

# **QUADROCOPTER**

(sterowanie, stabilizacja)

*Projekt przejściowy 2014/15  
specjalności Robotyka  
na Wydziale Elektroniki*

Politechnika Wrocławska 2015

## Autorzy

*Marcin Ciopcia*

*Michał Drwięga*

*Daniel Gut*

*Alicja Jurasiak*

*Kacper Nowosad*

*Piotr Semberecki*

*Hanna Sienkiewicz*

*Mateusz Stachowski*

*Paweł Urbaniak*

*Krzysztof Zawada*

Skład raportu wykonano w systemie L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X



Praca udostępniana na licencji Creative Commons: *Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Na tych samych warunkach 3.0*, Wrocław 2015. Pewne prawa zastrzeżone na rzecz Autorów. Zezwala się na niekomercyjne wykorzystanie treści pod warunkiem wskazania Autorów jako właścicieli praw do tekstu oraz zachowania niniejszej informacji licencyjnej tak dugo, jak tylko na utwory zależne będzie udzielana taka sama licencja. Tekst licencji dostępny na stronie: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/pl/>

# Spis treści

<b>1. Wstęp . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Quadrocopter . . . . .	5
1.2. Cel pracy . . . . .	6
<b>I. Sprzęt</b>	
<b>2. Ahsoka . . . . .</b>	<b>8</b>
2.0.1. Wybór środowiska pracy . . . . .	8
2.0.2. Środowisko maszyny wirtualnej . . . . .	8
2.0.3. Środowisko uruchomieniowe - Nano 6060 . . . . .	8
2.0.4. Pixhawk . . . . .	10
2.0.5. Administracja maszyną . . . . .	11
2.0.6. Paczka mavros . . . . .	12
2.0.7. Schemat komunikacji w systemie ROS . . . . .	12
<b>3. Uruchomienie platformy latającej . . . . .</b>	<b>13</b>
3.0.8. Używanie środowiska mavros . . . . .	13
3.0.9. Uruchamianie połączenia z Pixhawkiem . . . . .	13
3.0.10. Uzbrajanie silników . . . . .	13
3.0.11. Tryb sterowania nadzawanego . . . . .	14
3.0.12. Sterownik ahsoka_control . . . . .	14
<b>4. Uruchomienie kamery 3D . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>5. Uruchomienie komunikacji . . . . .</b>	<b>18</b>
5.1. Komunikacja ROS—kamera . . . . .	18
5.2. Komunikacja ROS—MAVLINK . . . . .	19
5.3. Komunikacja ROS—GroundStation . . . . .	19
5.4. Komunikacja ROS—czujniki . . . . .	20
5.5. Komunikacja MAVLINK—PixHawk . . . . .	21
<b>6. Czujniki odległości . . . . .</b>	<b>22</b>
6.1. Dobór czujników odległości . . . . .	22
6.1.1. Specyfikacja potrzeb . . . . .	22
6.1.2. Dostępne rozwiązania . . . . .	23
6.1.3. Dobór czujników . . . . .	23
6.2. Rozmieszczenie czujników odległości . . . . .	25
6.2.1. Przegląd rozwiązań . . . . .	25
6.2.2. Propozycja rozmieszczenia . . . . .	26
6.3. Płytki PCB . . . . .	27
6.3.1. Specyfikacja potrzeb . . . . .	27
6.3.2. Wykonanie i uruchomienie płytki PCB . . . . .	27
6.4. Oprogramowanie interfejsu . . . . .	29
6.4.1. Dekodowanie sygnału PPM, Michał . . . . .	32
6.4.2. Komunikacja ROS-czujniki . . . . .	33
6.5. Montaż czujników na platformie docelowej . . . . .	33

**II. Zadania**

<b>7. Rozpoznanie dostępnych rozwiązań</b>	37
7.1. Interfejs do istniejącego oprogramowania i sprzętu	37
7.1.1. Rozpoznanie protokołu quadrocoptera	37
7.1.2. Rozpoznanie możliwości platformy	38
7.2. Zdalne debagowanie	39
7.2.1. Dostępne rozwiązania	39
7.2.2. Link radiowy	41
7.2.3. Przegląd rozwiązań FPV	42
<b>8. Stabilizacja w punkcie</b>	46
8.1. Algorytmy rozpoznawania przesunięcia	46
8.1.1. Algorytm Lucas—Kanade	46
8.1.2. Zmodyfikowany PTAM	47
8.1.3. Algorytm SVO	49
8.2. Implementacja algorytmów przesunięcia	50
8.2.1. Algorytm Lucas—Kanade	51
8.2.2. Zmodyfikowany PTAM	51
8.2.3. Algorytm SVO	54
8.3. Stabilizacja w poziomie	55
8.3.1. Fuzja sensoryczna	55
8.4. Stabilizacja w pionie	58
8.4.1. Fuzja sensoryczna	58
<b>9. Stabilizacja w pomieszczeniu</b>	61
9.1. Sterownik nadrzędny	61
9.1.1. Zdarzeniowy sterownik antykolizyjny	61
9.1.2. Lot wzduż ściany	61
<b>10. Zadania dodatkowe</b>	64
10.1. Center Plate	64
<b>11. Podsumowanie</b>	66
<b>Bibliografia</b>	67

# 1. Wstęp

Projekt zrealizowano w ramach przedmiotu „Projekt przejściowy” na studiach magisterskich na kierunku Automatyka i Robotyka, specjalność Robotyka.

Tematyka projektu dotyczyła zagadnień autonomii bezzałogowego obiektu latającego (ang. *Unmanned Aerial Vehicle - UAV*), powszechnie nazywanego dronem. Urządzenie miało postać modelu helikoptera z czterema wirnikami (quadrocoptera). W ramach zajęć zostało poruszonych szereg zagadnień związanych z konstrukcją elektroniki oraz stworzeniem oprogramowania umożliwiającego zrealizowanie sterowania obiektem, stabilizację jego położenia oraz stworzenie autopilota.

Zadania zostały podzielone na problem stabilizacji położenia obiektu w punkcie oraz stabilizację w pomieszczeniu. Następnie przetestowano zaimplementowane algorytmy. Testowana platforma została oparta o sterownik PixHawk, który zawierał jednostkę inercyjną IMU (ang. *inertial measurement unit*), wejście dla odbiornika radiowego oraz sterowniki do silników. Jednostka inercyjna zawierała żyroskop, akcelerometr i magnetometr. Oprócz sterownika, quadrocopter posiadał także komputer typu embedded oparty o platformę Atom, który dokonywał wszelkich niezbędnych obliczeń na podstawie pomiarów z czujników i obrazu z kamer. Komputer ten był platformą docelową, na której zaimplementowano algorytmy sterowania oparte o system ROS.

## 1.1. Quadrocopter

**Quadrocopter** (zwany także quadrotorem) jest to rodzaj wielosilnikowego helikoptera, napędzany czterema wirnikami.

W przeciwieństwie do większości helikopterów, quadrocoptery używają dwóch zestawów śmigieł: dwa o ruch wskazówek zegara (CW) i dwa o ruchu przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (CCW). Różnice momentu obrotowego pozwalają na stabilizację pojazdu podczas lotu jak i zmianę kierunku jego lotu.

W historii lotnictwa projekt quadrocopterów postrzegany był jako możliwość rozwiązania niektórych uporczywych problemów w locie pionowym: problemów sterowania momentem obrotowym wirnika głównego i wydajności wirnika ogonowego. Udane załogowe prototypy powstały w latach 20-tych i 30-tych XX-wieku. Jednak wczesne prototypy jak i późniejsze projekty cierpiały na niską wydajność i wymagały ogromnego doświadczenia i nakładu pracy od pilotów.

W ostatnim czasie bardzo dużą popularność zyskały jednak projekty quadrocopterów bezzałogowych, dzięki wykorzystaniu elektronicznych układów sterowania oraz elektronicznych czujników do stabilizacji pojazdu. Ich przewagą nad innymi pojazdami latającymi to przedewszystkim: małe wymiary, brak mechanicznych połączeń potrzebnych do zmiany kąta łopat, uproszczona konstrukcja, duża stabilizacja w powietrzu. Dodatkowo zastosowanie czterech śmigieł powoduje zmniejszenie ich średnicy, przez co wykazują mniejszą energię kinetyczną podczas lotu. Sprawia to że pojazdy te są bezpieczniejsze dla ścisłej interakcji gdyż szkody wyrządzone przez wirniki powinny być mniejsze.



Rysunek 1.1: Quadrocopter SKN JEDI udostępniony do projektu

## 1.2. Cel pracy

Główym celem pracy jest przygotowanie quadrocoptera do startu w zawodach IMAV 2015 (ang. International Micro Air Vehicles). Aby to umożliwić należało zrealizować zadania programowe, sprzętowe jak i wdrożyć się w tematykę robotów mobilnych - quadrocopterów. Stabilizacja w punkcie, stabilizacja w pomieszczeniu, lot wzdłuż ściany są głównymi zadaniami, ich osiągnięcie zależy od wykonania mniejszych zadań. Cele postawione do zrealizowania stabilizacji w punkcie to zaimplementowanie sterownika głównego w tym algorytm stabilizacji w pionie jaki i w poziomie, rozpoznawanie przesunięcia za pomocą systemów wizyjnych oraz czujników odległości, uruchomienie komunikacji ze sterownikiem quadrocoptera, uruchomienie kamery 3D oraz infrastruktury FPV, zaprojektowanie, wytworzenie oraz oprogramowanie płytki PCB, integracja wszystkich modułów z istniejącymi już rozwiązaniami na płycie głównej quadrocoptera. Następnym celem jest stabilizacja w pomieszczeniu oraz lot wzdłuż ściany. Do spełnienia tego zadania wyróżniono zaprojektowanie i zaimplementowanie sterownika nadzawanego w tym zdarzeniowego sterownika antykolizyjnego. Do celów należy również przetestowanie wszystkiego co zostało wytwarzone podczas trwania projektu.

Część I

Sprzęt

## **2. Ahsoka**

### **2.0.1. Wybór środowiska pracy**

Do realizacji sterowania wielowirnikowcem wymagane jest środowisko, które spełnia szereg wymagań, m. in.:

1. Jest niezawodne.
2. Nie wymaga zbyt dużych zasobów sprzętowych.
3. Jest łatwe w konfiguracji.
4. Zapewnia wsparcie narzędziom wykorzystywanym w projekcie.

Dlatego też zdecydowano, aby projekt był realizowany przy użyciu środowiska Linux. Ponieważ najpopularniejszą dystrybucją jest w tej chwili Ubuntu Server, co implikuje dużą ilość dobrze napisanej dokumentacji/poradników, dobre wsparcie techniczne, bogactwo uruchomionych i gruntownie przetestowanych narzędzi - wybór ten okazał się najlepszą z rozpatrywanych opcji.

Pomimo początkowej chęci pracy na aktualnym wydaniu LTS, tzn 14.04.1, o wiele lepszą alternatywą okazała się wersja 12.04.5 LTS - ze względu na fakt, iż ROS Hydro, dedykowany na tę platformę zawiera więcej przydatnych modułów, które w wypadku użycia nowszej wersji, wymagałyby portowania.

Do realizacji projektu wykorzystano Ubuntu 12.04.5 wraz z ROS Hydro. Ze względu na problem z cyfrowym podpisem paczek dla polskiego repozytorium, użyto wersji angielskiej.

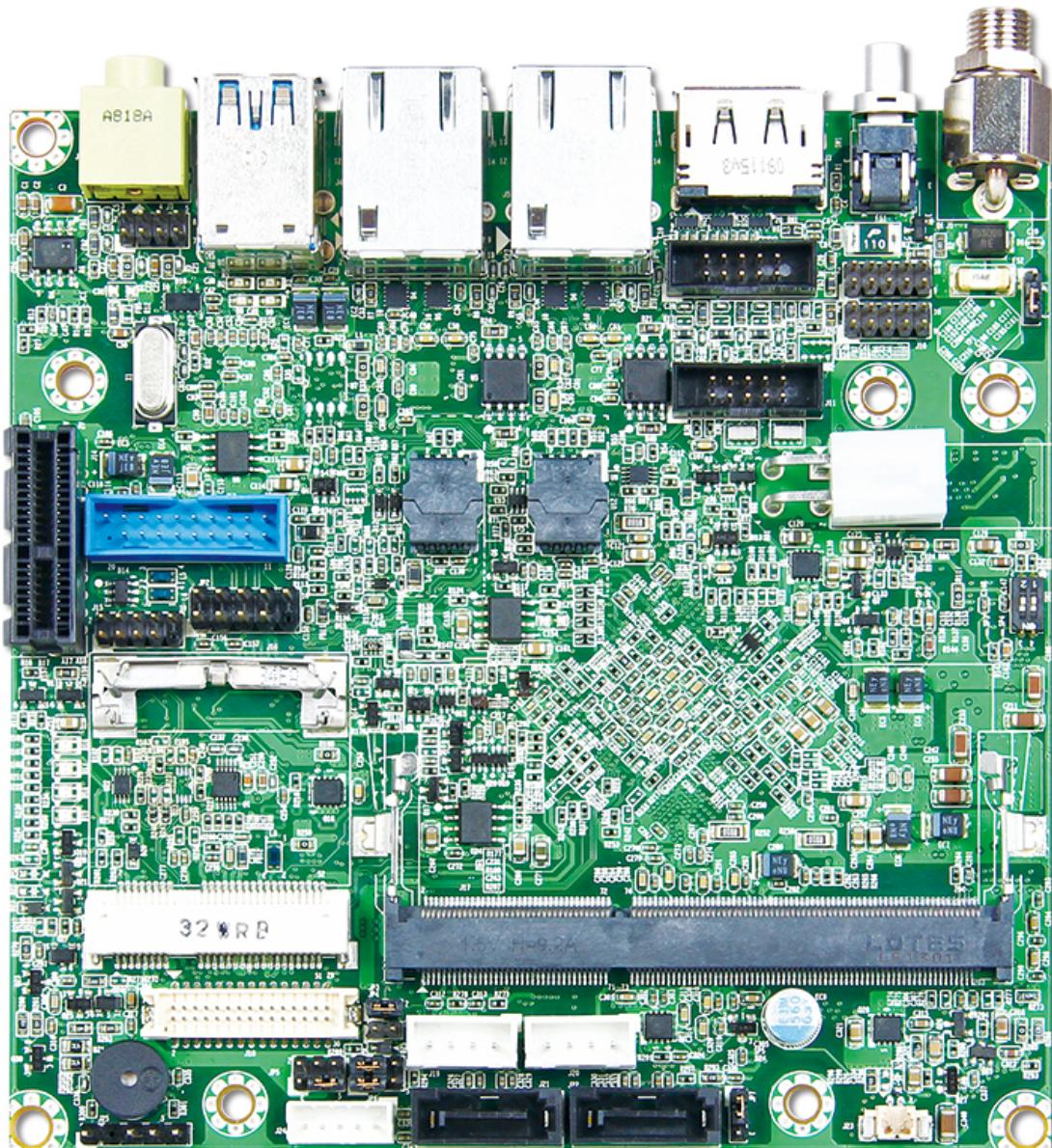
### **2.0.2. Środowisko maszyny wirtualnej**

Do celów zapoznania się z środowiskiem ROS stworzono, przy użyciu oprogramowania Virtualbox, środowisko typu sandbox. We wczesnych etapach projektów służyło ono do bezpiecznego eksperymentowania ze środowiskiem. Dzięki faktowi, iż była to maszyna wirtualna - przeinstalowanie całego systemu było banalną operacją. Ponadto na maszynie wirtualnej każdy z użytkowników miał prawa administratora, przez co mógł testować oprogramowanie przed docelową instalacją na platformie latającej.

