

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)
SPECJALNOŚĆ: Robotyka (ARR)

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Stanowisko demonstracyjne układu sterowania
orientacją obiektu z użyciem żyroskopu

Demo stand for control moment gyroscopes

AUTOR:
Jakub Piasecki

PROWADZĄCY PRACĘ:
dr inż. Robert Muszyński

OCENA PRACY:

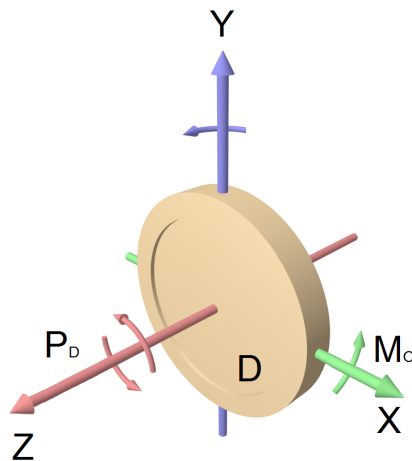
Spis treści

1	Wstęp	2
1.1	Klasyfikacja urządzeń CMG	3
1.2	Konstrukcje wykorzystujące CMG	4
1.3	Cel pracy	5
2	Projekt stanowiska	7
2.1	Założenia projektowe	7
2.2	Konstrukcja mechaniczna	7
2.3	Układ sterowania	10
2.4	Oprogramowanie sterujące	12
3	Eksperymenty i demonstracje	14
3.1	Demonstracje	14
3.1.1	Prezentacja platformy PDSO	14
3.1.2	Demonstracja 1	14
3.1.3	Demonstracja 2	15
3.1.4	Demonstracja 3	16
3.1.5	Podsumowanie	16
3.2	Eksperymenty	16
3.2.1	Badanie sił obracających obejmę	16
3.2.2	Badanie możliwości regulacji obrotem platformy	19
3.2.3	Podsumowanie	19
4	Komputerowy model PDSO	21
4.1	Środowisko modelowania	21
4.2	Opis przeprowadzonych eksperymentów	21
4.3	Podsumowanie	23
5	Podsumowanie	25
	Bibliografia	26
A	Instrukcja obsługi stanowiska PDSO	29
A.1	Konfigurowanie połączenia	29
A.2	Sterowanie	30
A.3	Interpretacja danych pomiarowych	31
B	Płyty DVD	32

Rozdział 1

Wstęp

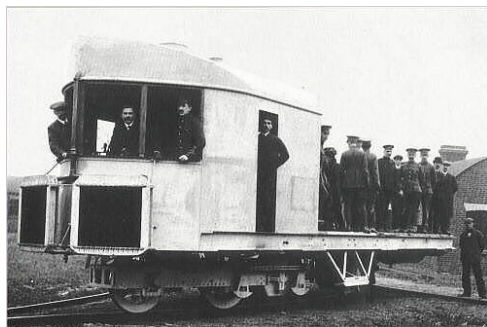
Control Moment Gyroscope (CMG) jest to urządzenie posiadające napędzany wirnik (najczęściej w postaci dysku) oraz dwa lub trzy swobodne przeguby przestrzenne (ang. *gimbal*) o zasadzie działania analogicznej do przegubów Kardana (zobacz rysunek 1.1). Wymuszanie kąтового odchylenia wirującego z dużą prędkością dysku D , powoduje zmianę jego momentu pędu P_D , spowodowaną momentem siły odchylającej M_O . Konsekwencją tego zjawiska jest ruch obrotowy całego układu wokół osi prostopadłej do płaszczyzny wyznaczonej przez wektory P_D i M_O (zgodnie z regułą prawej ręki). W fizyce ruch taki nazywa się precesją (precesją żyroskopu) [6].



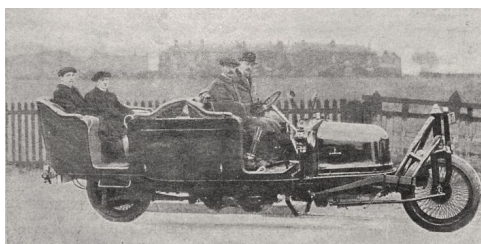
Rysunek 1.1 Ilustracja zasady działania CMG (na podstawie [19])

Pierwsze konstrukcje wykorzystujące CMG pojawiły się już na początku XX wieku. W 1910 Louis Brennan zaprezentował swój „Gyro monorail” (rysunek 1.2(a)) [20], a dwa lata później Pyotr Shilovsky stworzył pierwszy prototyp samobalansującego samochodu „Gyrocar” (rysunek 1.2(b)) [20]. W 1917 roku zostały zainstalowane pierwsze duże stabilizatory okrętowe (rysunek 1.2(c)) działające w oparciu o zasadę CMG. O ile stabilizatory okrętowe były i nadal są stosowane na dużych okrętach, a technologia ta wciąż się rozwija, to pomysł balansujących pojazdów mobilnych (z wyjątkiem kilku przypadków) nie przyjął się.

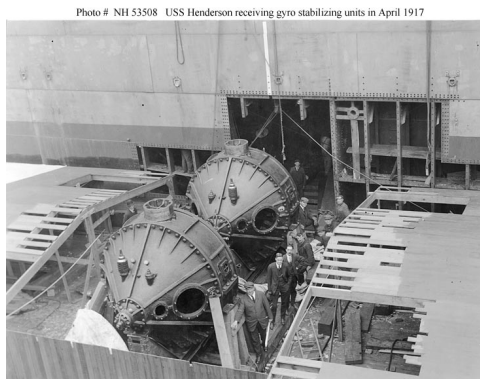
Wzrost zainteresowania tematem żyroskopowego sterowania odrodził się wraz z wysyłaniem większych jednostek w kosmos i potrzebą kontrolowania ich orientacji względem



(a) Gyro-monorail [20]



(b) Gyrocar [20]



(c) Stabilizator z USS Henderson [7]

Rysunek 1.2 Historyczne pojazdy korzystające z CMG

Ziemi. W roku 1973 pierwsze takie urządzenie pojawiło się na stacji kosmicznej „Skylab” [15]. Od tego czasu takie urządzenia montowane są również na innych stacjach kosmicznych, takich jak „US military observation satellites” czy „MIR”.

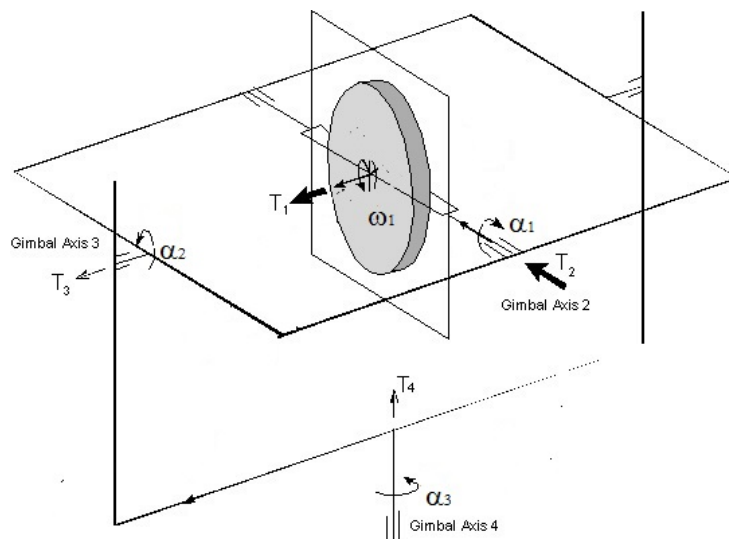
Wraz ze wzrostem liczby obiektów wysyłanych na orbitę okołozemską rozwijana jest technologia układów CMG. W literaturze pojawiają się opisy nowych algorytmów sterowania [18] oraz wykorzystania metody dla małych satelitów [10]. W naturalny sposób głównym miejscem rozwoju technologii CMG są placówki naukowe związane z lotnictwem i kosmonautyką [8].

Poza opisywanymi powyżej rozwiązaniami pojawiały się również nowe pomysły na wykorzystanie CMG. Jednym z nich jest zastosowanie w robotach humanoidalnych do wspomagania obracania się, co mogłoby zastąpić skomplikowane konstrukcje skrętnych kończyn [2].

1.1 Klasyfikacja urządzeń CMG

Urządzenia CMG możemy podzielić na trzy rodzaje, zgodnie z poniższym opisem. Ogólny przypadek zobrazowano na rysunku 1.3.

- SGCMG (ang. *Single Gimbal Control Moment Gyroscopes*) – w tym rozwiązaniu wirnik posiada jeden podstawowy stopień swobody oraz jeden dodatkowy stopień swobody, którego oś obrotu jest umieszczona pod kątem prostym do wektora momentu pędu dysku, zaś prędkość obrotowa wirnika jest stała (według oznaczeń z rysunku 1.3: $\omega_1 = \text{const}$, $\alpha_3 = \text{const}$, α_2 – zmienna sterująca);
- DGCMG (ang. *Double Gimbal Control Moment Gyroscopes*) – w tym rozwiązaniu



Rysunek 1.3 Rysunek ilustrujący elementy składowe konstrukcji CMG (na podstawie [12])

wirnik posiada jeden podstawowy stopień swobody oraz dwa dodatkowe stopnie swobody, gdzie oś obrotu pierwszego jest umieszczona pod kątem prostym do wektora momentu pędu dysku, a oś obrotu drugiego jest pod kątem prostym do pierwszego stopnia swobody, zaś prędkość obrotowa wirnika jest stała (według oznaczeń z rysunku 1.3: $\omega_1 = \text{const}$, α_2 oraz α_3 – zmienne sterujące);

- VSCMG (ang. *Variable Speed Control Moment Gyroscopes*) – w tym rozwiązaniu wirnik posiada tylko jeden stopień swobody – sterujemy jedynie prędkością obrotową wirnika (według oznaczeń z rysunku 1.3: $\alpha_2 = \alpha_3 = \text{const}$, ω_1 – zmienna sterująca);

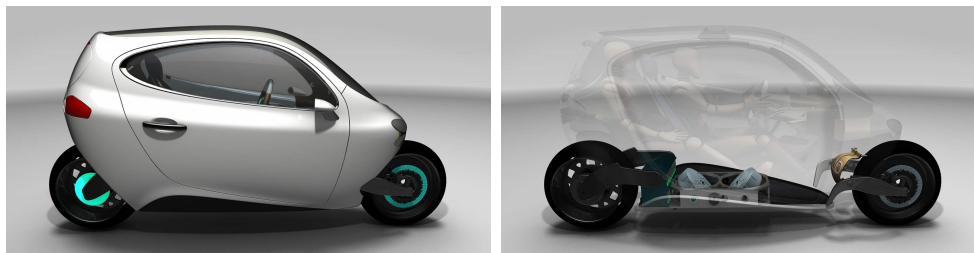
1.2 Konstrukcje wykorzystujące CMG

Mimo, że CMG nie jest nowym wynalazkiem, współcześnie niewiele konstrukcji wykorzystuje jego właściwości. Jest to związane głównie z dużym zużyciem energii do utrzymywania prędkości wirującego dysku oraz dużą wagą samego urządzenia. Wady powodujące rzadkość CMG na Ziemi nie dotyczą przestrzeni kosmicznej, gdzie po zamieszczeniu na orbicie okołozemskiej waga nie stanowi problemu. Na stacjach kosmicznych, dzięki panelom słonecznym, energii elektrycznej jest pod dostatkiem, w przeciwieństwie do paliwa rakietowego wymaganego do alternatywnych rozwiązań, do którego dostęp jest ograniczony. Spośród istniejących rozwiązań, najbardziej interesującymi przykładami są:

- Motocykl C-1

Firma „Lit Motors” od 2013 roku posiada patent [9] i jest w trakcie wprowadzania na rynek samobalansującego motocykla o nazwie „C-1” (rysunek 1.4), który dzięki wykorzystaniu CMG ma możliwość samodzielnego utrzymywania pozycji pionowej oraz jazdy z pasażerem bez potrzeby dodatkowego podparcia. To pozwala na zamknięcie kabiny pasażera i znaczny wzrost komfortu i bezpieczeństwa jazdy.

