

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

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

PROJEKT INŻYNIERSKI

System stabilizujący poziome położenie platformy.

Self-levelling system for a platform.

AUTOR:
Alicja Jurasik

PROWADZĄCY PROJEKT:
Dr inż. Marek Wnuk

OCENA PROJEKTU:

Spis treści

1 Wstęp	2
1.1 Cel Projektu	2
2 System stabilizacji platformy	3
2.1 Konstrukcja mechaniczna platformy	3
2.1.1 Przegląd dostępnych materiałów i technologii	3
2.1.2 Założenia konstrukcyjne	3
2.1.3 Model platformy	4
2.1.4 Rzeczywista konstrukcja	5
2.2 Dobór serwomechanizmu	6
2.2.1 Stanowisko pomiarowe	6
2.3 Układy elektroniczne	7
2.3.1 Czujniki	7
2.3.2 Mikrokontroler i obsługa sygnałów	12
2.3.3 Integracja układów z konstrukcją	15
2.4 Sterowanie	16
2.4.1 Dane z sensorów	17
2.4.2 Regulacja	19
2.4.3 Testy działania platformy	21
2.5 Programowanie	22
2.5.1 Stanowisko pomiarowe	23
2.5.2 Sterowanie platformą	23
3 Podsumowanie	25
3.1 Kontynuacja projektu	25
A Schemat i płytki PCB układów	29
B Zdjęcia	32

Rozdział 1

Wstęp

Stabilizacja poziomu wykorzystywana jest w wielu dziedzinach. Uniezależnienie położenia od zmian nachylenia podłoża jest pożąданie i często nieodzowne, począwszy od zastosowań militarnych, przez rozwiązań przemysłowe, do prostych systemów stabilizacji obrazu. W robotyce problem utrzymania poziomu dotyczy robotów kroczących, balansujących oraz bezzałogowych statków latających. Nie byłoby możliwe zbudowanie tych robotów bez użycia układów MEMS (mikroelektromechanicznych). Niniejszy projekt przedstawia system utrzymywania poziomu z wykorzystaniem czujników MEMS i serwomechanizmów.

1.1 Cel Projektu

Celem projektu jest budowa platformy stabilizującej poziom położenie zwanej *Platformą samopoziomującą*. *Platforma samopoziomująca* to konstrukcja utrzymująca poziom w dwóch płaszczyznach, która odpowiednio reaguje na zmiany nachylenia podłoża. Projekt oparty jest na czujnikach inercyjnych współpracujących z układami wykonawczymi. Wszystkim steruje 16-bitowy mikrokontroler HC9S12A64 z rodziny HCS12 firmy Freescale.

Problem stabilizacji poziomu *Platformy samopoziomującej* sprowadza się do utrzymywania zadanej orientacji *Platformy właściwej*. Aby możliwa była reakcja na wychylenie platformy konieczne jest zastosowanie elementów wykonawczych. Niezbędne są również sensory, z których uzyskuje się informacje o bieżącej orientacji podłoża i *Platformy właściwej*. W projekcie elementami wykonawczymi będą serwomechanizmy modelarskie. Wymagane jest aby miały one duży moment napędowy i dużą szybkość pozycjonowania. W pracy przewidziano zbudowanie stanowiska, które ma na celu umożliwienie zbadania działania serwomechanizmu. Wspomniane wcześniej układy MEMS posłużą jako czujniki. Ze względu na nietrywialny problem określenia orientacji na podstawie odczytów z sensorów zdecydowano się zastosować wybrane metody filtracji i fuzji danych pomiarowych z różnych czujników (akcelerometr, żyroskop). W ramach pracy przewidziane jest wykonanie następujących zadań:

- zbudowanie konstrukcji *Platformy samopoziomującej*,
- dobranie serwomechanizmów modelarskich oraz ich zbadanie,
- dobranie sensorów i metod filtrowania danych pochodzących z czujników,
- dobranie sposobu sterowania,
- stworzenie algorytmu sterowania *Platformą samopoziomującą* i jego zbadanie.

Rozdział 2

System stabilizacji platformy

Na potrzeby projektu wykonane zostało stanowisko demonstracyjne. Stanowisko ma postać platformy ("tacy"). System stabilizacji platformy umożliwia utrzymywanie poziomu w płaszczyźnie $X - Y$. Na ten system składają się: konstrukcja mechaniczna, czujniki inercyjne, serwomechanizmy oraz mikrokontroler z zaimplementowanym algorytmem sterowania.

2.1 Konstrukcja mechaniczna platformy

Na konstrukcję mechaniczną platformy składają się 3 części: pierwsza - utrzymywana w poziomie, druga - kompensująca zmiany poziomu w osi X oraz trzecia - kompensująca zmiany poziomu w osi Y . Konstrukcja mechaniczna platformy powinna wytrzymać ruchy poszczególnych elementów względem siebie. Ważną cechą projektu części mechanicznej jest umiejscowienie elementów wykonawczych ze względu na charakter ruchu. Wielkość konstrukcji nie może przysparzać problemów użytkownikowi. Dodatkowo platforma powinna posiadać uchwyty do wygodnego trzymania.

2.1.1 Przegląd dostępnych materiałów i technologii

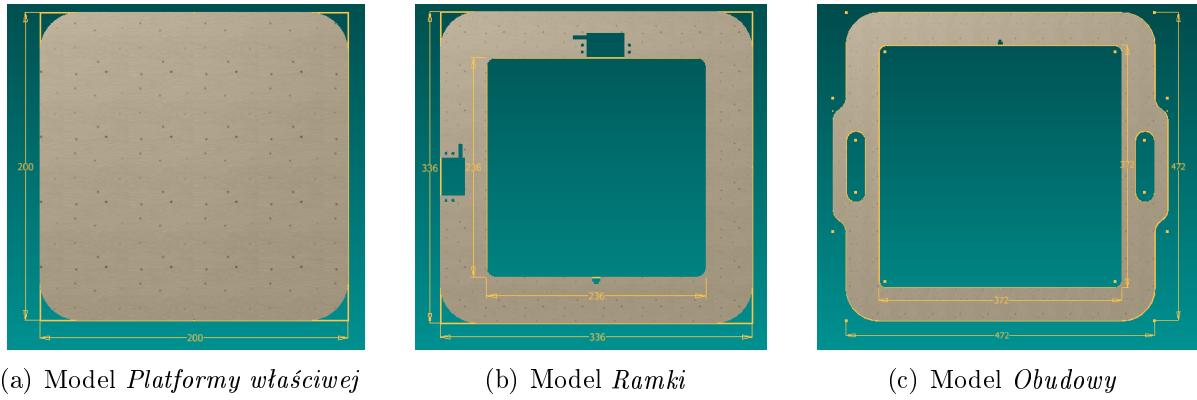
Rozważane materiały i technologie do wykonania konstrukcji:

- tworzywo sztuczne — drukowanie przestrzenne
- szkło akrylowe (pleksiglas) — cięcie laserowe
- sklejka — obróbka skrawaniem

Po wstępny rozeznaniu odrzucono technologię druku 3D ze względu na małą wytrzymałość i duży margines błędu. Cięcie laserowe w szkle akrylowym zapewnia estetykę oraz dokładność. W tym projekcie do wykonania konstrukcji wykorzystano sklejkę lisciątą. Zaletami tego tworzywa są łatwość obróbki, odpowiednia wytrzymałość oraz mniejsza, niż w przypadku pleksi, gęstość.

2.1.2 Założenia konstrukcyjne

Konstrukcja platformy składa się z trzech części. Pierwszą z nich jest *Platforma właściwa*, która docelowo ma pozostać w poziomie. Ta składowa jest kwadratem o boku 200mm co przedstawia rysunek 2.1(a). Stabilizowana część będzie przytwierdzona do *Ramki*. Roz-

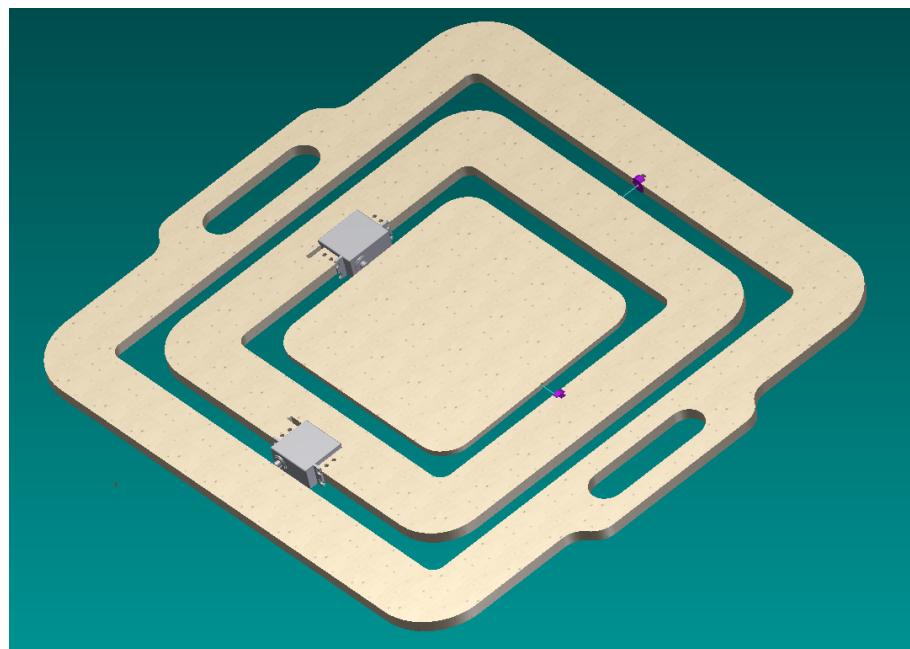


Rysunek 2.1 Modele komponentów konstrukcji platformy stabilizującej

miary kwadratowej ramki (rys. 2.1(b)) przewidują możliwość swobodnego ruchu zawieszonej w jej wnętrzu *Platformy właściwej*. Na ramce znajdują się miejsca przewidziane na serwomechanizmy i łożyska, dzięki którym *Platforma właściwa* będzie zamocowana obrotowo do *Ramki*. Całość utrzymywać będzie *Obudowa* (rys.2.1(c)). Model tej części również przewiduje obrotowe mocowanie elementu znajdującego się wewnętrz (Ramki) oraz zachowanie odpowiedniej odległości. Zewnętrzna część jest przystosowana do wygodnego uchwycenia.

2.1.3 Model platformy

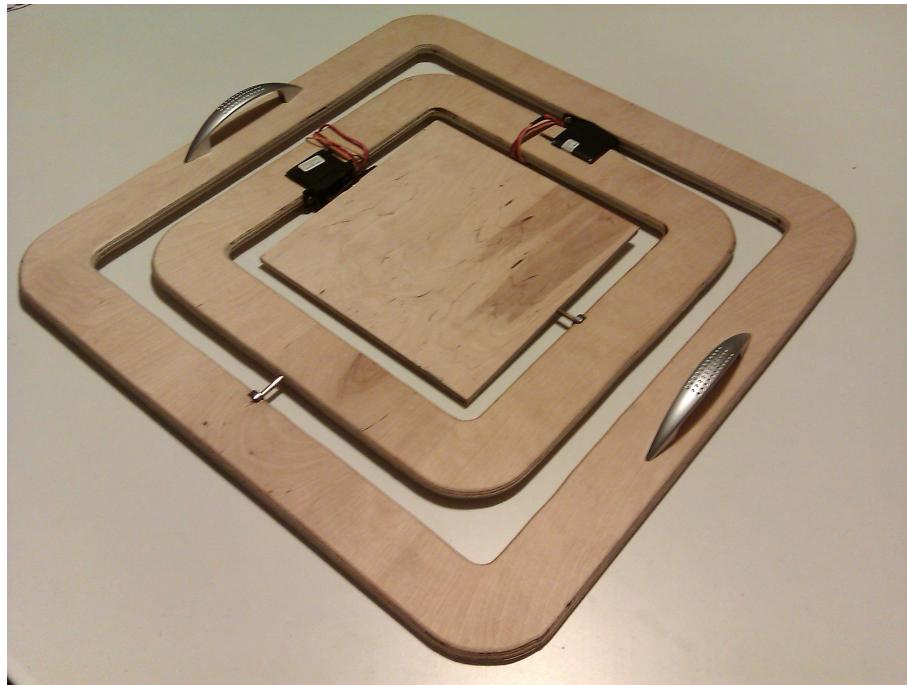
Omówione wyżej komponenty zaprojektowane zostały za pomocą programu Autodesk Inventor Professional 2012 [8]. Następnie w programie złożono elementy, tym samym tworząc model platformy przedstawiony na rysunku 2.2



Rysunek 2.2 Model konstrukcji platformy stabilizującej poziome położenie

2.1.4 Rzeczywista konstrukcja

Podczas praktycznej realizacji opisanego modelu zmienione zostały postanowienia dotyczące uchwytów. Aby uniknąć dodatkowej obróbki sklejki do *Obudowy* zamontowano uchwyty meblowe (rysunek 2.3).



Rysunek 2.3 Konstrukcja platformy stabilizującej poziome położenie

Parametry mechaniczne platformy

Aby konstrukcja była wytrzymała i jednocześnie niezbyt ciężka należało dobrać poprawną grubość sklejek. Ze względu na dostępność zakupiono sklejki o grubości 6 i 10 mm. Zakładając gęstość sklejki $\rho = 0,8g/cm^3$ obliczono masy poszczególnych elementów. Na podstawie wymiarów oraz mas elementów oszacowano momenty bezwładności elementów napędzanych, co przedstawia tabela 2.1. W obliczeniach nie zostały uwzględnione masy układów elektronicznych.