### **2.0.3. Środowisko uruchomieniowe - Nano 6060**

Jako platformę docelową wybrano komputer x86 typu Small-Form-Factor. Ze względu na mierną, w dniu dzisiejszym, kompatybilność systemu ROS z platformą ARM - po rozpoznaniu możliwości, zarzucono ten pomysł.

Wybór padł na produkt firmy Portwell, komputer Nano 6060 [2.1]. Jest to zwarta, kompaktowa konstrukcja (format mini-ITX), przez co nadaje się do montażu na obiektach latających.



Rysunek 2.1: Fotografia użytego komputera pokładowego - Nano 6060



Rysunek 2.2: Fotografia użytego kontrolera lotu - Pixhawk

Kluczowe parametry zastosowanego komputera:

1. Procesor Intel Atom E3845 - 4x 1.91 GHz
  2. 4 Gb pamięci RAM DDR3 .
  3. Dysk SSD.
  4. Złącze mini-PCIe - posłużyło do montażu karty sieciowej Atheros AR9285
  5. Zasilanie 12V
- Komputer jest zasilany z baterii robota za pomocą przetwornicy step-down.

#### 2.0.4. Pixhawk

Jako kontroler lotu użyto komputera pokładowego Pixhawk [2.2]. Dzięki obsłudze protokołu mavlink oraz zaimplementowanym procedurom do sterownika nadzawanego stanowił on rozsądny wybór.

Kontroler jest podpięty do komputera pokładowego za pomocą złącza USB - co pozwala na administrowanie systemem Pixhawk, oraz poprzez przejściówkę UART - USB - służącą do czytania danych telemetrycznych.

Do kontrolera podpięty jest także GPS oraz system kontroli stanu zasilania.

### 2.0.5. Administracja maszyną

#### Wymagane oprogramowanie

Aby uruchomić projekt, oprócz zainstalowania systemu, należy zainstalować następujące paczki:

- build-essential
- git
- guvcview
- h264enc
- hostapd
- isc-dhcp-server
- libcanberra-gtk-module
- libgtk2.0-dev
- liblapack-dev
- openssh-blacklist
- openssh-blacklist-extra
- openssl-blacklist
- openssl-blacklist-extra
- python-dev
- python-pip
- python-rosdep
- python-rosinstall
- python-software-properties
- ros-hydro-camera-calibration
- ros-hydro-cmake-modules
- ros-hydro-desktop-full
- ros-hydro-gscam
- ros-hydro-mavlink
- ros-hydro-mavros
- ros-hydro-mavros-extras
- ros-hydro-usb-cam
- screen
- wireless-tools
- wpasupplicant

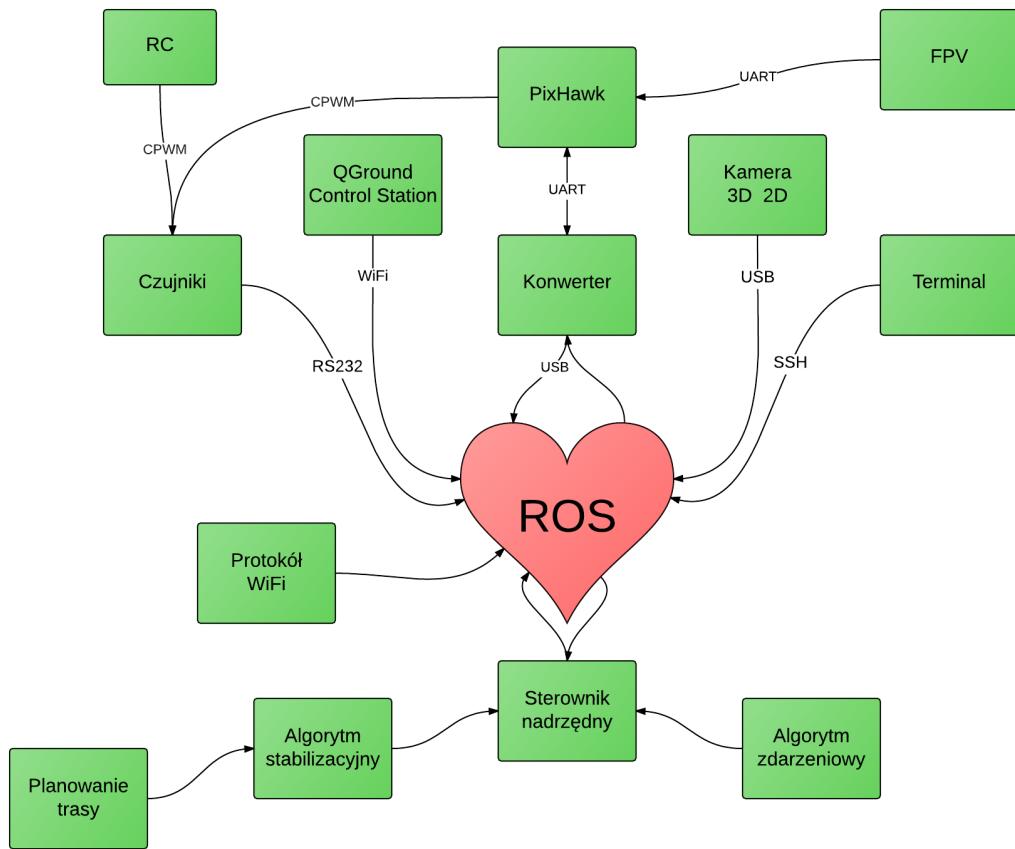
#### Uprawnienia użytkownika

Aby usprawnić pracę nad projektem zwykli użytkownicy dzieliły konto użytkownika *start*. Ma on uprawnienia jedynie do modyfikowania workspace'a programu catkin oraz pełni dostęp do wymaganych peryferiów, gdyż należy do grup: *dialout* oraz *video*. Oprócz tego na maszynie istnieje konto administratora - *tano*.

#### Lokalna sieć Wi-Fi

Przy użyciu narzędzia *hostapd* oraz *isc-dhcp-server* jako serwer DHCP utworzono tzw. software access point, dzięki czemu można połączyć się bezpośrednio do robota za pomocą sieci Wi-Fi. Sieć nadaje w standardzie 802.11g i częstotliwości 2.4 GHz. Połączenie szyfrowane jest w standardzie WPA2-PSK.

Plik konfiguracji znajduje się w */etc/hostapd/hostapd.conf*



Rysunek 2.3: Fotografia użytego komputera pokładowego - Nano 6060

#### 2.0.6. Paczka mavros

Do obsługi komunikacji pomiędzy Piawakiem a systemem ROS wykorzystano moduł *mavros*. Uruchamia ona topic `/mavros/` oraz zapewnia łącze dla programu QGroundControl za pomocą protokołu UDP. Dzięki tej ostatniej funkcjonalności możliwe jest zarządzanie robotem za pomocą WiFi, bądź ethernet.

#### 2.0.7. Schemat komunikacji w systemie ROS

Na rys. 2.3 zaprezentowano schemat blokowy podzespołów robota Ahsoka.

### 3. Uruchomienie platformy latającej

#### 3.0.8. Używanie środowiska mavros

Środowisko *mavros* wspera 2 główne mechanizmy komunikacji z sterownikiem lotu:

- Podprogramy uruchamiane z poziomu środowiska konsoli
- ROS Topics

Pierwszy z nich pozwala na zmianę ustawień platformy oraz wysyłanie poleceń.

Drugi z kolei służy stricte do akwizycji danych i sterowania platformą.

#### 3.0.9. Uruchamianie połączenia z Pixhawkiem

Aby uruchomić ROSa oraz zainicjować jego połączenie z sterownikiem lotu *Pixhawk* należy wykonać polecenie:

*roslaunch mavros PX4.launch*

Polecenie to składa się z 3 części:

- roslaunch - służy do uruchomienia środowiska ROS (*roscore*) wraz z modułem oraz plikiem *".launch"*
- mavros - nazwa uruchamianej paczki
- PX4.launch - nazwa pliku konfiguracyjnego, znajdującego się w katalogu paczki w folderze launch: (w tym wypadku *roscore mavros/launch*)

W wymienionym powyżej pliku *PX4.launch* znajduje się także konfiguracja połączenia TCP dla QGroundControlStation. Należy ustawić parametr dot. portu dla QGCS w następujący sposób:

*<arg name="gcs\_url" default="tcp-l://>*

Poprawnie uruchomiony moduł powinien wyświetlić informacje o posiadaniu(lub braku) fixa GPS.

Poprawnie wykonana procedura utworzy wątki komunikacyjne dla ROS oraz umożliwi wykonywanie poniższych poleceń *mavros*.

#### 3.0.10. Uzbrajanie silników

Do zarządzania uzbrajaniem silników służą polecenia: *rosrun mavros mavsafety arm* oraz *rosrun mavros mavsafety disarm*

Ten typ poleceń składa się z 4 części:

- rosrun - uruchom podprogram z paczki
- mavros - nazwa paczki
- mavsafety - nazwa podprogramu
- arm/disarm - parametr

Wykonuje się je za pomocą linii poleceń BASH lub kodu C++ za pomocą funkcji *system()* dostarczanej przez system Linux.

### 3.0.11. Tryb sterowania nadzecznego

Aby kontroler lotu przyjmował polecenia od sterownika nadzecznego(modułu ROS), należy ustawić tryb lotu na *OFFBOARD*.

Dokonuje się tego za pomocą polecenia: *rosrun mavros mavcmd guided -e*. Aby polecenie wykonało się poprawnie, silniki muszą być uzbrojone, a do topców odpowiedzialnych za sterowanie musi dotrzeć choć jedna poprawna ramka sterowania.

Tryb *OFFBOARD* wyłączamy w analogiczny sposób, zamieniając parametr "-e" na "-d".

### 3.0.12. Sterownik ahsoka\_control

Moduł *ahsoka\_control* implementuje funkcje sterowania robotem. Zawiera ona instancję klasy *PX\_data*, która implementuje odczyt orientacji (*/mavros/imu/data*), stanu (*/mavros/state*) oraz sterowanie robotem poprzez powyzsze polecenia oraz topic'i ROS: */mavros/setpoint/local\_position* i */mavros/setpoint/accel*.

Klasa implementuje metody *Set\_yaw(rad)* i *Set\_force(x,y,z)* służące do sterowania robotem. Komendy te powinno stosować się w wymienionej powyżej kolejności, a jako argumenty przyjmują liczby typu *double*. Konstruktor klasy przyjmuje charakterystyczny dla danego modułu obiekt klasy *ros::NodeHandle*.

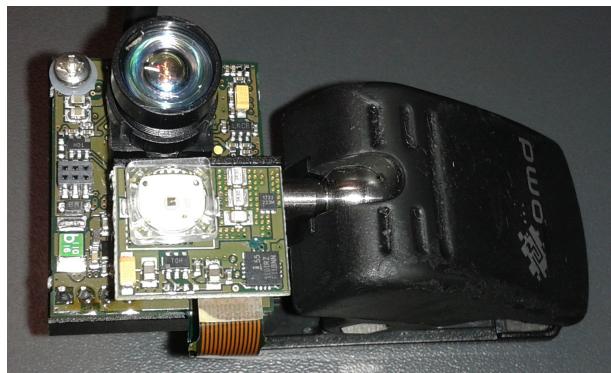
W danym module przewidziano implementację sterowników nadzecznich. Należy stworzyć klasy im opowiadające, uaktualnić plik *CMakeLists.txt* oraz *package.xml*, podłączyć je do interfejsów sterowania instancji klasy *PX\_data* w pliku *ahsoka\_control.cpp* a następnie zbudować moduły poleceniem *catkin\_make*.

Moduł uruchamiamy za pomocą polecenia *roslaunch ahsoka\_control PID.launch*. Plik *PID.launch* zawiera nastawy nadzecznich regulatorów i znajduje się w folderze *rosed ahsoka\_control/launch*.

## 4. Uruchomienie kamery 3D

Quadrocopter wyposażony jest między innymi w kamerę 3D TOF **PMD CamBoard nano**, która została przedstawiona na rysunku ???. Kamera ta wykorzystuje sensor *PMD PhotonICs 19k-S3*, a jej podstawowe parametry są następujące:

**rozdzielcość obrazu** 160x120 pikseli,  
**częstotliwość odświeżania obrazu** do 90 Hz,  
**kąty widzenia** 90° na 68°,  
**wymiary** 37 x 30 x 25 mm,  
**długość fali światła** 850nm,  
**pobór prądu** około 500mA.

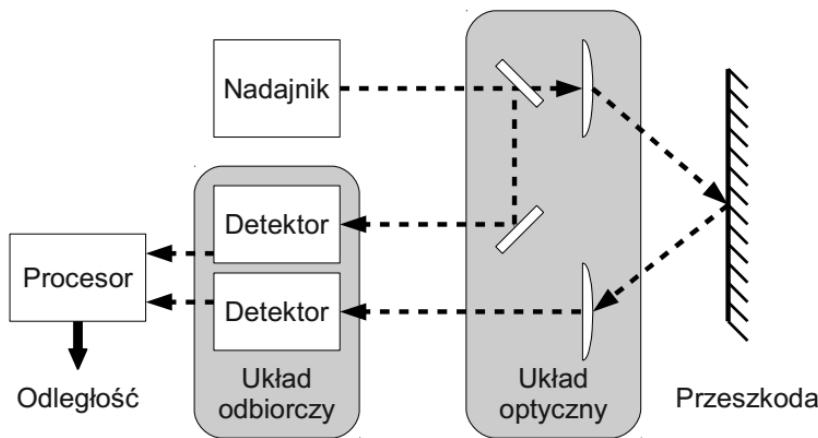


Rysunek 4.1: Wykorzystywana kamera 3D PMD CamBoard nano

Przedstawiona kamera wykorzystuje metodę pomiaru określana mianem *TOF (Time Of Flight)*, czyli mierzenia czasu przelotu impulsu. Budowa takiej kamery w postaci blokowej została przedstawiona na rysunku 4.2. Odnośnie zasad działania, układ nadajnika generuje odpowiednie impulsy światła, które po przejściu przez układ optyczny kierowane są w stronę przeszkody. Impulsy po odbiciu się od przeszkody wracają do układu odbiorczego, który z użyciem specjalizowanego procesora mierzy czas w jakim impuls powrócił. Na tej podstawie, znając prędkość przelotu, obliczana jest odległość do przeszkody. Układy mierzące czas są zwykle bardzo dokładne, z tego względu, że w celu uzyskania rozdzielcości rzędu milimetrów pomiar czasu należy wykonywać z dokładnością do pojedynczych pikosekund. Inną metodą pomiaru jest metoda pośrednia polegająca na mierzeniu przesunięcia fazowego fali odbieranej względem nadawanej.

### Portowanie pakietu *pmd\_camboard\_nano*

W celu zapewnienia dostępu do obrazów kamery 3D z poziomu środowiska *ROS*, które umożliwia integrację tworzonego w ramach projektu oprogramowania zdecydowano się na przeniesienie pakietu *pmd\_camboard\_nano* obsługującego kamerę *PMD Camboard nano*, autorstwa Sergey'a Alexandrov'a do nowszej wersji *ROS Hydro* z wersji *Fuerte*.