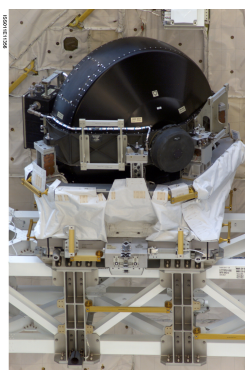
- Układ sterowania orientacją na International Space Station (ISS)



(a) Widok ogólny

(b) Umieszczenie CMG w C-1

Rysunek 1.4 Motocykl C-1 firmy „Lit Motors” [11]



Rysunek 1.5 Jeden z czterech DGCMG z ISS [14]

11 października 2000r. na ISS w segmencie Z-1 Truss, został zamontowany system składający się z czterech DGCMG (rysunek 1.5). Zadaniem tego systemu jest utrzymywanie stacji w odpowiedniej orientacji względem Ziemi.

- System redukcji kołysania statków

Na rynku dostępne są konstrukcje, które korzystając z siły obrotowej wytwarzanej przez CMG, redukują powodowane falami kołysanie statków na wodzie. Ich przykładem są konstrukcje (rysunek 1.6) oferowane na rynku przez firmę Seakeeper.

1.3 Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest opracowanie stanowiska demonstracyjnego pozwalającego na prezentację zasady działania urządzenia Control Moment Gyroscope. Potrzeba opracowania takiego stanowiska wynika z faktu, iż prezentowane zjawisko jest nieintuicyjne, przez co jego wy tłumaczenie i zrozumienie bez odpowiedniej ilustracji jest trudne.

Celem dodatkowym jest przetestowanie zaproponowanych w pracy rozwiązań technicznych i możliwości wykorzystania zdobytego w ten sposób doświadczenia w robotach wykorzystujących CMG. Po zapoznaniu się z treścią tej pracy oraz wykonaniu zaproponowanych ćwiczeń, projektant robota korzystającego z CMG będzie posiadał wiedzę o dodatkowych uwarunkowaniach, jakie trzeba uwzględnić podczas budowy robota, które nie są bezpośrednio widoczne w modelu komputerowym oraz wiedzę o problemach, jakich można się spodziewać podczas budowy rzeczywistej konstrukcji.

Dla odróżnienia ogólnej klasy urządzeń CMG od konkretnie opracowywanego w tej pracy, zaprojektowane stanowisko demonstracyjne zostało nazwane „Platforma demonstracyjna sterowania orientacją”, w skrócie PDSO. Model PDSO należy do urządzeń typu



Rysunek 1.6 Seakeeper 5 do stabilizacji łodzi do 20 ton [16]

SGCMG.

Układ pracy jest następujący. W rozdziale drugim znajduje się opis projektu oraz budowy stanowiska PDSO. W rozdziale trzecim został opisany sposób jego wykorzystania, a w rozdziale czwartym przedstawiono eksperymenty wykonane z wykorzystaniem komputerowego modelu PDSO. Całość podsumowuje rozdział piąty. Do pracy zostały dołączone dwa dodatki. Dodatek A opisuje instrukcję obsługi stanowiska PDSO a dodatek B zawartość płyty DVD dołączonej do pracy.

Rozdział 2

Projekt stanowiska

2.1 Założenia projektowe

Projektowane stanowisko ma umożliwiać prezentację zasady działania Control Moment Gyroscope. Aby było to możliwe i zjawisko było prezentowane w sposób czytelny, stanowisko powinno pozwalać na zauważalne zmiany położenia konstrukcji mechanicznej już przy małych wartościach sygnałów sterujących. Z zasady działania CMG wynika, że amplituda obserwowanej odpowiedzi na pobudzenie jest zależna od proporcji pomiędzy prędkością obrotową dysku i jego momentem bezwładności a momentem bezwładności pozostałej, ruchomej, ale niewirującej konstrukcji zamocowania żyroskopu. Zakładając stałą prędkość obrotową dysku i dobraną stałą jego masę, każde zmniejszenie momentu bezwładności pozostałych elementów zwiększy przyspieszenie z jakim porusza się cała konstrukcja. Z tego względu podczas projektowania części mechanicznej urządzenia, dążono do minimalizacji masy dodatkowych elementów mechanicznej konstrukcji PDSO oraz ich zwartego umiejscowienia.

2.2 Konstrukcja mechaniczna

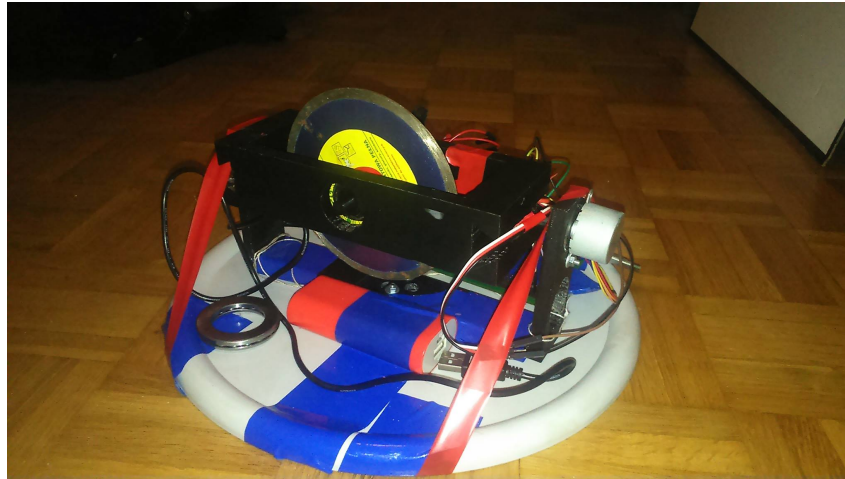
Finalny efekt (rysunek 2.1(c)) oraz etapy powstawania (prototyp 1 na rysunku 2.1(a) oraz prototyp 2 na rysunku 2.1(b)) możemy zobaczyć na rysunku 2.1(c)

Konstrukcja układu mechanicznego składa się z trzech części:

1. ruchomego elementu „O”, do którego mocowany jest silnik wraz z wirującym dyskiem, nazywanego dalej „obejmą” (rysunek 2.2(a)),
2. nieruchomego elementu „U”, w którym zamocowana jest obejmą, zwanego dalej „uchwytem” (rysunek 2.2(b)),
3. ruchomego elementu „P”, który jest nieruchomo połączony z uchwytem oraz w sposób ruchomy połączony z podłożem za pomocą łożyska kulowego wzdłużnego dwukierunkowego. Element „P” jest nazywany dalej „platformą” (rysunek 2.2(c)).

Aby zminimalizować zakłócenia powodowane tarciem, pomiędzy każdą z tych części zastosowano połączenia łożyskowane.

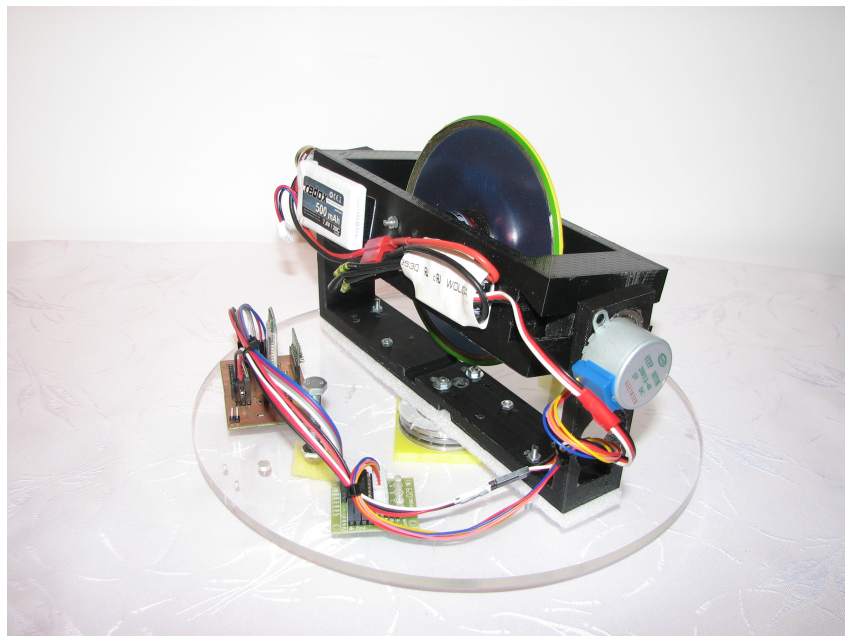
Wybrane elementy mechanicznej konstrukcji urządzenia zostały wykonane w technologii druku 3D. Zdecydowały o tym trzy główne czynniki: po pierwsze, cena wykonania części z tworzywa sztucznego, w porównaniu do wykonania ich z metalu, jest o wiele