Element	Wymiary zewnętrzne [mm]	Masa [kg]	Moment bezwładności [kg · m ²]
Platforma właściwa	200x200x6	0,2	$6,4 \cdot 10^{-4}$
Ramka	336x336x10	0,5	$64,3 \cdot 10^{-4}$
Obudowa	472x472x10	0,7	—

Tabela. 2.1 Parametry mechaniczne elementów

2.2 Dobór serwomechanizmu

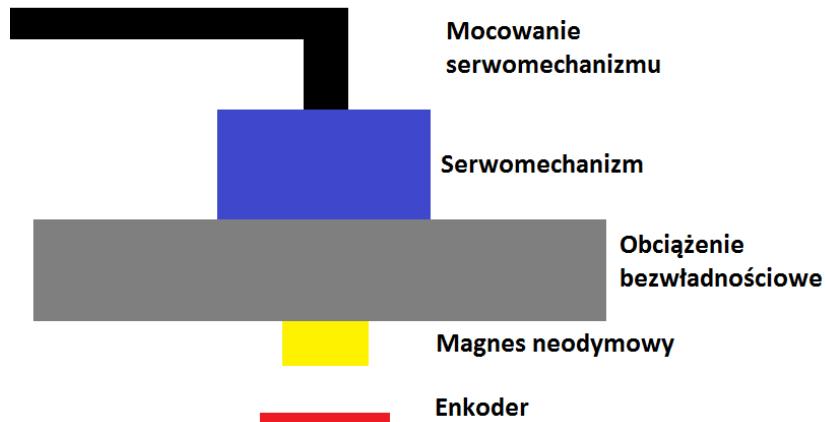
Wybór serwomechanizmów determinują momenty bezwładności elementów platformy. Dodatkowym aspektem jest szybkość serwomechanizmu. Nazwijmy serwomechanizmem wewnętrznym ten, który napędza *Platformę właściwą* względem *Ramki*, a zewnętrznym drugi z nich. Serwomechanizm wewnętrzny będzie poruszał *Platformą właściwą* o momencie bezwładności $I_p = 6,4 \cdot 10^{-4}$ zaś zewnętrzny *Ramkę* wraz z *Platformą właściwą* o łącznym momencie bezwładności $I_{rp} = 70,7 \cdot 10^{-4}$. Zastosowano serwa o dużym momencie napędowym i dużą szybkością pozycjonowania firmy TowerPro. W tabeli 2.2 podano zestawienie dobranych elementów wykonawczych.

Serwomechanizm	Parametr	Dane dla modelarzy		Układ SI	
		Napięcie pracy			
		4,8V	6V	4,8V	6V
TowerPro MG-945R	moment	$10kg \cdot cm$	$12kg \cdot cm$	$1N \cdot m$	$1,2N \cdot m$
	prędkość	$0,23s/60^\circ$	$0,2s/60^\circ$	$4,56rad/s$	$5,24rad/s$
TowerPro MG-996R	moment	$9,4kg \cdot cm$	$11kg \cdot cm$	$0,94N \cdot m$	$1,1N \cdot m$
	prędkość	$0,17s/60^\circ$	$0,14s/60^\circ$	$6,16rad/s$	$7,48rad/s$

Tabela. 2.2 Zestawienie serwomechanizmów

2.2.1 Stanowisko pomiarowe

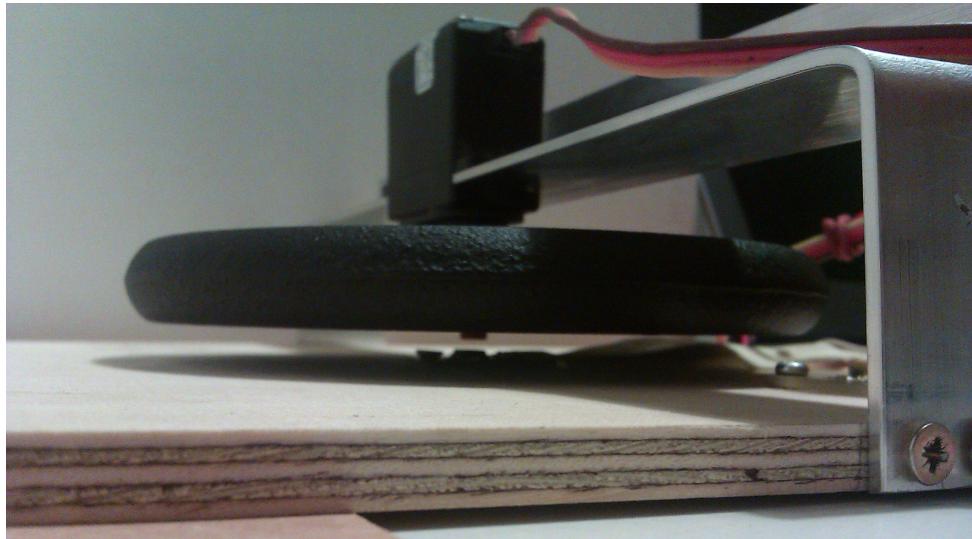
W celu zbadania poprawności parametrów serwomechanizmów zbudowano stanowisko pomiarowe. Wykorzystując enkoder magnetyczny [2] można ustalić czy kąt o jaki obróci się serwomechanizm jest zgodny z zadanym wypełnieniem. Badanie serwomechanizmu modelarskiego polegało na odczytaniu odpowiedzi skokowej. Aby zasymulować obciążenie z jakim będzie zmagał się element wykonawczy wykorzystano ciężarek o momencie bezwładności $I_c = 28,3 \cdot 10^{-4}[kg \cdot m^2]$ (rysunek 2.4).



Rysunek 2.4 Rysunek poglądowy stanowiska pomiarowego

Do skonstruowania stanowiska wykorzystano sklejkę oraz aluminiowy kątownik.

Obsługę stanowiska zrealizowano na mikrokontrolerze HCS12A64. Po wysterowaniu serwomechanizmu impulsy enkodera były zliczane i przesyłane poprzez port szeregowy do komputera.



Rysunek 2.5 Stanowisko pomiarowe do badania serwomechanizmu

Odczytano odpowiedzi skokowe obu serwomechanizmów poruszających orczyk z obciążeniem oraz bez. Charakterystyki czasowe przedstawiono na rysunku 2.6.

Na podstawie odpowiedzi skokowych można stwierdzić, że odpowiednio wybrano serwomechanizmy. Prędkość zmiany położenia osi serwomechanizmu nie zależy od obciążenia i wynosi $370[\text{°}/\text{s}]$ (niezależnie od kierunku ruchu).

2.3 Układy elektroniczne

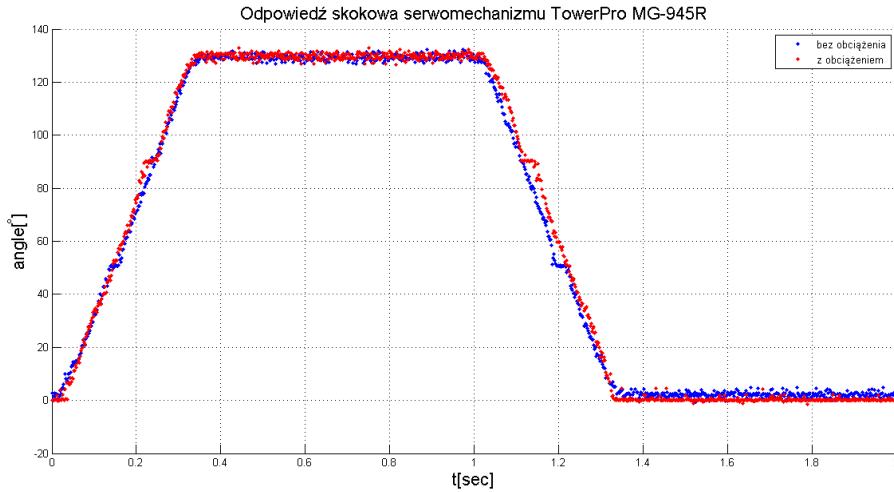
Zastosowane układy elektroniczne służą do:

- pozyskania informacji o orientacji *Platformy właściwej*,
- wysterowania układów wykonawczych,
- przesyłania danych do komputera.

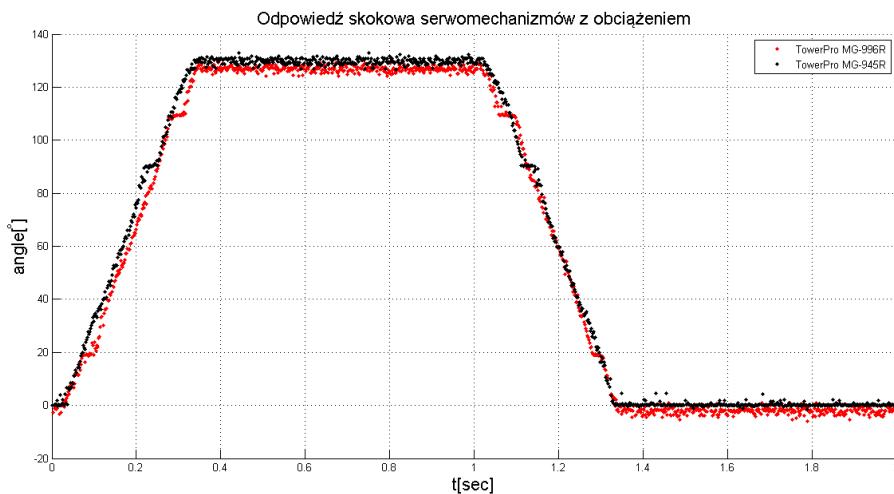
2.3.1 Czujniki

Możemy wyróżnić dwa sposoby badania pozycji *Platformy właściwej*: pomiar bezwzględny oraz pomiar względny. Bezwzględny pomiar pozycji nie zależy od poprzednich położeń konstrukcji. Zastosowanie dalmierzy optycznych, mierzących odległość od stabilizowanej części do znaczników, spełniałoby założenie pomiaru bezwzględnego. Rozwiązanie to nie jest jednak zadowalające ze względu na wysoką trudność wykonania. Akcelerometr wykonuje pomiar względem wektora grawitacji. Jest to czujnik inercyjny mierzący przyspieszenie ziemskie. Pomiar z akcelerometru jest pomiarem bezwzględnym. Względny pomiar pozycji opiera się na informacji o poprzednim położeniu *Platformy właściwej*. Żydroskop mierzy prędkość kątową obiektu obracającego się wokół jednej z osi *X* (*roll*), *Y* (*pitch*) lub *Z* (*yaw*). Uzyskanie orientacji z odczytów tego sensora polega na całkowaniu prędkości. Żydroskop dokonuje pomiaru względnego.

W tym projekcie zdecydowano się użyć układu scalonego zawierającego oba czujniki. Spośród trzech branych pod uwagę modułów zdecydowano się na moduł GY-521 z układem MPU-6050[5]. Tabele 2.3 i 2.4 przedstawiają dane techniczne możliwych do wykorzystania w projekcie czujników.



(a) ToweProMG945R



(b) ToweProMG945R i ToweProMG996R

Rysunek 2.6 Odpowiedzi skokowe serwomechanizmów

Układ MPU-6050 to 6-osiowy czujnik położenia względem Ziemi. Wbudowany 3-osiowy akcelerometr MEMS oraz 3-osiowy żyroskop MEMS zapewniają informację o przyspieszeniu i prędkości obrotowej modułu. Oba czujniki posiadają opcję doboru zakresu. Istnieje możliwość podłączenia magnetometru. Dzięki temu można otrzymać kompletny, 9-osiowy inercyjny zespół pomiarowy (IMU). Komunikacja z MPU-6050 odbywa się poprzez magistralę I2C.

Rozważmy kilka sposobów pozyskania informacji o orientacji *Platformy właściwej* na podstawie odczytów czujników.

Funkcja trygonometryczna

Mierząc wartości składowych przyspieszenia ziemskiego można określić kąt pod jakim znajduje się czujnik względem pionu, wyznaczonego przez wektor grawitacji (rysunek 2.7). Zależności trygonometryczne (2.1) ustalają kąty o jakie *Platforma właściwa* wychyla się

Parametry	
Wymiary	20 x 16mm
Waga	XXX g
Zasilanie	2,375 – 3,46V
Pobór prądu przez żyroskop	3,6mA
Pobór prądu przez akcelerometr	500 μ A
Pobór prądu przez MPU	250 μ A
Standard stanów logicznych	2,4 lub 3,3V
Komunikacja	Magistrala I2C 400kHz
Zakres pomiarowy żyroskopu	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000^\circ/s$
Zakres pomiarowy akcelerometru	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$
Rozdzielcość	16-bitowa dla wszystkich osi
Szybkość pomiaru żyroskopu	4 – 8000Hz
Szybkość pomiaru akcelerometru	4 – 1000Hz
Szybkość pomiaru MPU	5 – 200Hz

Tabela. 2.3 Dane techniczne układu MPU-6050

Parametry	IMU GY-80	MPU 91-50
Zakres pom. akcelerometru	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$
Rozdzielcość akcelerometru	10 bitów	16 bitów
Zakres pom. żyroskopu	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000^\circ/s$	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000^\circ/s$
Rozdzielcość żyroskopu	16 bitów	16 bitów
Zasilanie	3 – 5V	2,4 – 3,46V
Komunikacja	Magistrala I2C	Magistrala I2C

Tabela. 2.4 Zestawienie danych technicznych innych czujników

od pionu dla osi X i Y.

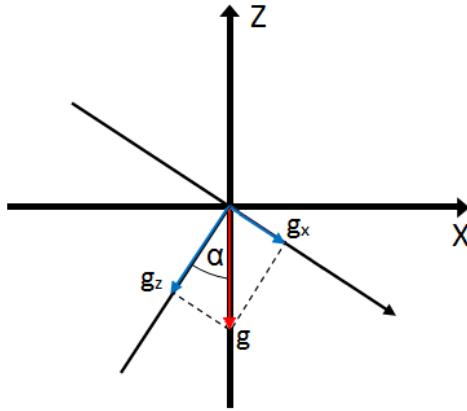
$$\begin{aligned}\alpha_x &= \arctg\left(\frac{g_Y}{g_Z}\right), \\ \alpha_y &= \arctg\left(\frac{g_X}{g_Z}\right),\end{aligned}\quad (2.1)$$

gdzie g_X, g_Y i g_Z to składowe przyspieszenia ziemskiego.

