

**Praca dyplomowa  
inżynierska**

**Łukasz Drożdż***Imię i nazwisko* **Automatyka i Robotyka***Kierunek studiów*

**Projekt i budowa modelu zdalnie sterowanego typu quadcopter.***Temat pracy dyplomowej*

dr hab. inż. Mariusz Giergiel, prof. nadzw. AGH .………….  
 *Promotor pracy Ocena*

Kraków, rok 2016/2017

Kraków, dn 22.01.2017

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Imię i nazwisko: | Łukasz Drożdż |  |
| Nr albumu: | 259209 |  |
| Kierunek studiów: | Automatyka i Robotyka |  |
| Profil dyplomowania: | Automatyka i Metrologia |  |

**OŚWIADCZENIE**

Świadomy/a odpowiedzialności karnej za poświadczanie nieprawdy oświadczam, że niniejszą inżynierską pracę dyplomową wykonałem/łam osobiście i samodzielnie oraz nie korzystałem/łam ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Jednocześnie oświadczam, że dokumentacja oraz praca nie narusza praw autorskich   
w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r. Nr 90 poz. 631 z późniejszymi zmianami) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym. Nie zawiera ona również danych i informacji, które uzyskałem/łam w sposób niedozwolony. Wersja dokumentacji dołączona przeze mnie na nośniku elektronicznym jest w pełni zgodna z wydrukiem przedstawionym do recenzji.

Zaświadczam także, że niniejsza inżynierska praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów wyższej uczelni lub tytułów zawodowych.

………………………………..  
*podpis dyplomanta*

Kraków, 22.01.2017

Imię i nazwisko: Łukasz Drożdż

Adres korespondencyjny: ul. Doktora Judyma 6, 30-436 Kraków

Temat pracy dyplomowej inżynierskiej: Projekt i budowa modelu zdalnie sterowanego typu quadcopter.

Rok ukończenia: 2017

Nr albumu: 259209

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

Profil dyplomowania: Automatyka i Metrologia

**OŚWIADCZENIE**

Niniejszym oświadczam, że zachowując moje prawa autorskie, udzielam Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie nieograniczonej w czasie nieodpłatnej licencji niewyłącznej do korzystania z przedstawionej dokumentacji inżynierskiej pracy dyplomowej, w zakresie publicznego udostępniania i rozpowszechniania w wersji drukowanej i elektronicznej1.

Publikacja ta może nastąpić po ewentualnym zgłoszeniu do ochrony prawnej wynalazków, wzorów użytkowych, wzorów przemysłowych będących wynikiem pracy inżynierskiej2.

Kraków, ...............… ……………………………..

*data podpis dyplomanta*

1 Na podstawie Ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. 2005 nr 164 poz. 1365) Art. 239. oraz Ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2000 r. Nr 80, poz. 904, z późn. zm.) Art. 15a. "Uczelni w rozumieniu przepisów o szkolnictwie wyższym przysługuje pierwszeństwo w opublikowaniu pracy dyplomowej studenta. Jeżeli uczelnia nie opublikowała pracy dyplomowej w ciągu 6 miesięcy od jej obrony, student, który ją przygotował, może ją opublikować, chyba że praca dyplomowa jest częścią utworu zbiorowego."

2 Ustawa z dnia 30 czerwca 2000r. – Prawo własności przemysłowej (Dz.U. z 2003r. Nr 119, poz. 1117 z późniejszymi zmianami) a także rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 17 września 2001r. w sprawie dokonywania i rozpatrywania zgłoszeń wynalazków i wzorów użytkowych (Dz.U. nr 102 poz. 1119 oraz z 2005r. Nr 109, poz. 910).

Kraków, dnia 22.01.2017

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**

**WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI**

**TEMATYKA PRACY DYPLOMOWEJ INŻYNIERSKIEJ**

dla studenta IV roku studiów stacjonarnych

Łukasz Drożdż

*imię i nazwisko studenta*

|  |  |
| --- | --- |
| TEMAT PRACY DYPLOMOWEJ INŻYNIERSKIEJ: |  |

Projekt i budowa modelu zdalnie sterowanego typu quadcopter.

*Promotor pracy:* dr hab. inż. Mariusz Giergiel, prof. nadzw. AGH

*Recenzent pracy:* dr inż. Krzysztof Holak *Podpis dziekana:*

PLAN PRACY DYPLOMOWEJ

1. Omówienie tematu pracy z promotorem.
2. Zebranie i opracowanie literatury dotyczącej tematu pracy.
3. Wykonanie projektu oraz jego realizacja.
4. Analiza wyników, ich omówienie i zatwierdzenie przez promotora.
5. Opracowanie redakcyjne.

Kraków, ...............… ……………………………..

*data podpis dyplomanta*

**TERMIN ODDANIA DO DZIEKANATU: 20        r.**

*podpis promotora*

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica Kraków, 22.01.2017

**Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki**

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Profil dyplomowania: Automatyka i Metrologia

Łukasz Drożdż

**Praca dyplomowa inżynierska**

Projekt i budowa modelu zdalnie sterowanego typu quadcopter.

Opiekun: dr hab. inż. Mariusz Giergiel, prof. nadzw. AGH

STRESZCZENIE

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie i budowa latającego modelu zdalnie sterowane typu quadcopter. Części maszyny podzielono na dobrane z ofert komercyjnych, oraz zaprojektowane i wykonane samodzielnie przy użyciu technologii druku 3D.

Część teoretyczna rozpoczyna się wprowadzeniem do tematu. Dalej znajduje się przegląd przykładowych zastosowań prywatnych, naukowych i przemysłowych. Następnie przedstawiona jest podstawowa mechanika opisująca zachowanie modelu typu quadcopter. Na końcu tej części opisane są elementy niezbędne do budowy modelu latającego będącego przedmiotem pracy.

Część druga pracy prezentuje wyniki pracy projektowej wraz z przyjętymi w niej wymaganiami i napotkanymi problemami. Następnie przedstawione są efekty wdrożenia projektu w rzeczywistości i wnioski z tego płynące.

AGH University of Science and Technology Kraków, 22/01/2015

**Faculty of Mechanical Engineering and Robotics**

Field of Study: Automatics and Robotics

Specialisations: Automatics and Metrology

**Łukasz Drożdż**

**Engineer Diploma Thesis**

**The design and construction of the remote-controlled model of quadcopter type.**

Supervisor: dr hab. inż. Mariusz Giergiel, prof. nadzw. AGH

SUMMARY

The purpose of this study was to design and construct a flying remote-controlled model of quadcopter type. Components of the machine were divided into those chosen from commercial offers, and those designed and manufactured by the author with 3D printing technology.

The theoretical part begins with an introduction to the topic. Then there is an overview of private, scientific and industrial application examples. Next, the basic mechanics describing the behavior of the quadcopter model is presented. In the end of this part there is a description of components necessary to build a flying model being the subject of this thesis.

The second part presents the results of the design work with adopted requirements and problems encountered during the process. Furthermore, the effects of project implementation are shown and conclusions made from it.

Spis treści

[1. Cel pracy 10](#_Toc471770192)

[2. Wprowadzenie w zagadnienie 12](#_Toc471770193)

[2.1. Przegląd przykładowych zastosowań 12](#_Toc471770194)

[2.2. Możliwe konfiguracje ułożenia silników 14](#_Toc471770195)

[2.3. Mechanika 15](#_Toc471770196)

[2.3.1. Układ Współrzędnych 15](#_Toc471770197)

[2.3.2. Kinematyka 15](#_Toc471770198)

[2.3.3. Siły i momenty siły 17](#_Toc471770199)

[2.3.4. Momenty bezwładności 18](#_Toc471770200)

[2.3.5. Dynamika 19](#_Toc471770201)

[2.4. Podstawowe elementy 20](#_Toc471770202)

[2.1.1. Rama 21](#_Toc471770203)

[2.1.2. Sterownik lotu 22](#_Toc471770204)

[2.1.3. Bateria 22](#_Toc471770205)

[2.1.4. Kontrolery obrotów 22](#_Toc471770206)

[2.1.5. Silniki 23](#_Toc471770207)

[2.1.6. Śmigła 23](#_Toc471770208)

[3. Projekt 25](#_Toc471770209)

[3.1. Elementy ramy zaprojektowane 26](#_Toc471770210)

[3.1.1. Płytki centralne ramy 27](#_Toc471770211)

[3.1.2. Płytki montażowe silnika 31](#_Toc471770212)

[3.1.3. Płytka montażowa IMU 31](#_Toc471770213)

[3.2. Elementy ramy dobrane 33](#_Toc471770214)

[3.2.1. Nogi podwozia 33](#_Toc471770215)

[3.2.2. Obejmy ramion 33](#_Toc471770216)

[3.2.3. Ramiona 34](#_Toc471770217)

[3.3. Sterownik lotu 34](#_Toc471770218)

[4. Realizacja 36](#_Toc471770219)

[4.1. Algorytm sterowania 36](#_Toc471770220)

[4.1.1. Charakterystyka wirników w funkcji sygnału sterującego 37](#_Toc471770221)

[4.1.2. Regulacja nadążna – podejście 1 40](#_Toc471770222)

[4.1.3. Regulacja nadążna – podejście 2 42](#_Toc471770223)

[4.1.4. Próba kalibracji parametrów sterowania 44](#_Toc471770224)

[4.2. Wykonanie części ramy 45](#_Toc471770225)

[4.2.1. Próba wycięcia laserowego 45](#_Toc471770226)

[4.2.2. Druk 3D 46](#_Toc471770227)

[4.3. Wykonanie sterownika lotu 49](#_Toc471770228)

[5. Działanie w praktyce 51](#_Toc471770229)

[5.1. Interfejs kalibracji 51](#_Toc471770230)

[5.2. Użytkowanie 51](#_Toc471770231)

[6. Podsumowanie 53](#_Toc471770232)

[Spis ilustracji 55](#_Toc471770233)

[Bibliografia 57](#_Toc471770234)

[Załączniki 59](#_Toc471770235)

# Cel pracy

Jako cel niniejszej pracy obrane zostało zaprojektowanie i budowa zdalnie sterowanego modelu latającego typu quadcopter. Część projektowa obejmie zaprojektowanie zasadniczych części ramy i dopasowanie wzajemne części w stworzonym modelu 3D. Zaimplementowany zostanie sterownik lotu, a następnie zlutowany układ na płytce prototypowej. Zaprojektowane części ramy zostaną wykonane w technologii druku 3D i złożone w całość z elementami dobranymi z rozwiązań komercyjnych.

Zaimplementowany sterownik lotu powinien realizować możliwie najprostszy wariant dobranych zmiennych stanu. Powinien również zapewniać podstawową logikę bezpieczeństwa i konfigurację za pomocą portu szeregowego. Do komunikacji z maszyną w trakcie lotu wykorzystana zostanie komercyjna aparatura RC pracująca w paśmie 2,4GHz.

Za cel pracy zostało również obrane wprowadzenie do zagadnienia zdalnie sterowanych wielowirnikowców. Zaprezentowana zostanie uproszczona mechanika opisująca zachowanie urządzenia i podstawowe wymagania konstrukcyjne.

**Część I - teoretyczna**

# Wprowadzenie w zagadnienie

W ciągu ostatnich lat można zaobserwować znaczący wzrost zainteresowania bezzałogowymi pojazdami latającymi, tzw. quadcopterami. Powszechnie używa się również określenia „dron”[[1]](#footnote-1) i „UAV”[[2]](#footnote-2). Te bezzałogowe pojazdy latające posiadają cztery ramiona i cztery śmigła o stałym skoku, po dwie pary o przeciwstawnym kierunku obrotów. Taka konstrukcja szybko zdominowała rynek bezzałogowych pojazdów autonomicznych i zdalnie sterowanych ze względu na swoją prostotę.

## Przegląd przykładowych zastosowań

Wielowirnikowce, a quadcoptery w szczególności, mają szerokie zastosowanie. Jest to spowodowane ich nieskomplikowaną konstrukcję w porównaniu do innych latających maszyn, takich jak zdalnie sterowane helikoptery i samoloty. Daje to inżynierom szerokie możliwości co do doboru dodatkowego sprzętu i dostosowania dronów do własnych potrzeb.

Poniżej została sformułowana lista przykładowych zastosowań ogólnych i szczegółowych, zarysowująca możliwości wykorzystania dronów:

* **Fotografia.** Jeden z najpopularniejszych obszarów zastosowań. Drony dają niespotykaną wcześniej możliwość łatwego robienia ujęć z trudnodostępnych i odległych od ziemi miejsc. Jako przykład jednostki przeznaczonej do fotografii można podać model Phantom firmy DJI, która jako pierwsza na świecie w tym sektorze osiągnęła dochód powyżej 1 mld dolarów amerykańskich rocznie[1].
* **Inspekcja.** Jest to często rozwinięcie dziedziny fotografii. Obraz podlega akwizycji celem jego późniejszej analizy. Przykładem jest linia lotnicza EasyJet, która używa dronów do prowadzenia inspekcji samolotów[2].   
    