(a) Fotografia prototypu 1 konstrukcji PDSO

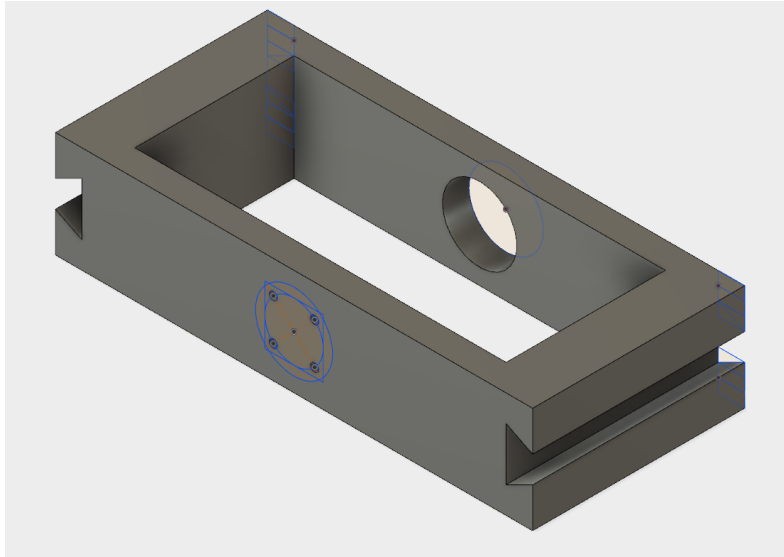


(b) Fotografia prototypu 2 konstrukcji PDSO

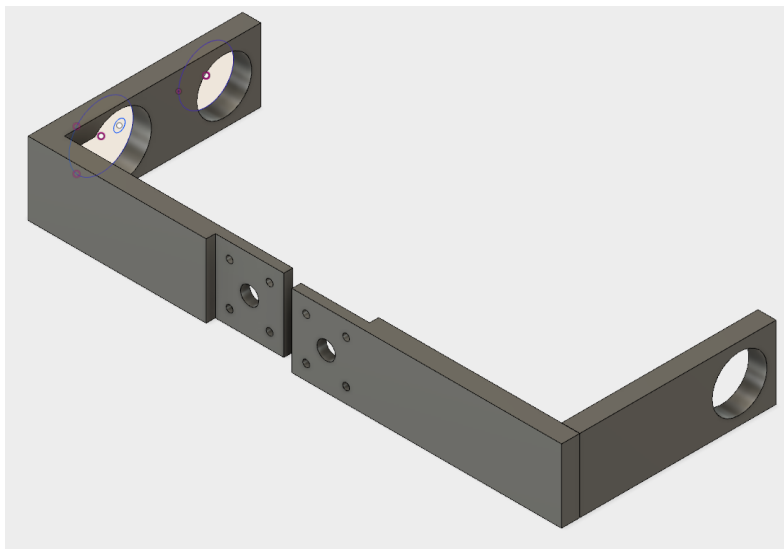


(c) Fotografia platformy PDSO

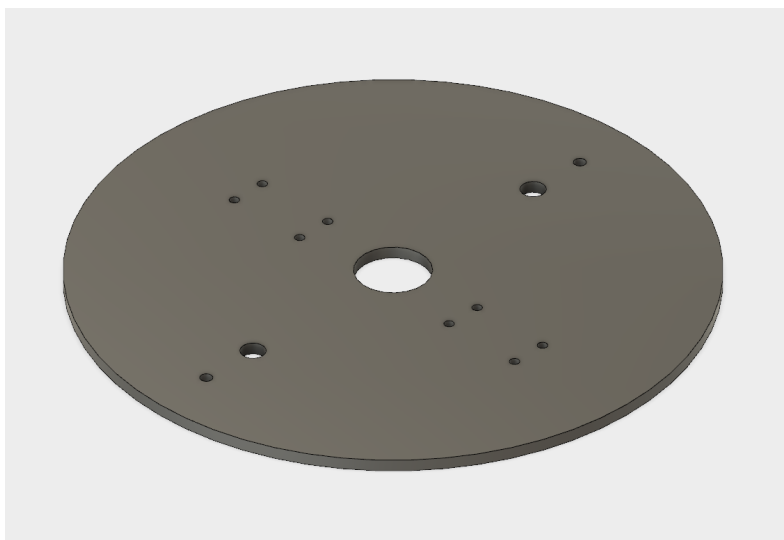
Rysunek 2.1 Etapy powstawania platformy PDSO



(a) Komputerowy projekt pbejmy „O”



(b) Komputerowy projekt uchwyty „U”



(c) Komputerowy model platformy „P”

Rysunek 2.2 Komputerowe projekty części zaprojektowanych do PDSO

niższa. Po drugie, druk 3D daje możliwość łatwego przechodzenia od projektu komputerowego do rzeczywistego układu. Po trzecie, druk 3D umożliwia zmianę wytrzymałości konstrukcji poprzez zmianę stopnia wypełnienia wydruku.

Wydruki elementów obejmują „O” oraz uchwytu „U” wykonano z materiału ABS, ponieważ autor pracy ma dostęp do drukarki 3D przystosowanej do wykorzystania tego materiału. Model komputerowy zaprojektowano w programie Fusion 360 firmy Autodesk [1]. Program wybrano z powodu dostępu do niego na podstawie bezpłatnej licencji dla studentów, a także posiadanego przez autora doświadczenia w jego obsłudze.

Platforma „P” została wykonana ze szkła akrylowego, na zamówienie według projektu własnego autora pracy.

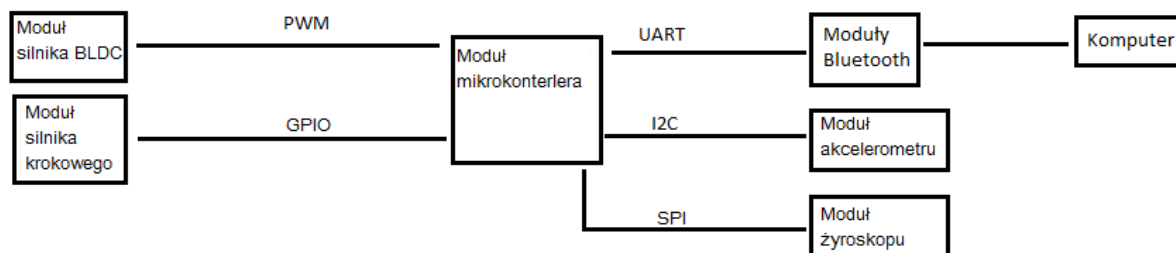
2.3 Układ sterowania

Układ sterujący platformą realizuje następujące funkcjonalności:

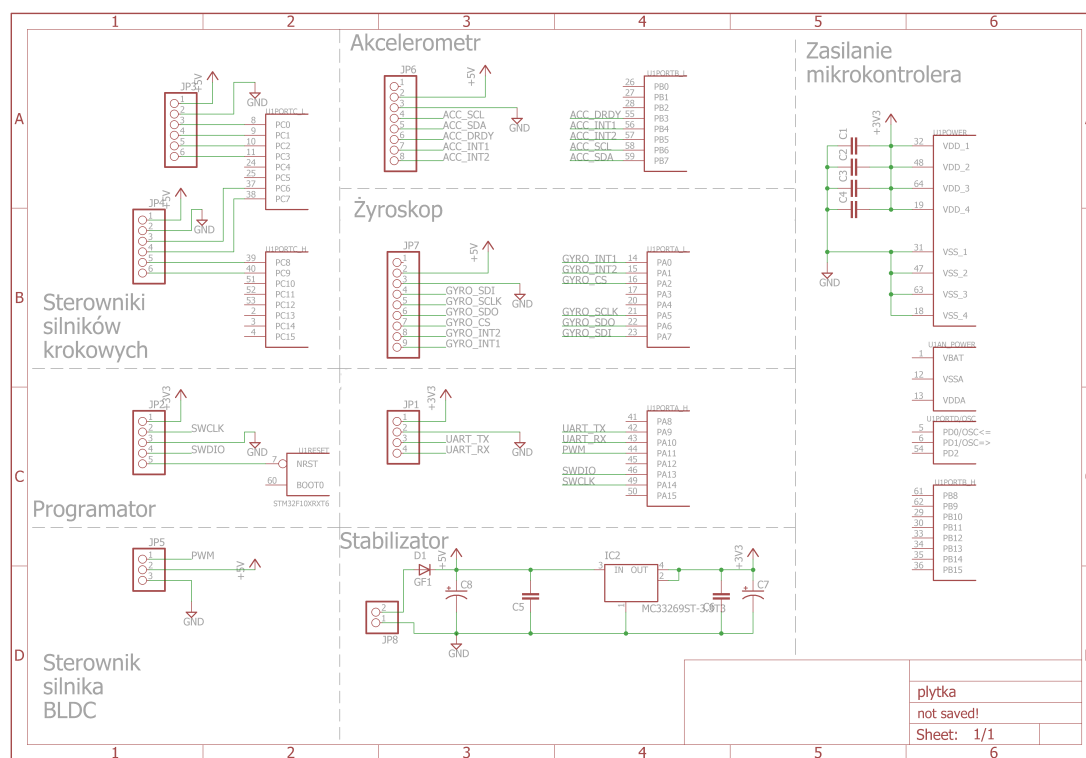
- zapewnienie dużej i stabilnej prędkości obrotowej dysku,
- stymulowanie zmian położenia obejmują „O”,
- odczyt danych z żyroskopu i z sensora obrotu (początkowo akcelerometru, a w finalnej konstrukcji – z potencjometru),
- komunikację układu sterującego z komputerem.

