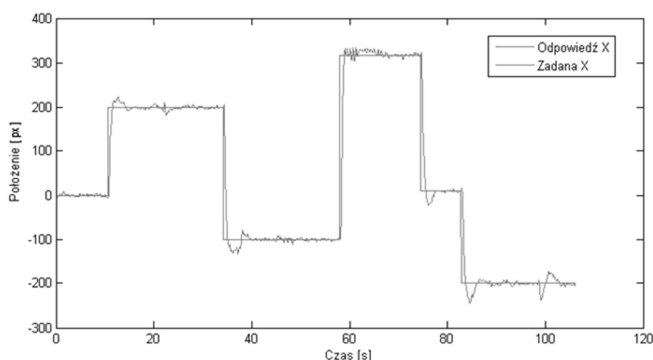
Projektując system sterowania należy pamiętać, że pracujemy z obiektem dynamicznym i wielowymiarowym. Celem sterowania jest pozycjonowanie kuli na panelu. Wielkość sterująca z regulatora zostaje przekształcona na kąt, który następnie przekazywany jest na wyliczoną kinematykę w celu poprawnego ustawienia górnej platformy. W algorytmie zastosowano regulator PID oraz PD, twardo przełączalne. Regulator PD działa w przypadku uchybu większego niż 40 jednostek, wtedy też wartość wzmocnienia całki jest zerowana, zapewniając szybką zmianę położenia. Dla uchybu równego bądź mniejszego niż 40 załącza się człon całkujący (PID), który sprowadza uchyb do zera. Wartości nastaw dla regulatorów dobrano eksperymentalnie, drogą inżynierską. Jakość regulacji została przedstawiona na rys. 10-11. Położenie na panelu wyrażane jest w pikselach. Panel posiada rozdzielczość 1023 x 1023 [px].

Zadawanie trajektorii poruszania się kuli zrealizowano w oparciu o program napisany w środowisku Microsoft Visual Studio w języku C#. Na rys. 12-13 przedstawiono interfejs oprogramowania.

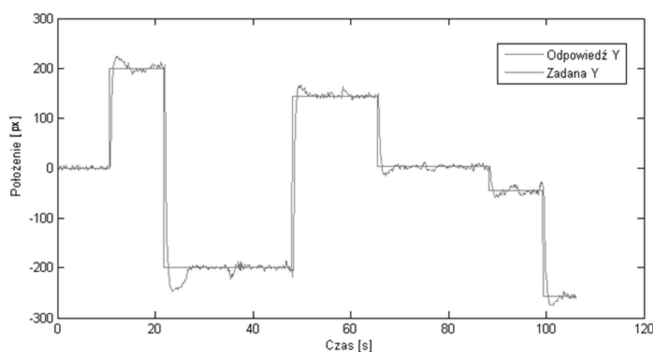
Interfejs użytkownika dzieli się na dwa główne okna. Na rys. 12 przedstawiono wizualizację pracy platformy dla każdej osi z osobna. Jeden z wykresów przedstawia trajektorię zadaną, drugi natomiast rzeczywistą trajektorię realizowaną przez kulę. Rys. 13 obrazuje zadawanie trajektorii w dwóch osiach. W celu zadania nowej trajektorii, użytkownik rysuje linię prowadząc kursor wewnątrz wyznaczonego okna.

Program czytuje zadane punkty, które są następnie wysyłane do sterownika.

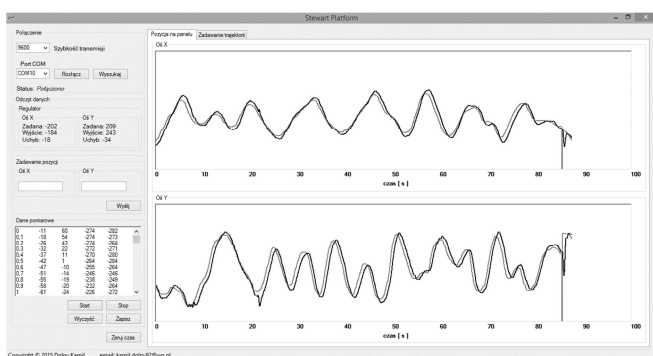
Oprogramowanie posiada także możliwość wprowadzania stałych wartości zadanych, które można wpisać w lewej części interfejsu. Ponadto z poziomu aplikacji można zapisać dane pomiarowe do pliku, aby następnie wykorzystać je w innych narzędziach komputerowych, np. w środowisku Matlab/Simulink w celu weryfikacji modelu matematycznego.



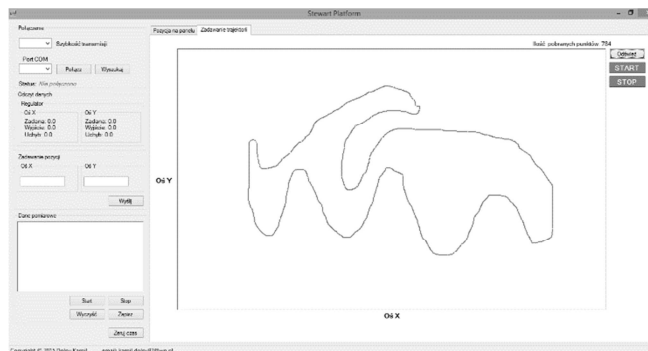
Rys. 10. Odpowiedź układu regulacji w osi x



Rys. 11. Odpowiedź układu regulacji w osi y



Rys. 12. Główne okno interfejsu



Rys. 13. Okno zadawania trajektorii

## 5. PODSUMOWANIE

Platformę Stewarta-Gougha wykonano zgodnie z założeniami. Urządzenie spełnia wszystkie wymagania i charakteryzuje się prostotą wykonania. Potencjalnym kierunkiem rozwoju projektu może być rozwinięcie kinematyki tak, aby możliwa była także zmiana położenia środka górnej płaszczyzny oraz wykorzystanie alternatywnych algorytmów pozycjonowania kuli.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Harib K., Srinivasan K. *Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures*. Robotica, Vol. 21 (2003), No. 5, pp. 541-554.
2. Gao X.S., Lei D., Liao Q., Zhang G.F. *Generalized Stewart-Gough Platforms and Their Direct Kinematics*. IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21 (2005), No. 2, pp. 141-151.
3. Borras J., Thomas F., Torras C. *New Geometric Approaches to the Analysis and Design of Stewart-Gough Platforms*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19 (2014), No. 2, pp. 445-455.
4. Morecki A., Knapczyk J. *Podstawy Robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów*. WNT, Warszawa 1999.
5. Jaskulski A. *Autodesk Inventor Professional 2015PL/2015+ Fusion/Fusion 360*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2014.
6. Simon M. *Arduino dla początkujących. Kolejny krok*. Wydawnictwo HELION, Gliwice 2015.
7. Wieczorek H. *Eagle, pierwsze kroki*. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2007.

## DESIGNING AND CONTROL OF STEWART-GOUGH PLATFORM

Stewart-Gough platform, invented in 1965, is still a popular topic for engineering and scientific applications. Publications relate primarily to kinematics, dynamics and design platform. The original version of the platform based on the hydraulic cylinders. Today they are replaced by electric servomotors. Thereby the potential of the increase platform dynamics.

Stewart-Gough platform successfully used in various types of simulators. With six degrees of freedom it is able to simulate the movement of a vehicle or aircraft.

**Keywords:** parallel robot, Stewart-Gough platform, design, robotics, automatics, mechatronics.