    
    
  Quadcoptery są obsługiwane przez inżynierów, którzy sprawdzają stan samolotu będąc w centrali.

Rys. 2.1: Dron EasyJet [2]

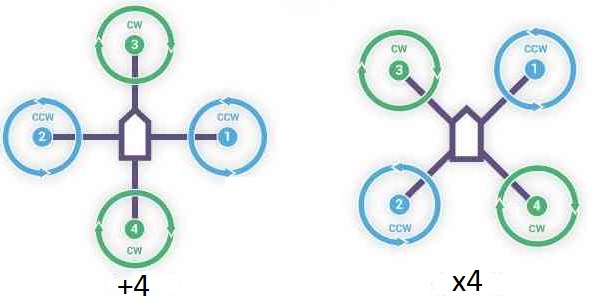
* **Misje search & rescue.** Drony mogą być używane przy akcjach ratunkowych. Możliwości bezzałogowych pojazdów latających są wykorzystywane przy takich akcjach, jak np. przeczesywanie terenu celem zlokalizowania zaginionej osoby[3].
* **Nadzór i ochrona.** Jest to również rozwinięcie dziedziny fotografii. Połączenie akwizycji obrazu z w pełni zautomatyzowaną obsługą daje możliwość nieustannego obserwowania terenu, lub wykonywania regularnych zadań[4].
* **Badania naukowe.** Drony dają możliwość uchwycenia zdjęć w środowisku bardzo niesprzyjającym człowiekowi, np. nad kraterem wulkanu[5], lub wykonywania innych zadań bardzo trudnych dla człowieka, np. złapania znacznej ilości komarów celem przeprowadzenia badań epidemiologicznych[6].
* **Precision Farming.** Dronymogąbyć narzędziem w sektorze rolniczym. Użycie floty autonomicznych dronów wyposażonych w aparaty, kamery promieniowania cieplnego, czujniki laserowe i inny sprzęt pozwala na zebranie istotnych informacji odnośnie plonów i ułatwia zarządzanie uprawą[7] 

Rys. 2.2 Mapa planu misji Precision Farming [7]

* **Sport.** Jest to dynamicznie rozwijająca się dziedzina. W maju 2016 w Dubaju odbyły się pierwsze Mistrzostwa Świata w Wyścigach Dronów o łącznej puli nagród 1 mln $ [8].

## Możliwe konfiguracje ułożenia silników

Istnieją dwie zasadnicze możliwości umownego przyjęcia kierunku uznanego za przód modelu, a przez co pozycjonowania układu współrzędnych względem ramy i silników. Przedstawione są na Rys. 2.2.

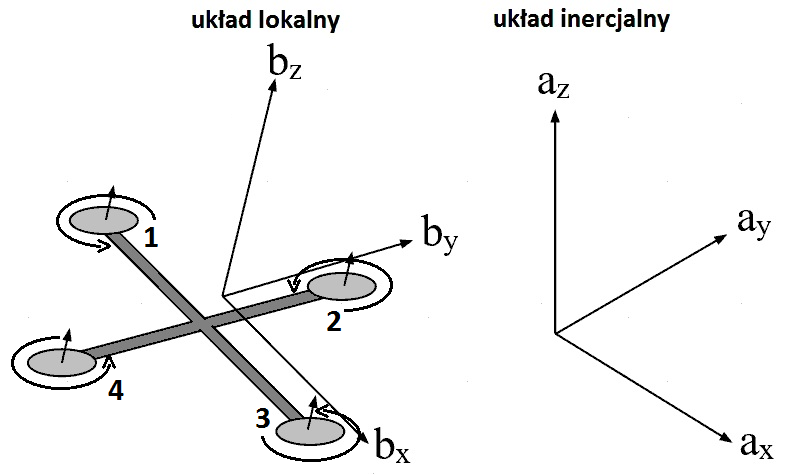


Rys. 2.3: Możliwe kierunki uznane za przód modelu [17].

Przyjęcie układu zależy od decyzji projektanta. Ze względu na pozycjonowanie silników na osiach układu współrzędnych układ typu +4 zapewnia prostszy opis matematyczny, który został przedstawiony w kolejnym podrozdziale.

## Mechanika

### Układ Współrzędnych

Dobrano lokalny układ współrzędnych przypisany do środka ciężkości ramy i globalny układ współrzędnych jak na Rys. 2.4. Jest to układ w konfiguracji +4.

Rys. 2.4: Lokalny i globalny układ współrzędnych.

### Kinematyka

Zdefiniowano kolejno pozycję i orientację quadcoptera w globalnym układzie współrzędnych jako:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.1**)** |
|  |  | (2.2) |

gdzie:  
 – obrót (roll)  
 – pochylenie (pitch)  
 – skręt (yaw)  
Powyższę kąty określa się jako kąty RPY (roll, pitch, yaw).

Następnie zdefinowano prędkości liniowe i prędkości kątowe w lokalnym układzie współrzędnych:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.3) |
|  |  | (2.4) |

Macierz obrotu ***R*** reprezentującą przejście między lokalnym układem współrzędnych a globalnym układem współrzędnych uzyskuje się poprzez kolejne przekształcenia:  
co daje ostatecznie macierz:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.5) |

gdzie:  
*C – cos()*  
*S – sin()*

Macierz przejścia między układem lokalnym do układu inercjalnego dla prędkości kątowych jest następująca :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.6) |

Daje to następującą zależność prędkości kątowych w obydwu układach:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.7) |
|  |  | (2.8) |
|  |  |  |

### Siły i momenty siły

Każde z 4 niezależnych śmigieł generuje ciąg, oraz moment zależne od prędkości obrotowej. Kierunki i zwroty sił i momentów działających na model są przedstawione na Rys. 2.3.

Siła ciągu generowana przez śmigło w zależności od prędkości obrotowej jest w przybliżeniu wyrażona wzorem [10]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.9) |

gdzie:  
*F* – siła ciągu;  
*ω* – prędkość obrotowa;  
*kF* – stała proporcjonalności ciągu.

Sumując siły działające na wszystkie silniki w układzie lokalnym można zapisać zależność wektorową:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.10) |

Do uproszczonego modelu można przyjąć siły oporu ruchu w układzie lokalnym zależne liniowo od prędkości [10]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.11) |

Moment obrotowy generowany przez śmigło w zależności od prędkości obrotowej jest w przybliżeniu wyrażony wzorem [10]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.12) |

gdzie:  
*F* – siła ciągu;  
*ω* – prędkość obrotowa;  
*kM* – stała proporcjonalności momentu.

Indeksami 1 i 3 oznaczono silniki wpływające na obrót, zaś indeksami 2 i 4 silniki wpływające na pochylenie, jak na Rys. 2.4. Sumując momenty działające na model w układzie lokalnym można zapisać zależność wektorową:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.13) |
|  |  |  |

### Momenty bezwładności

Założono strukturę quadcoptera o nieważkich ramionach pokrywających się z osiami bx i by układu lokalnego. Każdy silnik przybliżono punktową masą. Macierz bezwładności ***I*** może być zapisana następująco:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.14) |

Często w praktyce przy odpowiedniej symetrii konstrukcji można założyć, że .

### Dynamika

Wykorzystując podane powyżej zależności można wyprowadzić równania dynamiczne ruchu. Na podstawie [10] i wypisanych równań (2.5), (2.10) i (2.11) zapisano równanie opisujące dynamikę zmian pozycji dla układu inercjalnego:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.15) |

Po rozpisaniu otrzymano:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.16) |

gdzie:  
m – masa quadcopter;  
g – przyspieszenie ziemskie równe;  
 – wektor pozycji w układzie inercjalnym;  
– macierz obrotu z układu lokalnego do inercjalnego;  
 – wektor sił w układzie lokalnym;  
 – wektor sił tarcia w układzie globalnym.

Na podstawie [10] zapisano równanie opisujące dynamikę zmian orientacji dla układu lokalnego:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.17) |

## Podstawowe elementy

Każdy quadcopter zdalnie sterowany składa się z podstawowych, niezbędnych do realizacji lotu elementów. Są to następujące elementy:

* Rama;
* Sterownik lotu;
* IMU – Inertial Measurement Unit – jednostka pomiaru orientacji modelu;
* 4 Silniki ze śmigłami;
* ECS – Electronic Speed Control – kontroler obrotów do każdego silnika;
* Odbiornik RC;
* Bateria.

Minimum niezbędbych części do budowy quadcoptera i kierunki ich wzajemnych zależności zostały przedstawione na poniższym schemacie, analogicznie do [14].  
Gdzie:  
kolor czarny – przepływ informacji;  
kolor niebieski – przepływ zasilania.

Rys. 2.5: Schemat podstawowej konstrukcji.

Odbiornik RC

IMU

Bateria

ECS

ECS

ECS

ECS

Silnik

CS

Silnik

CS

Silnik

CS

Silnik

CS

Rama

### Rama

Multikoptery wymagają sztywnych i lekkich ram do zamocowania wszystkich części. Istnieje wiele możliwych konstrukcji różniących się kształtem, wymiarami i materiałami. Z powodu mniejszych ugięć i wypaczeń, sztywniejsza rama zapewnia stabilniejszy lot. Z drugiej strony, jeżeli rama jest zbyt krucha, nieuniknione upadki będą owocować częstszymi uszkodzeniami i potrzebami naprawy. Rama powinna być jednocześnie lekka, ponieważ niższa masa wpływa korzystnie na czas lotu i odpowiedź sterowania.  
 Jednym z najbardziej powszechnych materiałów używanych komercyjnie do wykonania ramy jest włókno węglowe. Zapewnia wysoki stosunek sztywności do masy i dobrą wytrzymałość zmęczeniową. Największymi minusami są możliwość blokowania sygnałów radiowych przez laminat węglowy i przewodnictwo elektryczne [11].  
 Inne często używane materiały to między innymi laminat szklano-epoksydowy, aluminium [12], ABS i PLA. Charakteryzują się niższą sztywnością i odpornością na uszkodzenia, jak również niższym stosunkiem sztywności do masy. Dodatkowo, elementy z tworzywa sztucznego mogą być dowolnie ukształtowane. Niektóre komercyjne drony, jak np. DJI Phantom, odeszły od powszechnej konstrukcji: płytka centralna ramy + ramiona. Zamiast tego rama jest jednolita, bez wyraźnie oddzielonych ramion.  
 Powszechna jest integracja złączy zasilania z centralną płytą ramy. Daje to możliwość przylutowania przyłączy baterii i zasilania ESC bezpośrednio do ramy, co ogranicza potrzebę prowadzenia dużej ilości kabli. Nie jest to niezbędne rozwiązanie, lecz upraszcza konstrukcję, jak również zapewnia większą niezawodność.  
 Głównym parametrem charakteryzującym rozmiar ramy jest rozpiętość mierzona między osiami dwóch silników zamieszczonych po przekątnej. Dla modeli typu quad jest to jedyna możliwa przekątna. Dla modeli typu hexa-, octa-, lub innych jest to przekątna pomiędzy osiami silników najbardziej od siebie odległych. Ramę dobiera się w zależności od zastosowania quadcoptera.

### Sterownik lotu

Sterownik lotu jest głównym elementem każdego modelu latającego. Jest on odpowiedzialny za prawidłową pracę wszystkich systemów. W minimalnym wariancie składa się z mikrokontrolera i peryferii pozwalających na pracę procesora; sensorów dostarczających danych pozwalających na estymację położenia i orientacji drona; oraz modułu radiowego którym odbierane są sygnały radiowe. Jednostka logiczna przetwarza informacje z sensorów dotyczące położenia i orientacji i sygnały z modułu radiowego, a następnie odpowiednio steruje wyjściami na kontrolery obrotów silników [13]. Sterownik lotu może wykonywać dodatkowe zadania, takie jak obliczanie trasy, czy przetwarzanie parametrów lotu, w zależności od zastosowania.

### Bateria

Dominujący rodzaj baterii to akumulatory litowo-polimerowe. Model latający zazwyczaj wyposażony jest w jedną baterię, wspólną dla układu napędowego (silników) i układu logicznego (sterownika lotu). Jest to możliwe poprzez zastosowanie BEC (Battery Eliminator Circuit), który jest częścią kontrolera obrotów. W praktyce używa się baterii 2-6 komorowych (7,4 V – 22,2 V).

### Kontrolery obrotów

ESC (Electronic Speed Controler) jest układem elektronicznym działającym jako regulator obrotów silnika, sterującym jego prędkością obrotową i kierunkiem. Również pełni funkcję hamulca dynamicznego[11]. Zazwyczaj posiada 3 piny dostosowane do rastra 2,54 mm, wpinane do sterownika lotu. Piny te to: pin sygnałowy, masa, oraz 5 V (BEC). Komunikacja z kontrolerem odbywa się poprzez modulację szerokości impulsów (PWM - Pulse-Width Modulation), lub modulację położenia impulsu (PPM – Pulse-Position Modulation). Kontroler obrotów zasilany jest z bezpośrednio z baterii. Wyjścia są podłączone do jednego silnika.