Podczas projektowania urządzenia konieczne było podjęcie szeregu decyzji konstrukcyjnych. Do najważniejszych z nich należą:

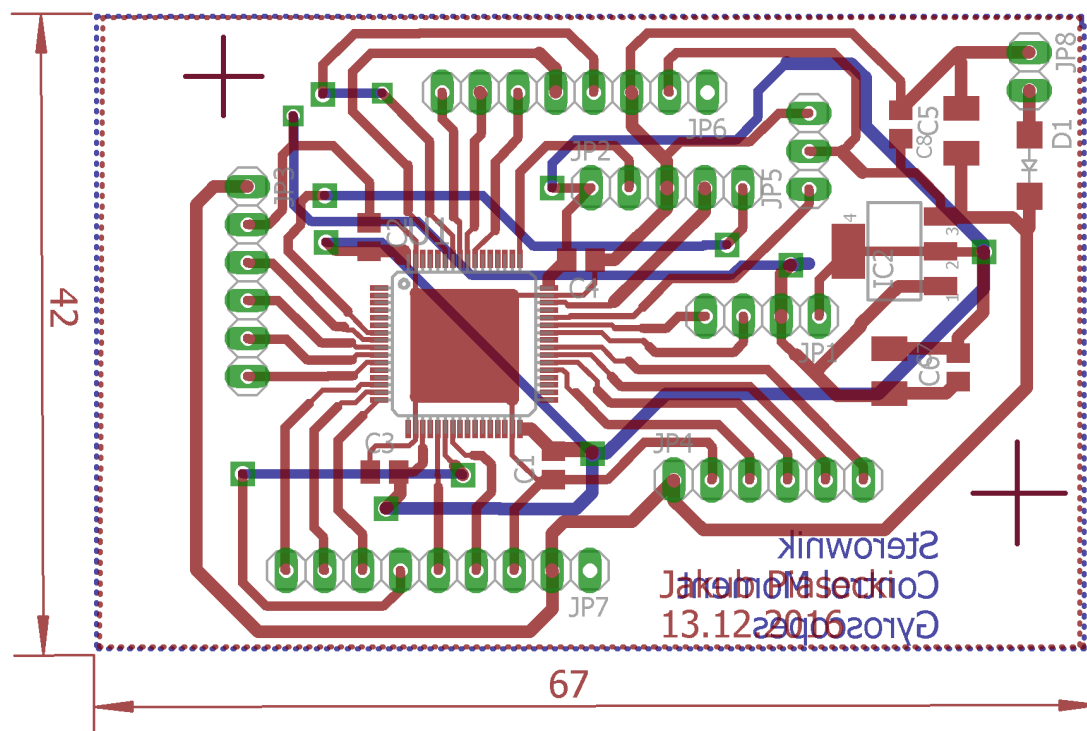
- Dobór silnika napędzającego dysk – wybrano silnik BLDC. Wybór wynika z najlepszej proporcji jego masy do prędkości obrotowej.
- Dobór silnika obracającego obejmą – zdecydowano się na zastosowanie silnika krokowego, ponieważ daje on możliwość łatwego zadawania kąta obrotu oraz jednostajną siłę, nawet podczas gdy rotor pozostaje w bezruchu. Wadą tego rozwiązania jest dostępność tylko dwóch wartości siły, zależnych od algorytmu sterowania oraz potrzeba stosowania specjalnego sterownika.
- Rozwiązanie problemu połączeń elektrycznych zawijających się wokół obrotowych połączeń podstawy – do komunikacji z komputerem wybrano technologię Bluetooth, a zasilanie – akumulatorowe.
- Dobór rodzaju zasilania – w celu dostarczenia wystarczającej ilości prądu wybrano akumulatory litowo-polimerowe.
- Dobór mikrokontrolera – elementem sterującym został mikrokontroler stm32.
- Dobór sposobu montażu podzespołów elektronicznych – zastosowano obwód drukowany (PCB). Płytkę PCB została zaprojektowana przez autora pracy, a schemat logiczny przesyłania informacji przedstawia rysunek 2.3. Do projektowania płytki PCB użyto programu Eagle [3], ponieważ autorzy dostarczają darmową licencję dla małych projektów oraz posiada on bogatą bibliotekę elementów elektronicznych. Schemat logiczny połączeń na płytce można zobaczyć na rysunku 2.4 a projekt wykonanej płytki na rysunku 2.5. Pliki dokumentujące oba projekty znajdują się na załączonej płycie DVD w katalogu o nazwie PCB.



Rysunek 2.3 Schemat blokowy płytki PCB



Rysunek 2.4 Schemat logiczny płytki PCB

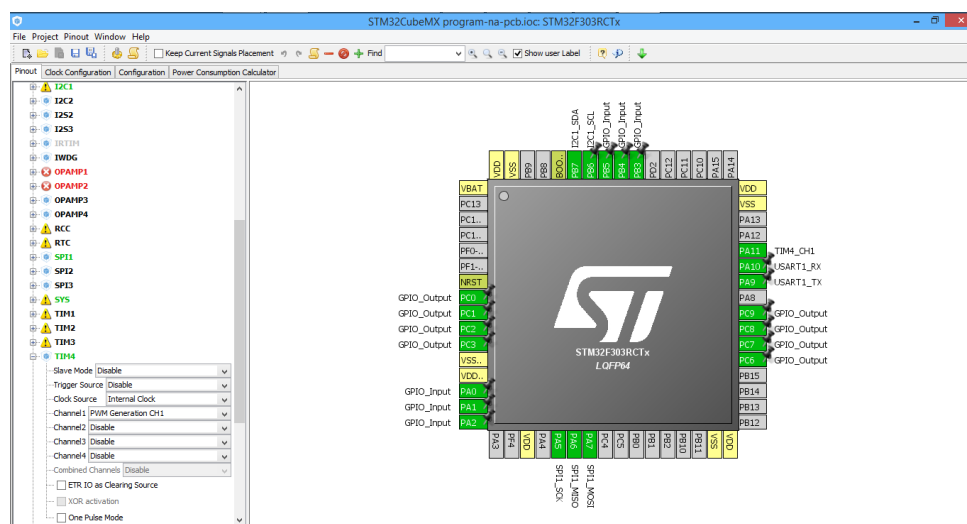


Rysunek 2.5 Schemat płytki PCB

2.4 Oprogramowanie sterujące

Program sterujący platformą PDSO został zainstalowany na 32-bitowym mikrokontrolerze firmy ST z rdzeniem ARM Cortex-M4. Ten mikrokontroler posiada 256 kB pamięci Flash, 40 kB pamięci RAM i jest taktowany z częstotliwością 64 MHz. Program został napisany w środowisku System Workbench for STM32 [17]. Jest to nakładka wyprodukowana przez firmę ST dla edytora Eclipse [5].

W trakcie pisania programu wykorzystano z bibliotek HAL (Hardware Abstraction Layer) [4]. Do konfiguracji peryferiów mikrokontrolera posłużono się programem STM32CubeMX 2.6, który za pomocą interfejsu graficznego pozwala wygenerować kody źródłowe. Pomiary z czujników, sterowania silnikami oraz komunikacja zostały zaimplementowane w przerwaniach zewnętrznych, dzięki czemu nie blokują się nawzajem i imitują system czasu rzeczywistego. W celu zainstalowania programu na mikrokontrolerze, użyto programatora z płytki ewaluacyjnej STM32F3-Discovery, który za pomocą programu ST-Link, po uprzednim standardowym skonfigurowaniu (korzystając z protokołu SWD) wgrywa program na docelowy mikrokontroler. Kod programu można znaleźć na dołączonej płycie DVD w katalogu Oprogramowanie.



Rysunek 2.6 Graficzne środowisko STM32CubeMX

Rozdział 3

Eksperymenty i demonstracje

3.1 Demonstracje

Pokaz zasady działania CMG można zrealizować w trzech eksperymentach zaplanowanych specjalnie dla zbudowanego stanowiska PDSO. Przed ich wykonaniem należy zapoznać się z Dodatkiem A, zawierającym instrukcję obsługi urządzenia.

3.1.1 Prezentacja platformy PDSO

1. Cel

Wstępna prezentacja stopni swobody i bezwładności oraz sprawdzenie oporów ruchu.

2. Wykonanie

- (a) Należy obrócić obejmę o kilkadziesiąt stopni w jedną i drugą stronę, prezentując w ten sposób swobodę jej ruchu.
- (b) Kolejno należy ręcznie wprowadzić platformę w ruch, a gdy nabierze już prędkości – pozostawić w ruchu, by móc zaobserwować swobodę jej ruchu, a także przekonać się, że opory tarcia są bardzo małe i wpływają w nieznacznym stopniu na dalsze obroty platformy wynikające z jej bezwładności. Należy zwrócić uwagę, czy zadane ruchy są płynne.

3. Obserwacje

Podczas prezentacji platformy zaobserwowano, jakie możliwości ruchu ma PDSO, a także sprawdzono, czy cała konstrukcja działa poprawnie.

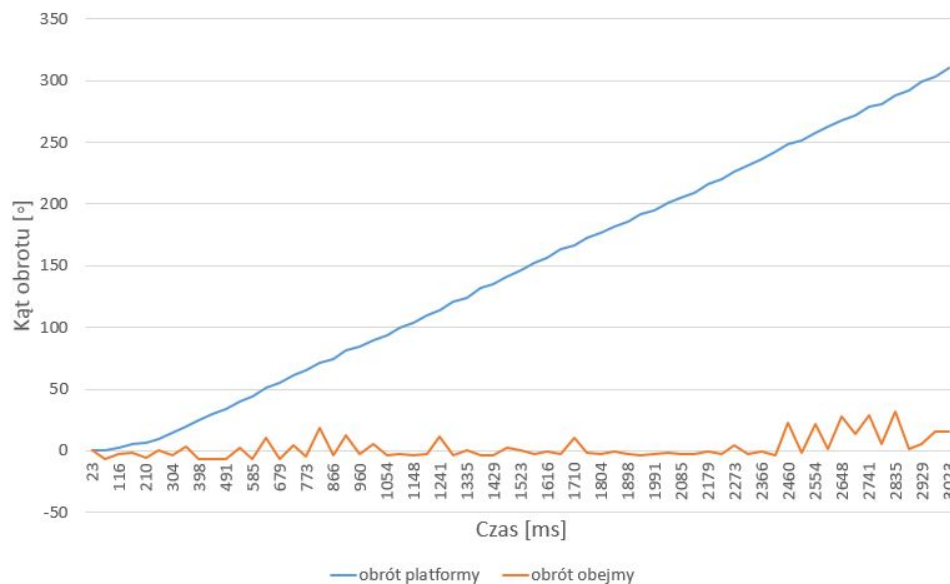
3.1.2 Demonstracja 1

1. Cel

Zaobserwowanie zachowania modelu dla bardzo małego tarcia.

2. Wykonanie

Wykorzystując opisane w instrukcji sposoby sterowania urządzeniem, należy ustawić dysk w pozycji pionowej. Ustawić PWM sterujący mocą silnika napędzającego dysk na 10% wypełnienia. Odczekać, aż dysk zakończy fazę rozpędzania się i osiągnie stałą prędkość obrotową. Następnie należy zadać obrót obejmę o kąt 90 stopni.



Rysunek 3.1 Pomiary z demonstracji 1

3. Obserwacje

Po zadaniu siły, zaobserwowano ruch obejmmy o kilka stopni, a następnie obrót platformy. Jest to związane ze zmianą siły tarcia spoczynkowego na siłę tarcia ruchowego. Na samym początku, w momencie przyłożenia siły F_o , na platformę „P” działa siła tarcia spoczynkowego F_s , która jest dużo większa od siły tarcia ruchowego, działającego na platformę „P” dopiero w trakcie jej ruchu. Z tego względu, do momentu kiedy siła F wytwarzana przez przesuwający się moment pędu wirującego dysku nie będzie większa od siły tarcia statycznego, będzie się obracała sama obejmma „O”. Dopiero po przekroczeniu tego progu sumaryczne siły tarcia maleją (zanika tarcie statyczne) i platforma „P” zaczyna się poruszać, a obejmma „O” zatrzymuje się. Na rysunku 3.1 przedstawiono pomiary z demonstracji 1. Niestety dostępna w zaprojektowanym urządzeniu rozdzielczość pomiaru kąta obrotu obejmmy „O” oraz wibracje wprowadzane przez wirujący dysk spowodowały, że opisane zjawisko nie uwidoczniło się na wykresie, jednakże obserwacje rzeczywistej konstrukcji pozwoliły na jego stwierdzenie.