Rysunek 4.2: Budowa i zasada działania kamery TOF

Przeniesienie pakietu do ROS'a w wersji Hydro wymagało między innymi zmiany rozwiązania odnośnie budowania paczek. Opis zawartości paczek w przypadku różnych systemów budowania przedstawiono w [2]. W poprzedniej wersji pakietu *pmd\_cambord\_nano* używano *rosbuild* [?], natomiast w nowszej wersji wykorzystano środowisko *catkin* oparte na wieloplatformowym systemie budowania pakietów *cmake*. Odnośnie systemu *cmake*, jego zaletą jest to, że jest niezależny od platformy i kompilatora. W zasadzie nie kompliuje on programów samodzielnie, ale wykorzystuje do tego reguły budowania pakietów specyficzne dla danej platformy. Przykładowo dla systemu linux, są to pliki *Makefile*. Warto zaznaczyć, że rozwiązanie z *rosbuild* wykorzystywane było we wcześniejszych wersjach ROS'a, natomiast w nowszych odchodzi się od jego użycia na rzecz środowiska *catkin*. Proces migracji do nowszego systemu opisany został na stronie [3].

Dodatkowo, zdecydowano się na usunięcie z zależności pakietu *dynamic\_reconfigure* odpowiadającego za dynamiczną zmianę parametrów pakietu, ze względu na problemy z jego uruchomieniem oraz w celu ujednolicenia sposobu konfiguracji całości oprogramowania, za pomocą plików *launch*. W obecnej wersji pełną konfigurację można przeprowadzić z użyciem odpowiedniego pliku *launch*, w którym opisane zostały parametry.

Kolejnym rozwiązaniem, które uległo zmianie jest sposób dostarczania sterowników kamery. W bieżącej wersji są one umieszczane bezpośrednio w katalogu *pmd\_driver* pakietu *pmd\_cambord\_nano*. Wykorzystane zostały sterowniki w wersji 1.3.2.

### Wybrane topiki publikowane przez pakiet *pmd\_cambord\_nano*

- obraz w odcieniach szarości (*/camera/amplitude/image*),
- informacje o kamerze i generowanym obrazie (*/camera/amplitude/camera\_info*),
- odległości od środka optycznego sensora (*~distance/image*),
- obraz głębokości w mm (*/camera/depth/image*),
- informacje o kamerze i mapie głębokości (*/camera/depth/camera\_info*),
- chmura punktów (*~points\_unrectified*),

### Uruchomienie pakietu i weryfikacja poprawności działania

- `source devel/setup.bash` - załadowanie zmiennych środowiskowych workspace'a,
- `roslaunch pmd_cambord_nano pmd_cambord_nano.launch` - uruchomienie pakietu, z wykorzystaniem oprogramowania rosLaunch, czyli plików uruchomieniowych,

- `rosrun image_view image_view image:=/camera/depth/image`
  - wyświetlenie obrazu głębi. Dwukrotne wystąpienie `image_view` związane jest z organizacją pakietów w ROS'ie, co znaczy tyle, że pierwszy parametr określa metapaczkę, natomiast drugi paczkę, która zawiera się w wymienionej wcześniej metapaczce. W przypadku, gdy pakiet nie należy do żadnej metapaczki, podaje się jego nazwę dwukrotnie.
- `rosrun image_view image_view image:=/camera/amplitude/image`
  - wyświetlenie obrazu w odcieniach szarości.

## 5. Uruchomienie komunikacji

Komunikacja ze sterownikiem quadrocoptera odbywa się z wykorzystaniem protokołu **MAVLink**, który został zaprojektowany do wymiany informacji między podsystemami robota oraz do komunikacji ze stacją kontroli (**GCS**). Specyfikację protokołu można znaleźć pod następującym odnośnikiem [1].

Dla dwóch wersji ROS'a: hydro i indigo został zaimplementowany protokół MAVLink, w postaci pakietu **mavros**. Pakiet ten umożliwia z poziomu ROS'a dostęp do parametrów sterownika, oraz pozwala wysyłać do niego komendy sterujące. Ponadto, przewidziane zostały w nim funkcjonalności pozwalające na dodawanie własnych wtyczek (pluginów). Dokładny opis jest dostępny pod następującym odnośnikiem [7]. Poniżej wymienione zostały wybrane funkcjonalności pakietu **mavros** w przypadku załadowania domyślnego zestawu pluginów. Przedstawione topiki publikowane i subskrybowane są przez pakiet **mavros**.

- Publikowanie topików zawierających dane z IMU (plugin **imu\_pub**), między innymi:
  - orientacja obliczona przez sterownik ( $\sim imu/data$ ),
  - wartości zmierzane przez IMU ( $\sim imu/data\_raw$ ),
  - odczyty magnetometru ( $\sim imu/mag$ ),
  - temperatura ( $\sim imu/temperature$ ),
  - ciśnienie powietrza ( $\sim imu/FluidPressure$ ).
- Subskrybowanie topików z komendami lotu:
  - zadane prędkości ( $\sim setpoint/cmd\_vel$ ),
  - zadane przyspieszenia ( $\sim setpoint/accel$ ),
  - zadane prędkości kątowe ( $\sim setpoint/att\_vel$ ),
  - zadana poza ( $\sim setpoint/attitude$ ).

Warto również wspomnieć o dwóch podobnych pakietach: **roscopter** i **mavlink\_ros**. Pierwszy z nich przeznaczony jest dla firmware'u **Arducopter** oraz występuje dla ROS'a w wersjach: groovy i hydro. Jego funkcjonalności są także ograniczone w porównaniu do pakietu **mavros**. Natomiast drugi pakiet, **mavlink\_ros** jest przestarzały, a twórcy zalecają zastąpienie go pakietem **mavros**.

### 5.1. Komunikacja ROS—kamera

Moduł ROS zawiera wiele ciekawych i przydatnych w sterowaniu robotami funkcji. Pierwszym zadaniem po zainstalowaniu pakietu ROS, było uruchomienie kamery internetowej 2 – D, wykorzystując wbudowane funkcje. W tym celu ROS wykorzystuje pakiet Gstream, którego konfiguracja jest opisana poniżej.

1. Przygotowanie repozytorium  
*sudoapt – getinstallubuntu – restricted – extras*

2. Instalacja pakietu GStream (w naszym przypadku manualnie, ponieważ z automatem zdarzają się problemy)
 

```
sudo apt-get install gstreamer-dbus-media-service gstreamer-tools gstreamer0.10-alsa gstreamer0.10-buzztard
gstreamer0.10-buzztard-doc gstreamer0.10-crystalhd gstreamer0.10-doc
gstreamer0.10-ffmpeg gstreamer0.10-ffmpeg-dbg
gstreamer0.10-fluendo mp3 gstreamer0.10-gconf gstreamer0.10-gnomevfs
gstreamer0.10-gnonling gstreamer0.10-gnonlin-dbg
gstreamer0.10-gnonlin-doc gstreamer0.10-hplugins gstreamer0.10-nice
gstreamer0.10-packagekit gstreamer0.10-plugins-bad
gstreamer0.10-plugins-bad-doc gstreamer0.10-plugins-bad-multiverse
gstreamer0.10-plugins-base gstreamer0.10-plugins-base-apps
gstreamer0.10-plugins-base-dbg gstreamer0.10-plugins-base-doc
gstreamer0.10-plugins-cutter gstreamer0.10-plugins-good
```
3. Instalacja funkcji "gscam"
 

```
rosdep install gscam
rosmake gscam
```

Gdy pakiety zostały przygotowane i dysponujemy kamerką, następnym krokiem jest weryfikacja działania oprogramowania. W terminalu należy wpisać następujące polecenia:

```
— cd bin
— export GSCAM_CONFIG = "v4l2src
device = /dev/video0!video/x-raw-rgb!ffmpegcolorspace"
— rosrun gscam gscam
```

Powyżej zaprezentowana metoda może nie zadziałać w każdej dystrybucji Ubuntu i ROS'a. Za każdym razem należy zweryfikować posiadane wersje i sięgnąć do dokumentacji udostępnionej przez producenta. Jeśli jednak wszystko się udało, w okienku wyświetli się obraz z kamery, bez dodatkowych informacji i funkcji.

## 5.2. Komunikacja ROS—MAVLINK

Moduł MAVLINK został przygotowany przez producentów tak, aby działać wspólnie z ROS'em. Dlatego też jego instalacja oraz późniejsze użytkowanie jest bardzo proste. Aby zainstalować MAVLINK'a należy wykonać następujące polecenie: *sudo apt-get install ros-hydro-mavros ros-hydro-mavros-extras*

Tak zainstalowany moduł daje piękne i intuicyjne środowisko do podglądu tego co dzieje się "na" i wokół latającego robota. Aby móc odbierać dane z czujników, kamer itp., należy "podpiąć" port pod widget programu. W tym celu używamy opcji *Network => AddLink*. Dane otrzymane w ten sposób można wyeksportować oraz wizualizować również w zewnętrznych środowiskach, np. w Matlab'ie. Wszystkie widgety można do woli edytować (rozmieszczenie, ilość itp) poprzez kliknięcie prawym przyciskiem myszy i wybranie właściwości danego elementu.

## 5.3. Komunikacja ROS—GroundStation

Tworzenie platformy, która będzie mogła poruszać się autonomicznie powoduje konieczność otrzymywania od niej pełnego wachlarza informacji o jej położeniu. Warto w

tym celu wykorzystać GroundStation, czyli stacją naziemną.

Jest to centrum sterowania bezzałogowych statków powietrznych, pozwalające na komunikację z platformą poprzez terminal. Pomimo że platforma porusza się autonomicznie to należy podać jej współrzędne po których może (lub ma) się poruszać.

Dane telemetryczne potrzebne do komunikacji ze stacją naziemną pochodzą bezpośrednio ze sterownika PixHawk. Posłuży do tego komunikacja z systemem operacyjnym ROS zaimplementowanym na platformie Ahsoka.

Groundstation jest to GUI oparte na GTK+, co pozwala na wyświetlanie i aktualizację danych dostarczonych bezpośrednio przez topici w ROSie. Dane mogą być wyświetlane przez jeden z programów do zdalnej telemetrii takich jak: **CityFlyer** czy **QGroundControl**. Ze względu na lepszą integrację z ROSEm do projektu wybrany został QGroundControl. Dodatkowo program ten umożliwia pełną symulację lotu bez uruchamiania pojazdu.

Komunikację z ROS-GroundStatnion uzyskano dzięki gotowym poradnikom i bibliotece MAVLink. Dzięki temu uzyskano połączenie platformy latającej z QGroundControl. Połączenie następuje poprzez sieć WI-FI.

## 5.4. Komunikacja ROS—czujniki

Na potrzeby projektu został napisany moduł, który odpowiada za pobieranie oraz udostępnianie pomiarów odległości. Implementuje on interfejs komunikacyjny w jaki został wyposażony moduł z czujnikami. Komunikacja odbywa się z wykorzystaniem portu szeregowego. Do implementacji przesyłania danych została użyta biblioteka termios. Poniżej została przedstawiona konfiguracja portu:

```
1 settings.c_iflag = IGNBRK | IGNPAR | IGNCR;
2 settings.c_oflag = 0;
3 settings.c_cflag = CS8 | CREAD | CLOCAL;
4 settings.c_lflag = 0;
5 settings.c_cc[VMIN] = 0;
6 settings.c_cc[VTIME] = 0;
7 cfsetispeed(&settings, B9600);
8 cfsetospeed(&settings, B9600);
```

Czytanie z portu odbywa się w sposób asynchroniczny. Poniżej przedstawiono konfigurację oraz obsługę sygnału wysyłanego w momencie, gdy są możliwe dane do czytania:

```
1 sigaio.sa_handler = Device::signalHandler;
2 sigaio.sa_flags = 0;
3 sigemptyset(&sigaio.sa_mask);
4 sigprocmask(SIG_SETMASK, &sigaio.sa_mask, NULL);
5 sigaction(SIGIO, &sigaio, NULL);
6 fcntl(fd, F_SETOWN, getpid());
7 fcntl(fd, F_SETFL, FASYNC);
```

W powyższym wydruku w pierwszej kolejności ustawiamy funkcje, która jest odpowiedzialna za wywołanie odpowiednich czynności po otrzymaniu sygnału. W następnych trzech liniach konfigurowana jest obsługa sygnału. Na końcu modyfikowany jest deskryptator w którym powinniśmy się spodziewać odpowiedniego zdarzenia. Kiedy sygnał jest odbierany z wejścia pobierane są dane z czujników, które następnie są publikowane w topicu o nazwie: pomiary. Odczyty publikowane są w formacie:

```
1 uint16 [] dane  
time timestamp
```

Pierwsze pole w powyższej wiadomości to wektor zawierający odczyty z czujników w cm, drugi to czas wykonania pomiaru. Kiedy otrzymamy niekompletny lub pusty zestaw danych pomiary nie są publikowane, a w logach pojawia się informacja: "Receive data failed".

## 5.5. Komunikacja MAVLINK—PixHawk

Moduł *mavros* jest skonfigurowany w taki sposób, aby generował komunikaty w formacie *mavlink* dla urządzenia typu konwerter *UART* o nazwie *ttyACM0* z częstotliwością 57600 baud. Konfiguracja tego parametru znajduje się w pliku *px4.launch* modułu *mavros*.

Od strony peryferyjnej do jednego z portów USB komputera *NANO 6060* podłączony jest konwerter USB to *UART*, który odpowiada za fizyczną translację komunikacji pomiędzy *Pixhawkiem* a *NANO 6060*. Gniazdo *UART* konwertera podłączone jest do pinów portu *Telemetry 1* sterownika lotu, co zapewnia odczyt danych telemetrycznych oraz przesyłanie komend.

# **6. Czujniki odległości**

W robotyce mobilnej istnieje konieczność pomiaru odległości. Robot mobilny powinien znać odległość od przeszkody, aby móc ją ominąć i odległość od ściany, aby wzdłuż niej podążać. W celu określenia dystansu konstruktorzy używają czujników odległości, które bazują na metodzie pomiaru czasu przelotu od nadajnika do obiektu oraz od obiektu do odbiornika. Nośnikiem energii mogą być: fale radiowe, podczerwień, ultradźwięki lub skupiona wiązka światła (laser).

Quadrocopter powinien posiadać czujniki o zasięgu mniejszym niż 2 metry (badające bliskie otoczenie platformy) oraz czujniki o zasięgu większym niż 5 metrów (w celu lokalizacji w pomieszczeniu).

## **6.1. Dobór czujników odległości**

Dobierając czujniki należy uwzględnić środowisko w jakim będą pracować. Mogą być one narażone na takie czynniki jak turbulencje powietrza, zakłócenia akustyczne ze śmigieł, szумy elektryczne czy vibracje. Każde z tych zjawisk generuje różne problemy, które mogą wpływać na niepożądane działanie czujników. Po specyfikacji potrzeb należy rozsądnąć się w dostępnych rozwiązańach na rynku, następnie wybrać najlepsze rozwiązania.

### **6.1.1. Specyfikacja potrzeb**

Specyfikacja potrzeb powinna uwzględnić zjawiska fizyczne, zakłócające pracę czujników jak i zadanie wykonywane przez quadrocopter.