### Silniki

W modelach latających powszechnie stosuje się silniki bezszczotkowe, jak np. w [14]. Są to silniki synchroniczne, nie korzystające ze szczotek, gdzie funkcję komutatora pełni układ elektroniczny. Magnesy znajdują się na wirniku, a cewki są nieruchome. Dzięki wyeliminowaniu szczotek, które są szybko zużywającym się elementem, silniki bezszczotkowe odznaczają się wyższą trwałością i niezawodnością. Moc silnika może być nawet rzędu tysiąca watów.

### Śmigła

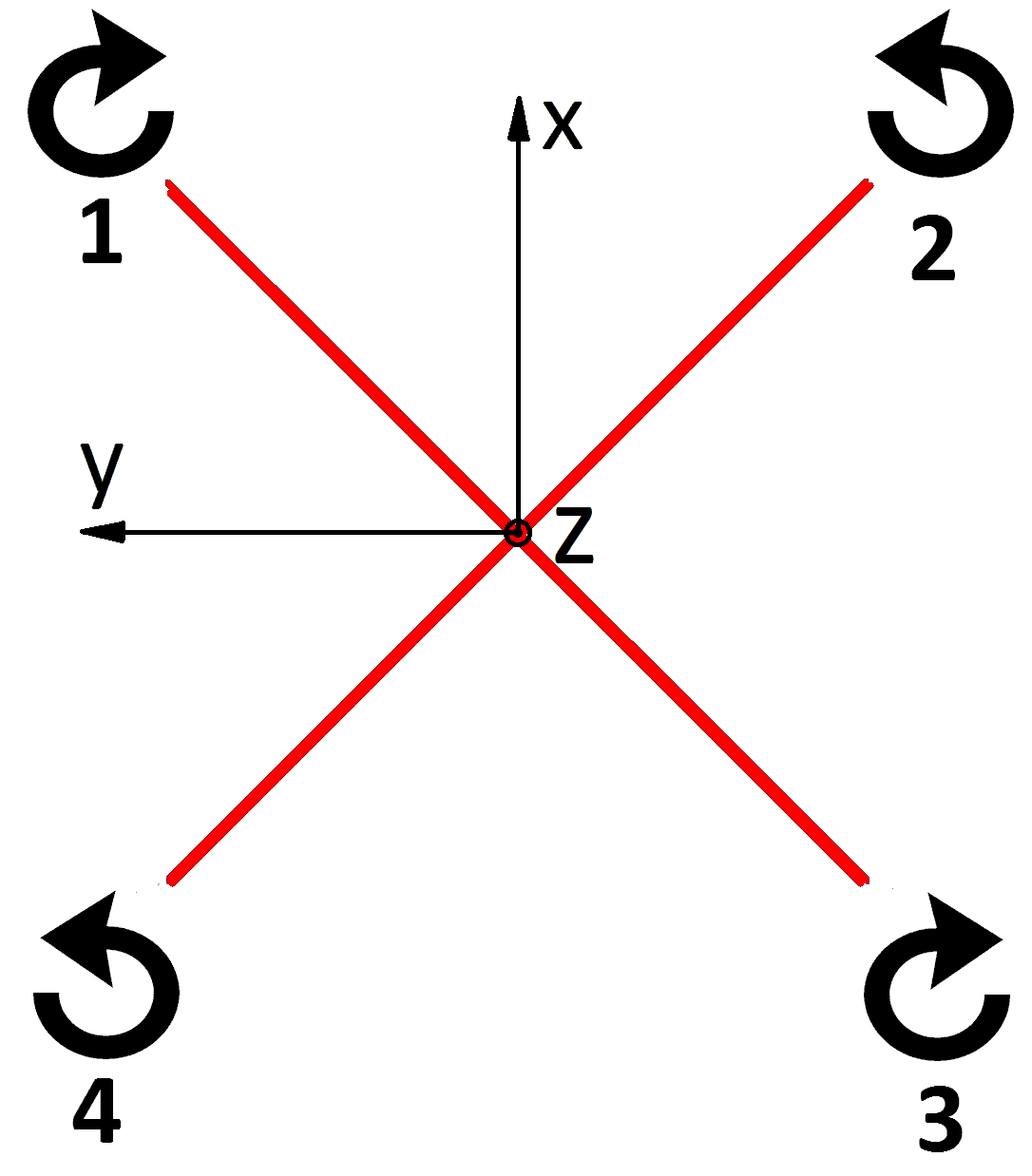
Podstawowymi parametrami opisującymi śmigło są średnica i skok. Wybór śmigła o odpowiednich parametrach powinien być dokonany w zależności od dobranych silników, rozmiaru ramy i szacowanej masy [18]. Stosuje się różne materiały do produkcji śmigieł, wśród których dominują tworzywo sztuczne i włókno węglowe [18]. Jako różnice między tymi materiałami można między innymi wyróżnić [19]:

* Śmigła z włókna węglowego są sztywniejsze;
* Śmigła z włókna węglowego są lepiej fabrycznie wyważone;
* Śmigła z włókna węglowego posiadają niższy moment bezwładności, przez co szybciej reagują na zmianę nastawy prędkości obrotowej regulatora obrotów;
* Śmigła z tworzywa sztucznego są tańsze;
* Śmigła z tworzywa sztucznego generują większy ciąg;
* Śmigła z tworzywa sztucznego dzięki wyższej podatności na zniszczenia lepiej zabezpieczają wał silnika przed uszkodzeniem.

**Część II – projekt i realizacja**

# Projekt

Przyjęto układ współrzędnych i numerację silników przedstawioną na Rys. 3.1.



Rys. 3.1: Przyjęty układ współrzędnych i zaznaczone kierunki obrotu śmigieł.

W ramach projektu zdecydowano się na samodzielne zaprojektowanie i wykonanie następujących elementów:

* centralnej płytki ramy;
* płytek montażowych silnika;
* płytek montażowych IMU;
* sterownika lotu.

Z gotowych rozwiązań komercyjnych dobrano następujące elementy:

* Moduł CPU Teensy 3.1 - ARM Cortex-M4, 96 MHz, 64 kB RAM, 256 kB flash;
* MPU9250 – 3 osiowy żyroskop, 3 osiowy akcelerometr, 3 osiowy magnetometr;
* Emax 2216 – 4 silniki, ;
* BLHeli 12 A – 4 regulatory obrotów;
* Emax 8045 – 4 śmigła 8x4,5”;
* HK-T6A V2 – aparatura i odbiornik RC 2,4GHz;
* Vant LiPo 4500 mAh – bateria 14,8 V; 30 C;
* Rura ϕ12x1000x0,5 mm - z włókna węglowego, wykonana w technologii owijania tkanin;
* Obejmy tzw. Boom Block, 16 sztuk;
* Podwozie – 4 nogi z zestawu DJI S500;
* Śruby, nakrętki i tuleje dystansowe, poliamidowe.

Do stworzenia modelu 3D posłużono się oprogramowaniem Solidworks 2016 w wersji studenckiej. Oprogramowanie sterownika napisane zostało w języku C++. W tym celu wykorzystano biblioteki Arduino i źródła dostępne w Internecie na zasadzie wolnej licencji. Do implementacji posłużyło oprogramowanie Visual Studio 2016 w wersji Community z wtyczką Visual Micro, umożliwiającą programowanie mikroprocesorów kompatybilnych z platformą Arduino, przy jednoczesnym wykorzystaniu wygodnych narzędzi edytorskich firmy Microsoft.

## Elementy ramy zaprojektowane

Stworzenie modelu 3D miało dwa zasadnicze cele:

* zaprojektowanie centralnych płytek ramy, płytek montażowych silnika i płytki montażowej IMU do późniejszego wykonania;
* zapewnienie wzajemnego dopasowania wszystkich elementów już na etapie projektu.

Początkowo zamierzano zaprojektowane części wyciąć laserem CNC, lecz zarzucono ten pomysł na rzecz druku 3D, co opisano w Rozdziale 4.2.

Rys. 3.2. przedstawia render ukazujący wyniki pracy. Jest to model uproszczony względem rzeczywistego. Nie modelowano części nie mających znaczenia dla poprawnego dopasowania elementów łączonych, takich jak: kable, moduł RC, regulatory obrotów. Układ sterownika lotu i moduł MPU9250 zostały zamodelowane w sposób uproszczony, jako płytki koloru kolejno: zielonego i granatowego; z zachowaniem wymiarów podłączeniowych i gabarytowych.



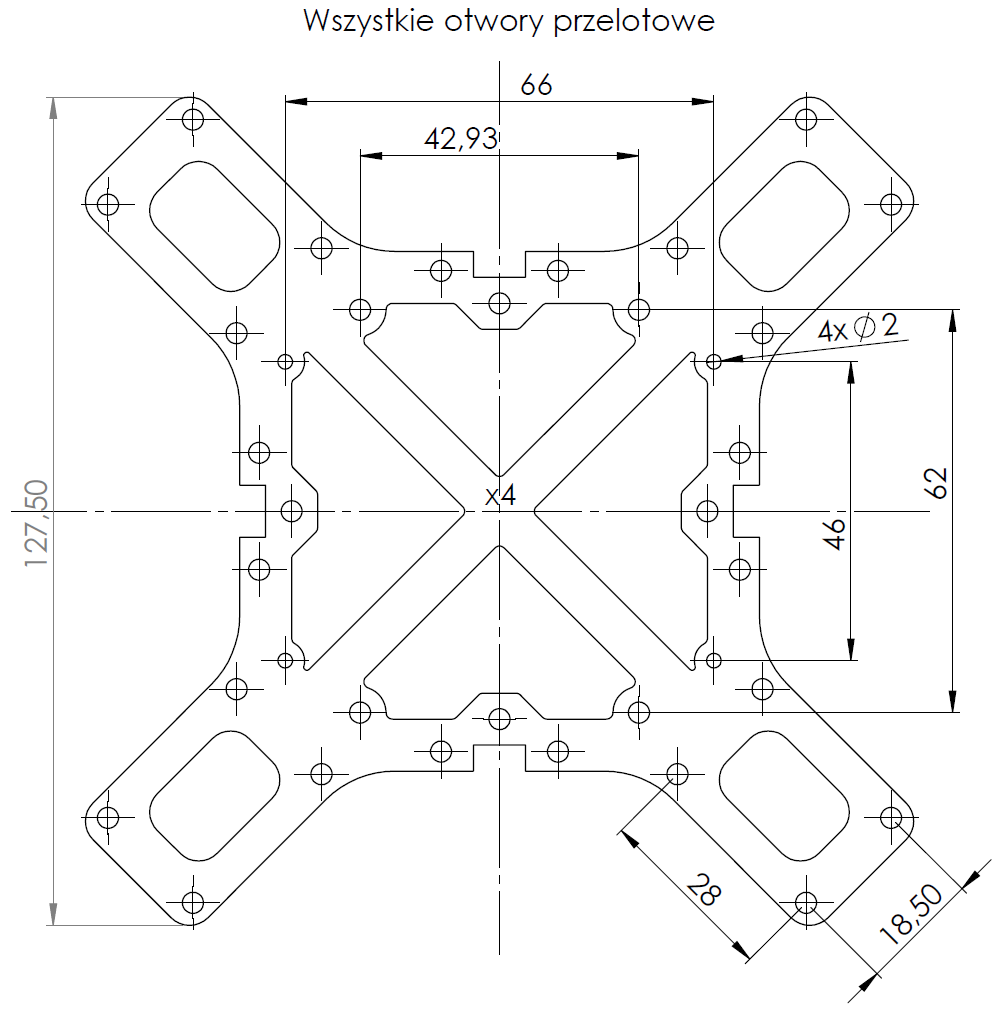
Rys. 3.2: Render zaprojektowanego modelu 3D.

### Płytki centralne ramy

Zdecydowano się na samodzielne zaprojektowanie elementów centralnych ramy. Było to spowodowane następującymi względami:

* dowolność w przyjętych rozwiązaniach konstrukcyjnych;
* możliwość zaprojektowania rozwiązania minimalnego, bez zbędnych elementów, które dominują w rozwiązaniach komercyjnych, jak np. uchwyt kamery;
* otwartość na przyszłe zmiany;
* możliwość uwzględnienia modułowości;
* możliwość szybkiej zmiany wytrzymałości ramy poprzez zmianę grubości elementów, w zależności od potrzeb.