3.1.3 Demonstracja 2

1. Cel

Zaobserwowanie rozkładania się siły F na siłę obrotu platformy i siłę obrotu obejmmy.

2. Wykonanie

Na platformie należy dokręcić specjalnie przygotowane śruby regulujące tarcie. Następnie należy ustawić dysk w pozycji pionowej. Ustawić PWM sterujący mocą silnika napędzającego dysk na 10% wypełnienia. Należy odczekać, aż dysk przestanie się rozpędzać i osiągnie stałą prędkość obrotową. Kiedy to nastąpi, należy zadać obrót obejmmy o kąt 90 stopni. Dokonać obserwacji obrotu obejmmy i platformy.

3. Obserwacje

Od chwili, w której zadana została siła, obejmą i platforma obracają się jednocześnie. Jest to spowodowane tym, że siła tarcia F_T oraz siła momentu pędu wirującego dysku F_D przeciwdziałające obrotowi są podobnych rzędów, przez co siła F rozkłada się w miarę równomiernie: część siły powoduje obrót platformy, a część obrót obejmę.

Pomiary przeprowadzano dla dwóch różnych sił tarcia F_T . Rysunek 3.2(a) przedstawia pomiary dla przyłożonej małej siły tarcia, a rysunek 3.2(b) dla przyłożonej większej siły tarcia.

3.1.4 Demonstracja 3

1. Cel

Zaobserwowanie zachowania modelu dla bardzo dużego tarcia.

2. Wykonanie

Ustawić dysk w pozycji pionowej. Ustawić prędkość obrotową dysku na 10% mocy silnika. Odczekać, aż dysk przestanie się rozpędzać i osiągnie stałą prędkość obrotową. Należy ręcznie zablokować obracanie się platformy. Następnie zadać obrót obejmę o kąt 90 stopni. Dokonać obserwacji obrotu obejmę i platformy.

3. Obserwacje

Od chwili w której zadano siłę, obracała się wyłącznie obejmą „O”. Ostatecznie, obejmą obróciła się o taki sam kąt, jak w demonstracji platformy, gdzie dysk nie wirował. Dzieje się tak, ponieważ siła blokująca obrót platformy jest bardzo duża, przez co 100% przyłożonej siły zostało wykorzystane do obrotu obejmę. Pomiary z tego doświadczenia możemy zobaczyć na rysunku 3.3

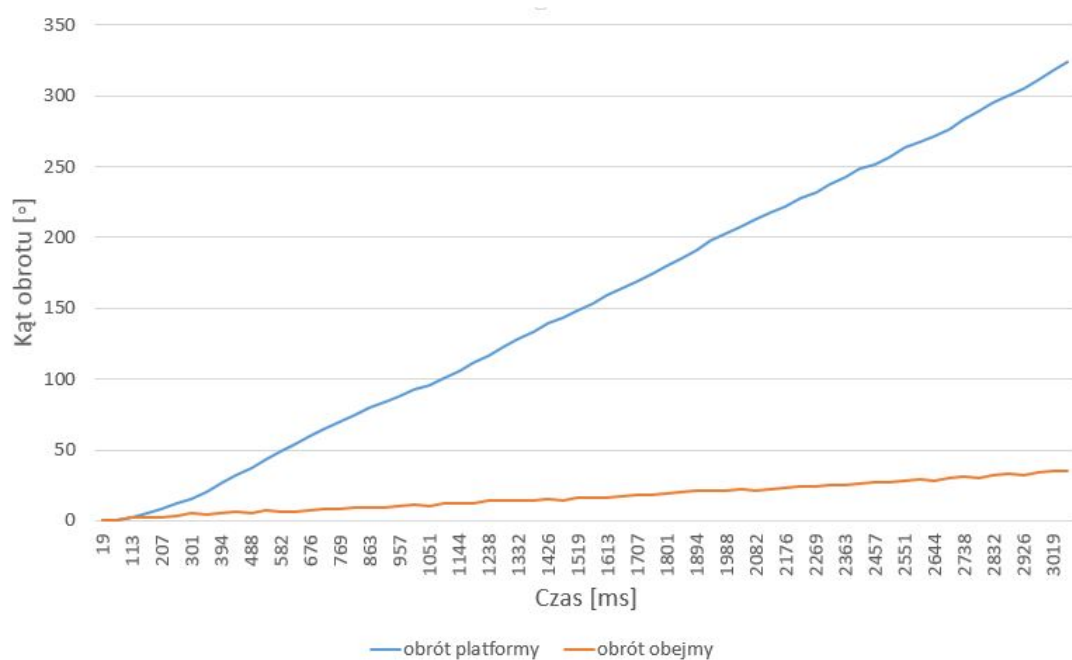
3.1.5 Podsumowanie

Warto zauważyć, że próba przybliżenia zerowych oporów tarcia platformy w Demonstracji 1, w rzeczywistości występuje w przestrzeni kosmicznej. W konstrukcjach naziemnych najczęściej występuje przypadek z Demonstracji numer 2, jednak w konstrukcjach wykorzystujących CMG, takich jak kiwający się statek czy balansujący motor, dyski wychylają się na zmianę raz w jedną, raz w drugą stronę, przez co średnie położenie dysku pozostaje w tym samym miejscu.

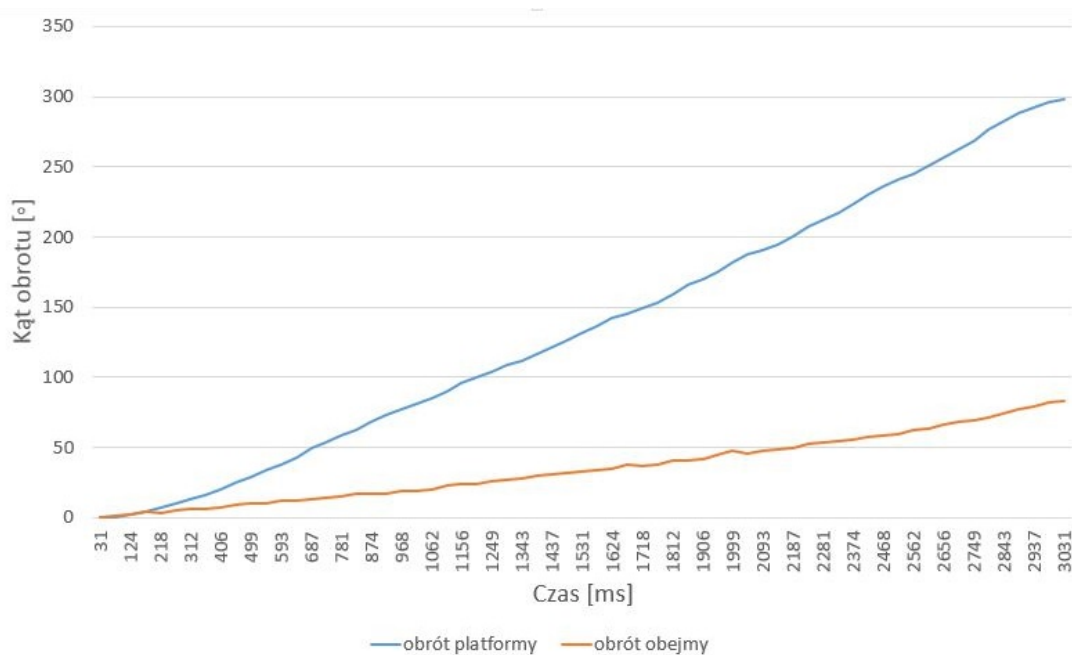
3.2 Eksperymenty

3.2.1 Badanie sił obracających obejmę

Sterowanie obejmą może odbywać się przy użyciu jednego z dwóch algorytmów: w pierwszym, w każdym momencie siła jest generowana przez jedną cewkę silnika krokowego, który obraca obejmę „O”, natomiast w drugim algorytmie wykorzystywane są do tego dwie cewki. Z danych technicznych silnika wynika, że drugi algorytm generuje większą siłę niż algorytm pierwszy nie wiadomo jednak dokładnie o ile większą. Proporcje pomiędzy tymi siłami wyznaczone zostaną eksperymentalnie.

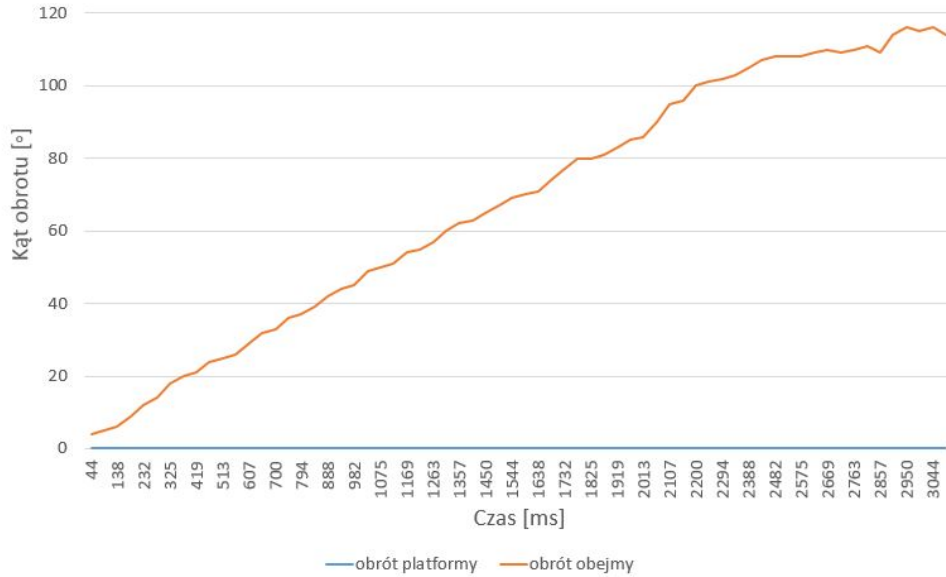


(a) Wyniki dla dodanej małej wartości tarcia



(b) Wyniki dla dodanej dużej wartości tarcia

Rysunek 3.2 Wykresy przedstawiające pomiary z Demonstracji 2



Rysunek 3.3 Pomiary z Demonstracji 3

W tym eksperymencie każdy pomiar rozpoczyna się, kiedy prędkość obrotowa platformy ω_0 jest zerowa, a kąt o jaki się ona dotychczas obróciła α_0 wynosi zero. Wiemy, że kąt obrotu α w ruchu jednostajnie przyspieszonym wynosi

$$\alpha = \alpha_0 + \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad (3.1)$$

gdzie ε to przyspieszenie kątowe, który możemy wyznaczyć z zależności

$$M = I\varepsilon \quad (3.2)$$

gdzie I to moment bezwładności, a M to moment obrotowy. Stąd możemy wyliczyć, wartość kąta obrotu

$$\alpha = \frac{M t^2}{2I} \quad (3.3)$$

Przeprowadzono pomiary kąta, o jaki obróciła się platforma po 5 sekundach od zadanania obrotu dla algorytmu 1 (przykładającego siłę F_1) i algorytmu 2 (przykładającego siłę F_2) dla obrotu w dwie strony. Wyniki pomiarów przedstawia tabela 3.1. Moment bezwładności I oraz czas trwania pomiarów t we wszystkich pomiarach pozostają stałe. Na podstawie tabeli oraz powyższych wzorów możemy ustalić proporcję $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$, gdzie α_1 to kąt o jaki obróciła się platforma przy użyciu algorytmu 1, a kąt α_2 – przy użyciu algorytmu sterującego numer 2.