Szумy na wyjściach czujnika wprowadzają niedokładność pomiarową. Ponadto wzór 2.1 jest prawdziwy tylko gdy czujnik pozostaje w bezruchu lub porusza się ruchem jednostajnym. Jeśli sensor porusza się ruchem przyspieszonym, wartość przyspieszenia tego ruchu wpływa na odczyty. Dane akcelerometru obarczone są wtedy przyspieszeniem układu pomiarowego. Niemożność odseparowania wektora przyspieszenia ziemskiego powoduje błędy pomiaru orientacji.

Całkowanie prędkości kątowej

Prędkość kątowa jest pochodną kąta. Aby wyznaczyć orientację obiektu należy całkować dane pochodzące z żyroskopu. Całkowanie składowych wektora prędkości obrotowej pozwala uzyskać kąty dla poszczególnych osi (2.2). Ze względu na wpływ temperatury na punkt pracy żyroskopu, zakłócenia w formie pomiarowej oraz skończoną dokładność reprezentacji sygnału cyfrowego czujnika pojawia się niewielka składowa stała. Całkowanie tej składowej objawia się jako dryf. Całkowanie nieprawidłowych informacji powoduje



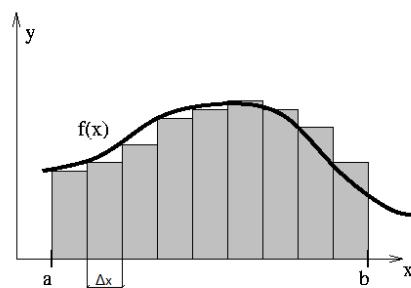
Rysunek 2.7 Odchylenie *Platformy właściwej* od pionu względem osi *Y*

niekontrolowane narastanie błędu.

$$\begin{aligned}\alpha_x(t) &= \alpha_x(0) + \int_0^t \omega_x(\tau) \cdot d\tau, \\ \alpha_y(t) &= \alpha_y(0) + \int_0^t \omega_y(\tau) \cdot d\tau.\end{aligned}\quad (2.2)$$

W układach dyskretnych wykorzystuje się metody numeryczne. Całkowanie dyskretnie może odbywać się za wykorzystaniem metody prostokątów. Metoda ta korzysta z całki oznaczonej Riemanna, w której wartość całki interpretuje się jako sumę pól obszarów pod krzywą na zadanym przedziale (rysunek 2.8). Całkowanie w przypadku dyskretnym opisują wzory (2.3).

$$\begin{aligned}\alpha_x &= \alpha_x(0) + \sum_{i=1}^n \omega_x(t_i - t_{i-1}), \\ \alpha_y &= \alpha_y(0) + \sum_{i=1}^n \omega_y(t_i - t_{i-1}).\end{aligned}\quad (2.3)$$



Rysunek 2.8 Całkowanie dyskretnie - metoda prostokątów

Filtr komplementarny

Zauważmy, że żyroskop dostarcza wiarygodnej informacji o wszystkich kątach w momencie gdy sensor obraca się, natomiast akcelerometr daje rzetelną informację gdy czujnik się nie porusza, zatem dokładnie wtedy gdy sensor prędkości kątowej ma najmniejszą wiarygodność.

Wyznaczanie orientacji przy pomocy czujnika prędkości w momencie ruchu oraz stosowanie czujnika przyspieszenia w stanie spoczynku prowadzi do fuzji danych pochodzących z obu sensorów. Dodatkowo należy filtrować dane pochodzące z czujników.

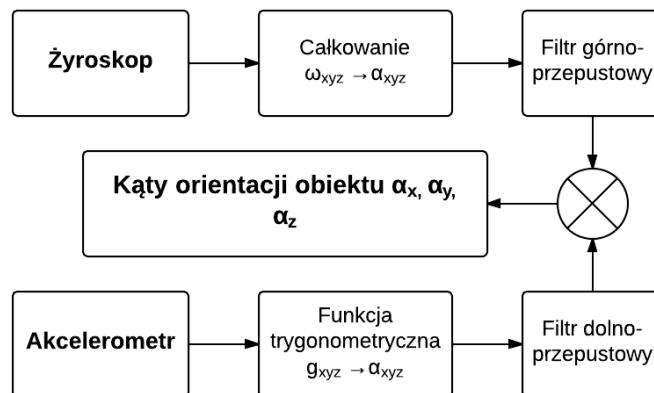
Zakłócenia pochodzące z akcelerometru można wyeliminować stosując filtr dolnoprzepustowy. Operacja ta wprowadza jednak opóźnienie względem rzeczywistej zmiany orientacji. Używając filtra górnoprzepustowego można z kolei wyeliminować błędy związane z całkowaniem błędu zera. Spowoduje to jednak zmniejszenie czułości sensora na powolne zmiany orientacji.

Filtr komplementarny jest wynikiem sumowania filtrowanych danych pochodzących z żyroskopu i akcelerometru (rysunek 2.9).

Sposób sumowania danych przedstawia wzór:

$$\alpha_k = \eta(\alpha_{k-1} + \omega_k \Delta t) + (1 - \eta)a_k$$

gdzie α_k -kąt wychylenia w iteracji k , η -waga pomiaru, ω_k -prędkość obrotowa w iteracji k , a_k -przyspieszenie w iteracji k . Stosowanie opisanego filtra zapewnia eliminację błędu całkowania oraz niewrażliwość na zakłócenia. Uzyskany pomiar jest prawdziwy zarówno dla wolnych jak i szybkich zmian.



Rysunek 2.9 Działanie filtra komplementarnego

Filtr Kalmana

Filtr Kalmana [14] jest optymalnym estymatorem procesu. Filtr dokonuje filtracji i fuzji danych. FK zakłada dwie fazy: predykcji oraz korekcji. Predykcja nazywana jest aktualizacją czasową. W tej fazie na podstawie informacji z poprzedniego kroku, wyznaczana jest estymowana wartość stanu oraz jego kowariancja. Faza korekcji jest aktualizacją pomiarową. Najpierw wyznacza się wartość współczynnika Kalmana. Współczynnik ten decyduje, która z faz będzie miała znaczący wpływ na wyjście filtra w danym kroku. Im większy jest szum pochodzący z czujnika tym mniejsze wzmacnienie K. Im mniejsza wartość wzmacnienia K, tym mniejszy jest procentowy udział fazy korekcji w wartości

stanu. Następnym krokiem w fazie korekcji jest wyliczanie wartości stanu i błędu kowariancji.

Pomiary żyroskopu są obciążone błędem systematycznym, natomiast pomiary akcelerometru błędem losowym. Faza korekcji, będąca sprzężeniem zwrotnym, nie może opierać się na odczycie błędnym z założenia.

Rozważmy kroki filtru Kalmana dla pomiaru odchylenia kątowego.

Faza predykcji

1. Estymacja wartości stanu na podstawie odczytu z żyroskopu.
2. Estymacja wartości kowariancji.

Faza korekcji

1. Obliczenie wzmacnień Kalmana.
2. Aktualizacja danych pomiarów z akcelerometru.
3. Obliczenie błędu kowariancji.

2.3.2 Mikrokontroler i obsługa sygnałów

Zastosowanym mikrokontrolerem jest MC9S12A64 [4] z rodziny HCS12 firmy Freescale. Ten mikrokontroler posiada 16-bitową jednostkę centralną, 8-kanałowy, 10-bitowy przetwornik analogowo/cyfrowy, 16-bitowy system timerów, 16-bitowy akumulator impulsów, modulator PWM, generację zegara, interfejsy szeregowe, 61 uniwersalnych wejść-wyjść binarnych, wbudowany regulator napięcia 2,5V, interfejs uruchomieniowy BDM. Przy użyciu środowiska programistycznego CodeWarrior [10] Development Studio for HCS12(X) Microcontrollers z Processor Expertem [12] można wygenerować kod inicjalizujący używane peryferia.

Do projektu wykorzystano moduł z mikrokontrolerem MC9S12A64 [7]. Płytki posiada minimalny zestaw elementów towarzyszących (rezonator kwarcowy, zwojki do wyboru trybu pracy, złącze BDM, rezystory wymuszające pożądaną stan logiczny wybranych sygnałów i kondensatory blokujące zasilanie). Sygnały mikrokontrolera wyprowadzono na dwa dwurzędowe złącza (L, P) zawierające po 40 styków (rysunek 2.10).

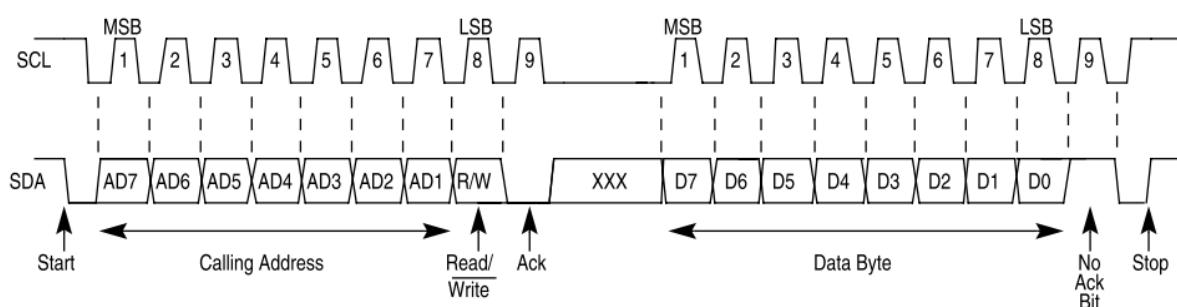
Moduł GY-521

Komunikacja z układem scalonym MPU-6050, zamontowanym na module GY-521, odbywa się poprzez interfejs I₂C [3]. Szeregową, dwukierunkową magistralą służącą do przesyłania danych wykorzystuje dwie linie. Dwukierunkowa linia SDA służy do przesyłania danych. Jednokierunkową, taktującą linią SCL steruje master. Przebieg czasowy sygnałów na magistrali przedstawiono na rysunku 2.11.

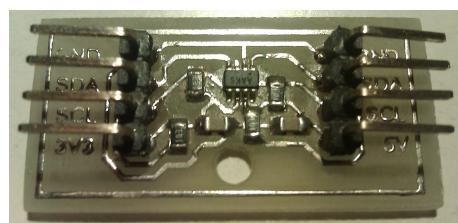
W momencie bezczynności na obu liniach jest stan wysoki. Napięcie sygnałów logicznych modułu zawiera się w zakresie $V_{LOGIC} = \langle 1,71V; 3,46V \rangle$, natomiast na wyprowadzeniach sygnałów SCL i SDA mikrokontrolera pojawia się napięcie $V_{DD} = 5V$, zatem oba urządzenia korzystają z różnych poziomów logicznych. Konieczne jest zastosowanie konwertera, który umożliwia komunikację pomiędzy nimi. Na potrzeby projektu, przy użyciu programu komputerowego CadSoft EAGLE PCB Designer 6.1.0 [9] utworzono schemat ideowy oraz płytę PCB. Ułatwiło to korzystanie z układu MAX3373 [6]. Na wykonanej



Rysunek 2.10 Płytkę z mikrokontrolerem MC9S12A64



Rysunek 2.11 Przebieg czasowy sygnałów w magistrali I2C



Rysunek 2.12 Płytkę z konwerterem MAX3373

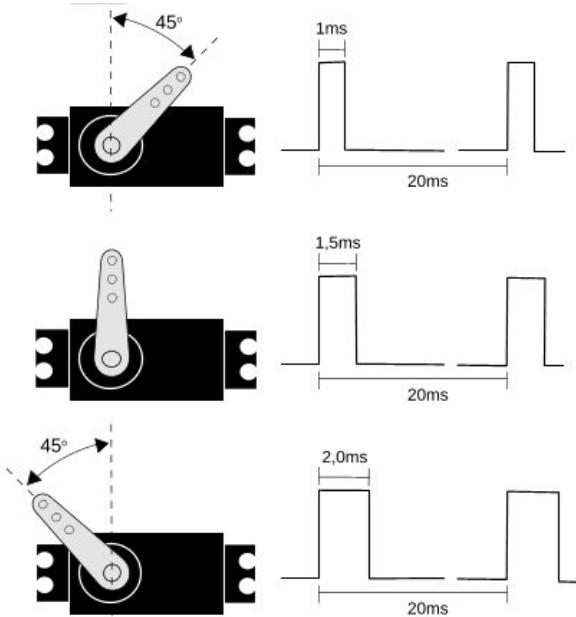
płytkę znajdują się wyprowadzenia dla SCL, SDA, VCC, GND dla napięcia 3,3V po jednej stronie oraz napięcia 5V po drugiej (rysunek 2.12). Schemat ideowy oraz płytka PCB znajdują się w załączniku A.

Sygnały SDA i SCL z modułu GY-521, poprzez konwerter, zostały podłączone do wyprowadzeń płytki z mikrokontrolerem.

Serwomechanizmy

Układy wykonawcze (serwomechanizmy) steruje się poprzez modulację szerokości impulsu (PWM). Szerokość impulsu decyduje o stopniu wychylenia orczyka serwomechanizmu (2.13)¹.

¹Rysunek pochodzi ze strony <http://hobby.abxyz.bplaced.net/index.php?pid=3&aid=20>

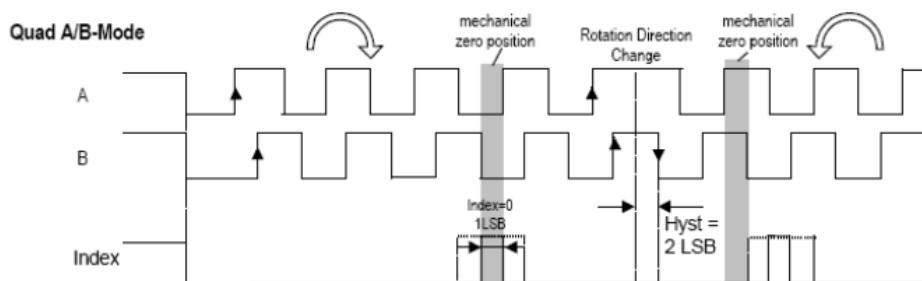


Rysunek 2.13 Sterowanie serwomechanizmem

Aby umożliwić podłączenie sygnałów sterujących serwomechanizmami należało odpowiednio skonfigurować wyjście modulatora w mikrokontrolerze. Dobrane elementy wykonawcze aktualizują pozycję orczyka z częstotliwością 50Hz. Zatem pętla sterowania serwomechanizmu wynosi 20ms. Taki okres należy ustawić na 16-bitowych kanałach PWM procesora.