#### **Turbulencje powietrza**

Turbulencje powietrza, wywoływane przez śmigła, wpływają na zmniejszenie energii otrzymanego sygnału przez czujnik, mogą zmieniać kierunek oraz intensywność fal akustycznych. Można temu zapobiec umieszczając sensory jak najdalej od śmigieł. Przy pomiarze odległości do ziemi należy umieścić czujnik pod ramą jak najbliżej centrum.

#### **Szum akustyczny wytwarzany przez śmigła**

To zjawisko jest bardzo podobne do opisanego powyżej. Zmienia energię sygnału, który ma odebrać czujnik, szумy akustyczne ze śmigieł są również odbierane jako sygnały powracające do czujników. Zakłócenia te są kumulowane na zakończeniach śmigieł. W takim przypadku najlepiej unikać montażu czujnika w miejscach, w których czujnik jest skierowany bezpośrednio na śmigło.

#### **Masa i napięcie zasilania**

Najlepszym rozwiązaniem połączania czujników z masą i napięciem zasilającym jest połączenie typu gwiazda. Każdy czujnik ma osobne przewody zasilające. Zapobiega to zakłóceniom powodowanym przez podłączenie urządzeń o różnych woltarzach.



Rysunek 6.1: Skaner laserowy RPLidar



Rysunek 6.2: Sharp GP2Y0A02YK0F

### Szумy elektryczne generowane przez fale radiowe

Szumy elektryczne generowane przez fale radiowe mogą powodować niepoprawne odczyty przez czujniki ultradźwiękowe. Gdy poprawnie zostanie użyty filtr i skorzysta się z takich interfejsów jak np. I2C, odczyt odległości nie powinien zostać uszkodzony przez zewnętrzne zakłócenia elektryczne. Należy użyć ekranowanych przewodów. Ekran ten musi być prawidłowo uziemiony do masy. Gdy ekran nie zostanie podłączony z masą, szумy mogą być jeszcze większe od tych, które występują przy braku ekranowanych kabli.

### Wibracje ramy

Drgania ramy mogą również powodować zakłócenia. Energia z ramki może być transmitowana do czujnika. W celu wyeliminowania tego hałasu można zastosować podkładki gumowe, taśmy z pianki lub inne materiały tłumiące wibracje.

### Dobranie czujników ze względu na zasięg

Zakresy czujników skierowanych pionowo w dół oraz w górę nie powinny przekraczać w sumie  $3m$ , ponieważ zakładamy lot w pomieszczeniu na wysokość oczu człowieka. Strefa martwa czujników umieszczonych w poziomie może wynosić  $40cm$ , dlatego, że lot wzduż ściany, przez tworzącą się poduszkę powietrzną będzie odbywał się w odległości około  $40cm$ .

#### 6.1.2. Dostępne rozwiązania

Na podstawie specyfikacji dokonano rozeznania dostępnych na rynku czujników odległości. Odrzucono sensory cyfrowe ze względu na to, że nie zwracają informacji o odległości do obiektu. Wybierając czujniki analogowe kierowano się prędkością z jaką dokonują pomiaru. Dodatkowo podczas selekcji czujników istotny był zakres prawidłowego działania, cena oraz masa. Wyniki rozeznania dostępnych sensorów przedstawiono w tabeli 6.1.

#### 6.1.3. Dobór czujników

Na podstawie specyfikacji i rozeznania rynkowego dobrano czujniki odległości wykorzystane w quadrocopterze. Zakupiono 7 czujników SHARP GP2Y0A02YK0F oraz 2



Rysunek 6.3: SHARP GP2Y0A710K0F



Rysunek 6.4: Sonar US-020



Rysunek 6.5: Sonar XL-MaxSonar-EZL0

Tabela 6.1: Zestawienie dostępnych na rynku czujników spełniających założenia

nośnik energii	czujnik	cena [zł]	zasięg [m]	masa [g]	zdjęcie
laser	skaner laserowy RPLidar	1870	6	-	6.1
podczerwień	Sharp GP2Y0A02YK0F	59	0,2 - 1,5	4,8	6.2
podczerwień	Sharp GP2Y0A710K0F	139	1 - 5,5	10	6.3
ultradźwięki	US-020	16	0,02 - 7	-	6.4
ultradźwięki	XL-MaxSonar-EZL0	169	10	8	6.5

Tabela 6.2: Zestawienie danych wybranych czujników

	GP2Y0A02YK0F	MAXSONAR-EZL0 [MB1260]
Zakres pomiarowy	20 – 150cm	0 – 10m
Napięcie zasilania	4, 5 – 5, 5V	3, 3 – 5, 5V
Średni pobór prądu	33mA	3.4mA
Czas odpowiedzi	38ms	30ms
Wymiary	29,5 x 13,0 x 21,5 mm	22,1 x 19,9 x 25,11

sonary ultradźwiękowe MAXSONAR-EZL0. W tabeli 6.2 przedstawiono dane dotyczące wykorzystanych czujników.

## 6.2. Rozmieszczenie czujników odległości

Rozmieszczenie czujników odległości musi zapewniać prawidłowe zebranie odczytów zarówno w płaszczyźnie poziomej (wspomaganie wykrywania przesunięć quadrocoptera w poziomie) jak i pionowej (kontrola aktualnej wysokości quadrocoptera). W związku z powyższym czujniki zostały podzielone na dwa zestawy działające w płaszczyźnie poziomej i w kierunku pionowym.

W trakcie planowania rozmieszczenia czujników odległości zostały wzięte pod uwagę następujące aspekty:

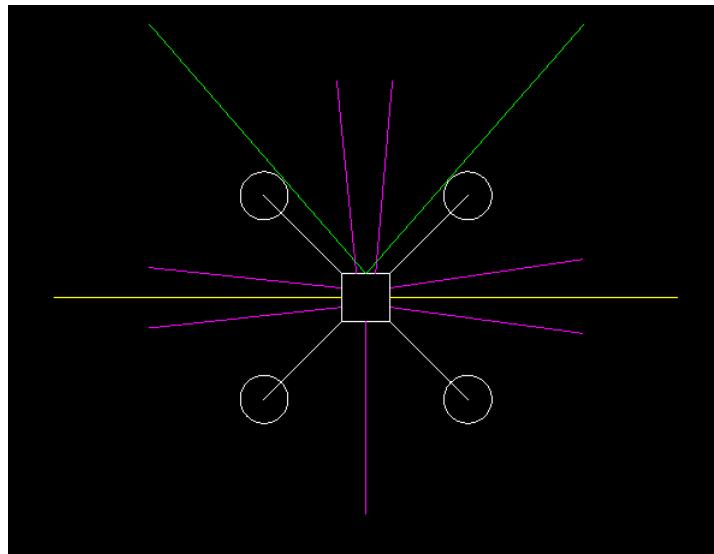
- minimalizacja ilości wykorzystanych czujników przy maksymalizacji dostarczanych przez nie informacji,
- zróżnicowanie rodzajów czujników (ze względu na wybrane wcześniej różne zakresy działania),
- możliwość montażu na ramie quadrocoptera.

### 6.2.1. Przegląd rozwiązań

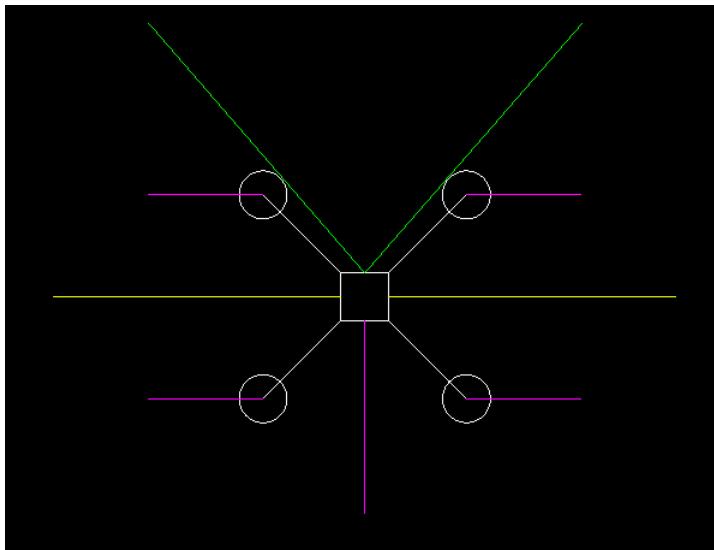
Poniżej wymienione zostały popularne projekty opisujące budowę quadrocoptera, posiadające dobrą dokumentację opartą na licencji opensource:

- <http://www.armokopter.at/>  
Analog MEMs gyroscopes, Analog MEMs accelerometers, digital motion sensor (MPU6050) + baro sensors + compass sensors
- <http://www.openpilot.org/>  
3-axis high-performance MEMs gyroscope, 3-axis high-performance MEMs accelerometer
- <http://code.google.com/p/arducopter/>  
Triple Axis magnetometer
- <http://aeroquad.com/>
- <http://ng.uavp.ch/>

W tych pracach nie występują czujniki odległości ułożone w płaszczyźnie wertykalnej, które byłyby wykorzystywane do stabilizacji w poziomej płaszczyźnie. Funkcję awaryjnego STOP pełnią zazwyczaj obręcze śmigieł, lub piankowe korpusy quadrocopterów. Jest to jednak tylko zabezpieczenie przed uszkodzeniem sprzętu, które w żaden sposób nie spełnia



Rysunek 6.6: Konfiguracja I



Rysunek 6.7: Konfiguracja II

wymagań projektu.

### 6.2.2. Propozycja rozmieszczenia

Zostały zaproponowane dwie konfiguracje rozmieszczenia pierwszego zestawu czujników (zbierającego odczyty w płaszczyźnie poziomej). Przedstawione są na rys. 6.6 oraz 6.7. Kolorem fioletowym zostały oznaczone czujniki bliskiego zasięgu — SHARP GP2Y0A02YK0F, żółtym sonary ultradźwiękowe — XL-MaxSonar-EZL0 [MB1260], natomiast zielony kolor to kąt i zasięg widzenia kamery 3D.

Ze względu na optymalizację kosztów oraz wagi układów sensorycznych ostatecznie zdecydowano się na rozwiązanie II. Dodatkowym aspektem wynikającym z przyjętej konfiguracji jest trywialny sposób kontroli równoległego lotu wzdłuż ściany, który polega na bezpośrednim porównywaniu odczytów z czujników znajdujących się po tej samej stronie quadrocoptera. Czujniki dalekiego zasięgu zostały zainstalowane ze względu na potrzebę

podejmowania decyzji wzduż której ściany powinien poruszać się quadrocopter zaraz po wlecienu do nieznanego pomieszczenia.

Do stabilizacji w pionie (drugi zestaw czujników) zostaną wykorzystane dwa czujniki typu SHARP skierowane prostopadle w dół (do ziemi) i w górę (w stronę sufitu). Zbierane pomiary zostaną uśrednione i wybrany do sterowania ten, który zmienia się wolniej (jego pochodna jest mniejsza). Dzięki zainstalowanym na platformie czujnikom inercyjnym wyliczanie prawdziwej wysokości, na której znajduje się quadrocopter, odbywać się będzie z wykorzystaniem bezpośrednich odczytów SHARP'a oraz aktualnymi wychyleniami platformy.

### 6.3. Płytki PCB

W celu poprawnego uruchomienia czujników odległości trzeba zaprojektować i wykonać płytę PCB. Płytki powinny obsługiwać sygnały wejściowe z czujników, odpowiednio je przetwarzając oraz publikować.

#### 6.3.1. Specyfikacja potrzeb

Płytki czujników powinna zapewniać:

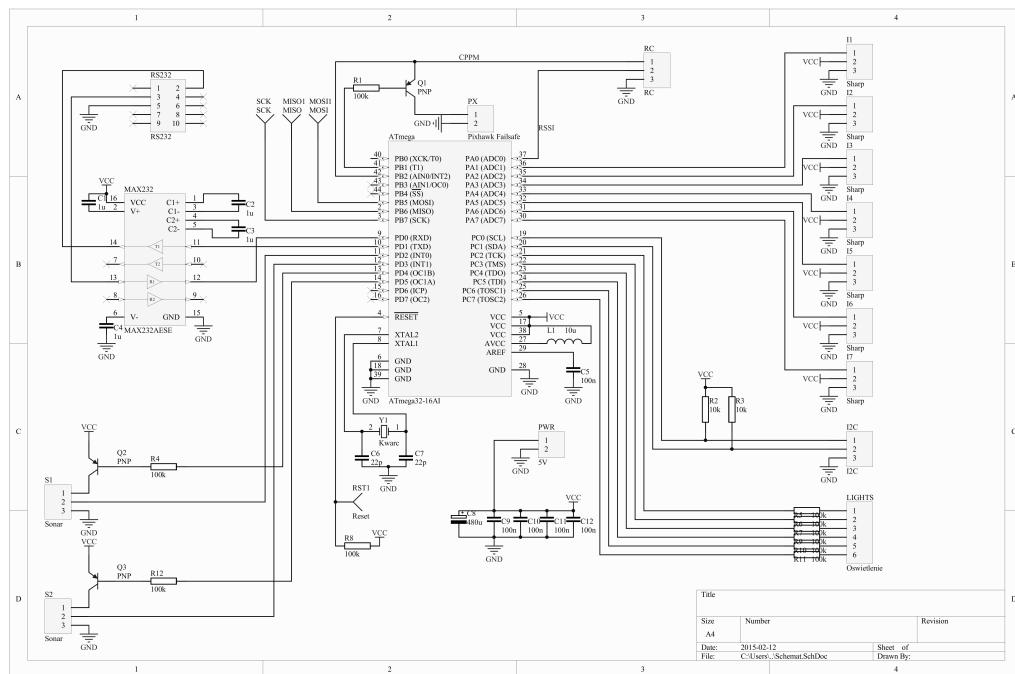
- Wejścia analogowe dla 7 czujników optycznych
- Wejścia PWM dla 2 sonarów
- Wyjścia do sterowania oświetleniem robota
- Mechanizm zarządzania sygnałem RC(wyłącznik)
- Dekoder sygnału RC oraz RSSI.