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\frac{M_1 * t^2}{2I}}{\frac{M_2 * t^2}{2I}} = \frac{M_1}{M_2}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{135}{191} = \frac{M_1}{M_2}, \quad (3.5)$$

$$M_2 \approx 1,4 * M_1. \quad (3.6)$$

Z równania 3.6 wynika, że drugi algorytm generuje 1,4 raza większą siłę obrotową, niż algorytm pierwszy.

Tablica 3.1 Eksperymentalne wyznaczanie sił algorytmów

	Algorytm 1		Algorytm 2	
1	148°	130°	176°	186°
2	138°	107°	193°	203
3	129°	140°	190°	192
4	120°	130°	205°	192°
5	145°	127°	187°	202°
6	137°	137°	205°	187°
7	142°	140°	170°	203°
8	138°	129°	211°	157°
9	126°	149°	184°	196°
10	142°	138°	201°	205°
Średnia	137°	132°	192°	190°
Średnia w dwóch kierunkach	135°		191°	

3.2.2 Badanie możliwości regulacji obrotem platformy

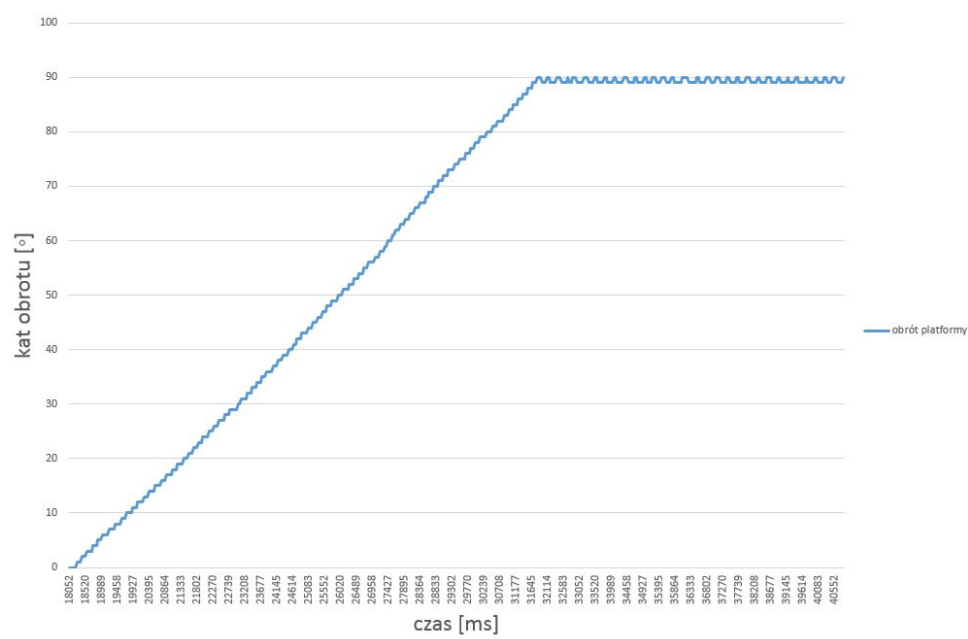
W celu pokazania, że korzystając z urządzeń CMG możemy obracać się o zadany kąt, do platformy PDSO dodano prosty regulator, mający za zadanie ustawić platformę pod zadany kąt. Działa on na zasadzie przyłożenia siły obrotowej w kierunku danego kąta. Zachowanie platformy PDSO z regulatorem obracającym o 90 stopni można zobaczyć na rysunku 3.4.

Podczas projektowania PDSO koncentrowano się głównie na prezentacji zasady działania tego typu urządzeń, dlatego zdecydowano się na zastosowanie silnika krokowego do obracania obejmą. Jednakże silnik taki może generować tylko dwie wartości siły, przez co uniemożliwia nadpisanie bardziej zaawansowanego algorytmu do sterowania o zadany kąt. Z tego powodu w urządzeniach CMG mających za zadanie wysterowanie kątem obrotu, proponuje się zastosowanie silnika z szerszym zakresem regulacji przykładanej siły.

3.2.3 Podsumowanie

W przedstawionych eksperymentach pokazano, że prędkość z jaką porusza się platforma jest zależna od przykładanej siły. W tabeli 3.1 zauważyć można, że dla każdego z algorytmów (tzn. w zależności od przyłożonej siły obrotowej), po tym samym czasie platforma obraca się o inny kąt – większy dla algorytmu drugiego, czyli dla tego algorytmu prędkość obrotowa musi być większa. Dlatego używając silnika, który dysponuje większą siłą, platforma będzie miała możliwość obracania się z większymi prędkościami.

W celu łatwiejszego zrozumienia zjawiska, zaprojektowano platformę PDSO tak, by była ona układem dążącym do stabilności oraz reagowała w sposób liniowy, dlatego prosty regulator na zasadzie przykładania siły w odpowiednim kierunku sprawdza się w tym przypadku. Warto jednak zauważyć, że w konstrukcjach takich jak samobalansujący motocykl (np. opisany w rozdziale 1.2), są to układy wymagające nieustanej stabilizacji oraz odpowiadające w sposób nieliniowy, dlatego wymagają o wiele bardziej skomplikowanych algorytmów sterowania.



Rysunek 3.4 Obracanie platformy PDSO o kąt 90 stopni

Rozdział 4

Komputerowy model PDSO

4.1 Środowisko modelowania

W celu zweryfikowania wniosków uzyskanych z badań na skonstruowanym rzeczywistym modelu PDSO zaprojektowano podobną konstrukcję w programie komputerowym MSC Adams [13], korzystając z wydania Adams View Student Edition 2016. Jest to program, który umożliwia symulowanie dynamiki wielu ciał, korzystając z metod numerycznych. Pozwala on na tworzenie brył przestrzennych oraz definiowanie zależności między nimi (na przykład: przegub rotacyjny, translacyjny), a następnie nakładanie na tak zbudowany model różnych wartości (na przykład: pozycji, prędkości, sił). Uruchomienie symulacji jest prezentowane w postaci filmu wizualizującego ruch i przemieszczanie się ciał względem siebie, a po jej zakończeniu umożliwia wizualizację obserwowanych parametrów w postaci wykresów. Zdecydowano się na ten program, ponieważ jest on obecnie najbardziej polecanym programem w tej dziedzinie. Dodatkowym atutem jest bezpłatna licencja dostarczana studentom przez producenta oprogramowania.

Dokładne zmierzenie wszystkich parametrów rzeczywistej konstrukcji PDSO, takich jak przykładane siły czy siły tarcia, było niemożliwe z powodu braku dostępu do specjalistycznego sprzętu, jednak konstrukcja zamodelowana w programie MSC Adams przedstawia tę samą zasadę działania, co konstrukcja rzeczywista, a także możliwie dokładnie odzwierciedla wartości wszystkich parametrów. Zbudowany model, widoczny na rysunku 4.1, składa się z czterech części połączonych ze sobą przegubami obrotowymi.

4.2 Opis przeprowadzonych eksperymentów

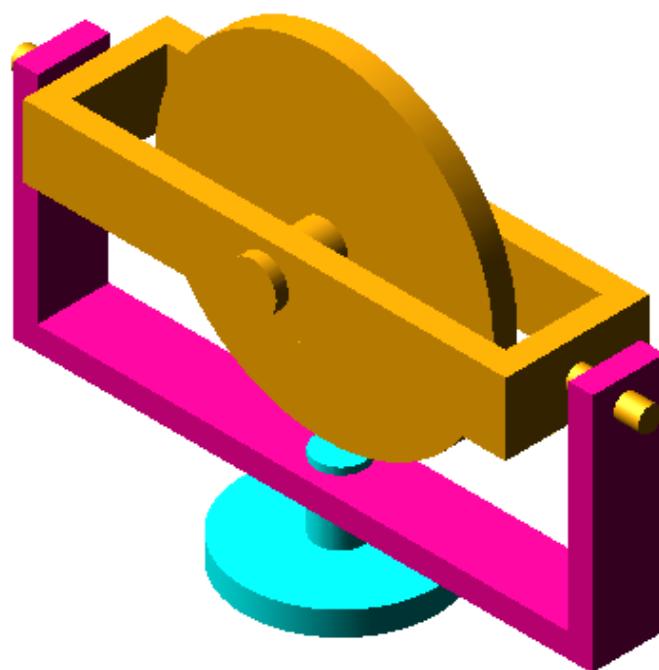
W przeprowadzonych symulacjach starano się odzwierciedlić warunki z doświadczeń opisanych w rozdziale 3.1