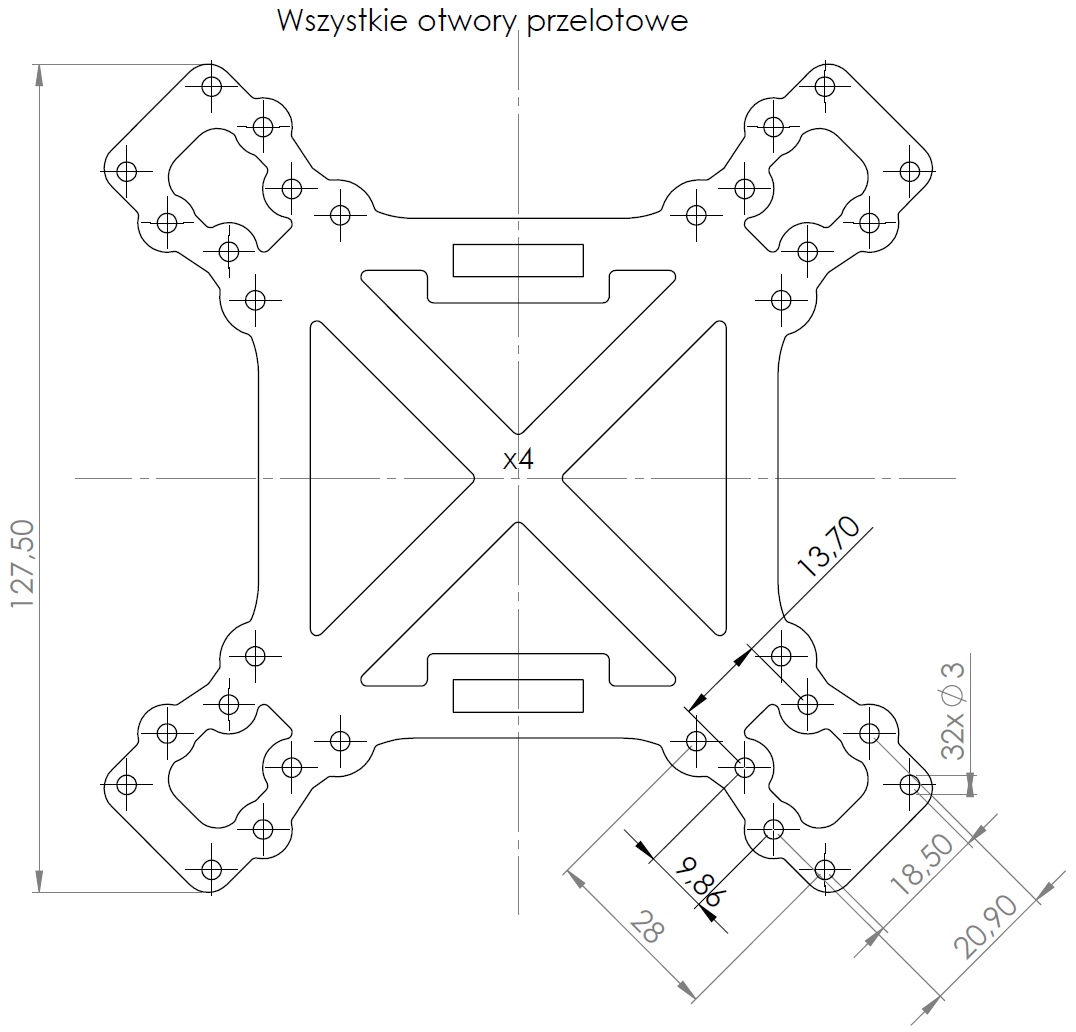
Rysunki zaprojektowanych elementów widoczne są poniżej. Z racji tego, że części były projektowane pod wykonanie bezpośrednio z formatu cyfrowego, nie było potrzeby tworzenia ich rysunków wykonawczych. Na ilustracjach zaznaczone są wymiary gabarytowe. Początkowo rysunki miały służyć do przeprowadzenia cięcia CNC, lecz ostatecznie skorzystano z wygenerowanych modeli 3D w formacie standardowym STL do druku 3D.



Rys. 3.3: Płytka górna ramy.

Przy projektowaniu górnej części centralnej ramy zrealizowano następujące zadania:

* dostosowano rozmiar i rozstaw otworów do 8 obejm typu Boom Block;
* dopasowano rozstaw otworów do podłączenia płytki sterownika lotu i płytki modułu IMU, zamontowanej na tulejach dystansowych;
* poprzez pozostawienie 3 otworów ϕ3 i wcięcia z 4 stron płytki otwarto możliwość przymocowania quadcoptera do ramy testowej ograniczającej stopnie swobody, jeżeli zaszłaby potrzeba prowadzenia testów.



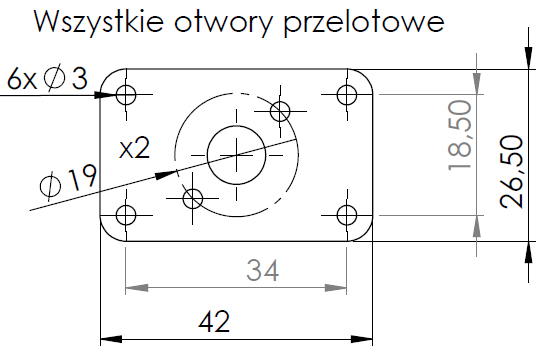
Rys. 3.4: Płytka dolna ramy.

Przy projektowaniu dolnej części centralnej ramy zrealizowano następujące zadania:

* dostosowano rozmiar i rozstaw otworów do 8 obejm typu Boom Block, analogicznie do górnej płytki;
* uwzględniono wymiary podłączeniowe nóg pełniących funkcję podwozia;
* uwzględniono otwory niezbędne do montażu baterii od spodu quadcoptera za pomocą rzepa;
* zapewniono odpowiednią wytrzymałość dzięki nadaniu grubości 4 mm.

### Płytki montażowe silnika

Element ten jest prosty w swojej konstrukcji, lecz jego dokładne wykonanie jest wymogiem precyzyjnego umocowania silników. Części te zostaną przymocowane za pośrednictwem obejm do ramion. Do nich zostaną przykręcone silniki.



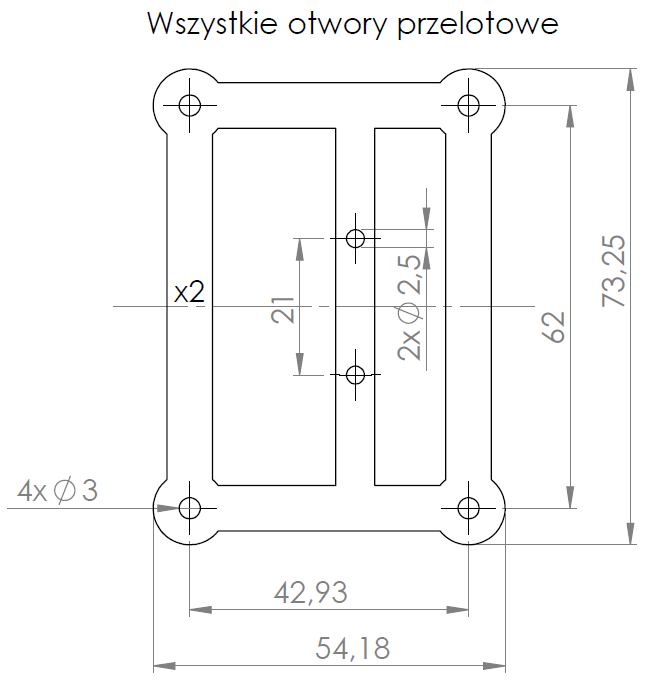
Rys. 3.5: Płytka montażowa silnika.

Przy projektowaniu płytek montażowych silnika zrealizowano następujące zadania:

* dostosowano rozmiar i rozstaw otworów do 2 obejm typu Boom Block;
* wykorzystano uniwersalny rozmiar i rozstaw otworów do montażu silnika, wykorzystywany w rozwiązaniach komercyjnych;
* zapewniono odpowiednią szerokość 34 mm pozwalającą na bezpieczny montaż silnika bez ryzyka kolizji ze śrubami łączącymi obejmy.

### Płytka montażowa IMU

W początkowej fazie projektu zakładano możliwość wykorzystania silikonowych łączników jako amortyzatorów, celem minimalizacji wpływu drgań na odczyty akcelerometru i żyroskopu. Przy późniejszej weryfikacji nie znaleziono przykładu takiego rozwiązania w pracach naukowych lub produktach komercyjnych, więc tę formę profilaktyki przeciwko niepożądanym drganiom uznano za zbędną. W wyniku tego zaprojektowano możliwie nieskomplikowaną część, do której zamontowany zostanie układ MPU9250. Całość jest przymocowana do górnej płytki centralnej ramy za pośrednictwem 4 poliamidowych tulei dystansowych ϕ3 x 40 mm.



Rys. 3.6: Płytka montażowa IMU.

Przy projektowaniu płytki montażowej IMU zrealizowano następujące zadania:

* dopasowano rozstaw otworów montażowych tulei do otworów w górnym centralnym elemencie ramy;
* dopasowano rozstaw i średnicę otworów montażowych IMU na podstawie pomiarów modułu MPU9250 dokonanych suwmiarką;
* część płytki montażowej przylegającą do IMU odsunięto od osi tak, by układ MEMS modułu MPU9250 znajdował się w osi symetrii quadcoptera.

## Elementy ramy dobrane

### Nogi podwozia

Początkowo zakładano, że nogi podwozia również zostaną zaprojektowane, lecz ostatecznie dobrano je z kompletu ramy DJI S500. Jest to element, który będzie można w przyszłości zaprojektować i wykonać, zwracając uwagę mniejsze wymiary i wyższą sztywność.

Rys. 3.7: Nogi podwozia z zestawu DJI S500 [20].

### Obejmy ramion

Obejma rury tzw. Boom Block dostosowana jest do rur o średnicy zewnętrznej ϕ12. Producent deklaruje właściwości tłumiące uchwytu dla wysokich częstotliwości[21], co będzie korzystne dla projektowanego modelu.



Rys. 3.8: Obejma rury ϕ12 [21]

### Ramiona

Jako ramiona dobrano rury z włókna węglowego o splocie ukośnym o wymiarach ϕ12x11x230mm. Zapewniają w pełni wystarczającą wytrzymałość i udarność.



Rys. 3.9: Rura z włókna węglowego [22], moneta dla skali

## Sterownik lotu

Określono wymagane połączenia mikrokontrolera Teensy 3.1 z elementami peryferyjnymi. Poniższa tabela zawiera oznaczenia pinów mikrokontrolera i przypadające im połączenia zewnętrzne.

Tab. 3.1: Połączenia mikrokontrolera.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Oznaczenie pinu Teensy 3.1** | **Oznaczenie pinu części podłączonej** | **Nazwa elementu** |
| Vin | VCC | IMU - MPU9250 |
| GND | GND |
| SCL0 | SCL |
| SDA0 | SDA |
| 1 | CH1 | Moduł RC – HK-T6A V2 |
| 2 | CH2 |
| 3 | CH3 |
| 4 | CH4 |
| 5 | CH5 |
| 6 | CH6 |
| Vin | VCC |
| GND | GND |
| Vin | 5 V (BEC) | Regulator Obrotów 1. |
| GND | GND |
| 20 | SIGNAL |
| Vin | 5 V (BEC) | Regulator Obrotów 2. |
| GND | GND |
| 21 | SIGNAL |
| Vin | 5 V (BEC) | Regulator Obrotów 3. |
| GND | GND |
| 22 | SIGNAL |
| Vin | 5 V (BEC) | Regulator Obrotów 4. |
| GND | GND |
| 23 | SIGNAL |
| 10 | IN | Buzzer |
| GND | OUT |

Do listy przyjętych części z początku Rozdziału 3. dodano generator tonu ciągłego o średnicy 12 mm. zasilany napięciem 5 V, tzw. buzzer. Będzie służył do sygnalizacji dźwiękowej stanu gotowości, lub błędów.

# Realizacja

## Algorytm sterowania

Jednym z przyjętych celów pracy była implementacja sterownika lotu w języku C++. Algorytm sterowania w sposób ogólny przedstawia schemat zamieszczony na Rys. 4.1. Pełna implementacja dostępna jest w repozytorium internetowym, którego adres podano w Załączniku pracy.

START

Inicjalizacja zmiennych sterownika

Czy UAV jest uzbrojony?

N

T

Odczyt nastaw aparatury RC

Odczyt stanu

Obliczenia regulatora

Wystawienie wyjść na regulatory obrotów

Czy port szeregowy obsłużył wszystkie zapytania?

N

T

Czy aparatura RC jest skalibrowana?

N

T

Obsługa portu szeregowego

Kalibracja kanałów aparatury

Rys. 4.1: Schemat algorytmu sterowania.