Enkoder magnetyczny

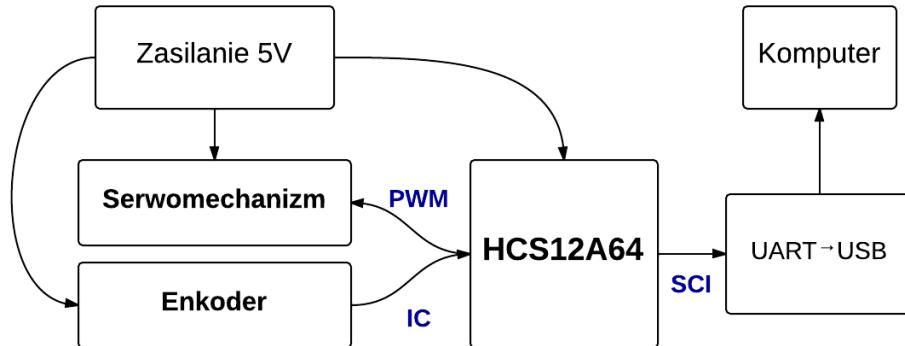
Czujnik ten został wykorzystany do stanowiska pomiarowego 2.2.1. Do badań serwomechanizmów użyto domyślnego trybu pracy - wyjść kwadraturowych (rysunek 2.14). Do zliczania impulsów enkodera wykorzystano dwa timery ustawione jako kanały Input



Rysunek 2.14 Interpretacja wyjść kwadraturowych

Capture. Każde zbocze zmienia stan licznika pozycji kątowej. Kierunek zmian zależy od stanu na drugim kanale czujnika. W momencie zmiany stanu kanał IC przechwytuje wartość i zapisuje ją do odpowiedniego rejestru.

W tabeli 2.5 zestawiono wykorzystane sygnały.



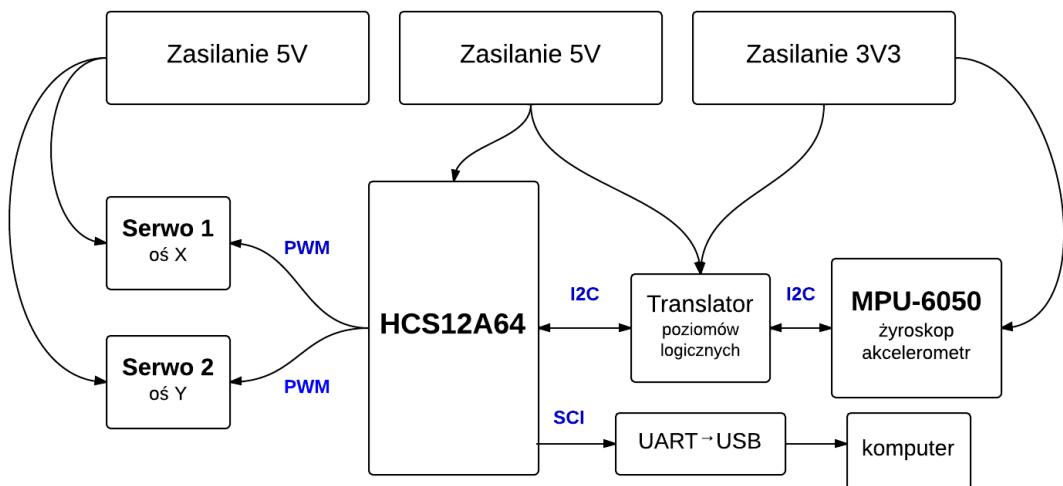
Rysunek 2.15 Diagram połączeń stanowiska pomiarowego

MC9S12A64		SerwoX	UART	Enkoder
Wyprowadzenie	Sygnał			
L31	Rx		+	
L32	Tx		+	
P20	IC			+
P22	IC			+
P26	PWM01	+		

Tabela 2.5 Podłączenie podzespołów stanowiska pomiarowego do mikrokontrolera

2.3.3 Integracja układów z konstrukcją

Ze względu na ruchomość części platformy względem siebie wymagane jest aby elektronika, w której wyposażona jest konstrukcja była odpowiednio rozmiieszczona. Układy elektroniczne, które na stałe będą przymocowane do platformy to: moduł z mikrokontrolerem, moduł z sensorami (oraz z translatorem), serwomechanizmy oraz moduły zasilania. Schemat podłączenia układów obrazuje rysunek 2.16.



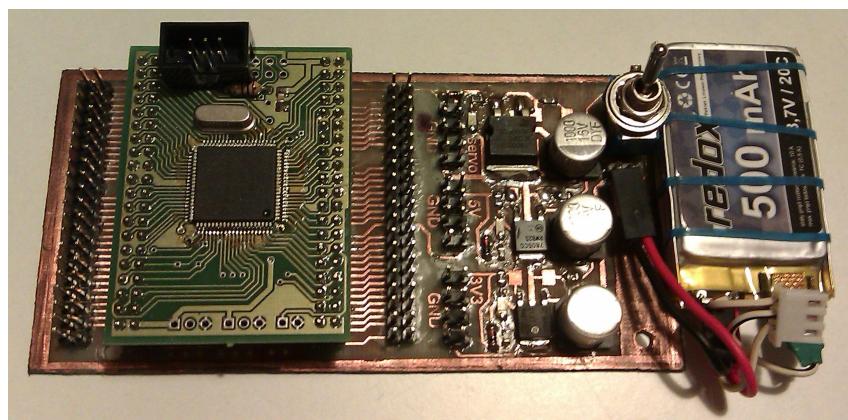
Rysunek 2.16 Diagram podłączenia układów elektronicznych

Zdecydowano się stworzyć płytę z wyprowadzeniami, do której włączany będzie moduł z mikrokontrolerem. Na płycie będą znajdować się również moduły zasilania. Zabieg

MC9S12A64		GY-521 (konwerter)	SerwoX	SerwoY	UART
Wyprowadzenie	Sygnał				
L31	Rx				+
L32	Tx				+
P 26	PWM01		+		
P 28	PWM23			+	
P35	SDA	+			
P36	SCL	+			

Tabela. 2.6 Podłączenie podzespołów platformy do mikrokontrolera

ten ułatwi łączenie wszystkich układów z mikroprocesorem. Rozmiary płytki przewidziane są tak, aby zmieściła się na *Ramce*.



Rysunek 2.17 Płytki do podłączenia modułu z mikroprocesorem

Dodatkowym aspektem jest rozmieszczenie przewodów tak, aby nie blokowały ruchu poszczególnych części konstrukcji (dodatek B)

2.4 Sterowanie

Podstawowym wymaganiem odnośnie stabilizacji poziomu jest utrzymanie zadanej orientacji *Platformy właściwej*. Aby możliwe było poprawne sterowanie należy zapewnić:

- wiarygodne wartości orientacji,
- zadawanie sygnałów sterujących.

Sterowanie *Platformą samopoziomującą* jest realizowane przez wspomniany wcześniej mikrokontroler. Wykorzystując oprogramowanie CodeWarrior Development Studio for HCS12(X) Microcontrollers (Classic IDE) [10] zaimplementowano filtry dla odczytów z czujników oraz algorytmy sterowania.

2.4.1 Dane z sensorów

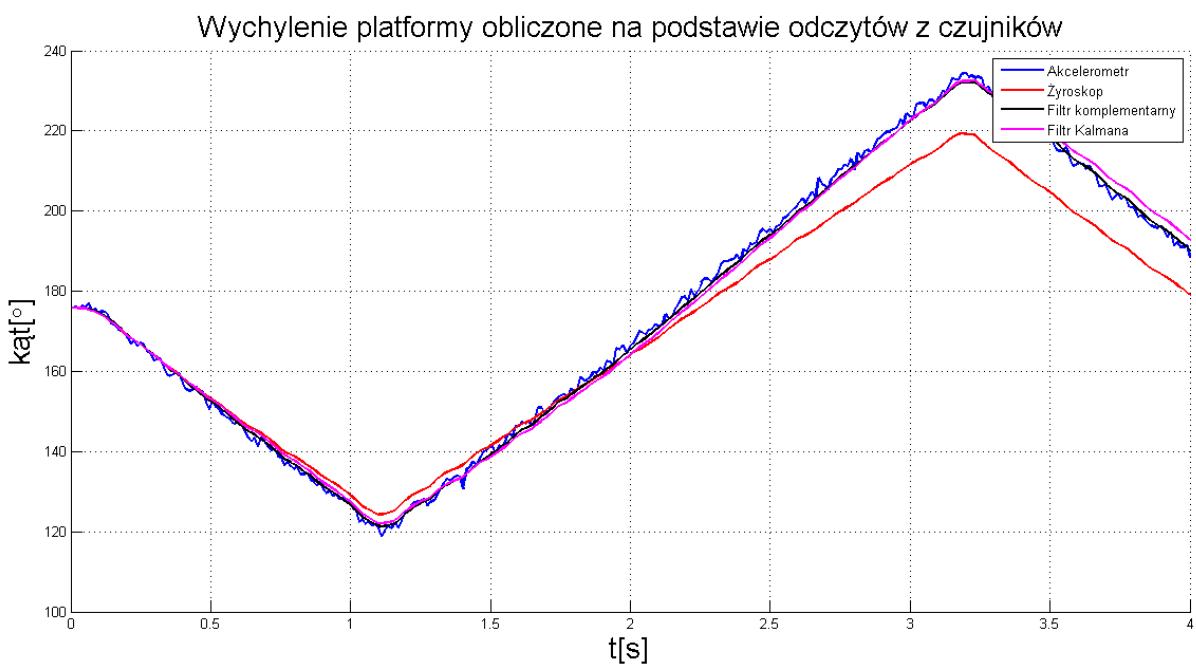
Na podstawie projektu, który opracował Kristian Lauszus, [1] zaimplementowano filtr komplementarny oraz filtr Kalmana.

Wykorzystując wcześniej opisane metody, na podstawie odczytów z sensorów, uzyskano informację o orientacji *Platformy właściwej*. W celu zilustrowania zalet i wad wykorzystanych metod zrealizowano dwa badania. Badanie pierwsze zakładało ruch *Platformy właściwej* w jednej osi ze stałą prędkością. Podczas badania drugiego *Platforma właściwa* poruszana była nieregularnie i w różnych kierunkach. Wykresy orientacji uzyskanych z akcelerometru, żyroskopu, filtru komplementarnego oraz filtra Kalmana dla obu prób zestawiono na rysunku 2.18.

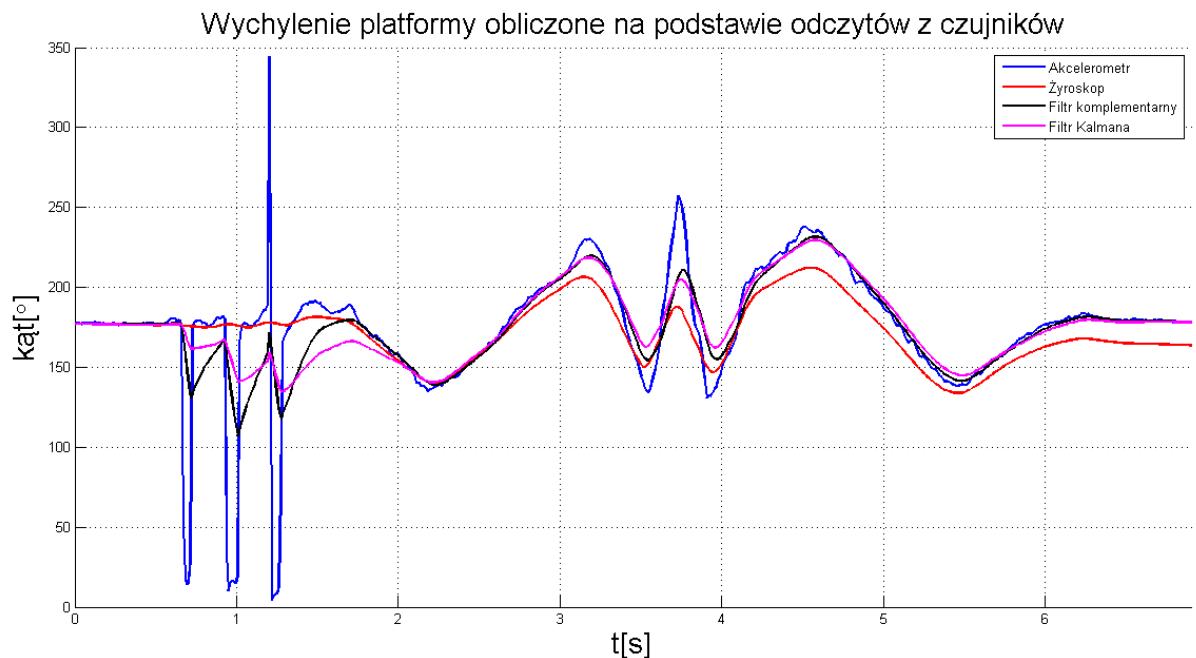
Na obu wykresach widoczne jest, że wykres orientacji uzyskany z żyroskopu jest przesunięty względem trzech pozostałych krzywych. Jest to spowodowane narastającym błędem tego czujnika (dryfem). Na rysunku 2.18(a) można zaobserwować, że filtr komplementarny przybiera kształt "gładziej" krzywej orientacji pochodzącej z żyroskopu oraz utrzymuje się na poziomie lekko zaszumionej krzywej z akcelerometru. Filtr Kalmana, dla tego przypadku, daje bardzo zbliżony wynik. Drugie badanie (rysunek 2.18(b)) pokazuje, że filtr Kalmana lepiej tłumii szum pochodzący z akcelerometru. Krzywa akcelerometru w zakresie czasowym $0,5 - 1,5[s]$ wskazuje na szybkie "szarpnięcia" podczas badania. Ruchy zakłócające odbywały się wzdłuż osi Z . Odchylenie *Platformy właściwej* w osi X tego czujnika, jest wyliczane ze składowych Y i Z wektora przyspieszenia ziemskiego - patrz rysunek 2.7. Filtr komplementarny w większym stopniu przeniósł zakłócenie pochodzące z akcelerometru na obliczoną orientację.