1. Demonstracja 1

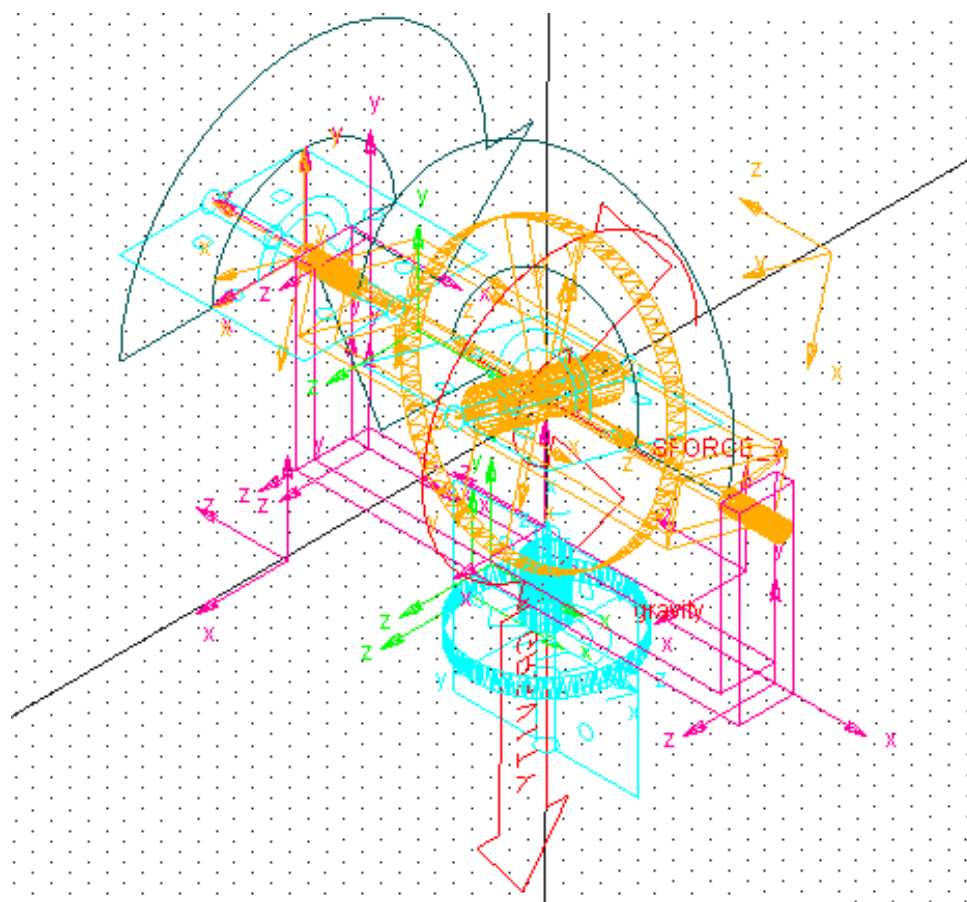
Platforma nie posiada tarcia. Jest to wyidealizowany przypadek, niewystępujący w rzeczywistości. Dzięki brakowi tarcia, 100% przyłożonej siły przekłada się na obrót platformy, nie powodując obrotu obejm. Wyniki z symulacji komputerowej przedstawia rysunek 4.2(a)

2. Demonstracja 2

Platforma posiada tarcie. W tym przypadku przyłożona siła rozkłada się na obrót platformy i obejm. Wyniki z symulacji komputerowej przedstawia rysunek 4.2(b)



(a) Widok komputerowego modelu PDSO podczas symulacji



(b) Widok okna projektowego modelu PDSO

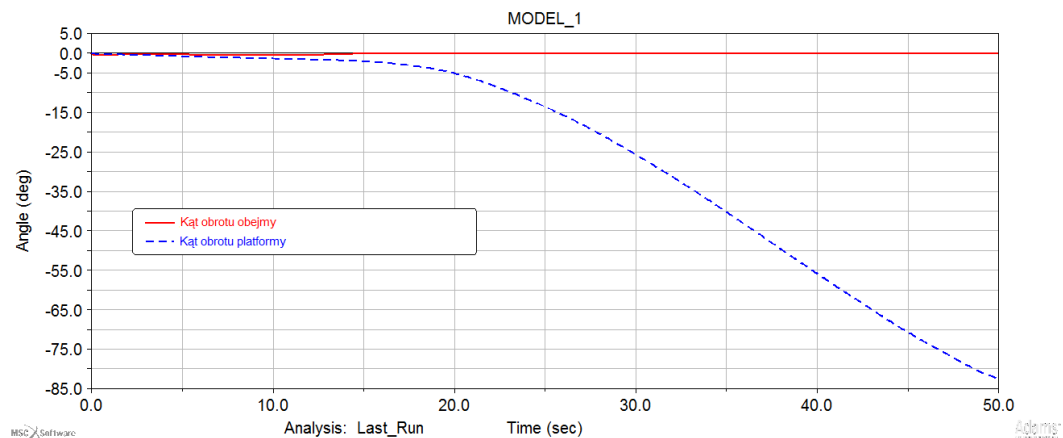
Rysunek 4.1 Model wygenerowany w programie Adams

3. Demonstracja 3

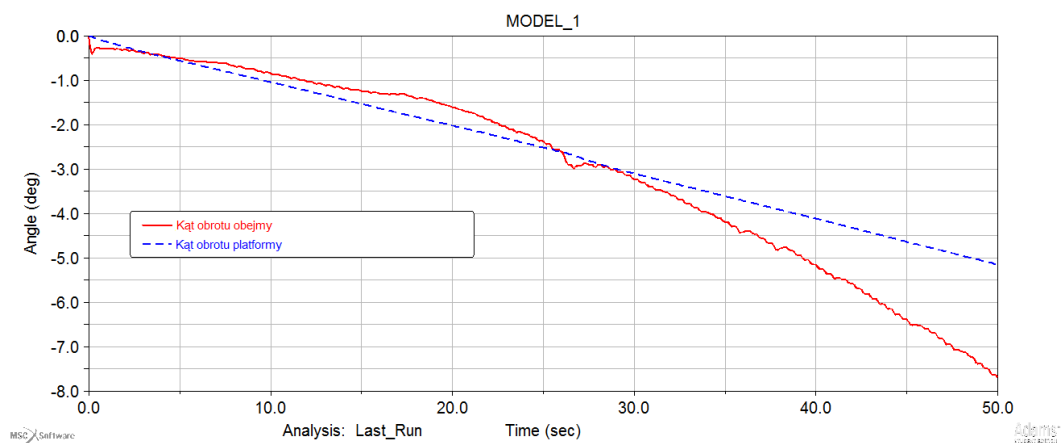
Platforma posiada bardzo duże tarcie (platforma jest zablokowana), dzięki czemu 100% przyłożonej siły przekłada się na obrót obejmę. Wyniki z symulacji komputerowej przedstawia rysunek 4.2.

4.3 Podsumowanie

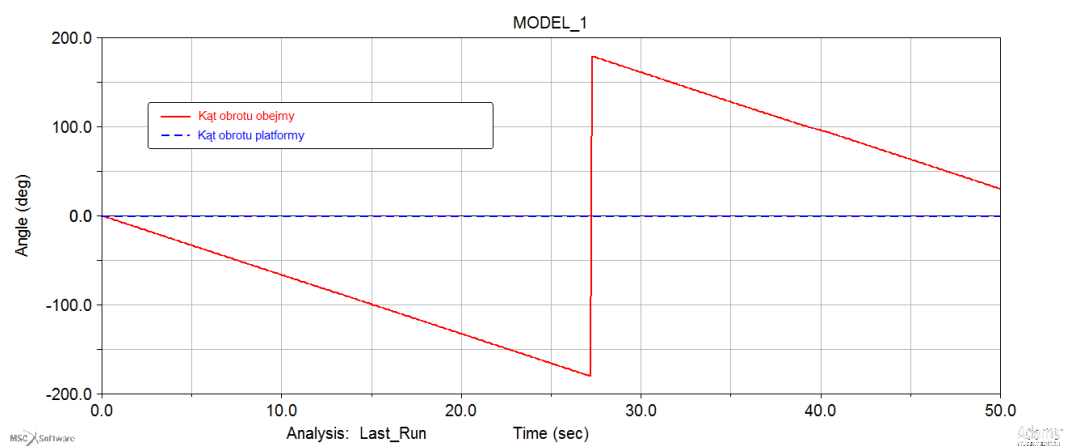
Wyniki badań komputerowych potwierdziły badania przeprowadzone na rzeczywistej konstrukcji PDSO. Przeprowadzone eksperymenty wyraźnie pokazują, że proporcje rozkładu momentu siły silnika (poruszającego obejmę) na składowe obracające platformę i obejmę są zależne od sił przeciwdziałających obrotowi platformy. W przeprowadzonych eksperymentach główną siłą przeciwdziałającą obrotowi platformy była regulowana przez eksperymentatora siła tarcia o podłoże.



(a) Wyniki symulacji komputerowej Demonstracji 1



(b) Wyniki symulacji komputerowej Demonstracji 2



(c) Wyniki symulacji komputerowej Demonstracji 3

Rysunek 4.2 Wykresy przedstawiające symulacje z programu Adams

Rozdział 5

Podsumowanie

Zgodnie z celem niniejszej pracy, opracowano stanowisko prezentujące urządzenie Control Moment Gyroscope. Zaproponowano także kilka demonstracji, dzięki którym można wizualizować interakcje zachodzące w układach CMG i zapoznać się z zasadą działania tego typu urządzeń.

Podczas projektowania i wykonywania platformy zauważono pewne problemy charakterystyczne dla układów żyroskopowych oraz wypracowano „dobre praktyki” które pozwalają rozwiązać część z nich. Zebrane poniżej wskazówki mogą być pomocne przy budowie kolejnych urządzeń wykorzystujących CMG.

Dużym problemem okazały się wibracje, które towarzyszą wirowaniu dysku. Były one spowodowane niedokładnościami wykonania części mechanicznych. Duże prędkości obrotowe potęgują nawet niewielkie niedokładności, rzędu dziesiątych milimetra. Zauważono, że warto używać większego momentu bezwładności dysku i mniejszych prędkości obrotowych, otrzymując w ten sposób taki sam moment pędu. Wadą tego rozwiązania jest zwiększenie masy całej konstrukcji, dlatego podczas dobierania elementów warto znaleźć złoty środek między jakością wykonania, a masą dysku.

Inną techniką, jaka sprawdziła się przy redukcji drgań, jest stosowanie sprężystych materiałów przy połączeniach elementów. Zapobiegają one przekazywaniu wibracji na kolejne elementy oraz tłumią te już istniejące. Trzeba jednak uważać stosując tę technikę, by nadmiernie nie zmniejszyć sztywności konstrukcji. Wibracje w konstrukcjach typu CMG będą występować zawsze, jedyne co można zrobić, to zredukować je do niezauważalnych. Warto wiedzieć, iż wibracje zależą od charakterystyki częstotliwości drgań, a ta zmienia się wraz ze zmianą prędkości dysku. Są one wzmacniane lub tłumione w zależności od charakterystyki częstotliwościowej układu. Tę zależność można zaobserwować na platformie PDSO podczas rozpędzania dysku. Prędkość rośnie liniowo, a wibracje początkowo niewielkie, kolejno zwiększają się i znów maleją.