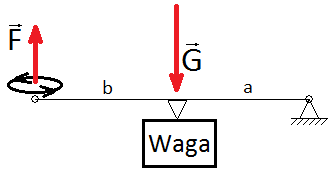
Przy implementacji należało uporać się z następującymi zagadnieniami:

* komunikacja z modułem MPU9250 poprzez szynę I2C;
* konfiguracja modułu MPU9250;
* wykorzystanie funkcjonalności DMP[[3]](#footnote-3) do pobierania aktualnych zmiennych stanu z modułu MPU9250;
* ustalenie częstotliwości odświeżania[[4]](#footnote-4) na 200 Hz;
* odbiór sygnałów radiowych za pomocą przerwań[[5]](#footnote-5);
* interpretacja sygnałów radiowych i ich konwersja na zmienne sterujące;
* implementacja nadążnego układu regulacji;
* wysyłanie sygnału sterującego do kontrolerów obrotów;
* możliwość odczytu / zapisu wybranych parametrów z / do pamięci nieulotnej EEPROM za pośrednictwem portu szeregowego;
* możliwość kalibracji położenia neutralnego i zakresu drążków aparatury RC.

### Charakterystyka wirników w funkcji sygnału sterującego

Parametrami podlegającymi sterowaniu są nastawy każdego z regulatorów obrotów. Stawiono sobie za zadanie znalezienie zależności ciągu i momentu wirnika generowanych w funkcji sygnału sterującego nadawanego do regulatora. Z niejasnego opisu regulatora BLHeli 12 A [23] można wnioskować, że regulator zapewnia liniowość generowanego ciągu i momentu. Postanowiono to sprawdzić.

W tym celu zbudowano stanowisko do statycznego testowania ciągu silnika. Jego schemat jest przedstawiony na Rys. 4.2.

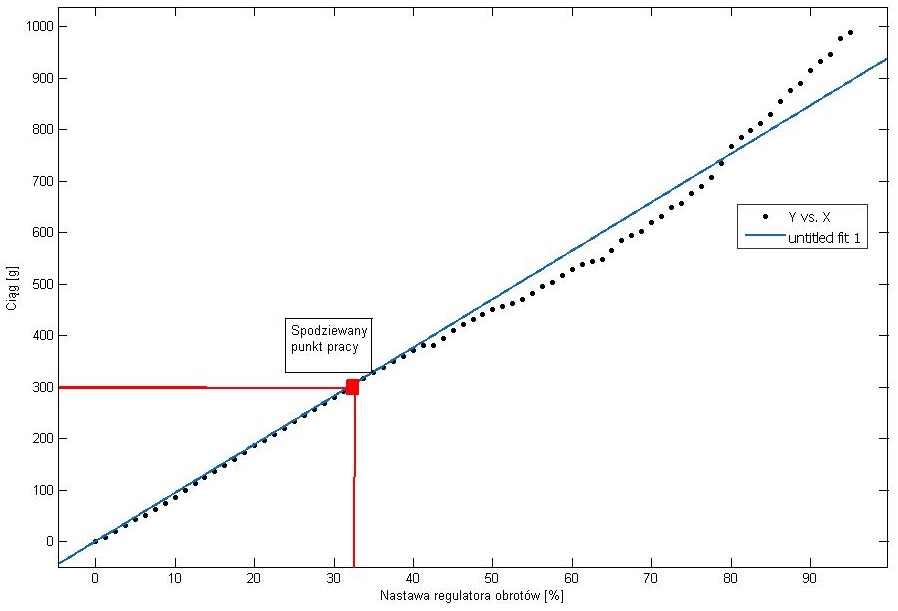


Rys. 4.2 Schemat stanowiska testowego do pomiaru ciągu silnika.

Wykorzystano zależność:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.1) |
|  | gdzie: ∆W – zmiana wskazania wagi;  – stała. |  |

Wynik przeprowadzonych testów przedstawia Rys. 4.3.



Rys. 4.3: Charakterystyka F(u).

Spodziewany punkt pracy przyjęto dla ciągu o wartości 300 g. Powyższy wykres potwierdza liniowy charakter ciągu w funkcji nastawy regulatora obrotów. Nieznaczące nieliniowości mogły być spowodowane zakłóceniami przy pomiarach dla wyższych prędkości obrotowych.

Zapisano więc zależność:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.2) |
|  | gdzie:  – stała proporcjonalności;  – nastawa regulatora obrotów. |  |

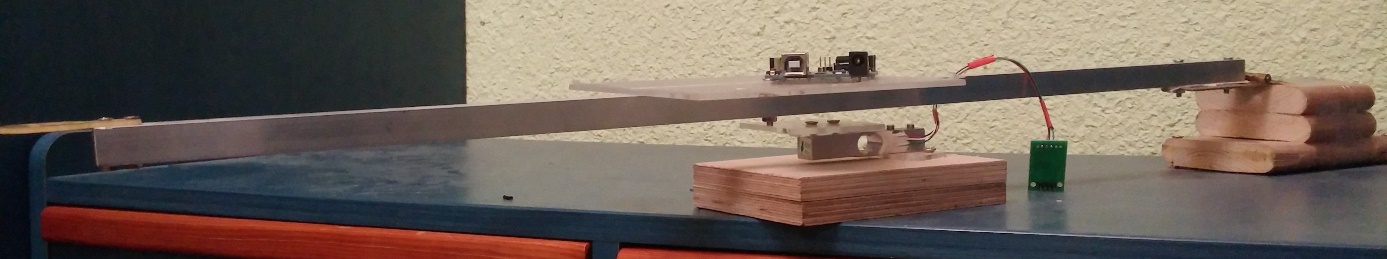
Na podstawie równań (2.9) i (2.12) zapisano:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Wynika z tego, że zależność momentu rekcji wirnika w funkcji nastawy regulatora obrotów również jest liniowa. Zapisano więc ostatecznie:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.3) |

Zdjęcie zbudowanego stanowiska testowego przedstawia Rys. 4.4.

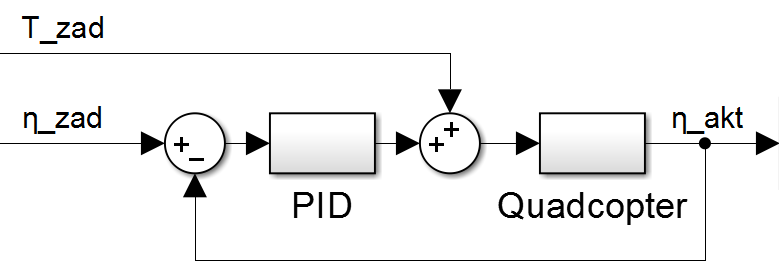


Rys. 4.4: Stanowisko testowe pomiaru ciągu silnika.

Do pomiaru zmiany ciężaru wykorzystano belkę tensometryczną NA27 o zakresie pracy do 50N i wzmacniacz SparkFun HX711. Program testujący zaimplementowano na platformie Arduino UNO.

### Regulacja nadążna – podejście 1

Przy pierwszym podejściu zaimplementowano możliwie najprostszy układ regulacji z jedną pętlą sprzężenia zwrotnego. Jego schemat przedstawia Rys. 4.5.



Rys. 4.5: Schemat blokowy regulacji - podejście 1.

Przyjęto następujące oznaczenia

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.4) |
|  | gdzie:  – wartości kątów i prędkości kątowej wyznaczone z konwersji kanałów radiowych 1-3; |  |
|  | – zadana wartość ciągu wyznaczona z konwersji kanału 4. |  |

Następnie podjęto próbę wyznaczenia współczynników regulatora PID zapewniających stabilność układu. Rozpoczęto od wyznaczenia tylko współczynników wzmocnienia i , jak dla regulatora P.

Nie znaleziono współczynników dla stabilnej regulacji proporcjonalnej. Było to spowodowane błędnie przyjętym schematem regulacji. Wg tego schematu momenty siły wzdłuż osi x i y są proporcjonalne kolejno do uchybu regulacji kąta obrotu i uchybu regulacji kąta pochylenia . Po porażce doboru parametrów regulacji dla regulatora P nie podjęto się próby szukania współczynników dla części całkującej i różniczkującej regulatora. Rozpisując matematycznie zachowanie regulatora P otrzymano:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.5) |
|  | (4.6) |

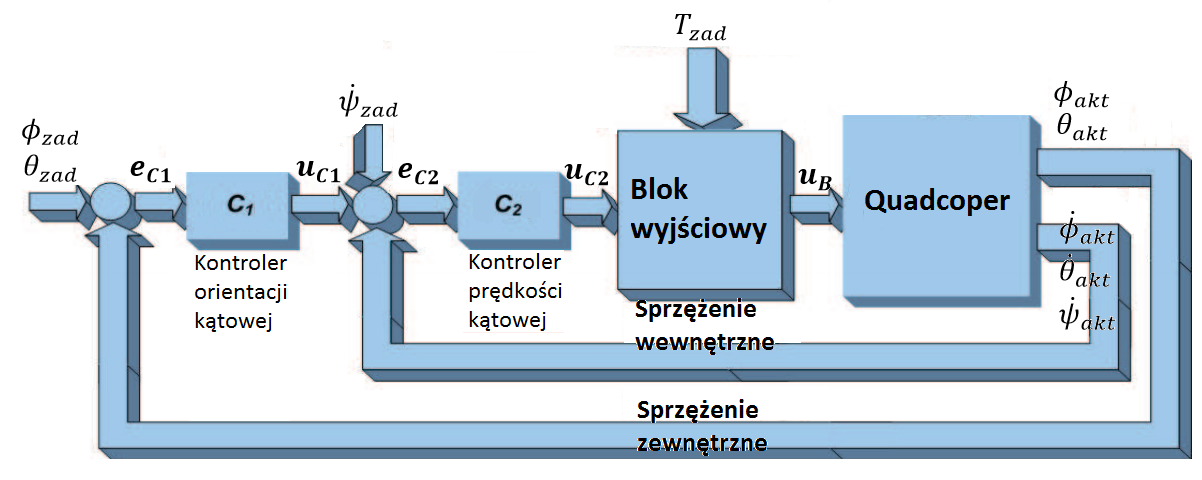
Na podstawie równania (2) w [24] zapisano rozwiązania równań:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.7) |
|  | (4.8) |

Na podstawie powyższych równań można stwierdzić, że przyjęty model regulatora powoduje oscylacje, co w rzeczywistości niesie za sobą niezbywalną niestabilność.

### Regulacja nadążna – podejście 2

Przy drugiej próbie zaprojektowania układu regulacji zdecydowano się na algorytm sterowania kaskadowego z dwoma pętlami sprzężenia zwrotnego, zbudowany na podstawie zaproponowanego w [25]. Zmodyfikowany schemat algorytmu przedstawia Rys. 4.6.



Rys. 4.6: Schemat blokowy regulacji - podejście 2.

Przyjęto następujące oznaczenia:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.9) |
|  | (4.10) |
|  | (4.11) |
|  | (4.12) |
|  | (4.13) |
|  |  |
| gdzie:  – uchyb regulacji, wejście regulatora C1/C2;  – sygnał sterujący, wyjście regulatora C1/C2;  – sygnał sterujący regulatorów obrotów, wyjście bloku wyjściowego  – wartości wyjściowe regulatora C1, będące wejściem regulatora C2.  – zadana wartość ciągu wyznaczona z konwersji kanału 4. |  |

Jako regulator C1 przyjęto regulator proporcjonalny, opisany równaniem:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.14) |
|  | gdzie:  – współczynnik wzmocnienia;  – k-ta chwila czasowa. |  |

Jako regulator C2 przyjęto regulator dyskretny PID, analogiczny do regulatora ciągłego przedstawionego w [9], opisany równaniem:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.15) |
|  | gdzie:  – współczynnik wzmocnienia części proporcjonalnej;  – współczynnik wzmocnienia części całkującej;  – współczynnik wzmocnienia części różniczkującej;  – k-ta chwila czasowa. |  |

Element oznaczony jako Blok Wyjściowy ma na celu konwersję sygnału wyjściowego regulatora C2 na sygnał sterujący podawany na regulatory obrotów. Jest zależny od przyjętego lokalnego układu współrzędnych, przedstawionego na Rys. 3.1. Można go opisać równaniem:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.16) |

Po rozpisaniu macierzy współczynników równanie Bloku Wyjściowego wygląda następująco:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.17) |

### Próba kalibracji parametrów sterowania

Dobranie właściwych parametrów pętli regulacji jest głównym warunkiem uzyskania stabilności lotu. Niestety w ramach niniejszej pracy zabrakło czasu na konstrukcję stanowiska testowego i systematyczną kalibrację parametrów regulacji przy prawidłowo odebranych stopniach swobody. Rozważane jest zajęcie się tym zagadnieniem w ramach pracy magisterskiej.