Badania pokazały że:

- akcelerometr daje wiarygodne wyniki podczas łagodnego ruchu,
- żyroskop wskazuje sposób w jaki odchyla się *Platforma właściwa*
- filtr komplementarny przy niezbyt wielkich zakłócieniach radzi sobie równie dobrze jak filtr Kalmana,
- gdy pomiary są mocno zaszumione filtr Kalmana działa najlepiej spośród prezentowanych metod.



(a) Badanie 1. - Ruch ze stałą prędkością



(b) Badanie 2. - Ruch ze zmienią prędkością

Rysunek 2.18 Zestawienie wykresów orientacji *Platformy właściwej* podczas przeprowadzonych badań

2.4.2 Regulacja

Podstawowym wymaganiem odnośnie stabilizacji poziomu jest utrzymanie zadanej orientacji *Platformy właściwej* (stałej wartości zadanej y_0 na rysunkach 2.19 i 2.20). Sygnał sterujący u jest realizowany jako przebieg PWM, z_1 oznacza mierzalne zakłócenia (orientacja *Obudowy*), a z - zakłócenia niemierzalne.

Istnieją dwie możliwości umieszczenia czujników: na *Platformie właściwej* lub na *Obudowie*.

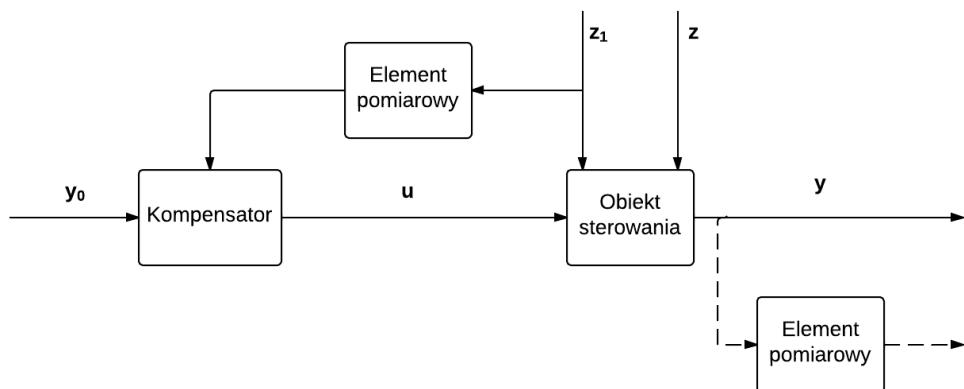
Usytuowanie modułu MPU-6050 na *Obudowie* umożliwia połączenie informacji o wychyleniu *Platformy właściwej* z sygnałami sterującymi serwomechanizmami. W tym przypadku do stabilizacji nie jest konieczne sprzężenie zwrotne, a sterowanie polega na kompensacji mierzonych zakłóceń.

Kiedy sensory umieszczone są na stabilizowanej części niemożliwe jest, aby bezpośrednio powiązać wypełnienie PWM zadawane na serwomechanizmy z wartością orientacji uzyskaną z czujników. *Platforma właściwa* powinna utrzymywać poziom dla różnych wartości wychyleń *Ramki* i *Obudowy*. Pojawia się potrzeba zastosowania regulatora w celu poprawnego wysterowania serwomechanizmów. Takie sterowanie jest typowo reakcyjne, gdyż wytwarzany sygnał sterujący zależy tylko od wartości uchybu.

Sterowanie w układzie otwartym

W układzie otwartym nie ma sprzężenia między sygnałem wejściowym, a wyjściowym. Brak sprzężenia zwrotnego uniemożliwia eliminację niemierzalnych zakłóceń z (rysunek 2.19). Brak sposobności weryfikacji osiągnięcia wartości zadanej może wprowadzać błąd. Z upływem czasu błąd będzie się kumulował.

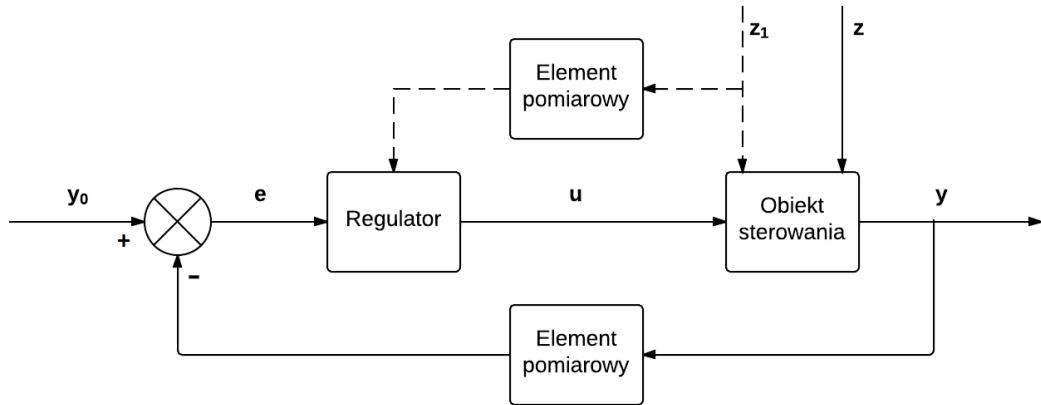
Istnieje możliwość powiązania orientacji *Obudowy* z wypełnieniem PWM zadawanym na serwomechanizm. Po wychyleniu *Obudowy* z położenia poziomego następuje kompensacja zmiany orientacji i utrzymanie *Platformy właściwej* w poziomie. Implementacja sterowania w układzie otwartym sprowadza się do podania na układ wykonawczy wypełnienia będącego iloczynem orientacji oraz stałego współczynnika K_k . Współczynnik ten jest wzmacnieniem kompensatora dla mierzonego zakłócenia $u = K_k \cdot z_1$.



Rysunek 2.19 Sterowanie w układzie otwartym

Regulacja w układzie zamkniętym

Przy pomocy czujników inercyjnych mierzone jest pochylenie *Platformy właściwej* (y), które po porównaniu z zadaną stałą wartością y_0 daje sygnał błędu e podawany na wejście regulatora. Regulator proporcjonalno-całkującą-różniczkującą (PID [15]) pracuje w pętli sprzężenia zwrotnego. Regulacja PID jest realizowana przez trzy niezależne człony, których wyjścia są sumowane do jednego sygnału sterującego. Zamknięty układ sterowania mierzy różnicę między wartością zadaną, a odczytem sygnału regulowanego, po czym dąży do zmniejszenia jej.



Rysunek 2.20 Regulacja w układzie zamkniętym

Człon proporcjonalny P kompensuje uchyb bieżący i wzmacnia jego wartość. Wzmocnieniem części proporcjonalnej nazywamy współczynnik K_p .

Człon całkujący I akumuluje uchyby z przeszłości. Wzmocnieniem części całkującej nazywamy współczynnik K_i .

Człon różniczkujący D przewiduje uchyby w przyszłości na podstawie szybkości zmian uchybu e . Wzmocnieniem części różniczkującej nazywamy współczynnik K_d .

Równanie regulatora PID:

$$u_n = K_p \cdot e_n + K_i \cdot s_n + K_d \cdot (e_n - e_{n-1}), \quad (2.4)$$

gdzie:

- u_n – sterowanie w kroku n,
- e_n – uchyb w kroku n,
- s_n – suma uchybów z przeszłości,
- K_p – wzmocnienie członu proporcjonalnego,
- K_i – wzmocnienie członu całkującego,
- K_d – wzmocnienie członu różniczkującego.

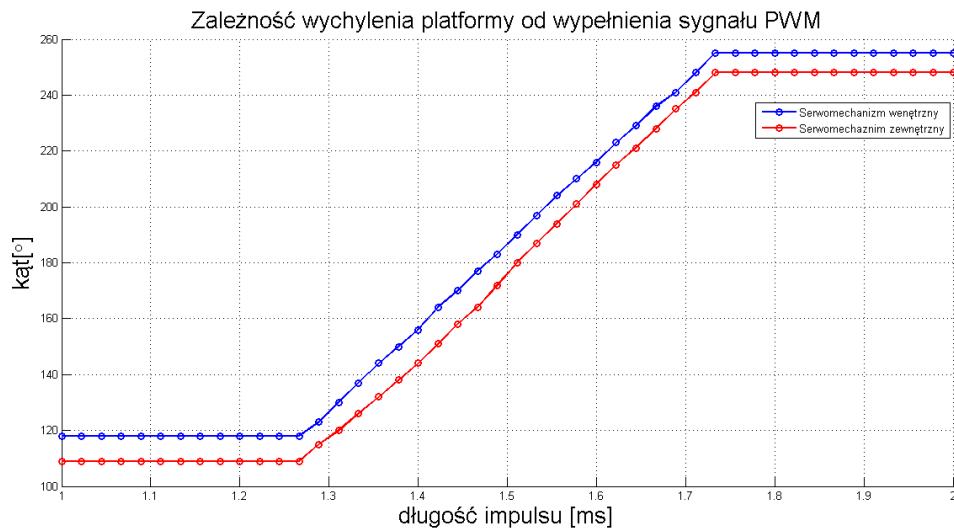
2.4.3 Testy działania platformy

Sterowanie w układzie otwartym

Sterowanie w układzie otwartym wymaga realizacji następujących czynności:

- znalezienie funkcji zależności wypełnienia PWM od orientacji,
- implemnetnacja algorytmu sterowania.

Konstrukcja *Platformy samopoziomującej* została unieruchomiona. Później dla każdego z serwomechanizmów przeprowadzone zostały badania. Dla zmieniającego się, ze stałym krokiem, wypełnienia odczytywano orientację *Platformy właściwej*. Badanie to pokazało, że serwomechanizmy działają tylko w pewnym zakresie długości impulsu sterownaia (2.21).



Rysunek 2.21 Badanie zależności orientacji *Platformy właściwej* od wypełnienia PWM

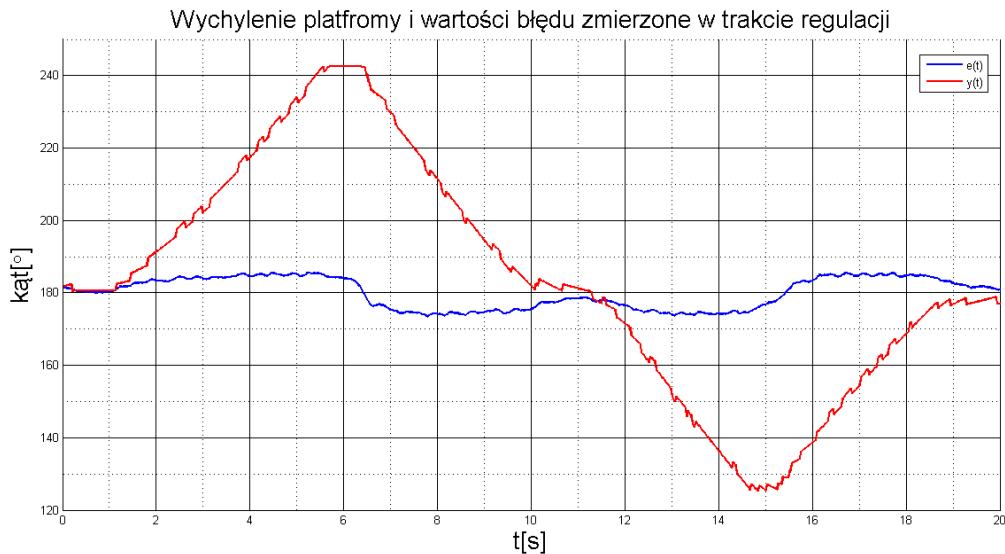
Na podstawie badań uzyskano przedziały, dla których zmiana sygnałów sterujących wprowadza zmiany przechyłu *Platformy samopoziomującej*. Uzależniono kąt przechyłu *Platformy właściwej* od pionu z sygnałem sterującym, tak aby *Platforma samopoziomująca* kompensowała zakłócenia. Obliczone wzmacnienie sygnału wejściowego K_k przy implementacji algorytmu sterowania.

W praktycznej realizacji sterowanie w układzie otwartym dało pożądane efekty. *Platforma samopoziomująca* kompensowała zmiany wychyleń *Ramki* i *Obudowy*, tym samym utrzymując *Platformę właściwą* w poziomie. Widoczne jednak było, że nie w każdej chwili poziomowana część pozostawała z zadanej pozycji. Rozbieżność spowodowana była brakiem informacji zwrotnej.

Regulacja w układzie zamkniętym

Opierając się na wzorze (2.4) zaimplementowano regulator PID. Dobór nastaw regulatora przeprowadzono wykorzystując metodę Zieglera-Nicholsa [13]. Eksperymentalnie zdjęto odpowiedź *Platformy samopoziomującej* na pobudzenie skokiem jednostkowym, a następnie na podstawie informacji uzyskanych z odpowiedzi skokowej obliczono nastawy według danych zaproponowanych przez autorów metody. Eksperyment przeprowadzono na serwomechanizmie obracającym *Platformą właściwą*.