Wykorzystanie druku 3D do elementów konstrukcyjnych okazało się trafną decyzją. Elementy były drukowane z wypełnieniem 20%, dzięki czemu są lekkie, a mimo niskiego poziomu wypełnienia spełniają oczekiwania dotyczące wytrzymałości. Pokazuje to, że materiału użytego w PDSO (ABS) można użyć także przy wykonywaniu innych konstrukcji, przenoszących większe obciążenia i wymagających większej wytrzymałości. Dodatkowo istnieje możliwość wzmocnienia konstrukcji poprzez zaprojektowanie elementów tak, by nie występowały w nich miejsca silnej koncentracji naprężeń, na przykład dzięki zastosowaniu wewnętrznych wsporników w narożach.

Opracowana platforma PDSO stanowi dobrą bazę rozwojową do kolejnych projektów. Przy niewielkim nakładzie pracy można ją przystosować do testowania algorytmów do takich urządzeń jak stabilizator okrętowy czy samobalansujący motocykl. W celu adap-

tacji, należałoby wymienić silnik obracający obejmą „O” na opisany w rozdziale 3.2.3 oraz połączenie platformy „P” z podłożem na U-kształtne (w celu umożliwienia testowania algorytmów redukujących bujanie się) lub połączenie punktowe (w celu testowania algorytmów do balansowania).

Bibliografia

- [1] Autodesk. <http://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [2] A. Boddiford, C. Manion, K. S. Kim, P. Radhakrishnan, L. Sentis. Experiments to Validate the Use of a Control Moment Gyroscope (CMG) to Turn Robots. *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [3] Cadsoft. <https://cadsoft.io/>. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [4] Dokumentacja dostarczona przez firmę ST. http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/a6/79/73/ae/6e/1c/44/14/DM00122016.pdf/files/DM00122016.pdf/jcr:content/translations/en.DM00122016.pdf. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [5] Eclipse. <https://eclipse.org/>. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [6] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, M. Łukaszewski, W. Komar, R. Bożek. *Podstawy fizyki*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2011.
- [7] Ibiblio. <http://www.ibiblio.org/hyperwar/OnlineLibrary/photos/images/h53000/h53508.jpg>. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [8] S. C. Johnson. Design of a Control Moment Gyroscope Attitude Actuation System for the Attitude Control Subsystem Proving Ground. Raport instytutowy, DTIC Document, 2013.
- [9] D. Kim, K. Bretney, A. Shao, A. Tsang. Electronic Control System for Gyroscopic Stabilized Vehicle, Wrze. 10 2013. US Patent 8,532,915.
- [10] V. Lappas, W. Steyn, C. Underwood. Attitude Control for Small Satellites Using Control Moment Gyros. *Acta Astronautica*, 51(1):101–111, 2002.
- [11] Lit motors. C-1. <http://litmotors.com/c1/>. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [12] Maelabs. Educational control systems. <http://maelabs.ucsd.edu/mae171/controldocs/gyroscope.htm>. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [13] MSCsoftware. <http://www.mscsoftware.com/page/adams-student-edition>. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [14] NASA. Return to flight top 35 images. https://www.nasa.gov/returntoflight/multimedia/top30_page2_prt.htm. [Online; dostęp 27.11.20016].

- [15] X. Roser, M. Sghedoni. Control Moment Gyroscopes (CMG's) and Their Application in Future Scientific Missions. *Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems*, wolumen 381, strona 523, 1997.
- [16] Seakeeper. Take a look under the hood. https://www.seakeeper.com/seakeeper_products/seakeeper-5/. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [17] ST. <http://www.st.com/en/development-tools/sw4stm32.html>. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [18] O. Tekinalp, E. Yavuzoglu. A New Steering Law for Redundant Control Moment Gyroscope Clusters. *Aerospace science and technology*, 9(7):626–634, 2005.
- [19] Wikimedia. Gyroscope wheel. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Gyroscope_wheel-text.png. [Online; dostęp 27.11.20016].
- [20] H. Yetkin. *Stabilizing Control of an Autonomous Bicycle*. Praca doktorska, The Ohio State University, 2013.

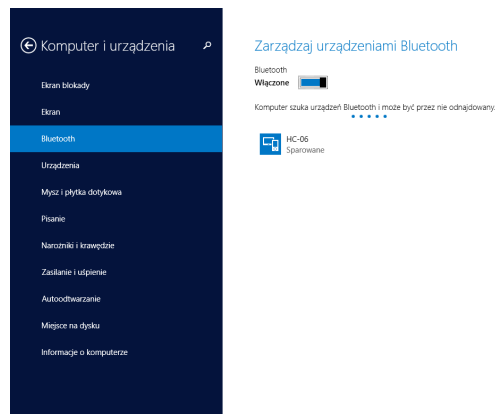
Dodatek A

Instrukcja obsługi stanowiska PDSO

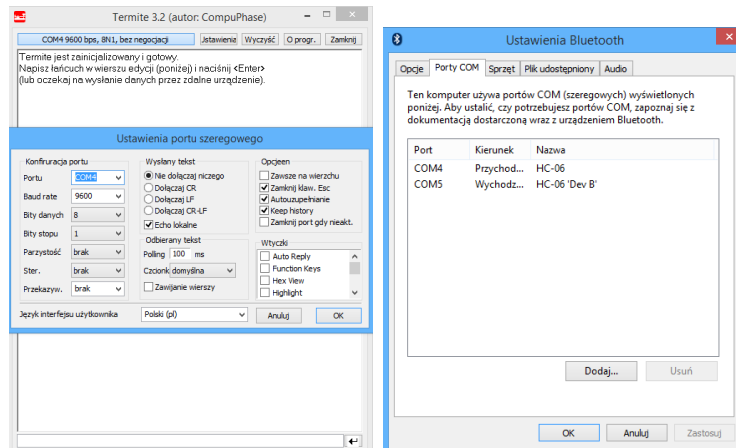
A.1 Konfigurowanie połączenia

Aby umożliwić korzystanie ze stanowiska PDSO, niezbędne jest wykonanie sekwencji inicjacji połączenia platformy z komputerem, poprzez wykonanie następujących kroków (opis dla systemu Windows 8.1):

1. Podłącz baterię zasilającą (na module Bluetooth powinna zacząć migać czerwona dioda).
2. Na komputerze, z którego zamierzasz sterować PDSO, włącz funkcję Bluetooth, a następnie wyszukaj urządzenia znajdujące się w pobliżu (rysunek A.1(a)). Wybierz z listy urządzenie o nazwie „HC-06”. Jeżeli urządzenie o podanej nazwie nie znajduje się na liście, wybierz opcję „odśwież” i ponownie spróbuj wybrać z listy urządzenie „HC-06”.
3. Po wybraniu urządzenia z listy, zostaniesz poproszony o podanie hasła w celu połączenia z wybranym urządzeniem. Hasło to „1234”.
4. Otwórz ustawienia Bluetooth (rysunek A.1(c)) i przejdź do zakładki „Porty COM”. Odczytaj numer wirtualnego portu, pod którym zainstalował się moduł „HC-06 Dev B”.
5. Otwórz program Termite lub inny tego typu, służący do komunikacji z portami COM. W opcjach (rysunek A.1(b)) ustaw: odczytany numer portu COM („Portu”), prędkość komunikacji („Baud rate”) na wartość 9600 oraz 8 bitową ramkę danych („Bity danych”).
6. Jeśli powyższe czynności zostały wykonane prawidłowo, po ustanowieniu połączenia na module bluetooth PDSO czerwona dioda zacznie świecić ciągłym światłem, a na ekranie terminala zaczną wyświetlać się aktualne wartości parametrów.



(a) Wyszukiwanie urządzenia



(b) Ustawienia terminala

(c) Sprawdzenie numeru portu

Rysunek A.1 Konfiguracja połączenia

A.2 Sterowanie

Do sterowania PDSO wykorzystywane są komendy składające się z czterech znaków, wysyłanych przez wirtualny port COM. Pierwszy znak to zawsze litera, która wskazuje jaki parametr jest zmieniany (objaśnione poniżej). Na kolejnych miejscach znajduje się wartość liczbowa, jaką ma przyjąć dany parametr. Wartość liczbowa nie może zająć więcej niż 3 znaki (np. -50 , 200). Jeżeli wartość jest krótsza niż wymagane 3 znaki, dodajemy „/” na końcu, żeby cała komenda składała się z czterech znaków.

Objaśnienie działania poszczególnych komend:

- x – umożliwia ustawienie wartości wypełnienia PWM, sterującego prędkością silnika dysku. Przyjmuje wartości w przedziale od 0 do 100, np.: „x50/” ustawia wypełnienie PWM na 50 %.
- y – służy do ustawienia wartości kąta, o jaki ma się obrócić obejm. Podana wartość jest mnożona przez 10, np.: „y-9/” obróci obejmę o -90 stopni.
- a – określa numer algorytmu dla silnika krokowego. Przyjmuje wartość 1 dla algorytmu wykorzystującego jedną cewkę oraz wartość 2 dla algorytmu wykorzystującego dwie cewki.

A.3 Interpretacja danych pomiarowych

Na ekranie terminala będą pojawiać się informacje z PDSO, np.

Czas 6932.x=10 y=120 z=152 pom=132

Składowe komunikatu oznaczają kolejno:

- Czas 6932 – czas jaki upłynął w milisekundach od ostatniej zmiany kąta obejmy, tu: 6932 milisekund.
- x=10 – wartość w procentach wypełnienia PWM z jaka aktualnie jest sterowany silnik dysku, tu: 10% wypełnienia
- y=120 – liczba kroków pozostałych do wykonania przez silnik sterujący obrotem obejmy do dokończenia obrotu o zadany kąt, tu: 120 kroków.
- z=152 – kąt w stopniach pod jakim jest ustawiona platforma względem miejsca gdzie został zadany obrót obejmy, tu: 152 stopnie.
- pom=132 – kąt w stopniach pod jakim była obrócona platforma w piątej sekundzie od zadania obrotu obejmy, tu: 132 stopnie.

Wszystkie komunikaty od PDSO należy odczytywać w analogiczny sposób jak powyżej.

Dodatek B

Płyty DVD

Dołączona do pracy płyta DVD zawiera następujące elementy:

- katalog PCB – projekt płytki PCB wykonany w programie Eagle,
- katalog Oprogramowanie – projekt wykonany w środowisku System Workbench for STM32, w którym znajdują się kody źródłowe programu napisanego do sterowania platformą PDSO,
- katalog Zdjęcia – dokumentacja fotograficzna opracowanego urządzenia,
- katalog Film – dokumentacja filmowa z demonstracji przeprowadzonych w ramach realizacji niniejszej pracy dyplomowej.