#### 6.3.2. Wykonanie i uruchomienie płytki PCB

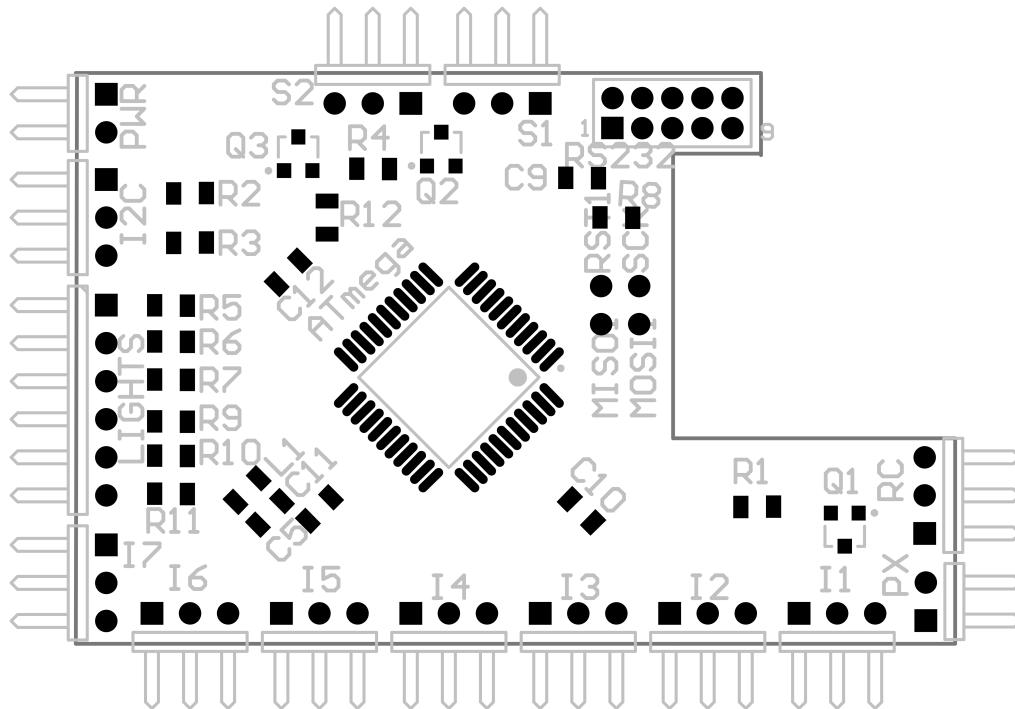
W oparciu o powyższe wytyczne zaprojektowano schemat 6.8 oraz płytę PCB. Jako mikrokontroler zastosowano chip ATmega32 firmy ATmel, a konwerter napięć dla RS-232 to popularny MAX232 w implementacji przetwornicy pojemnościowej. Płytki zawiera kluczowanie zasilania sonarów oraz włączalny bypass dla sygnału RC.

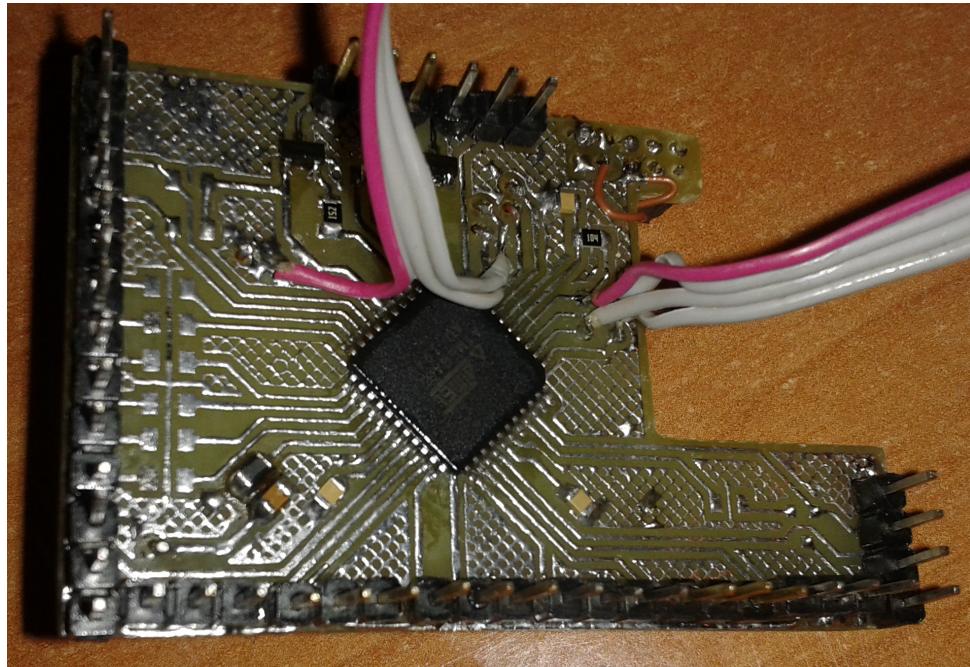
Opis złącz znajdują się na rys. 6.9.

Na rysunku 6.10 przedstawiono wykonany interfejs czujników. Widoczne złącza umożliwiają podłączenie zasilania, czujników odległości Sharp, stopnia mocy oświetlenia, czy sygnału z aparatury RC.

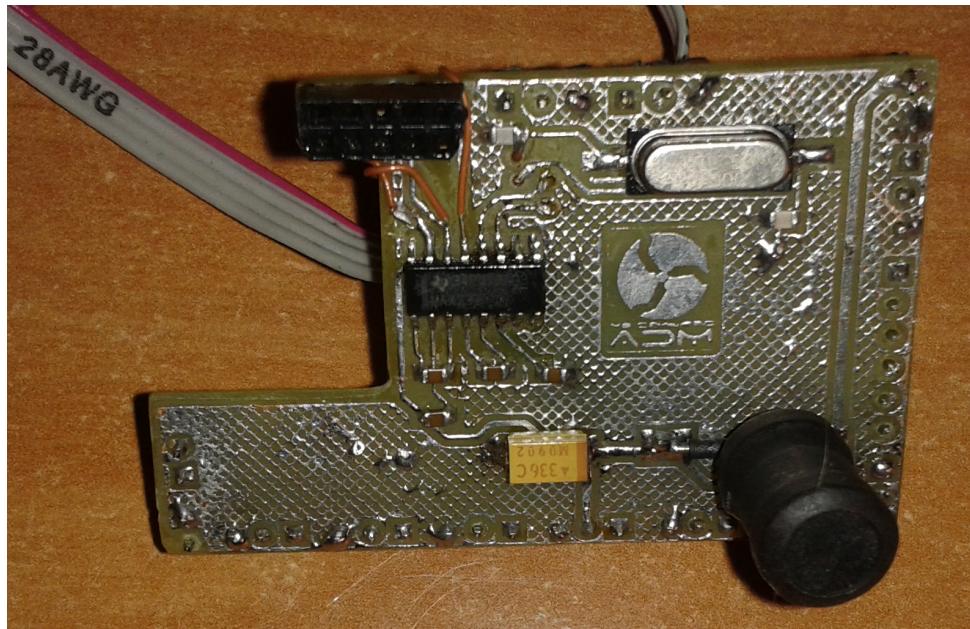


Rysunek 6.8: Schemat płytki PCB





(a) widok z góry



(b) widok z dołu

Rysunek 6.10: Przedstawienie wykonanego interfejsu

#### 6.4. Oprogramowanie interfejsu

Urządzenie spełnia rolę interfejsu sterującego wybranymi podzespołami quadrocoptera oraz jednostki pomiarowej, mierzącej odległość robota od przeszkód. Wyposażone zostało w mikrokontroler Atmel Atmega32. Aktualnie zaimplementowane funkcjonalności są następujące:

- cykliczne wykonywanie pomiarów napięć czujników odległości (porty ADC1-ADC7),

- pomiar odległości poprzez zliczanie czasu trwania impulsów (PW) generowanych przez sonary:
  - przerwania zewnętrzne,
  - timer zliczający czas.
- wysyłanie pomiarów do komputera nadziednego (UART),
- sterowanie oświetleniem quadrocoptera,
- dekodowanie sygnału PPM z zadajnika RC,
- obsługa Pixhawk Failsafe.

Oprogramowanie zostało utworzone w języku C, z wykorzystaniem środowiska Atmel Studio 6, które jest nieodpłatnie udostępniane przez producenta mikrokontrolerów. Szczegółowa dokumentacja oprogramowania została utworzona z wykorzystaniem generatora Doxygen.

### Protokół komunikacji z komputerem nadziednym

W celu umożliwienia komunikacji urządzenia z komputerem nadziednym konieczne było zaprojektowanie odpowiedniego protokołu komunikacyjnego. Warto zaznaczyć, że do omawianej komunikacji wykorzystuje się interfejs szeregowy UART.

Główną ideą zaprojektowanego protokołu komunikacji jednostki pomiarowej z komputerem jest wykorzystanie architektury klient-serwer. Rolę klienta pełni aplikacja uruchomiona na komputerze nadziednym, która wysyła odpowiednio zakodowane rozkazy. Natomiast interfejs sensorów dekoduje i realizuje otrzymywane rozkazy. W dalszej części przedstawiono szczegółowy opis protokołu.

### Weryfikacja poprawności ramek

#### Suma kontrolna

W celu weryfikowania poprawności transmisji zaimplementowano obliczanie prostej sumy kontrolnej. Algorytm zlicza liczbę bitów o stanie wysokim w ciągu wysłanych bajtów. Metoda ta nie zapewnia dużej odporności na zakłócenia, ponieważ jest duże prawdopodobieństwo, że suma bitów o wysokim stanie niepoprawnego ciągu bajtów będzie równa sumie poprawnego. Jednak zaletą takiej sumy kontrolnej jest niewielka złożoność obliczeniowa.

#### Potwierdzanie rozkazów

Zwiększenie niezawodności transmisji zrealizowano przez implementację potwierdzania rozkazów. Potwierdzanie dotyczy tylko rozkazów, dla których nie jest oczekiwana transmisja zwrotna, czyli między innymi rozkazów konfiguracyjnych. W przypadku tej grupy oczekuje się potwierdzenia w postaci krótkiej ramki składającej się z kodu rozkazu oraz sumy kontrolnej.

#### Opis protokołu

W pierwszym odebranym bajcie danych przez jednostkę pomiarową, dwa najstarsze bity są bitami kontrolnymi o wartościach wysokiego stanu logicznego (11). Kolejne 6 bitów określa rozkaz, który należy wykonać. W ten sposób można zakodować do 64 różnych rozkazów, co wydaje się być wartością zupełnie wystarczającą. W przypadku, gdy nie ma dodatkowych danych dla jednostki pomiarowej, drugi bajt zawiera sumę kontrolną. Ogólna postać ramki danych została przedstawiona na rysunku 6.11.

Nr bajtu	1	2....n-1	n
Funkcja	2 bity startowe i kod rozkazu	Dodatkowe dane	Suma kontrolna

Rysunek 6.11: Ogólna postać ramki danych

Zaimplementowany protokół zakłada przesyłanie bardziej znaczących bajtów przed mniej znaczącymi (Big endian). Każdy dodatkowo przesyłany ciąg danych jest weryfikowany sumą kontrolną, której algorytm został przedstawiony w poprzednim podrozdziale. Rozkazy podzielono na cztery części w zależności od wartości pierwszych czterech bitów:

- 0xC (1100)** żądania przesłania informacji zwrotnej,
- 0xD (1101)** rozkazy konfiguracyjne,
- 0xE (1110)** pozostałe rozkazy,
- 0xF (1111)** pozostałe rozkazy.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono opisy poszczególnych grup rozkazów. Rozkazy opisane zostały przez podanie odpowiadających im wartości bajtów i krótkich opisów działania.

### Żądania przesłania informacji zwrotnej - 0xC

#### 1100 0000 - 0xC0

Weryfikacja poprawności działania transmisji. Oczekuje się odpowiedzi w postaci 0101 0101 - 0x55.

#### 1100 1001 - 0xC1

Polecenie wysłania zmierzonych wartości z sensorów odległości oraz odczytyanych wartości z sygnału PPM. Jednostką pomiarów sensorów Sharp są *mV*. W przypadku sonarów odległość podawana jest w *cm*. Wartości sygnału PPM dla kolejnych kanałów podawane jest w  $\mu s$ . Kolejność pomiarów w ramce określona została następująco:

- 2 bajty - napięcie w mV odczytane z sensora Sharp 1,
- 2 bajty - napięcie w mV odczytane z sensora Sharp 2,
- 2 bajty - napięcie w mV odczytane z sensora Sharp 3,
- 2 bajty - napięcie w mV odczytane z sensora Sharp 4,
- 2 bajty - napięcie w mV odczytane z sensora Sharp 5,
- 2 bajty - napięcie w mV odczytane z sensora Sharp 6,
- 2 bajty - napięcie w mV odczytane z sensora Sharp 7.
- 2 bajty - odległość zmierzona sonarem nr 1,
- 2 bajty - odległość zmierzona sonarem nr 2,
- 2 bajty - szerokość impulsu w  $\mu s$  w sygnale PPM dla kanału nr1,
- 2 bajty - szerokość impulsu w  $\mu s$  w sygnale PPM dla kanału nr2,
- 2 bajty - szerokość impulsu w  $\mu s$  w sygnale PPM dla kanału nr3,
- 2 bajty - szerokość impulsu w  $\mu s$  w sygnale PPM dla kanału nr4,
- 2 bajty - szerokość impulsu w  $\mu s$  w sygnale PPM dla kanału nr5,
- 2 bajty - szerokość impulsu w  $\mu s$  w sygnale PPM dla kanału nr6,
- 2 bajty - szerokość impulsu w  $\mu s$  w sygnale PPM dla kanału nr7,
- 2 bajty - szerokość impulsu w  $\mu s$  w sygnale PPM dla kanału nr8,

## Rozkazy konfiguracyjne - 0xD

### 1101 0000 - 0xD0

Polecenie uruchomienia oświetlenia quadrocoptera.

### 1101 0001 - 0xD1

Polecenie wyłączenia oświetlenia quadrocoptera.

### 1101 0010 - 0xD2

Włączenie Pixhawk Failsafe (ustawienie stanu wysokiego).

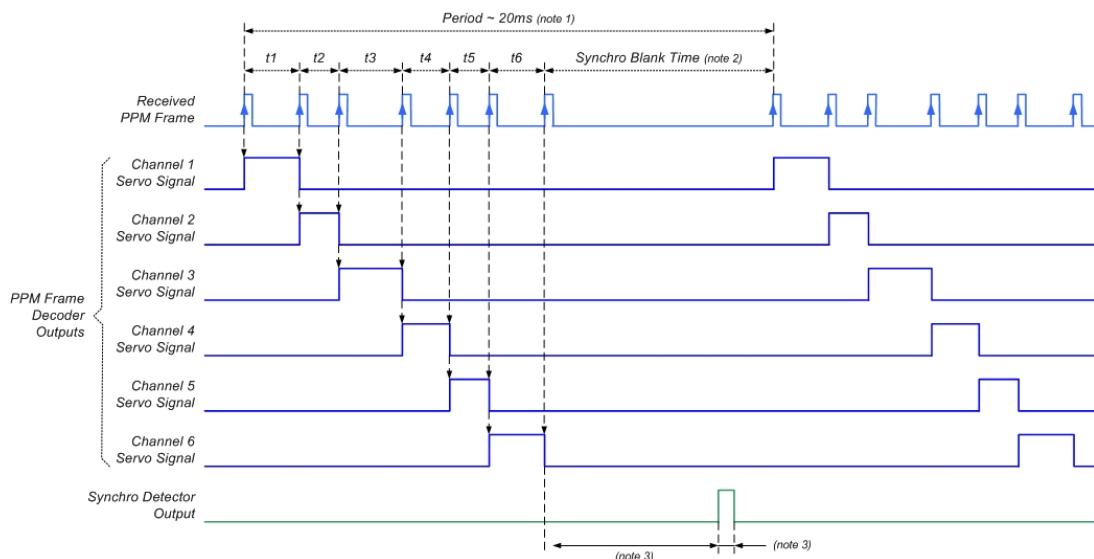
### 1101 0011 - 0xD3

Wyłączenie Pixhawk Failsafe (ustawienie stanu niskiego).

#### 6.4.1. Dekodowanie sygnału PPM, Michał

W celu umożliwienia ręcznego sterowania quadrocopterem przez operatora należało zrealizować dekodowanie sygnału PPM odbieranego przez aparaturę. Sygnał ten podłączony jest do wykonanego interfejsu i dekodowany przez umieszczony w nim mikrokontroler ATmega32.