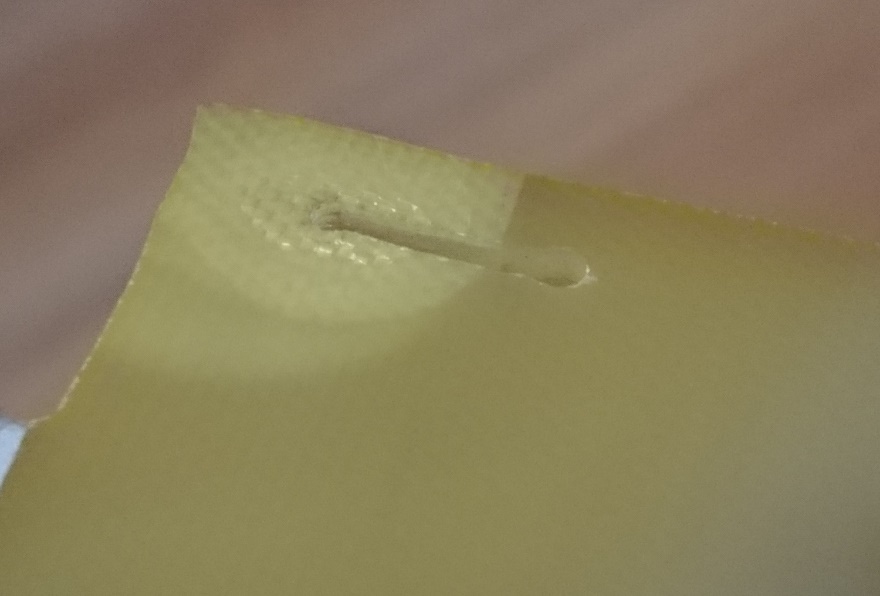
Podjęto się próby kalibracji na poziomie hobbystycznym, czyli metodą prób i błędów. Trzymano drona w ręku i obserwowano reakcje. Ograniczono się do składowych proporcjonalnych regulatora kaskadowego. Próbowano znaleźć parametry gwarantujące stabilność lotu. Jako subiektywnie najlepsze określono parametry:

Budowa stanowiska testowego może być podstawowym kierunkiem rozwoju niniejszej pracy. Możliwość montażu ramy testowej została uwzględniona na etapie projektowania centralnych płytek ramy, co zostało opisane w Rozdziale 3.1.1.

## Wykonanie części ramy

### Próba wycięcia laserowego

Części opisane w Rozdziale 3.1. początkowo próbowano wykonać w technologii cięcia laserowego CNC. Jako materiał wybrano arkusz laminatu szklano-epoksydowego. Niestety dwie firmy świadczące w Krakowie usługi cięcia laserowego nie były w stanie sprostać temu zadaniu. Wbrew oczekiwaniom[[6]](#footnote-6), arkusz laminatu szklano-epoksydowego okazał się niepodatny na cięcie wiązką lasera. Nieudana cięcie testowe przedstawione jest na Rys. 4.7.



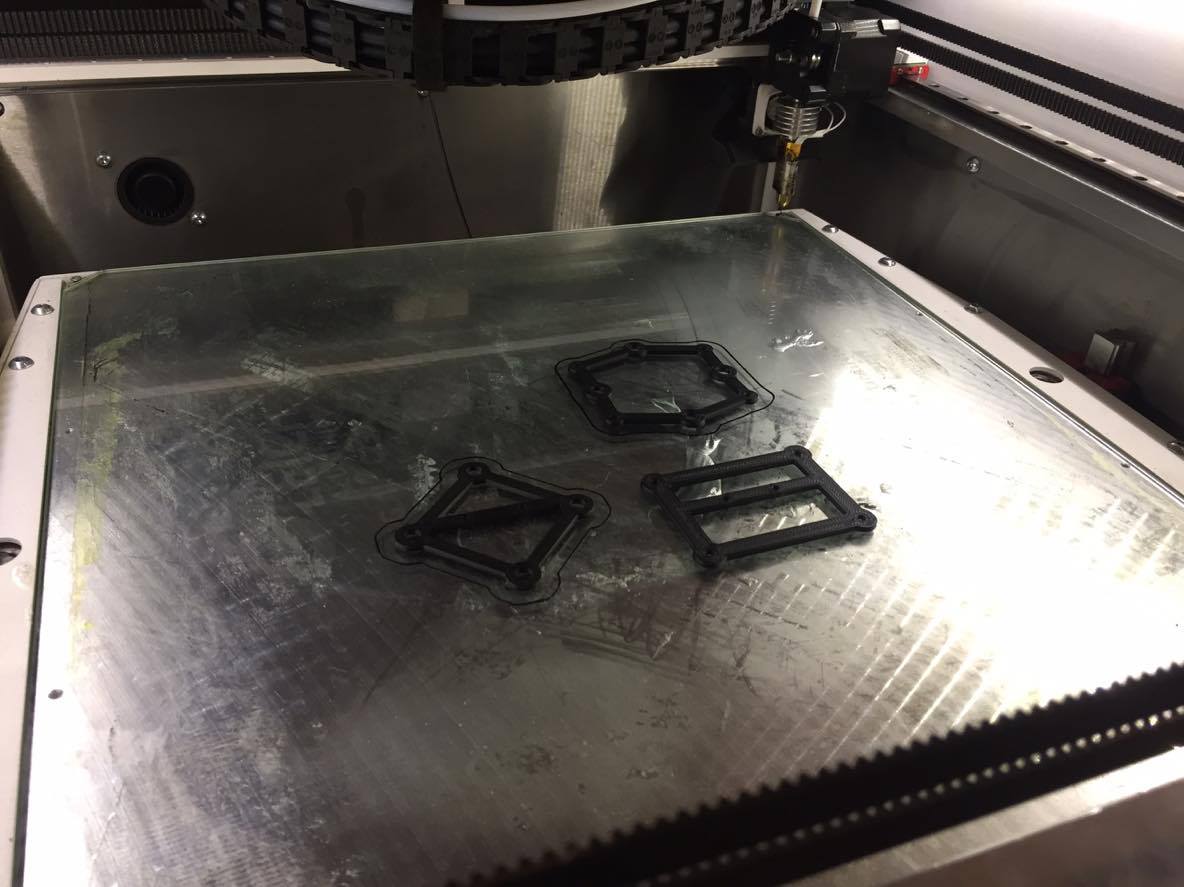
Rys. 4.7: Nieudana próba cięcia laserem.

Pod wpływem wysokiej temperatury arkusz laminatu szklano-epoksydowego pęczniał i tracił swoje właściwości.

### Druk 3D

Zdecydowano się na wykonanie zaprojektowanych części w technologii druku FDM. Polega ona na addytywnym nanoszeniu stopionego tworzywa. Zastanawiano się pomiędzy dwoma materiałami do druku 3D: ABS i PLA. Na podstawie Ilustracji 2. w [16] stwierdzono, że PLA zapewni wyższą wytrzymałość, niż ABS.

Posłużono się modelami w formacie .STL wygenerowanymi z modelu 3D. Pierwszy wydruk był niezadowalający z powodu niepoprawnie dobranej prędkości głowicy. Po dobraniu prawidłowych parametrów druku wykonano części opisane w rozdziale 3.1.

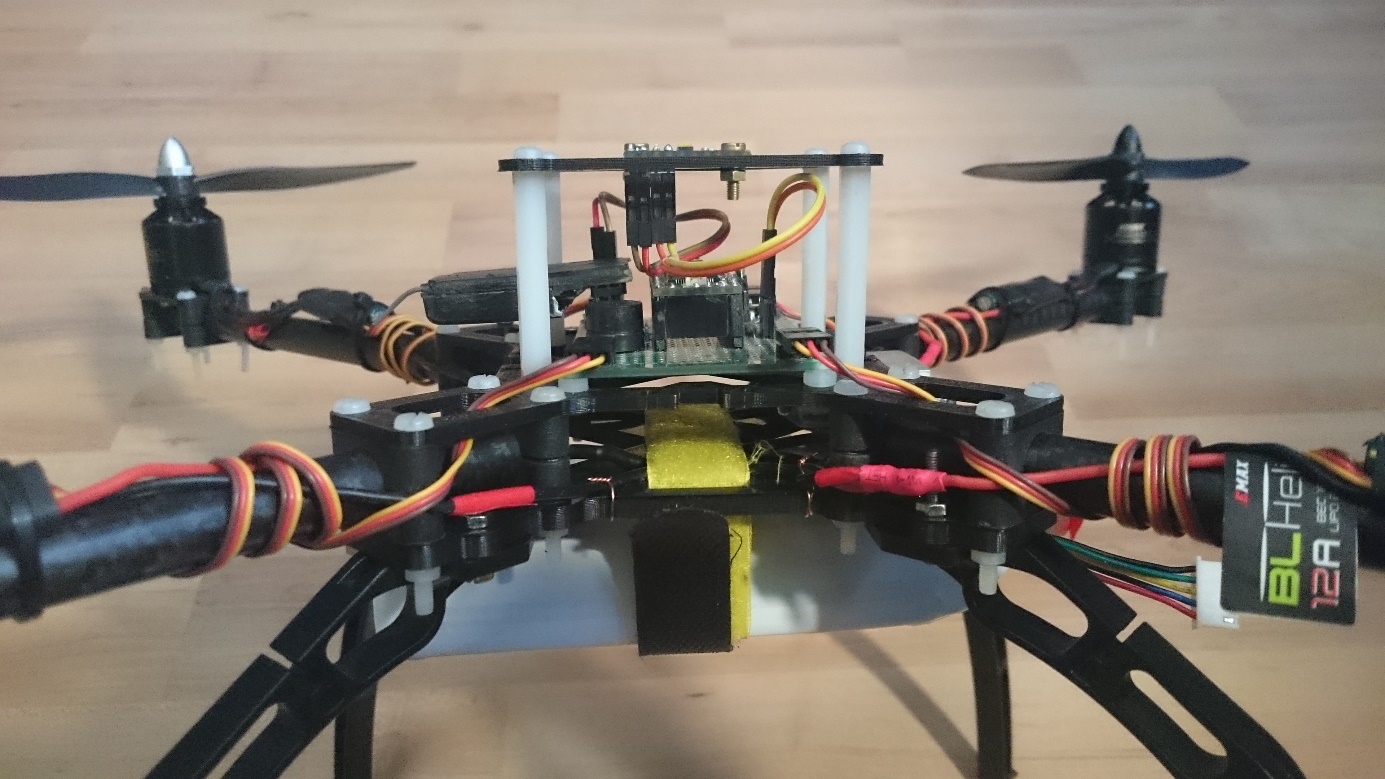


Rys. 4.8: Proces druku 3D[[7]](#footnote-7).

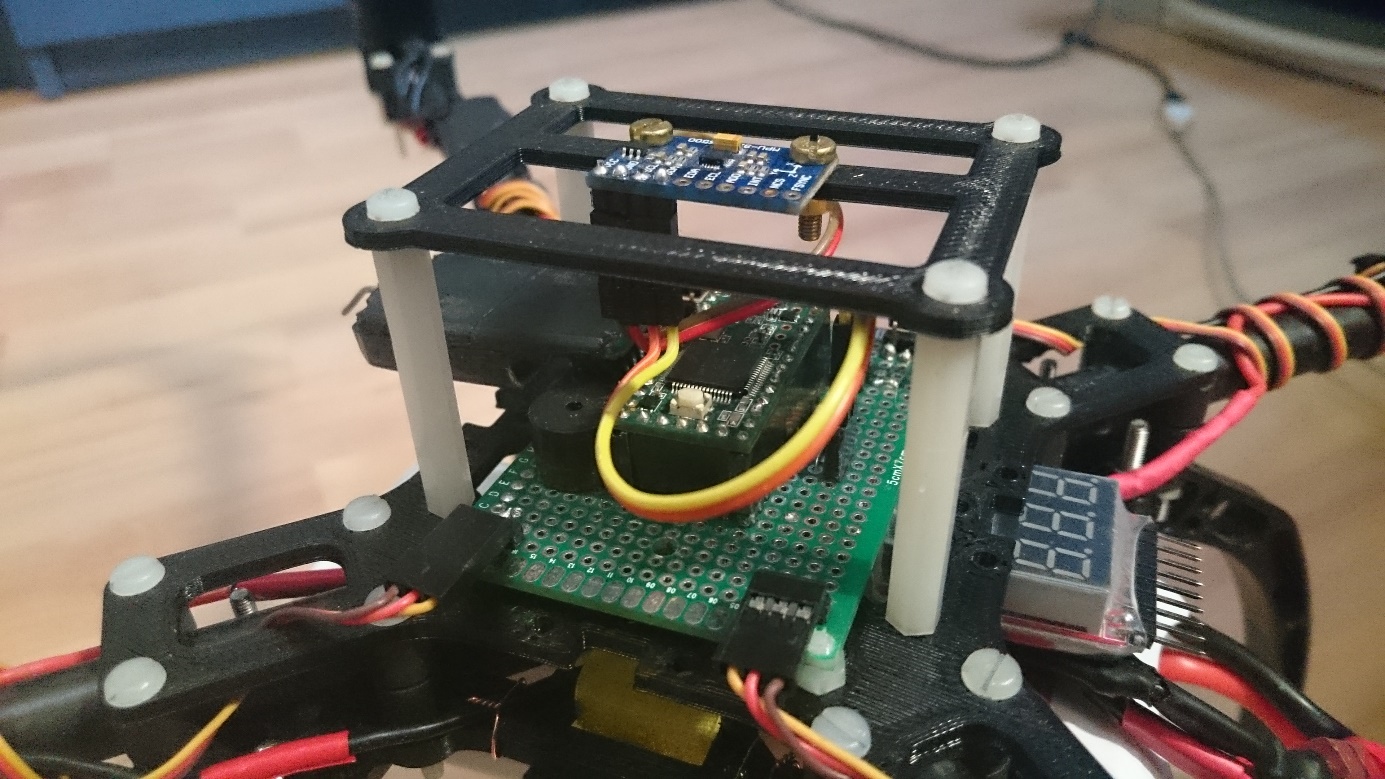
Zbudowany model latający jest przedstawiony na poniższych Rysunkach.