W praktycznej realizacji wykorzystanie obliczonych nastaw zapewniało bardzo wolną stabilizację. Zdecydowano się na zwiększenie nastaw o rzad. Większe wzmocnienie zapewniło szybszą reakcję *Platformy samopoziomującej* na zmiany orientacji *Platformy właściwej*. Ze względu na luzy przekładni serwomechanizmu zewnętrznego *Ramka* wpadała w oscylacje. Organia powodowały fałszowanie odczytów czujników, co z kolei przekładało się na ciągłe zmiany sygnału sterującego, w wyniku czego układ wzbudzał się. Luzy przekładni wynikają z mechanicznego zużycia trybów serwomechanizmu. Rozwiążaniem byłaby wymiana serwomechanizmu. Na rysunku 2.22 znajduje się wykres ilustrujący działanie regulatora dla wewnętrznego serwomechanizmu.



Rysunek 2.22 Sygnały regulatora PID dla wewnętrznego serwomechanizmu

Testy regulacji w układzie zamkniętym przeprowadzono wykorzystując wewnętrzny układ wykonawczy. Utrzymywanie poziomu z wykorzystaniem regulatora przebiegało sprawnie. Układ nadawał za zmianami orientacji *Platformy właściwej*. Wadą regulacji była reakcja *Platformy samopoziomującej* na drgania związane z trzymaniem konstrukcji przez użytkownika.

2.5 Programowanie

Oprogramowanie mikrokontrolera MC9S12A64 wykonano przy użyciu środowiska programistycznego CodeWarrior. Językiem programowania był język C.

Uzyskane dane pomiarowe były przetwarzane przy pomocy interaktywnego środowiska do wykonywania obliczeń MATLAB MathWorks [11].

2.5.1 Stanowisko pomiarowe

Rozważmy, co jest niezbędne do realizacji obsługi stanowiska pomiarowego.

1. Enkoder

- konfiguracja kanałów IC,
- włączenie przerwań.

2. Serwomechanizm

- konfiguracja modulatora PWM.

3. Wysyłanie danych

- konfiguracja interfejsu szeregowego.

4. Pętla główna programu

- podanie sygnału sterującego na serwomechanizm,
- przechowywanie informacji o zliczonych impulsach enkodera,
- wysłanie danych pomiarowych do komputera.

2.5.2 Sterowanie platformą

Rozważmy, co jest niezbędne do realizacji sterowania *Platformą samopoziomującą*.

1. Serwomechanizmy

- konfiguracja modulatorów PWM.

2. Moduł GY-521

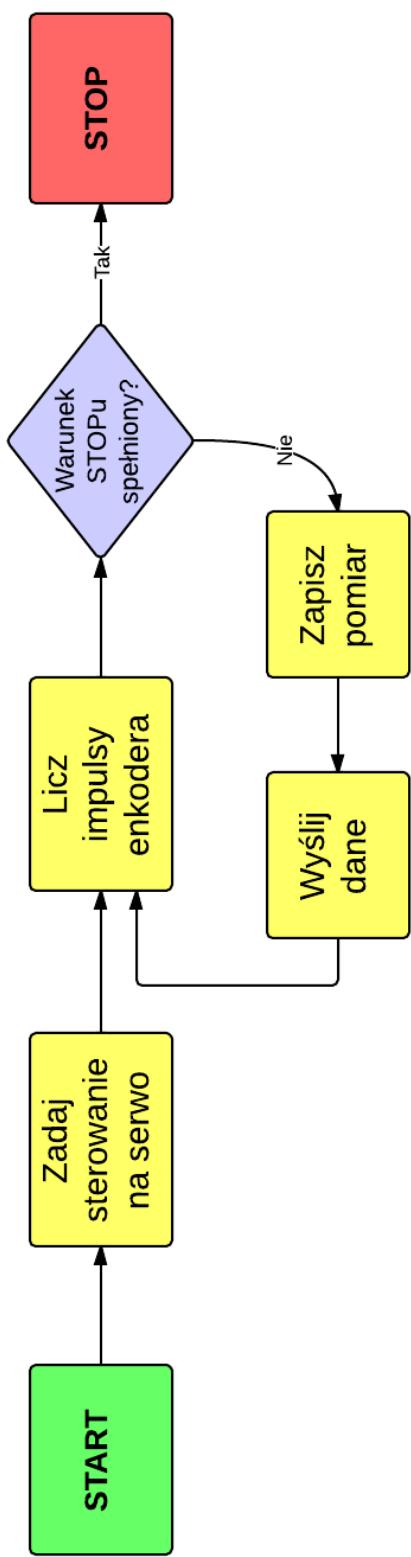
- konfiguracja interfejsu zgodnego z I2C,
- konfiguracja początkowa modułu,
- zaimplementowanie funkcji ułatwiającej komunikację z modułem (czytającej i piszącej).

3. Wysyłanie danych

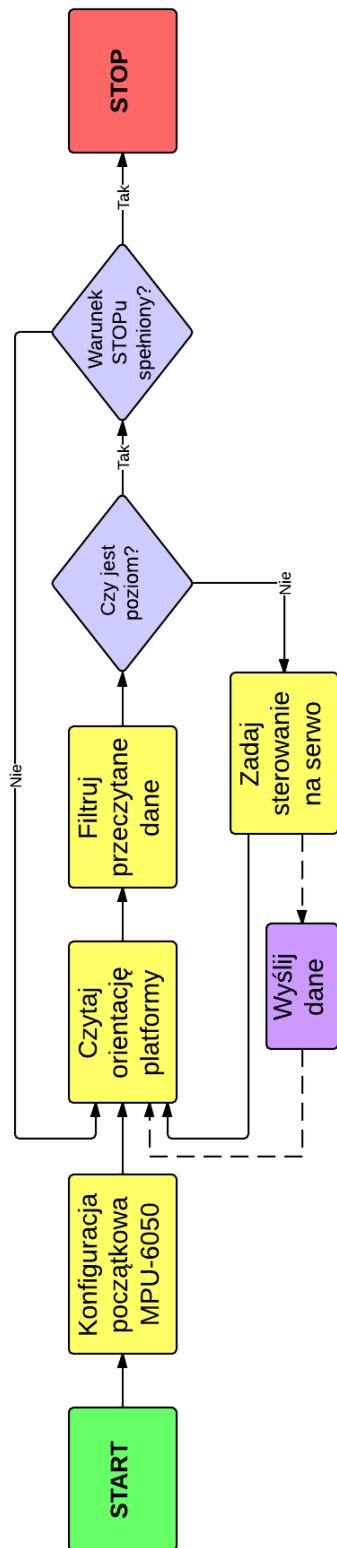
- konfiguracja interfejsu szeregowego.

4. Pętla główna programu

- konfiguracja początkowa MPU-6050
- pomiar pozycji *Platformy właściwej*,
- filtrowanie danych pochodzących z czujników,
- podanie sygnału sterującego na serwomechanizm,
- wysłanie danych pomiarowych do komputera (opcjonalnie).



Rysunek 2.23 Diagram działania programu obsługi stanowiska pomiarowego



Rysunek 2.24 Diagram działania programu sterowania Platformy samopoziomująccej

Rozdział 3

Podsumowanie

W ramach pracy wykonano następujące zadania:

- zbudowana konstrukcję platformy utrzymującej poziom,
- dobrano serwomechanizmy modelarskie,
- zbudowano stanowisko pomiarowe i zbadano wybrane układy wykonawcze,
- dobrano sensory,
- zaimplementowane zostały filtry dla danych pochodzących z sensorów,
- dobrano i zbadano dwa sposoby sterowania (w układzie otwartym oraz z wykorzystaniem regulatora PID).

Stosowanie filtracji danych pomiarowych zapewnia uzyskanie wiarygodnych informacji. Filtr komplementarny, którego algorytm nie jest skomplikowany dostarcza zadowalających wyników. Przy mocno zaszumionych pomiarach filtr Kalmana działa najlepiej spośród prezentowanych metod.

Pomimo swoich wad, zbadane sposoby sterowania dały zadowalające efekty. Eliminacja niedoskonałości każdego ze sterowań możliwa jest przy utworzeniu układu hybrydowego (regulatora z pomiarem zakłóceń). Do realizacji sterowania hybrydowego konieczne są dwa moduły pomiarowe (patrz rysunek 2.20).

Sterowanie elementami o dużych momentach bezwładności uszkadza przekładnie serwomechanizmów. Luzy przekładni elementów wykonawczych uwidaczniają się w momencie gdy sterowanie zadawane jest z dużą częstotliwością. W celu zmniejszenia momentów bezwładności elementów napędzanych, przy budowie konstrukcji mechanicznej, zaleca się użycie innego materiału, np. włókna karbonizowanego.

3.1 Kontynuacja projektu

Proponuje się realizację i zbudowanie sterowania opierającą się na algorytmie wykorzystanym w układzie otwartym z korekcją w postaci regulatora PID. Takie sterowanie powinno zapewnić pożądaną jakość stabilizacji poziomu.

Aby zapewnić niezawodność układów wykonawczych najlepiej jest zastosować silniki bezkomutatorowe o dużym momencie obrotowym.

W celu rozwinięcia projektu możliwe jest dodanie trzeciego czujnika - magnetometru. Sensor ten umożliwi stabilizację w trzeciej osi. Taka stabilizacja mogłaby być wykorzystana do utrzymywania kamery w zadanej orientacji (z wykorzystaniem dodatkowego napędu w osi pionowej).

Bibliografia

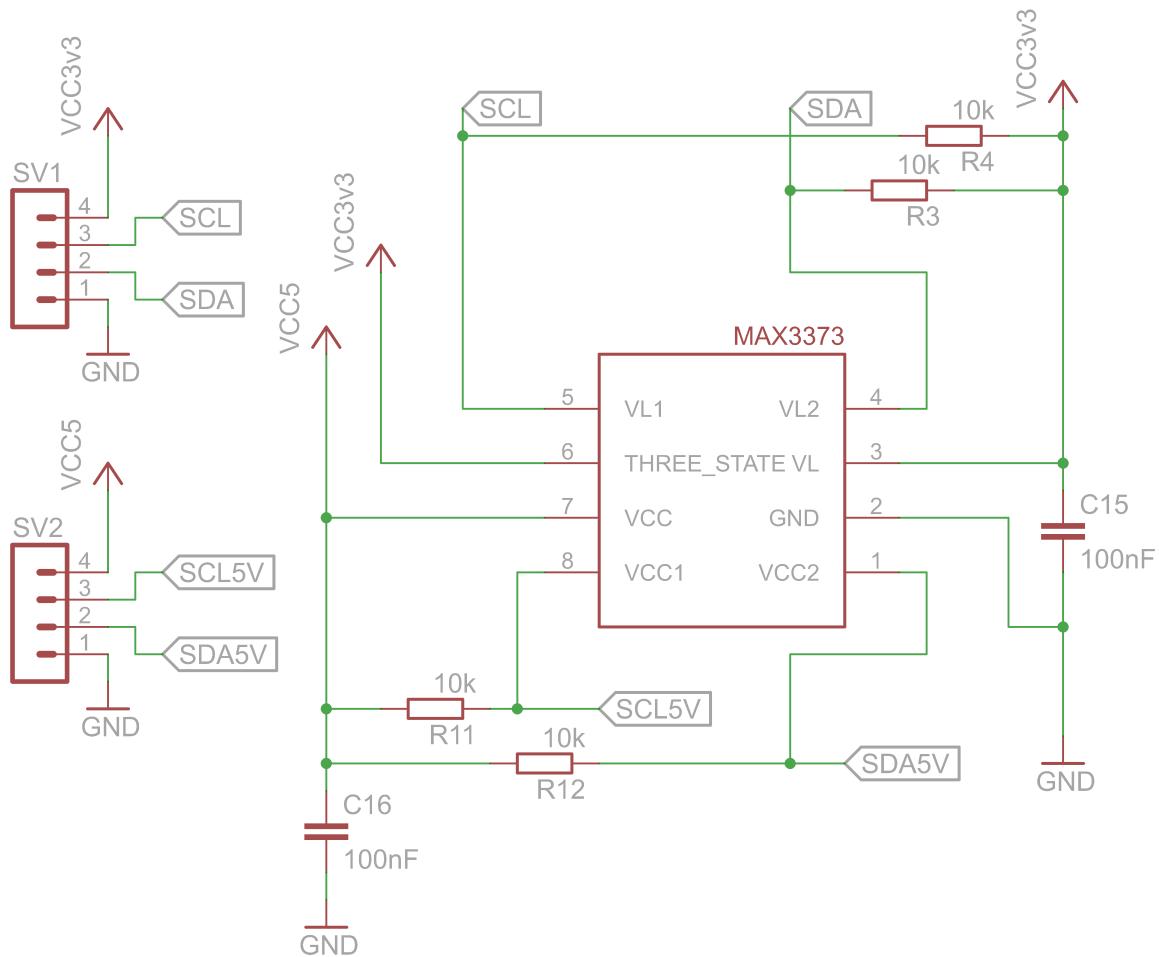
- [1] Implementacja filtru Kalmana dla IMU5060. <https://github.com/TKJElectronics/Example-Sketch-for-IMU-including-Kalman-filter>. [dostęp 6-Listopada-2013].
- [2] Nota katalogowa enkodera AS5040. <http://www.ams.com/eng/Products/Position-Sensors/Rotary-Magnetic-Position-Sensors/AS5040>. [dostęp 30-Października-2013].
- [3] Nota katalogowa magistrali I2C. http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf. [dostęp 19-Grudnia-2013].
- [4] Nota katalogowa mikroprocesora MC9S12A64. http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/9S12DJ64_ZIP.zip?fpfsp=1&WT_TYPE=Data%20Sheets&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=zip&WT_ASSET=Documentation. [dostęp 4-Listopada-2013].
- [5] Nota katalogowa modułu MPU6050. <http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu6050.html>. [dostęp 6-Listopada-2013].
- [6] Nota katalogowa układu MAX3373. <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/3253>. [dostęp 6-Listopada-2013].
- [7] Opis modułu mikroprocesora MC9S12A64. <http://rab.ict.pwr.wroc.pl/~mw/Proj/Micro/hc12/hc12a64.pdf>. [dostęp 4-Listopada-2013].
- [8] Strona domowa oprogramowania Autodesk Inventor Professional. <http://www.autodesk.com/products/autodesk-inventor-family/overview>. [dostęp 6-Listopada-2013].
- [9] Strona domowa oprogramowania CadSoft EAGLE PCB Design Software. <http://www.cadsoftusa.com/>. [dostęp 6-Listopada-2013].
- [10] Strona domowa oprogramowania CodeWarrior. http://www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?code=CW_HOME. [dostęp 19-Grudnia-2013].
- [11] Strona domowa oprogramowania MATLAB. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. [dostęp 19-Grudnia-2013].
- [12] Strona domowa oprogramowania Processor Expert. http://www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?code=BEAN_STORE_MAIN. [dostęp 19-Grudnia-2013].
- [13] B. Wayne Bequette. *Process Control: Modeling, Design and Simulation*. Prentice Hall Professional.