PPM (Pulse Position Modulation) jest sygnałem, w którym informacje kodowane są z wykorzystaniem modulacji położenia impulsów. Umożliwia przesyłanie wartości w kilku kanałach (w przypadku dostępnej aparatury jest to 8 kanałów). Postać takiego sygnału przedstawiona została na rysunku ??.



Rysunek 6.12: Sposób kodowania informacji w sygnale PPM

Po zdekodowaniu sygnału PPM, wartości o poszczególnych kanałach wysyłane są do komputera nadziedznego *nano6060*, gdzie przetwarzane są w środowisku *ROS* i następnie wysyłane do sterownika quadrocoptera Pixhawk'a. Takie podejście umożliwia ręczne sterowanie, ale także realizację korekcji sterowania z wykorzystaniem modułu antykolizyjnego.

#### Realizacja dekodowania sygnału PPM na mikrokontrolerze

Na potrzeby dekodowania sygnału PPM wykorzystano przerwanie zewnętrzne generowane w zależności od rodzaju zbocza sygnału. Rozpoznawanie początku ramki zrealizowane zostało przez badanie przekroczenia maksymalnego odstępu między impulsami, które w przypadku zwracanych wartości kanałów wynosi 2ms. Poniżej przedstawiono funkcję realizującą obsługę przerwania generowanego w przypadku zmiany stanu pinu do którego podłączono sygnał PPM.

Wydruk 6.1: Obsługa przerwania realizującego dekodowanie PPM

```

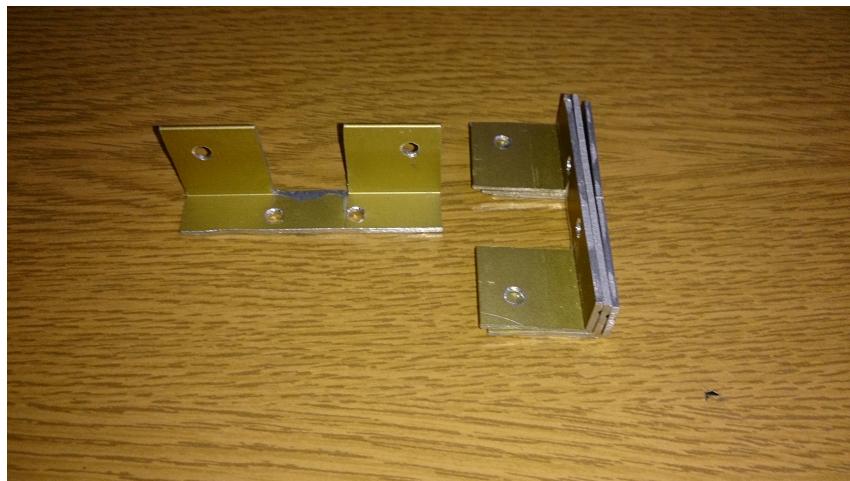
1 ISR (INT2_vect) // PPM
2 {
3     cli();
4     if ((timeCntPPM + TCNT2) > MAX_PPM_WIDTH) // new frame
5     {
6         newFrame = 1;
7         channelPPMcnt = 0;
8     }
9     else if(newFrame) // measurement for properly PPM channel
10    {
11        channelPPM[channelPPMcnt] = timeCntPPM + TCNT2;
12        if (channelPPMcnt < 7) // increase channel counter
13        {
14            channelPPMcnt++;
15        }
16        else
17        {
18            newFrame = 0;
19        }
20    }
21    TCNT2 = 0; // Timer2 reset
22    timeCntPPM = 0;
23
24    GIFR |= (1 << INTF1); // Interrupt flag clear
25    sei();
26 }
```

#### 6.4.2. Komunikacja ROS-czujniki

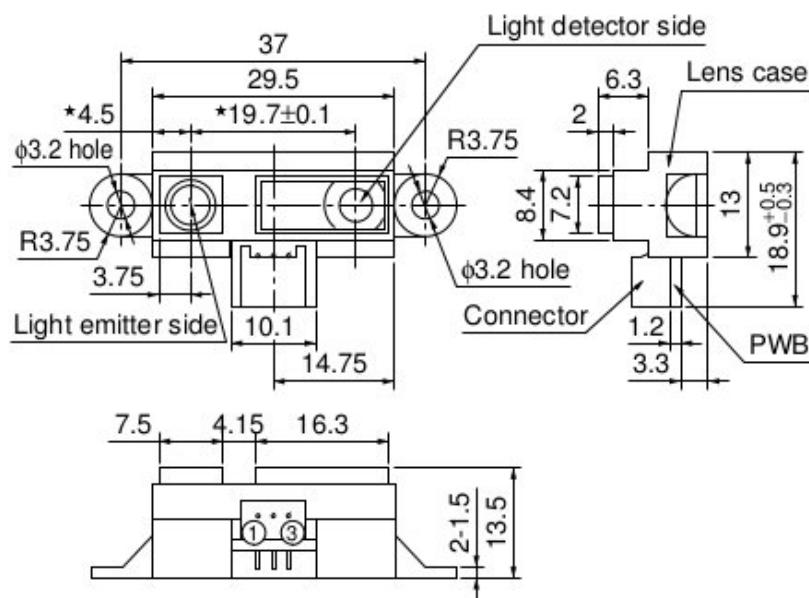
### 6.5. Montaż czujników na platformie docelowej

Po uprzednio zaprojektowaniu czujników należało zaplanować sam montaż. Należało wziąć pod uwagę wiele czynników takich jak: możliwość montażu do płytka lub do ramienia, optymalne rozmieszczenie śrub tak aby nie stracić właściwości mechanicznych konstrukcji, rozmiar i waga elementów pomocniczych do montażu, przebieg przewodów, dostępne materiały, trudności w montażu i demontażu oraz wpływ drgań i uderzeń na stabilne położenie czujników. Wszelkie przyszłe doposażenia musiały być również wzięte pod uwagę tak aby nawet w przyszłości pomiar nie był zakłócony, a warunki były zgodne ze specyfikacją podaną przez producenta.

Do tej pory zostało przymocowanych pięć czujników SHARP oraz 2 sonary. Montaż czterech dalmierzy optycznych został wykonany przy użyciu specjalnie stworzonych na ten cel kątowników, a pozostałych czujników przy pomocy plastikowych opasek.



Rysunek 6.13: Dedykowane kątowniki



Rysunek 6.14: Wymiary czujników SHARP

Połączenie czujników z płytka wykonaną w tym celu, zostało zrealizowane za pomocą specjalnej skrętki modelarskiej trój-żyłowej. Po stronie płytki, połączenie umożliwiają wtyczki do goldpinów, natomiast po stronie czujników, przewody zostały przylutowane w celu zwiększenia wytrzymałości i pewności łączenia. Kolory w skrętce dobrano do odpowiednich sygnałów w następujący sposób:

- Kolor biały - sygnał
- Kolor czerwony - zasilanie

— Kolor czarny - masa

Pozostałe 2 czujniki mogą zostać przymocowane tylko w momencie, kiedy quadcopter będzie miał podłączone i ustawione wszystkie moduły, w tym anteny i baterie.

Część II

Zadania

# 7. Rozpoznanie dostępnych rozwiązań

Rozpoznanie dostępnych rozwiązań było ważnym etapem w realizacji projektu. Miało ono na celu zgromadzenie informacji oraz analizę wykonalności dostępnych rozwiązań.

## 7.1. Interfejs do istniejącego oprogramowania i sprzętu

Jednym z pierwszych zadań projektu było wybranie i rozpoznanie możliwości platformy na jakiej będzie postawiony określony system operacyjny. Do tego należało dobrać protokół komunikacyjny odpowiedzialny za komunikację między stacją naziemną, a maszyną.

### 7.1.1. Rozpoznanie protokołu quadrocoptera

Do komunikacji z quadrocopterem służy protokół mavlink, który udostępniany jest na licencji LGPL [11]. Pozwala on na przepływ danych pomiędzy stacją naziemną a autopilotem, który jest zamontowany na maszynie. Do wspieranych platform należą:

- PX4,
- PIXHAWK,
- APM,
- Parrot AR.Drone.

Informacje przesyłane są za pomocą wiadomości. Dzięki nim możemy wykonać poniższe czynności:

- ustawiać lub odczytywać parametry maszyny,
- przesyłać obrazy,
- przesyłać listę punktów orientacyjnych,
- sterować lotem maszyny.

Struktury i zawartości komunikatów są opisywane za pomocą języka xml. Poniżej przedstawiono definicję przykładowej wiadomości:

```
1 <message id="0" name="NAZWA">
2   <description>Opis</description>
3   <field type="uint8_t" name="type">Typ</field>
4 </message>
```

Powyzsza wiadomość nosi nazwę: "NAZWA" oraz zawiera pole type, które jest typu unit8\_t. Korzystając z powyższej definicji możemy wygenerować za pomocą odpowiedniego programu kod w języku c++ lub python do obsługi powyższego komunikatu. Na stronie zawierającej opis protokołu [11] dostępne są również gotowe zbiory definicji typowych komunikatów.

### Przygotowanie specyfikacji interfejsu

Protokół wykorzystany do komunikacji Quadrocoptera został oparty o opisany protokół MAVLink. Ramka tego protokołu ma następującą strukturę:

- „Start-of-frame” - oznacza początek ramki transmisyjnej,
- „Pay-load-length” - długość wiadomość,
- „Packet sequence” - numer sekwencji, pozwala określić czy jakiś pakiet nie został zgubiony,
- „System ID” - pozwala określić z jakiego systemu w sieci pakiet został wysłany
- „Component ID” - określa z jakiego elementu systemu została wysłana ramka
- „Message ID” - określa kodowanie długości wiadomości oraz sposób w jaki powinna zostać zdekodowana
- „Payload” - treść wiadomości
- „CRC” - suma kontrolna

## Wybór interfejsu

### 7.1.2. Rozpoznanie możliwości platformy

Platforma na jakiej mieliśmy okazję pracować spełniała założenia architektury x86. Wykorzystanie takiego sprzętu pozwala na zainstalowanie systemu operacyjnego linux oraz wykorzystanie wielu dostępnych bibliotek. W projektach, które mają na celu implementację algorytmów sterowania, na szczególną uwagę zasługują następujące możliwości:

- proste wykonywanie cyklicznych zadań,
- łatwa integracja danych pomiarowych z różnych czujników.

W systemach operacyjnych z rodziny linux cykliczne wykonywanie zadań umożliwia nam usługa systemowa o nazwie cron. Pozwala ona za pomocą wpisu w odpowiedniej tabeli uruchamiać cyklicznie pewien program lub skrypt. W tego typu systemach dostępne są również pakiety takie jak xenomai oraz orocos, które poza cyklicznym wykonywaniem zadań dają nam także wsparcie czasu rzeczywistego.

## 7.2. Zdalne debagowanie

Debugowanie, jest to proces systematycznego redukowania liczby błędów w oprogramowaniu bądź w systemie mikroporcesorowym, który polega na kontrolowanym wykonywaniu programu pod nadzorem narzędzia debugującego.

Proces usuwania błędów można podzielić na kilka etapów:

1. Reprodukcja błędu
2. Wyizolowanie źródła błędu
3. Identyfikacja przyczyny awarii
4. Usunięcie defektu
5. Weryfikacja powodzenia naprawy

Centralnym punktem procesu usuwania błędów programu jest obserwacja jego wykonania w celu lokalizacji źródła usterki. Zadanie to ułatwia główne narzędzie do dynamicznej analizy programu, czyli *Debugger*. Umożliwia on:

- wykonywanie programu w trybie pracy krokowej lub z zastawianiem tzw. pułapek
- podglądzanie i ewentualna zmiana zawartości rejestrów, pamięci itd.

W celu zdalnego debugowania wykorzystane zostało połączenie quadrocoptera z Ground-Station, a dokładnie z programem qGroundControl. Pozwala on na podgląd na zmienne stanu i status coptera w czasie rzeczywistym.

Połączenie sterownika komputera pokładowego z qGroundControl następuje poprzez SSH. Komunikaty o stanie quadrocoptera wysyłane są w formie komunikatów gcc oraz komunikatów: ROS\_INFO, ROS\_ERROR oraz ROS\_FATAL.

### 7.2.1. Dostępne rozwiązania

Podczas jednego z etapów planowania, należało postawić pytanie, w jaki sposób będzie wyglądać komunikacja pomiędzy użytkownikiem lub komputerem centralnym a quadrocopterem. W pierwszym kroku trzeba było wyspecjalizować potrzeby oraz ewentualne dodatkowe wymagania, które mogłyby się pojawić wraz z wdrażaniem coraz to nowszych algorytmów. Następnymi kryteriami były czas wykonania, trudność w wykonaniu lub sprowadzeniu oraz oczywiście całkowity koszt. Wybór ograniczony został do dwóch możliwości wymienionych poniżej:

- Ground station
- Link radiowy

#### Ground Station

Pierwszą propozycją było najbardziej kompleksowe rozwiązanie, czyli "Ground station". Jednym z proponowanych modeli był: DJI iPad Ground Station w/Bluetooth Module. Cechami wyróżniającymi go były:

- nadajnik i odbiornik 2.4 Ghz,
- moduł Bluetooth i oprogramowanie PC Ground Station umożliwiające nawigacje,
- dane typu stan baterii, wysokość itp.,
- zasięg BT w pomieszczeniach do 350m,
- moc 125mW,
- cena 199 USD.



Rysunek 7.1

Kolejnym zaproponowanym rozwiązaniem był: Quanum FPV Ground Station with 8? Monitor and Voltage Display, który cechował się następującymi elementami:

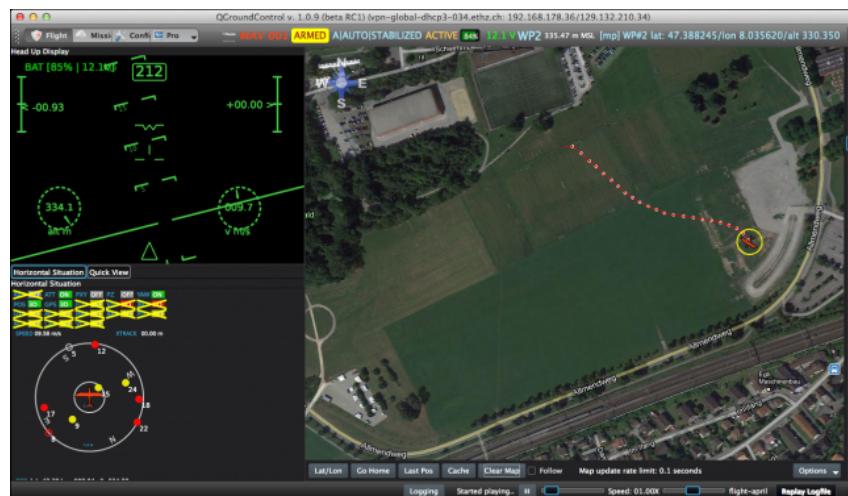
- rozwiązanie FPV - monitor LCD,
- gotowe wyprowadzenia (kable, złącza) do podłączenia anteny, sygnału video, modułu radiowego itp.,
- nie zawiera żadnych odbiorników,
- cena ok. 130 EUR,



Rysunek 7.2

Ostatnią alternatywą jest QGroundControl. Prezentowane rozwiązanie nie tyle jest samodzielnym produktem co niezależnym oprogramowaniem dedykowanym dla stacji PI-XHAWK. Pakiet zawiera następujące elementy:

- Open Source - protokół MAVLink,
- Linux Support,
- mapy 2D/3D,
- łatwe ustawianie punktów przelotu i manipulacja w locie,
- przedstawianie danych telemetrycznych w czasie rzeczywistym,
- wsparcie dla UDP i komunikacji radiowej,
- wsparcie dla autopilota, m.in. pxIMU,
- wsparcie dla transmisji video,
- obsługa wielu pojazdów jednocześnie.