Rys. 4.9: Zbudowany model.



Rys. 4.10: Zbudowany model.



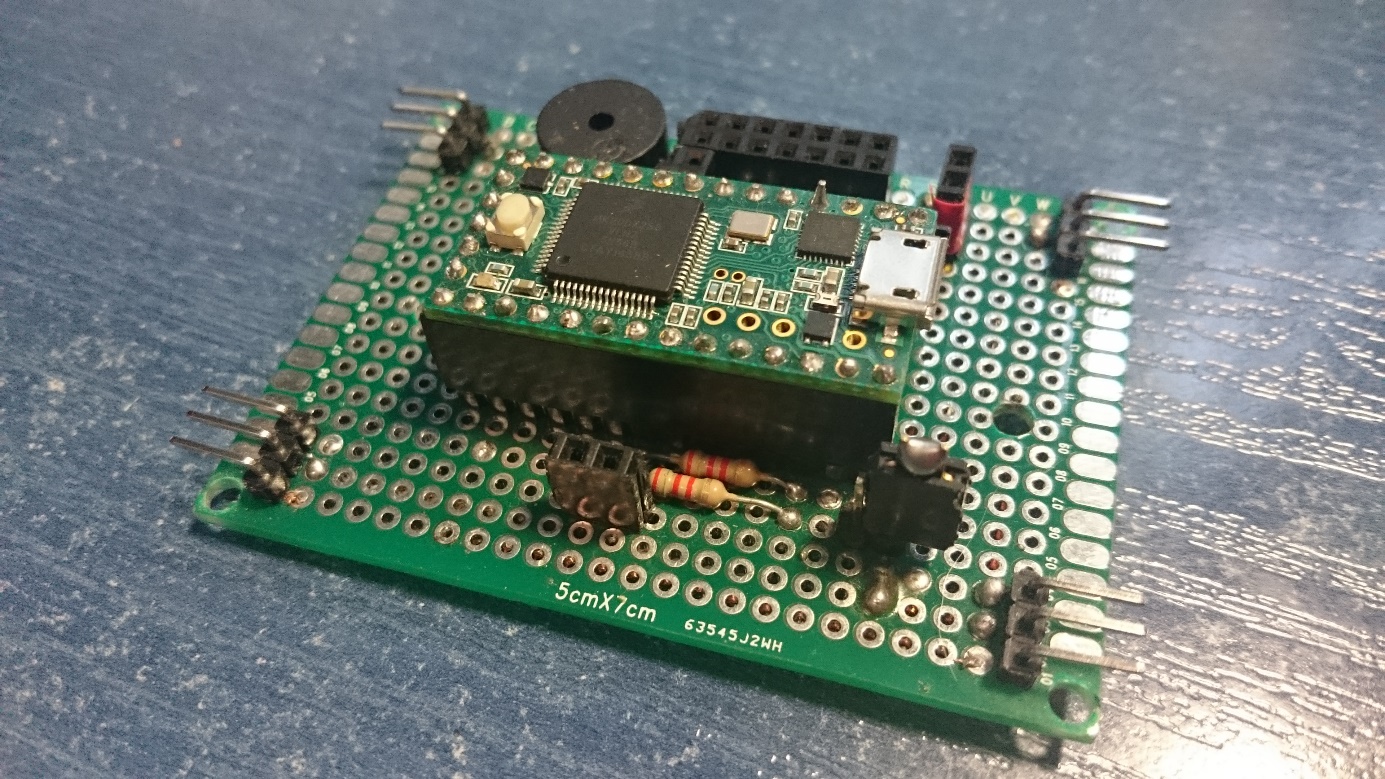
Rys. 4.11: Zbudowany model.

## Wykonanie sterownika lotu

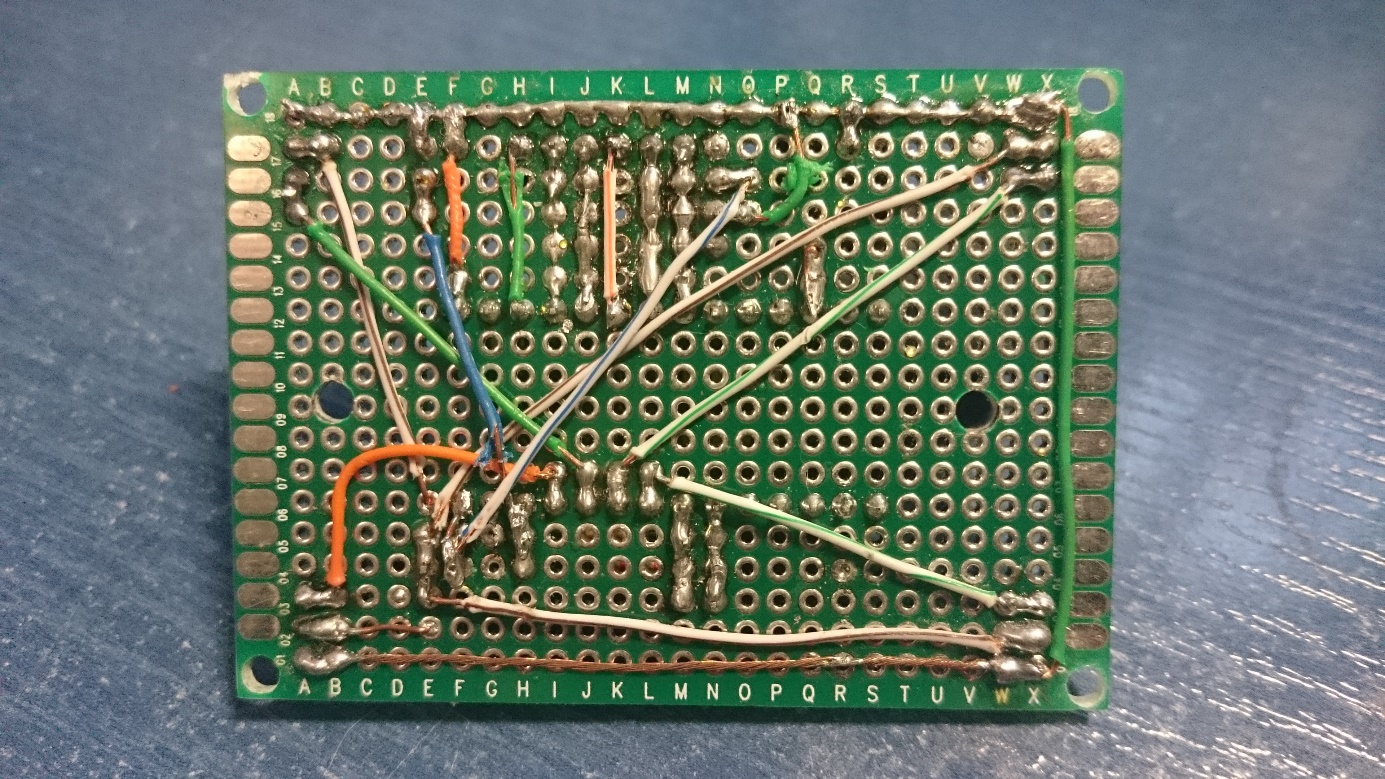
Po uwzględnieniu wymiarów ramy ustalonych na etapie projektowania[[8]](#footnote-8), jako bazę sterownika dobrano standardową płytkę prototypową 50x70 mm. Początkowo rozważano cyfrowe zaprojektowanie płytki i jej wytrawienie. Rozwiązanie to uznano później za ograniczające, ponieważ zamyka możliwości łatwej modyfikacji układu. Przy lutowaniu układu uwzględniono opis połączeń z Rozdziału 3.3. i zrealizowano następujące zadania:

* przylutowano gniazdo na mikroprocesor Teensy 3.1, aby nie mocować mikroprocesora na stałe do układu;
* poprowadzono główne ścieżki zasilania i masy;
* przylutowano zworkę umożliwiającą wybór źródła zasilania układu logicznego: poprzez port USB, lub poprzez wyjście BEC regulatorów obrotów;
* przylutowano gniazdo na odbiornik modułu RC i poprowadzono połączenia;
* przylutowano gniazdo zasilania i gniazdo sygnałowe magistrali I²C na moduł MPU9250 i poprowadzono połączenia;
* poprowadzono rezystory podciągające[[9]](#footnote-9) 2 kΩ między magistralą I²C , a linią 5 V;
* przylutowano piny pod gniazda regulatorów obrotów i poprowadzono połączenia;
* przylutowano generator tonu i poprowadzono połączenia.

Do poprowadzenia ścieżek, oprócz cyny lutowniczej, użyto miedzianych przewodów z wielożyłowego kabla sygnałowego. Po wykonaniu upewniono się, że nie następuje zwarcie. Następnie pomyślne wykonano testy prawidłowego działania wszystkich układów. Efekty pracy można zobaczyć na poniższych zdjęciach.



Rys. 4.12: Sterownik lotu.

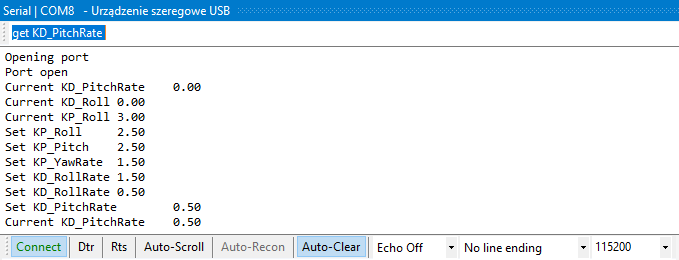


Rys. 4.13: Sterownik lotu – tył.

# Działanie w praktyce

## Interfejs kalibracji

Do kalibracji parametrów regulacji wykorzystuje się zaimplementowany interfejs. Za pomocą łącza szeregowego wprowadza się komendy „set” i „get” dotyczące poszczególnych parametrów. Przykład wykorzystania tego interfejsu przedstawia Rys. 5.1.

Rys. 5.1: Użytkowanie zaimplementowanego interfejsu kalibracji parametrów.

## Użytkowanie

Po podłączeniu baterii do układu zasilania wydawany jest dźwięk sygnalizujący poprawną inicjalizację sterownika i poprawne nawiązanie połączenia z modułem IMU. Puki dźwignia ciągu nie zostanie wychylona ponad zadany poziom, dron pozostaje nieuzbrojony. Przekręcając na aparaturze gałki kanału piątego i szóstego można włączyć tryb kalibracji dźwigni aparatury. Przy wychyleniu dźwigni ciągu powyżej poziomu bezpieczeństwa quadcopter zostaje uzbrojony i następuje proces regulacji orientacji i wysterowania silników.

Zaimplementowane zostały mechanizmy bezpieczeństwa podczas lotu. Utrata komunikacji z aparaturą RC lub rozłączenie modułu IMU powoduje awaryjne zatrzymanie silników.

Próba kalibracji parametrów sterowania opisana w Rozdziale 4.1.4. nie zapewniła możliwości stabilnego lotu. Podtrzymując model w ręku można się przekonać o poprawnej implementacji logiki sterownika. Quadcopter reaguje w sposób oczekiwany na sygnały wejściowe nadawane przez aparaturę RC. Dla drążków ustawionych w położeniu neutralnym przy wychyleniu w dowolną stronę następuje oczekiwane przyspieszenie stosownych silników. Spodziewana reakcja modelu następuje również przy zmianie prędkości kątowej dla kąta skrętu.

Przy wadze i ciągu maksymalnym proporcja ciągu do masy wynosi . Przy prawidłowo dobranych parametrach regulacji zapewni to zadowalający czas lotu.

# Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie i wykonanie modelu latającego zdalnie sterowanego typu quadcotper. Sterownik lotu i zasadnicze części ramy zostały zaprojektowane przez autora. Dobrano niezbędne części: silniki, śmigła, regulatory obrotów, baterię, aparaturę i odbiornik RC.