-
- [14] Gary Bishop Greg Welch. *An Introduction to the Kalman Filter*. University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science Chapel Hill.
 - [15] Tore Hagglund Karl J. Astrom. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*.

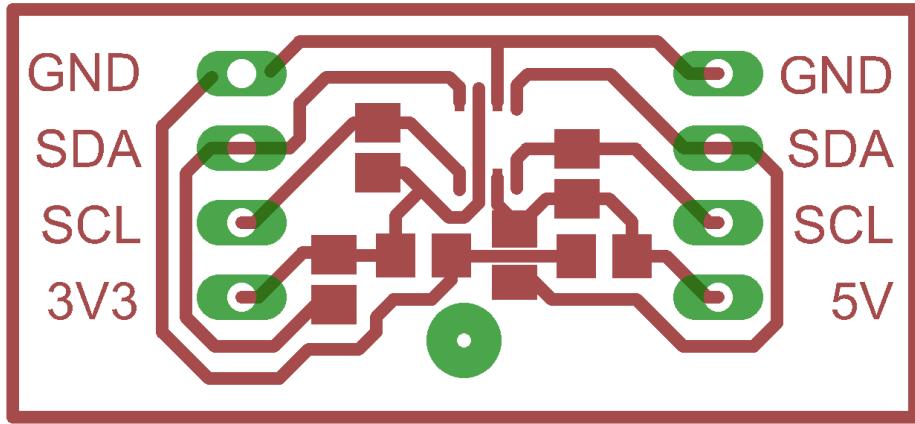
Dodatek A

Schemat i płytki PCB układów

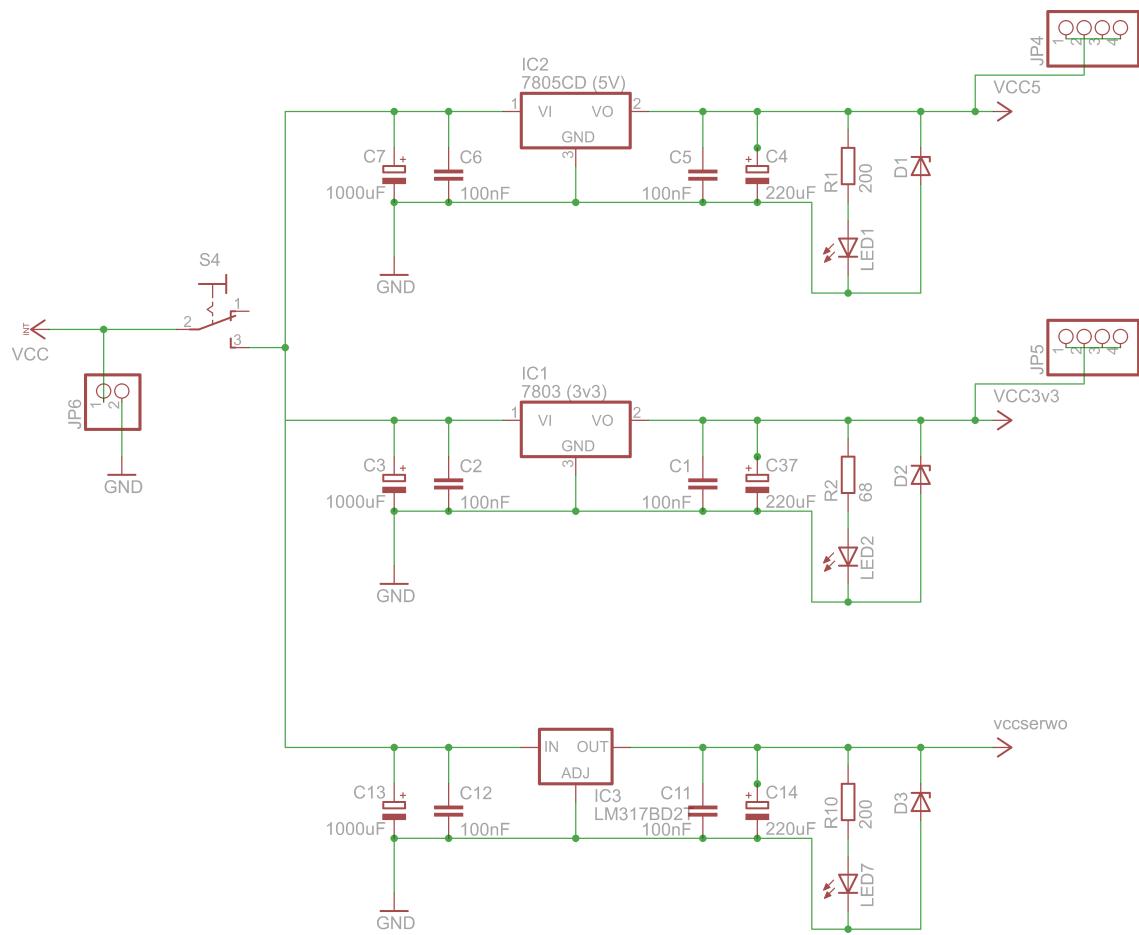
Poniższe schematy ideowe i płytki PCB zostały utworzone na potrzeby tego projektu.



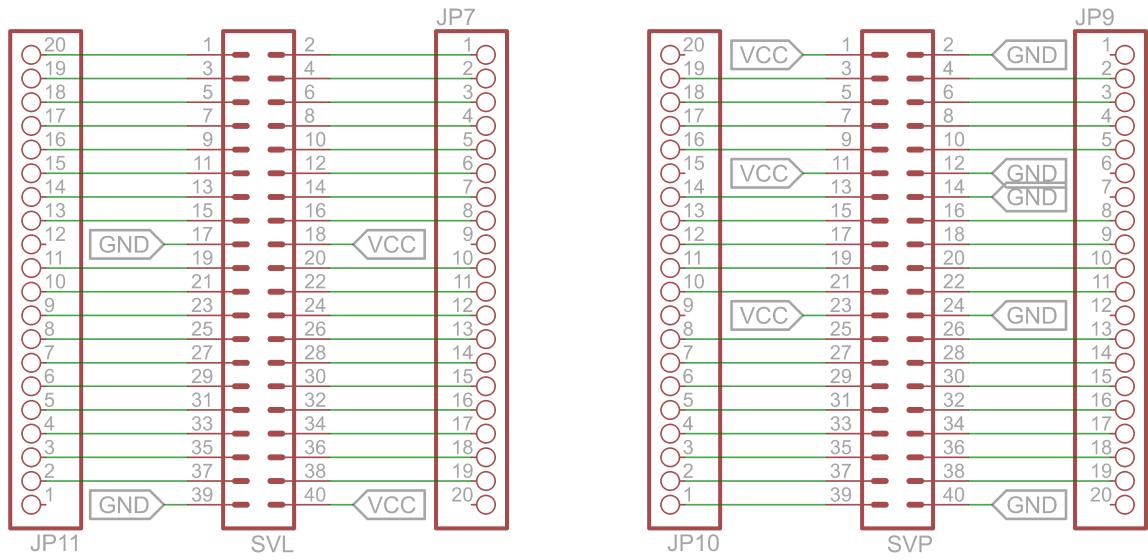
Rysunek A.1 Schemat ideowy układu MAX3373



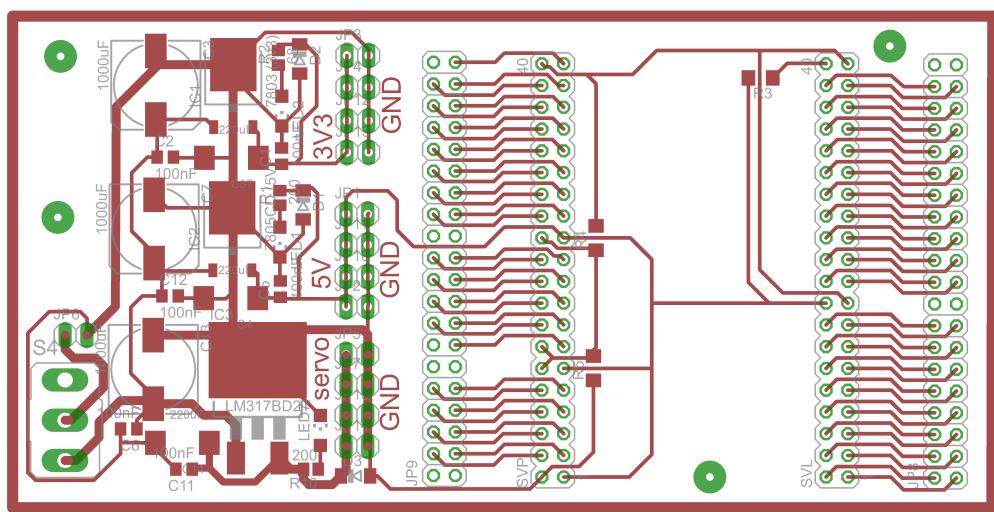
Rysunek A.2 Płytki PCB układu MAX3373



Rysunek A.3 Schemat zasilania płytka platformy



Rysunek A.4 Schemat podłączenia listew płytki platformy

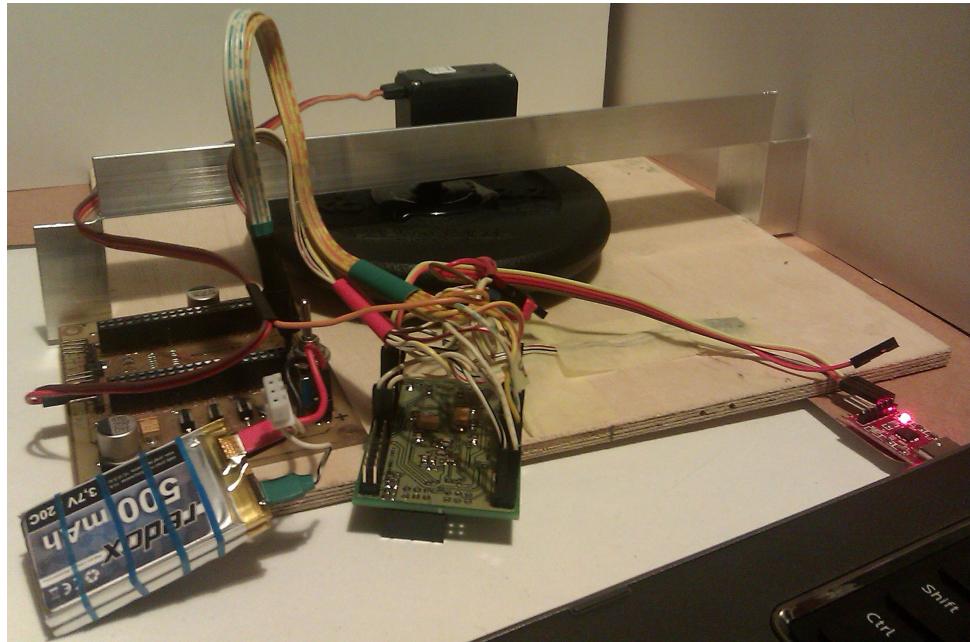


Rysunek A.5 Płytnka PCB platformy

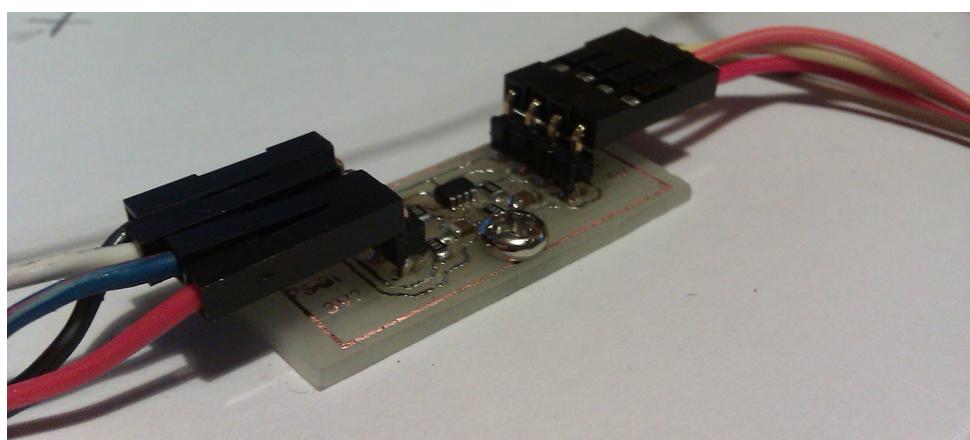
Dodatek B

Zdjęcia

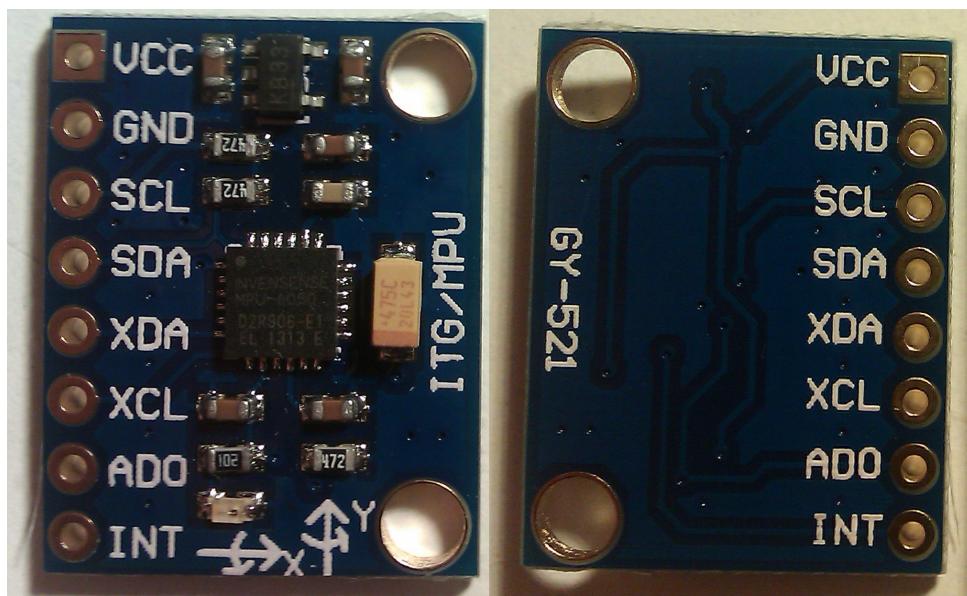
Podczas tworzenia projektu wykonano zdjęcia dokumentujące jego przebieg.