Rysunek 7.3

### 7.2.2. Link radiowy

Kolejną propozycją jest link radiowy. Są to rozwiązania niewiele tańsze oraz mniej skomplikowane. Wydają się być w zupełności wystarczające na potrzeby projektu. Podczas planowania przedstawione zostały następujące warianty:

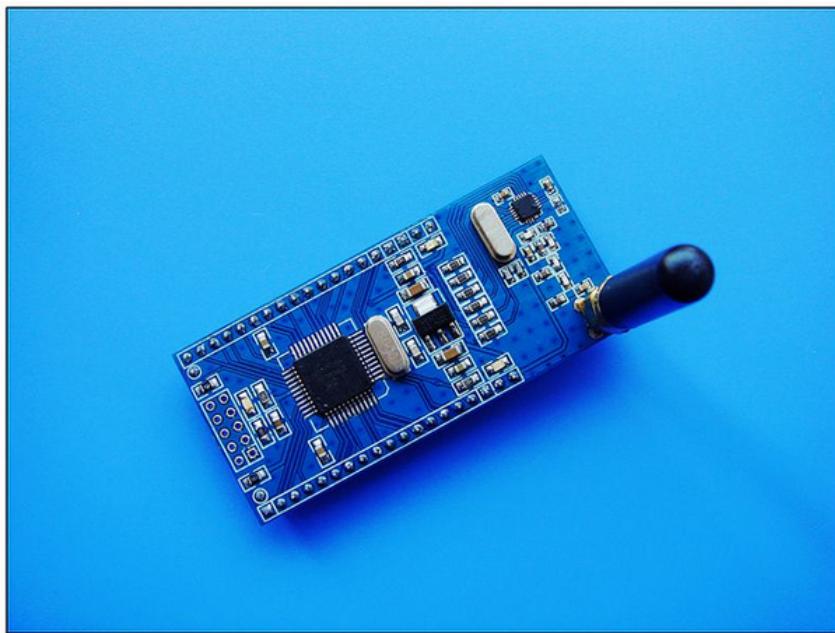
- Gotowy moduł od Texas Instruments z serii CC11xx
- Użycie kart sieciowych
- Stworzenie własnych modułów komunikacji radiowej

Już na początku można zauważyć, że tworzenie własnego modułu jest bardzo czasochłonne oraz wymaga pisania od nowa wszystkich sterowników. Rezultaty też nigdy nie będą takie jak w przypadku droższych, komercyjnych rozwiązań.

Do zalet gotowego modułu od Texas Instruments należą:

- częstotliwości 169,433,868,915,920 MHz
- niski pobór prądu
- wzmacniacz np. CC1190 (+0,5W)
- programowalna moc wyjściowa
- modulacje 2-FSK,2-GFSK,4-FSK,4-GFSK,OOK
- Wake-On-Radio
- single-chip

Wadą natomiast jest bardzo mała przepustowość (1.25 Mbps).



Rysunek 7.4

Łatwiej dostępnym i bardziej sprawdzonym rozwiązaniem jest wykorzystanie wszechobecnych kart sieciowych.

Do zalet takiego rozwiązania można zaliczyć:

- Łatwy dostęp i duży wybór gotowych rozwiązań
- Sterowniki oraz aplikacja obsługująca urządzenie w wybranym
- środowisku nie jest problemem
- Prędkość transmisji

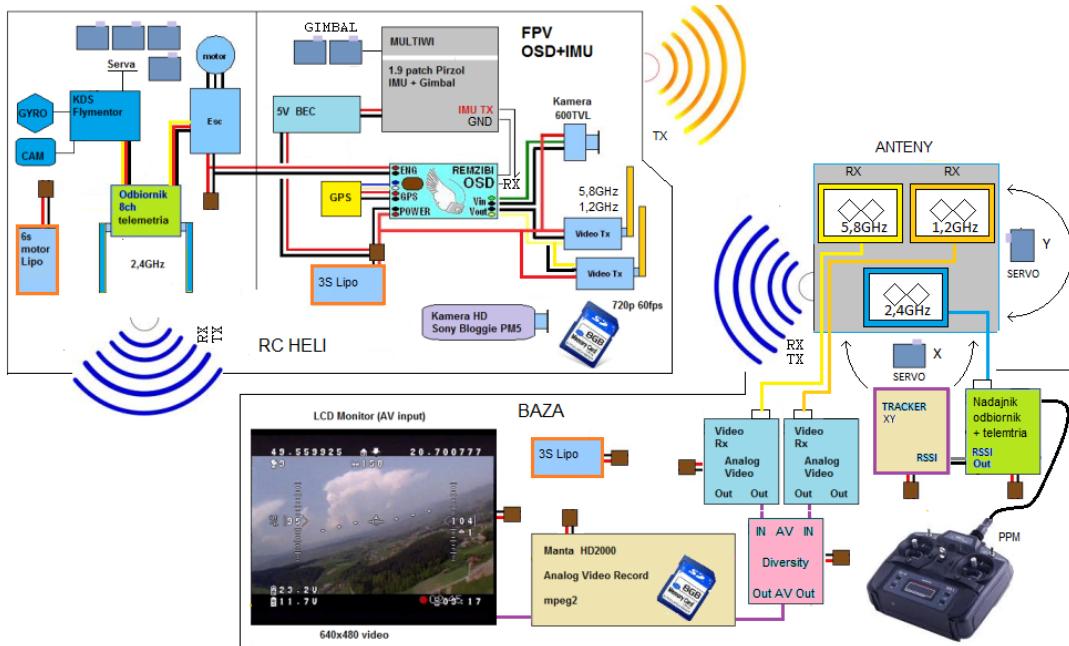
Wady:

- Praca na bardzo wysokich częstotliwościach - możliwe problemy z zasięgiem
- Podatność na zakłócenia
- Słabe zabezpieczenia

Pomimo podanych powyżej wad, wydaje się to być najbardziej optymalnym rozwiązaniem, który znalazło zastosowanie w projekcie.

### 7.2.3. Przegląd rozwiązań FPV

Termin FPV (First Person View) można przetłumaczyć jako *"Widok z pierwszego planu"* (lub też *"Widok pierwszoplanowy"*). Jest to technika wykorzystywana w modelarstwie, dająca podgląd obrazu z kabiny zdalnie sterowanego pojazdu. Pozwala to na lepszą orientację w terenie, oraz lepsze wykrywanie przeszkód i problemów z pojazdem.



Rysunek 7.5: Schemat podłączenia i działania FPV

System FPV zbudowany jest z:

Kamery analogowej umieszczonej na modelu RC,

Zestawu transmitującego zdalnie obraz z modelu ( zestaw Nadajnik-odbiornik)

Ekrana pokazującego obraz z kamery na ziemi,

Dodatków pokazujących parametry lotu (OSD)

Każdy z elementów infrastruktury FPV musi być przystosowany do pracy z modelami latającymi. W przypadku budowanego modelu należało postawić przez wybór kilka założeń, jakie powinien spełniać FPV:

Zasięg ok 500m - zasięg i moc nadajnika ma tutaj duże znaczenie. Projektowany quadrocopter poruszać się będzie po otwartej przestrzeni, jak i we wnętrzu budynku. Moc nadajnika powinna być na tyle duża by móc rekompensować straty sygnału wynikające ze betonowych ścian.

mała waga - cały moduł musi być stosunkowo lekki. Na budowanym dronie znajdzie się wiele dodatkowych elementów podnoszących jego wagę, dlatego każdy z nich powinien być możliwie jak najlżejszy.

kamera wykorzystana w module powinna mieć stosunkowo jak najwyższą rozdzielcość. Jednak w związku z małą przepustowością nadajnika należy unikać wysokich rozdzielcości HD. Wartość, która jest wykorzystywana w większości rozwiązań to rozdzielcość pomiędzy 520 TVL a 650 TVL.

Wykorzystanie gotowych zestawów ? pozwoli to uniknąć problemów przy podłączaniu, konfigurowaniu i obsłudze całego zestawu.

Przedkład rozwiązań FPV rozpoczęto od przejrzenia forów poświęconych tej dziedzinie modelarstwa. Zdobyte tam informacje i porady pozwoliły na wybór jednego gotowego już zestawu ze sklepu internetowego [www.rctrax.pl](http://www.rctrax.pl). **Nadajnik-odbiornik-kamera.**

Główne cechy zestawu:

- Częstotliwość pracy 5,8 GHz
- Moc znamieniowa nadajnika 500mW



Rysunek 7.6: Wybrany gotowy zestaw FPV

- Niewielkie rozmiary nadajnika
- Zastosowanie innej częstotliwości pracy niż stosowane w sterowaniu modelami
- Niewielkie zapotrzebowanie na energię
- Waga wraz z anteną 65,5g
- Kamera CCD 1/3 SONY
- Rozdzielcość 420TVL
- Obiektyw 3,6mm

Wybrany zestaw to jeden z najlepszych zestawów do transmisji video FPV, stosowany również przez profesjonalistów do filmowania z powietrza. Pomimo dużego zasięgu cechuje się odpornością na zakłócenia.

Przesyłany obraz jest w formacie analogowym, dlatego aby móc go oglądać na ziemi potrzebny jest ekran.

W tym celu można używać zwykłego telewizora, ekranu w stacji naziemnej lub laptopa zainstalowaną kartą telewizyjną. Powyższe sposoby sprawdzają się jednak kiedy korzystamy z FPV jako sprzętu nagrywającego, a dronem latamy utrzymując go w zasięgu wzroku. Kiedy jednak chcemy latać pojazdem po za zasięgiem wzroku, lub podczas lotu chcemy obserwować otoczenie z perspektywy quadrocoptera rozwiązania te powodują ciągłą konieczność zerkania na ekran. Pole widzenia zostaje ciągle zakłócone przez otoczenie, a operator musi stać przy ekranie.

W przypadku tego projektu, quadrocopter ma wlecieć do wnętrza budynku. Spowoduje to utratę kontaktu wzrokowego pilota z maszyną. Aby mógł on widzieć obraz z wnętrza budynku a jednocześnie sprawnie pilotować zaproponowano użycie gogli FPV.

Jest to specjalne urządzenie, składające się z ekranu LCD oraz specjalnej soczewki, zamknięte w formie zakładanych na głowę gogli. Używając ich, pilot ma wrażenie jakby stał przed bardzo dużym ekranem, jednocześnie mogąc objąć wzrokiem całą jego powierzchnię.

Wybrany zestaw FPV nie został zakupiony, gdyż okazało się że na potrzeby tego projektu zamontowany zostanie zestaw udostępniony przez Koło Naukowe JEDI.



Rysunek 7.7: Przykład obrazu widzianego w goglachFPV FatShark Atitude V2



Rysunek 7.8: Gogle FPV Fatshark Dominator

## 8. Stabilizacja w punkcie

Stabilizacja quadrocoptera w punkcie to jeden z najważniejszych elementów tej pracy. Zapewnia ona równowagę i utrzymanie pozycji podczas lotu quadrocoptera w trybie autonomicznym. Do podstawowych obowiązków pilota należy nadawanie i utrzymywanie kierunku lotu, obrotów, przechyleń i zmian wysokości poprzez zmianę gazu. W założeniach projektowych wielowirnikowiec ma utrzymywać ustaloną, zapamiętaną wysokość oraz stabilizować się w poziomie po puszczeniu drążków sterowniczych przez pilota oraz w trybie lotu autonomicznego.

### 8.1. Algorytmy rozpoznawania przesunięcia

Ze względu na formę zawodów, quadrocopter będzie poruszał się w zamkniętym pomieszczeniu, gdzie jak wiadomo sygnał GPS zawodzi. Dlatego jednym z ważnych zadań niniejszego projektu, była detekcja przesunięcia, ruchu quadrocoptera, która powinna być dokonywana automatycznie przy wykorzystaniu sekwencji obrazów z kamery wizyjnej. Wizualna odometria może współpracować z innymi rozwiązaniami, dlatego do stabilizacji w punkcie system wizyjny zostanie połączony z czujnikami laserowymi oraz ultradźwiękowymi. Zminimalizuje to błąd estymacji ruchu, a co za tym idzie, będzie można przeciwdziałać dryfowi. Ponieważ projekt opiera się na platformie ROS założono, że istnieją już gotowe rozwiązania problemu detekcji ruchu kamery i dokonano przeglądu dostępnych algorytmów. Do implementacji i badań wybrano algorytm Lucas–Kanade oraz dwa algorytmy monoSLAM PTAM i SVO.

#### 8.1.1. Algorytm Lucas—Kanade

Jednym z podejść do wykrywania ruchu na obrazie z kamery jest wykorzystanie tzw. „Optical Flow” („przepływ optyczny”) [4], czyli wzorca ruchu, który dla obrazów 2D jest względną prędkością wyznaczoną dla wybranych pikseli na dwóch zdjęciach, a w przypadku tworzonej aplikacji, dla dwóch sąsiednich klatek nagrania. Wydaje się to najbardziej naturalny sposób podejścia do problemu. Optical Flow jest określony poprzez dwa podstawowe założenia:

1. Jasność pikseli nie zmienia się pomiędzy dwoma klatkami,
2. Sąsiednie piksele są przesunięte o taką samą odległość ( $\Delta x, \Delta y$ ):

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t). \quad (8.1)$$

Zakładając, że to przesunięcie jest małe, prawą stronę równania rozwija się w szereg Taylora i otrzymuje:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t + o(\Delta^2), \quad (8.2)$$

gdzie  $o(\Delta^2)$  to czynniki coraz wyższych rzędów, które mogą zostać pominięte. Z tego otrzymuje się następujące równania:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t = 0, \quad (8.3)$$

lub

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\Delta t}{\Delta t} = 0, \quad (8.4)$$

co w rezultacie daje:

$$\frac{\partial I}{\partial x} V_x + \frac{\partial I}{\partial y} V_y + \frac{\partial I}{\partial t} = 0, \quad (8.5)$$

gdzie  $V_x, V_y$  to składowe  $x$  i  $y$  prędkości albo inaczej przepływ optyczny  $I(x, y, t)$ , natomiast  $\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}$  i  $\frac{\partial I}{\partial t}$  to pochodne cząstkowe obrazu w  $(x, y, t)$ . Inaczej można to przedstawić jako:

$$I_x V_x + I_y V_y = -I_t. \quad (8.6)$$

W równaniu tym są jednak dwie niewiadome ( $V_x$  i  $V_y$ ), co uniemożliwia jego rozwiązańe w sposób dokładny i jednoznaczny. Jedną z metod, która przybliża jego rozwiązanie, to algorytm Lucasa-Kanade [8]. Metoda ta opiera się na założeniu, że przesunięcie zawartości obrazu między dwoma ramkami jest minimalne i zakłada, że sąsiedztwo piksela (9 znajdujących się dookoła pikseli) ma podobnych ruch. Wobec tego jest rozwiązywanie 9. równań z dwiema zmiennymi, czyli układ jest nadokreślony:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1} I_x(q_i)^2 & \sum_{i=1} I_x(q_i)I_y(q_i) \\ \sum_{i=1} I_y(q_i)I_x(q_i) & \sum_{i=1} I_y(q_i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1} I_x(q_i)I_t(q_i) \\ \sum_{i=1} I_y(q_i)I_t(q_i) \end{bmatrix},$$

gdzie  $i=1$  do 9. Algorytm estymuje rozwiązanie poprzez wykorzystanie metody najmniejszych kwadratów [5].