W pracy zostały zawarte podstawowe informacje nt. przedmiotu pracy i przegląd przykładowych zastosowań autonomicznych i sterowanych quadcopterów. Po zapoznaniu się z literaturą naukową przedstawiono uproszczony model matematyczny mechaniki wybranego modelu latającego.

Po przeanalizowaniu istniejących rozwiązań zaprojektowano model 3D w oprogramowaniu Solidworks 2016. Zasadnicze elementy ramy zaprojektowano w sposób dokładny, co umożliwiło ich późniejsze wykonanie za pomocą druku 3D w technologii FDM. Resztę elementów w modelu 3D wykonano w sposób uproszczony z zachowaniem gabarytów i wymiarów podłączeniowych, co umożliwiło dopasowanie wszystkich części już na etapie projektu, bez późniejszych poprawek. Zlutowano również układ sterownika lotu na płytce prototypowej.

Po wykonaniu i połączeniu elementów fizycznych podjęto się implementacji sterownika realizującego wyszczególniony w pracy algorytm sterowania. Przy pierwszym podejściu zauważono błąd w przyjętym algorytmie sterowania, co usprawniono poprzez dołożenie wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego do algorytmu regulacji orientacji. W ten sposób zaimplementowano regulator kaskadowy.

Nie udało się dobrać parametrów regulacji zapewniających stabilny lot. Przyjęte metodą prób i błędów parametry pozwalają upewnić się co do poprawności implementacji logiki algorytmu regulacji. Quadcopter podtrzymywany dłonią reaguje w oczekiwany sposób na wychylenia.

Podstawowym kierunkiem rozwoju pracy może być budowa stanowiska testowego i wyznaczenie parametrów sterowania zapewniających stabilność. Następnie, model latający zbudowany w ramach niniejszej pracy posiada szerokie możliwości rozwoju. Ze względu na prostotę projektu i relatywnie niskie[[10]](#footnote-11) koszty produkcji, ramę można łatwo wzbogacić o nowe rozwiązania, takie jak np. uwzględnienie podłączenia uchwytu kamery. Rozwinąć można algorytm sterowania poprzez dodanie kolejnych sensorów, takich jak barometr i GPS. Jest również możliwość dodania nowych funkcjonalności, takich jak np. wykonanie lotu wg zadanego planu.

Zdalnie sterowane wielowirnikowce, w szczególności quadcoptery, dają bardzo rozległe możliwości ich wykorzystania. Ostatecznie się to sprowadza do kreatywności i potrzeb inżyniera projektanta. Rynek quadcopterów rozwija się bardzo intensywnie i regularnie wchodzi w nowe sektory. Z biegiem czasu będzie oddziaływać na coraz to nowe sfery życia współczesnego człowieka.

# Spis ilustracji

[Rys. 2.1: Dron EasyJet [2] 13](file:///C:\Users\Łukasz%20D\Documents\Praca%20Inżynierska\Praca_inzynierska.docx#_Toc471770236)

[Rys. 2.2 Mapa planu misji Precision Farming [7] 14](#_Toc471770237)

[Rys. 2.3: Możliwe kierunki uznane za przód modelu [17]. 14](#_Toc471770238)

[Rys. 2.4: Lokalny i globalny układ współrzędnych. 15](#_Toc471770239)

[Rys. 2.5: Schemat podstawowej konstrukcji. 20](file:///C:\Users\Łukasz%20D\Documents\Praca%20Inżynierska\Praca_inzynierska.docx#_Toc471770240)

[Rys. 3.1: Przyjęty układ współrzędnych i zaznaczone kierunki obrotu śmigieł. 25](#_Toc471770241)

[Rys. 3.2: Render zaprojektowanego modelu 3D. 27](#_Toc471770242)

[Rys. 3.3: Płytka górna ramy. 28](#_Toc471770243)

[Rys. 3.4: Płytka dolna ramy. 30](#_Toc471770244)

[Rys. 3.5: Płytka montażowa silnika. 31](#_Toc471770245)

[Rys. 3.6: Płytka montażowa IMU. 32](#_Toc471770246)

[Rys. 3.7: Nogi podwozia z zestawu DJI S500 [20]. 33](#_Toc471770247)

[Rys. 3.8: Obejma rury ϕ12 [21] 33](#_Toc471770248)

[Rys. 3.9: Rura z włókna węglowego [22], moneta dla skali 34](#_Toc471770249)

[Rys. 4.1: Schemat algorytmu sterowania. 36](#_Toc471770250)

[Rys. 4.2 Schemat stanowiska testowego do pomiaru ciągu silnika. 38](#_Toc471770251)

[Rys. 4.3: Charakterystyka F(u). 39](#_Toc471770252)

[Rys. 4.4: Stanowisko testowe pomiaru ciągu silnika. 40](#_Toc471770253)

[Rys. 4.5: Schemat blokowy regulacji - podejście 1. 40](#_Toc471770254)

[Rys. 4.6: Schemat blokowy regulacji - podejście 2. 42](#_Toc471770255)

[Rys. 4.7: Nieudana próba cięcia laserem. 45](#_Toc471770256)

[Rys. 4.8: Proces druku 3D. 46](#_Toc471770257)

[Rys. 4.9: Zbudowany model. 47](#_Toc471770258)

[Rys. 4.10: Zbudowany model. 47](#_Toc471770259)

[Rys. 4.11: Zbudowany model. 48](#_Toc471770260)

[Rys. 4.12: Sterownik lotu. 50](#_Toc471770261)

[Rys. 4.13: Sterownik lotu – tył. 50](#_Toc471770262)

[Rys. 5.1: Użytkowanie zaimplementowanego interfejsu kalibracji parametrów. 51](#_Toc471770263)

# Bibliografia

[1] Źródło internetowe: DJI is about to become the first billion dollar consumer drone company, <http://www.theverge.com/2015/3/12/8196413/dji-drone-funding-billion-dollar-sales>, dostęp: 2.01.2017

[2] Źródło internetowe: EasyJet turning to drones for aircraft inspections, http://www.computerworld.com/article/2931988/emerging-technology/easyjet-turning-to-drones-for-aircraft-inspections.html, dostęp: 2.01.2017

[3] Źródło internetowe: Search and Rescue Teams Aim to Save Lives with Off-the-Shelf Drones, http://makezine.com/2015/12/15/search-and-rescue-teams-aim-to-save-lives-off-the-shelf-drones/, dostęp: 2.01.2017

[4] Źródło internetowe: Drone solutions for security & surveillance, <http://www.airobotics.co.il/security-and-emergency-response/>, dostęp: 2.01.2017

[5] Źródło internetowe: Incredible drone footage shows world's largest lava lake inside active volcano, http://www.mirror.co.uk/news/world-news/incredible-drone-footage-shows-worlds-7447363, dostęp: 2.01.2017

[6] Źródło internetowe: How Microsoft's Mosquito-Catching Flying Drones Could Prevent Disease Outbreaks, http://www.techtimes.com/articles/59419/20150610/project-premonition-aims-use-mosquitoes-drones-cloud-computing-prevent-disease.htm, dostęp: 2.01.2017

[7] Źródło internetowe: How To Buy an Agriculture Drone: An In-Depth Buyer’s Guide, http://bestdroneforthejob.com/drone-buying-guides/agriculture-drone-buyers-guide/, dostęp: 2.01.2017

[8] Źródło internetowe: British teen wins $250,000 in world's biggest drone race, http://www.wired.co.uk/article/british-teenager-luke-bannister-wins-worlds-biggest-drone-race, dostęp: 2.01.2017

[9] T. Luukkonen, “Modelling and control of quadcopter”, School of Science, Mat-2.4108, Espoo, 22 sierpnia, 2011

[10] A. Gibiansky, “Quadcopter Dynamics, Simulation, and Control”, źródło internetowe, <http://andrew.gibiansky.com/downloads/pdf/Quadcopter%20Dynamics,%20Simulation,%20and%20Control.pdf>, dostęp: 18.12.2016

[11] M Thomas, et al., “Design and analysis of a quadcopter using CATIA”, International Journal of Scientific & Engineering Research, t. 7, wyd. 3, str. 143, 2016

[12] I. Manarvi, et al., “Design and Development of a Quad Copter (UMAASK) Using CAD/CAM/CAE” 2013, Department of Mechanical Engineering, HITEC University, Taxila Education City, Taxila, Pakistan, 2013

[13] A. Bondyra, et al., “A distributed control system for multirotor aerial platforms”, Measurement Automation Monitoring, t. 61, nr 07, str. 343-345, 2015

[14] S Jeremia, E. Kuantama, J. Pangaribuan, “Design and Construction of Remote-Controlled Quad-copter Based on STC12C5624AD”, International Conference on System Engineering and Technology, Indonesia, 2012

[15] Film: Laser Cutting G10-FR4 Garolite, https://www.youtube.com/watch?v=BtsL2brMVlA, dostęp: 2.01.2017

[16] E Carelli, et al., “3D-Printed ABS and PLA Scaffolds for Cartilage and Nucleus Pulposus Tissue Regeneration”, International Journal of Molecular Sciences, str. 15122, ISSN 1422-0067, 2015

[17] Grafika: Konfiguracje orientacji quadcoptera, <http://ardupilot.org/copter/_images/MOTORS_QuadX_QuadPlus.jpg>, dostęp: 2.01.2017

[18] Źródło internetowe: How to choose motor and propeller for quadcopter, <https://oscarliang.com/quadcopter-motor-propeller/>, dostęp 22.12.2016

[19] Źródło internetowe: Carbon Fibre Props vs plastic propeller, https://oscarliang.com/carbon-fibre-props-plastic-propeller/, dostęp 22.12.2016

20] Sklep modelarski ABC-RC, <http://abc-rc.pl/quadcopter-s500-pcb>, dostęp: 18.12.2016

[21] Sklep modelarski Pitlab, http://www.pitlab.pl/pitlabsklep/akcesoria-dla-wielowirnikowcow/, dostęp 18.12.2016

[22] Sklep Carbon-CNC, http://www.carbon-cnc.eu/pl/rurki-matowe/11-12x10x1000-splot-ukosny-matowa.html, dostęp 18.12.2016

[23] Sklep modelarski Avifly, https://avifly.pl/pl/regulatory-obrotow-esc/regulator-esc-blheli-emax-12a-fastpwm-multicopter, dostęp 18.12.2016

[24] Ruch drgający, prof. zw. AGH dr hab. Inż. Krzysztof Wierzbanowski <http://www.ftj.agh.edu.pl/~wierzbanowski/R_Harm(7).pdf>, dostęp 18.12.2016

[25] G. Szafranski, R. Czyba, „Different Approaches of PID Control UAV Type Quadrotor”, Proceedings of the International Micro Air Vehicles conference 2011 summer edition, Gliwice, Polska, 2011

# Załączniki

Repozytorium zawierające napisaną implementację sterownika lotu:

https://github.com/lucas93/quadcopter-agh

1. Oxford English Dictionary definiuje rzeczownik „drone” jako „bezzałogowa, zdalnie sterowana maszyna latająca lub pocisk”. Wg tej definicji zarówno prosty model zdalnie sterowany, jak i bezzałogowy samolot wojskowy można nazwać dronem. [↑](#footnote-ref-1)
2. Unmanned Aerial Vehicle – ang. bezzałogowy pojazd latający. [↑](#footnote-ref-2)
3. (ang. Digital Motion Processing) Układ MPU9250 ma możliwość samodzielnego wykonywania obliczeń aktualnej orientacji, bez potrzeby obciążania tym zadaniem sterownika lotu. [↑](#footnote-ref-3)
4. Jest to zależne od częstotliwości odświeżania modułu MPU9250. Przy DMP wynosi ona 200 Hz. [↑](#footnote-ref-4)
5. Moduł radiowy HK-T6A wystawia na piny sygnał wg modulacji położenia impulsu (PPM). Położenie impulsu jest proporcjonalne do wartości sygnału nadawanego przez aparaturę. Położenie impulsów jest obliczane dzięki zastosowaniu timerów wyzwalanych przerwaniami. [↑](#footnote-ref-5)
6. Zasugerowano się filmem znalezionym w sieci prezentującym cięcie tego materiału [15]. [↑](#footnote-ref-6)
7. Na zdjęciu widoczne są również elementy składające się na silikonowy amortyzator IMU, który ostatecznie nie został wykorzystany, co zostało opisane w Rozdziale 3.1.3. [↑](#footnote-ref-7)
8. Wymiary przedstawione w Rozdziale 3.1. [↑](#footnote-ref-8)
9. Z doświadczenia widać, że pomimo tego zabiegu istnieje prawdopodobieństwo rzędu kilku procent, że inicjalizacja komunikacji z modułem MPU9250 się nie powiedzie. Nie jest znany powód takiego zachowania. W wypadku niepowodzenia wystarczy uruchomić układ ponownie. [↑](#footnote-ref-9)
10. Koszt druku 3D ramy wyniósł około 50 zł. [↑](#footnote-ref-11)