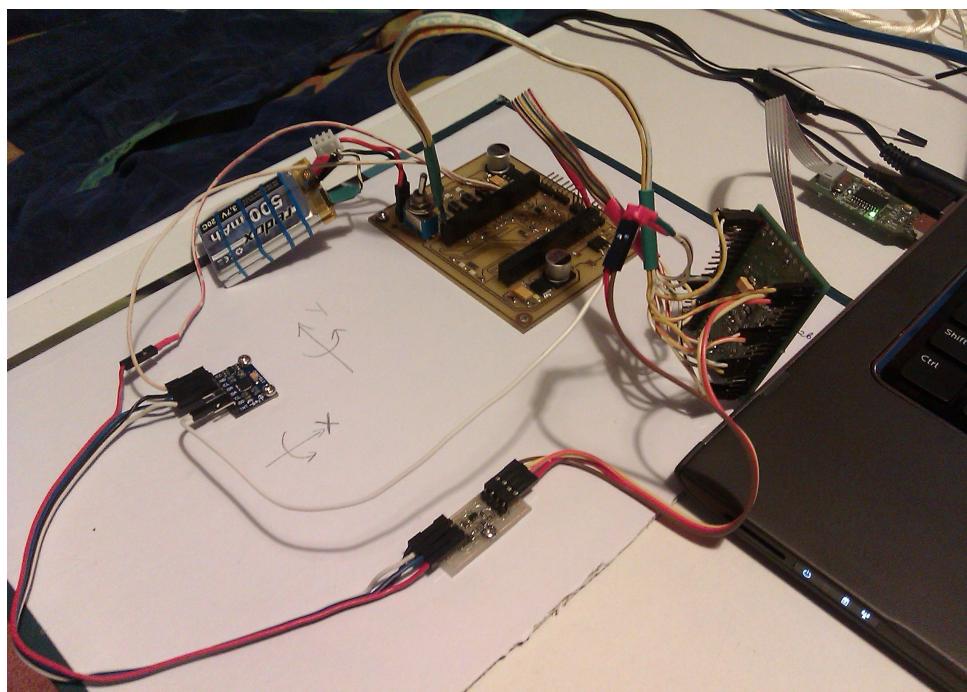
Rysunek B.1 Stanowisko pomiarowe



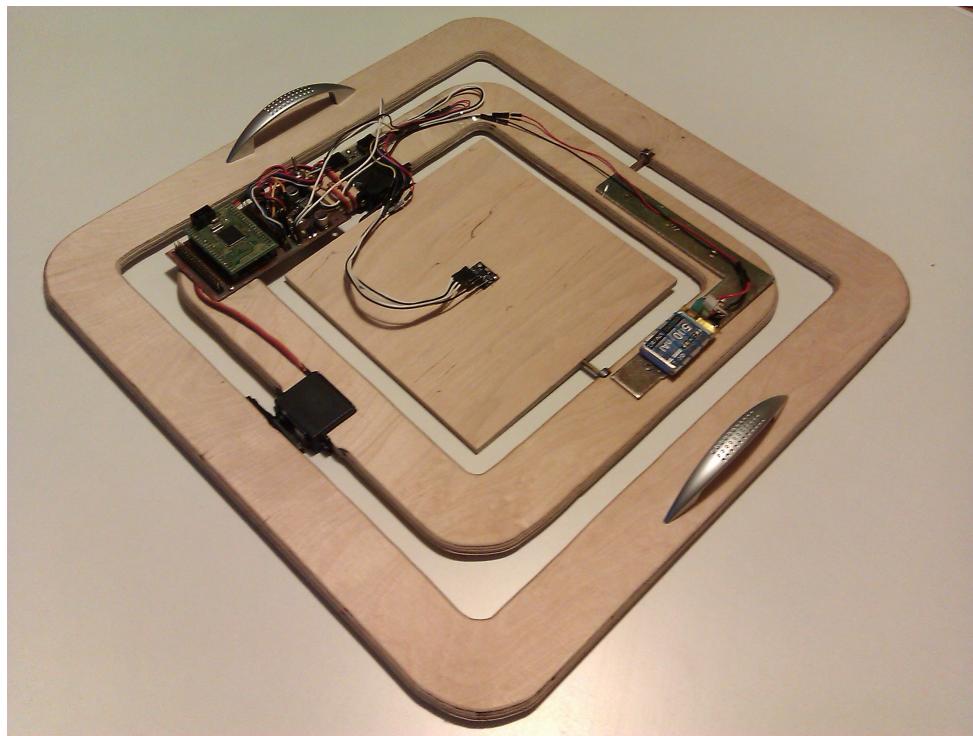
Rysunek B.2 Translator poziomów napięć logicznych



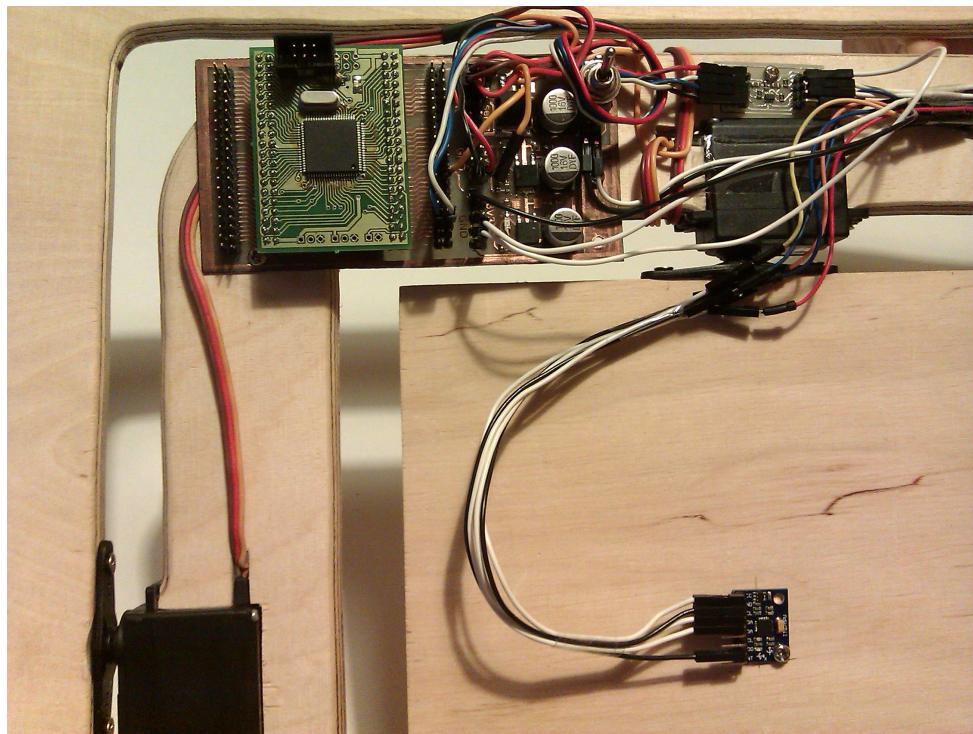
Rysunek B.3 Moduł GY-521 (widok z przodu i z tyłu)



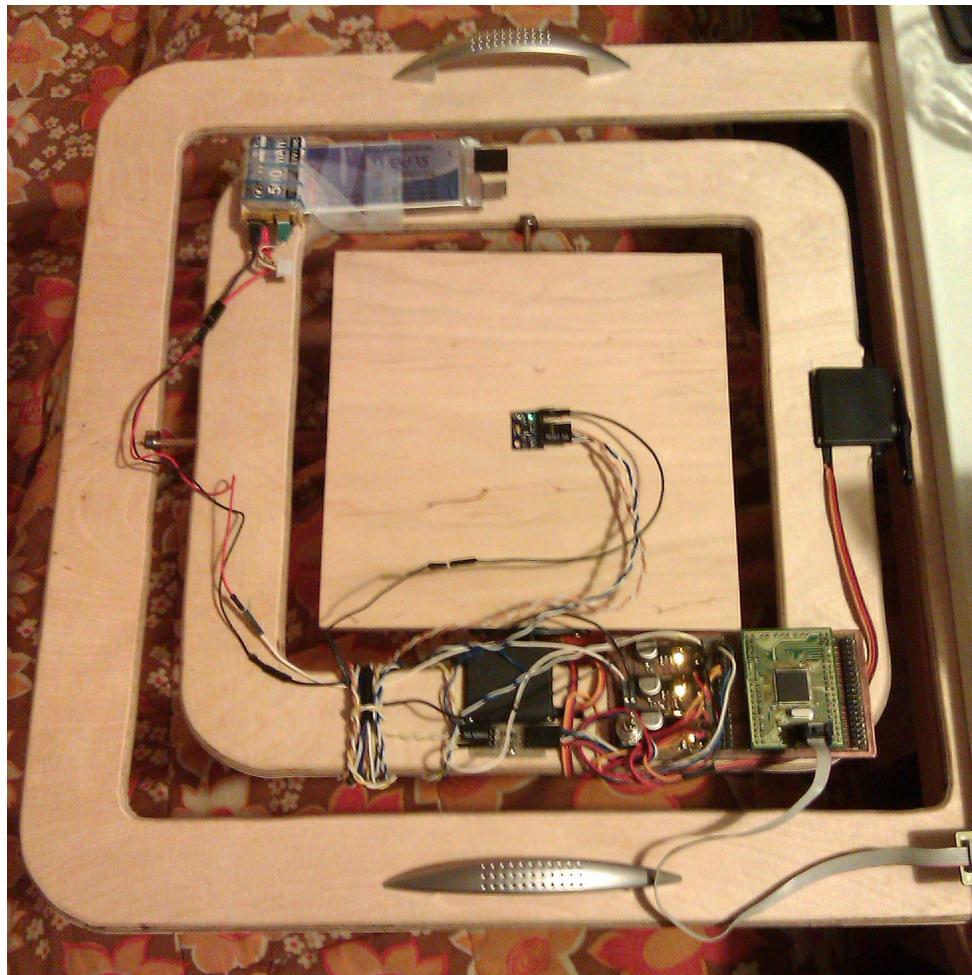
Rysunek B.4 Testowanie modułu GY-521



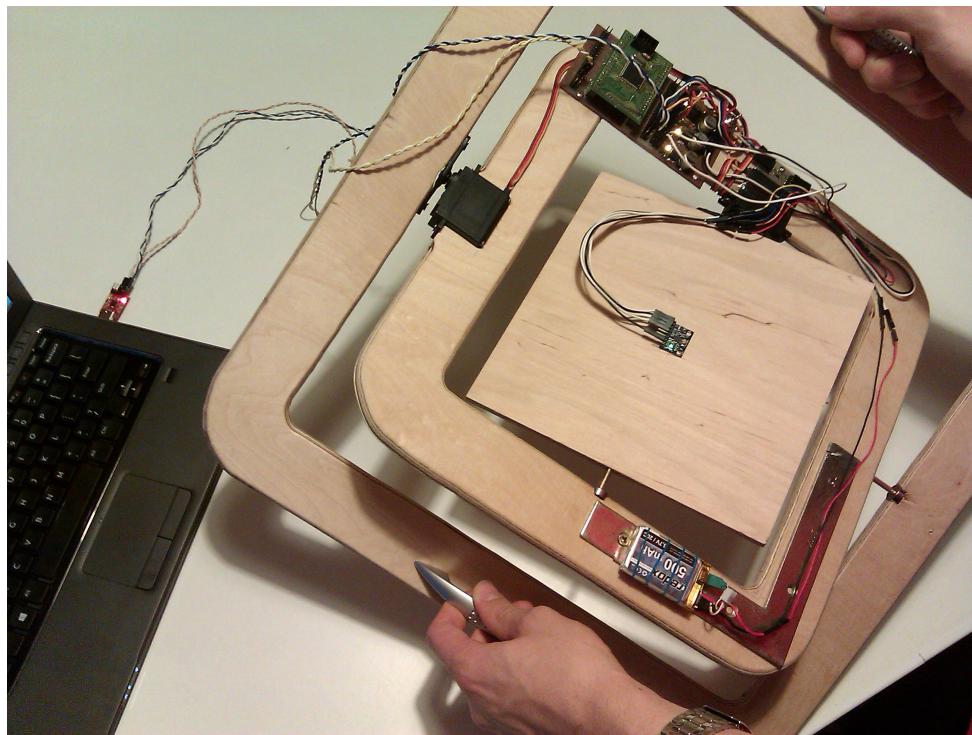
Rysunek B.5 Konstrukcja platformy



Rysunek B.6 Sposób rozłożenia układów i przewodów



Rysunek B.7 Unieruchomiona platforma podczas zdejmowania charakterystyk czasowych



Rysunek B.8 Platforma podczas poziomowania w układzie z regulatorem