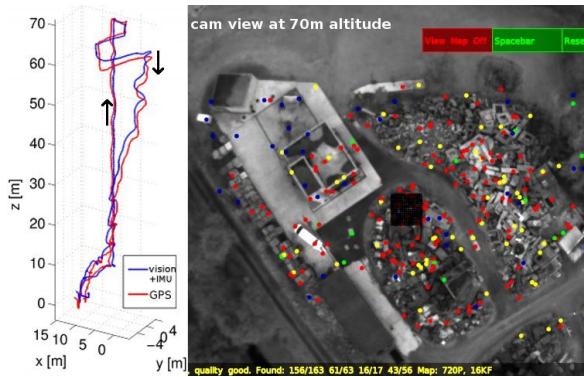
### 8.1.2. Zmodyfikowany PTAM

#### Algorytm PTAM - Parallel Tracking and Mapping

PTAM jest algorytmem rozwiążającym to samo zadanie, co algorytm monoSLAM, zaproponowanym w 2007 roku przez George Klein. Podejście to wykorzystuje jedną kamerę 6-DOF do śledzenia ruchu kamery i mapowania otoczenia tworząc chmurę punktów 8.1. Algorytm ten wyróżnia się spośród innych algorytmów monoSLAM, tym że zadanie śledzenia ruchu i mapowania jest realizowane w czasie rzeczywistym. Różnicę tej metody można podsumować w kilku punktach:

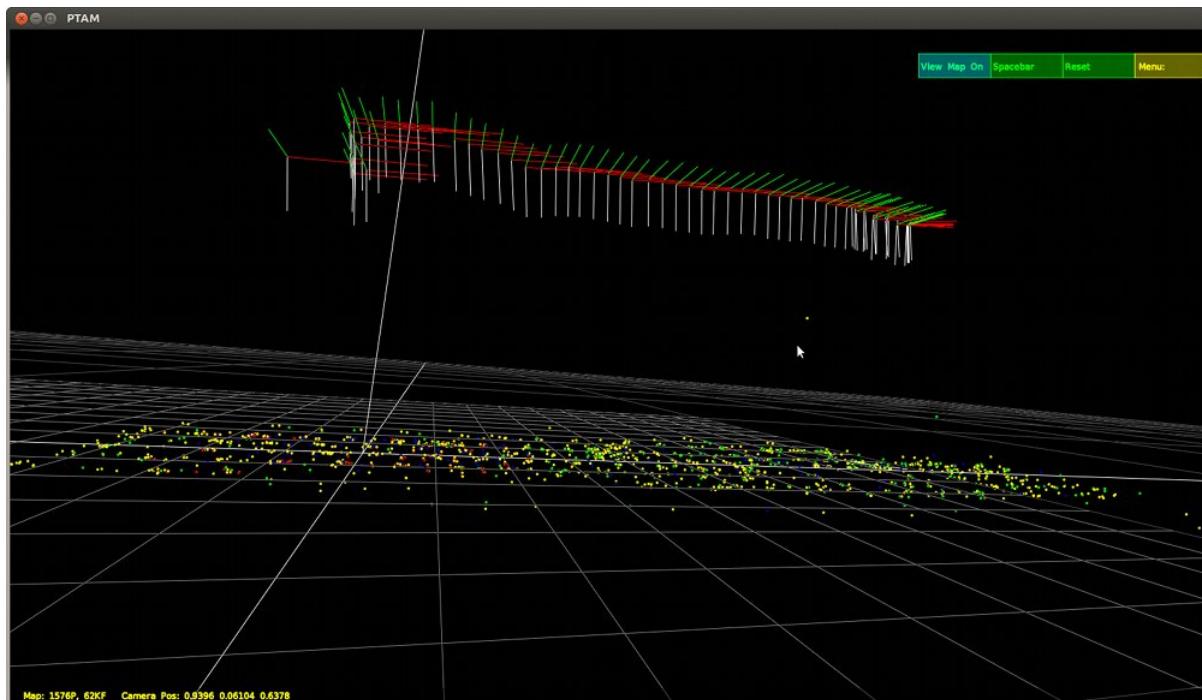
- śledzenie i mapowanie odbywa się w dwóch równoległych wątkach,
- mapowanie jest oparte na klatkach kluczowych, które są przetwarzane przy użyciu metod wsadowych (Bundle Adjustment),
- mapa jest gęsto zainicjowana przez pary punktów stereo, gdzie wykorzystano algorytm pięciu punktów,
- nowe punkty są inicjowane przez wyszukiwanie epipolarne.

Algorytm PTAM wyszczególnia dwa procesy: śledzenia i mapowania 8.2. Proces śledzenia przemieszczenia kamery, przy założeniu, że posiadamy mapę punktów 3D, odbywa w następujących krokach:

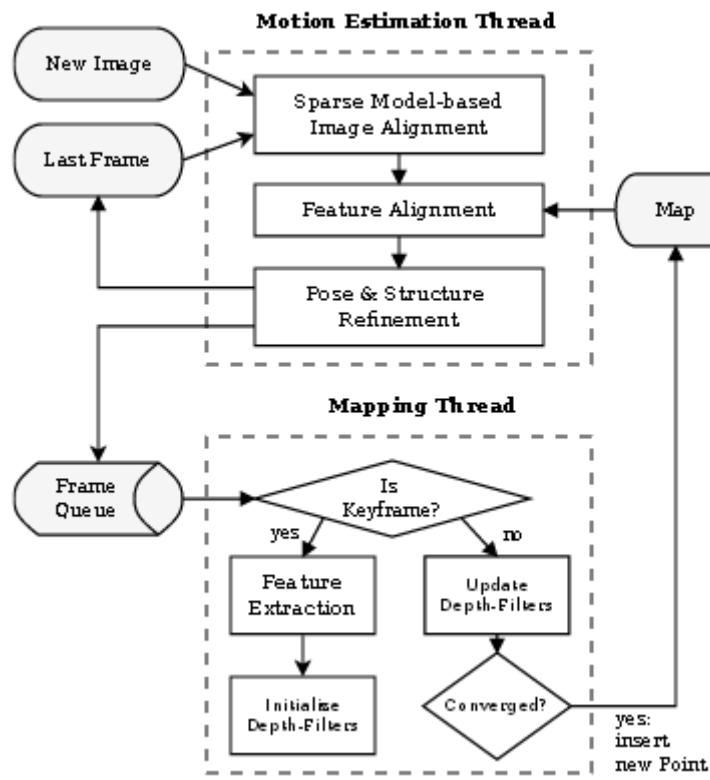


Rysunek 8.1: PTAM - Parallel Tracking and Mapping [10]

- pobierana jest nowa ramka z aparatu z wyestymowaną wcześniejsza pozycja kamery z modelu przemieszczenia,
  - mapa punktów jest przewidywana przez podążanie za wcześniej wyestymowaną pozycją ramki,
  - mała liczba (ok. 20-50) punktów jest wyszukiwana przy dużym promieniu na zdjęciu (do tych punktów odnosić się będzie przesunięcie kamery),
  - następnie aktualizowana jest pozycja kamery, która dopasowana jest według tych punktów,
  - punkty są odwzorowywane na zdjęciu i następuje wyszukiwanie większej ilości punktów (ok. 1000),
  - finalnie wyestymowana pozycja kamery jest obliczana z wszystkich zebranych punktów.
- Zadanie mapowania odbywa się w dwóch etapach. Po pierwsze jest budowana wstępna mapa przy wykorzystaniu technik stereo. Następnie mapa ta jest ciągle wzbogacana i udoskonalana przez otrzymywanie chmur punktów z nowych klatek kluczowych oddawanych przez system śledzenia.



Rysunek 8.2: PTAM - śledzenie i mapowanie [10]



Rysunek 8.3: Schemat algorytmu SVO [6]

### 8.1.3. Algorytm SVO

Program SVO (Semi-direct Monocular Visual Odometry) [6] jest zaimplementowany w ROSie. Wykorzystuje on obrazy dostarczone z pokładowej kamery. Quadrocopter zbiera informacje ze środowiska poprzez zdjęcia w dyskretnych chwilach czasu

$$I_1, I_2, \dots, I_n.$$

Odpowiednie macierze transformacji opisują relację pomiędzy dwiema pozycjami kamery

$$A_k = \begin{bmatrix} R_{k,k-1} & T_{k,k-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

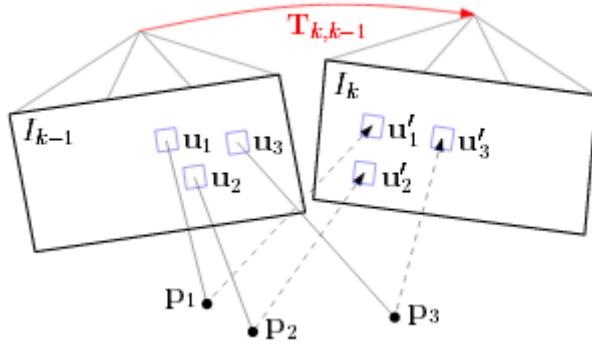
Pozycję kamery można obliczyć następująco

$$C_k = C_{k-1} \cdot A_k,$$

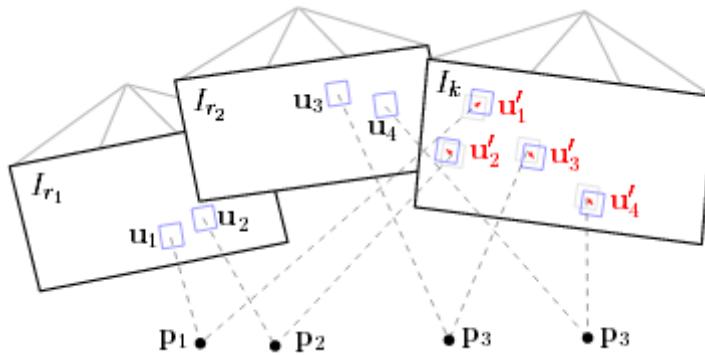
począwszy od znanej pozycji  $C_0$ , ustawianej jako parametr. Głównym zadaniem algorytmu jest obliczenie transformacji  $A_k$ , po to żeby obliczyć pozycję kamery  $C_k$ , a co za tym idzie jej trajektorii, wykorzystując do tego obrazy  $I_k$ . Rysunek 8.3 przedstawia ogólny schemat algorytmu SVO. Jest on podzielony na dwa główne wątki, z czego jawnie korzystamy tylko z wątku estymującego ruch kamery. Można za pomocą tego rozwiązania zaimplementować algorytm SLAM.

### Etapy algorytmu SVO

Estymację ruchu/położenia kamery można podzielić na trzy etapy



Rysunek 8.4: pierwszy etap [6]

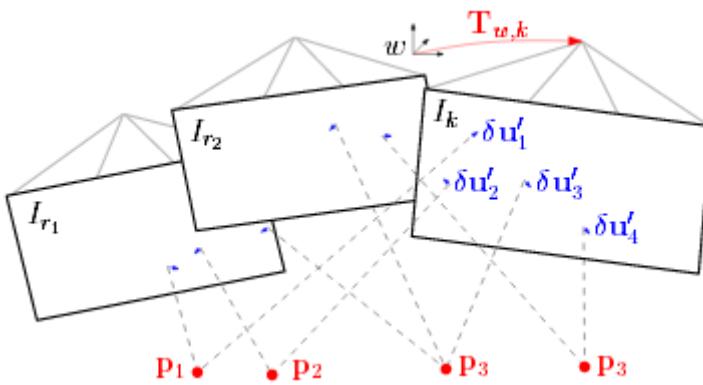


Rysunek 8.5: drugi etap [6]

- etap pierwszy Rysunek 8.4 przedstawia zmianę pozycji między wcześniejszą i obecną ramką danych pośrednio przenosi pozycję  $p$  na odwzorowanie punktów w nowym obrazie. Algorytm minimalizuje fotometryczny błąd poprawki dotyczącej tych samych 3D punktów  $p$ .
- drugi etap Ze względu na niedokładności w punktach 3D oraz w estymacji pozycji kamery, fotometryczny błąd pomiędzy odpowiadającymi poprawkami (niebieskie kwadraty) w obecnej ramce i poprzedniej dodatkowo minimalizuje się przez optymalizację pozycji 2D każdego fragmentu indywidualnie, co jest pokazane na rysunku 8.5.
- trzeci etap Rysunek 8.6 wizualizuje ostatni etap, w którym to estymacja ruchu, pozycja kamery i struktura (punkty 3D) są optymalizowane, aby zminimalizować błąd odwzorowania, który został obliczony w poprzednim kroku.

## 8.2. Implementacja algorytmów przesunięcia

W przypadku algorytmów monoSLAM, implementacja sprowadzała się do zainstalowania znalezionych paczek z algorytmami pod docelową platformą ROS, ich uruchomienie oraz ewentualne modyfikacje związane z potrzebami projektu. Biorąc pod uwagę algorytm Luca's Kanade, został on napisany samodzielnie i przeniesiony na platformę ROS .



Rysunek 8.6: trzeci etap [6]

### 8.2.1. Algorytm Lucas—Kanade

Algorytm detekcji przesunięcia Lucasa-Kanade został oparty o implementację z biblioteki OpenCV 3.0b. Następnie został on przystosowany do platformy ROS. Całość została zaimplementowana w języku Python.

Bibliotekę skompilowano pod docelową platformę, Ubuntu 12.04 server, wersja 32 bitowa. Następnie zaimplementowano specjalny *topic* pod platformę ROS, który obliczał średnią ze składowych x i y.

Kamera, z której korzysta algorytm jest skierowana w dół. Działa on poprawnie, jeśli obraz zawiera odpowiednią liczbę punktów charakterystycznych, dla których można jednoznacznie określić przesunięcie. Lista wektorów przesunięć jest uaktualniana z każdą nową klatką obrazu.

Algorytm nie jest algorytmem uniwersalnym. Istnieją pewne okoliczności, w których należy ograniczyć zaufanie co do wartości jakie zwraca.

Pewnym problemem jest szum, który jest wykrywany jako ruch. Jednak można ten problem wyeliminować, na przykład poprzez nałożenie odpowiednich masek na obraz. Wszystko zależy od jakości sensora użytej kamery.

Innym poważnym problemem, który wynika z samych założeń dotyczących działania algorytmu jest zmiana jasności obrazu. Algorytm zakłada, że jest ona stała. Problem ten może być istotny w przypadku pomieszczeń oświetlanych świetlówkami. Jeśli kamera wychwyci jej migotanie, algorytm może nie zadziałać poprawnie.

Algorytm operuje na płaszczyźnie XY, a wysokość na jakiej umieszczona jest kamera powinna być stała. W przypadku kiedy się ona zmienia, wartości jakie zwraca mogą być niepoprawne.

### 8.2.2. Zmodyfikowany PTAM

#### PTAM a ROS

Ponieważ algorytm wykrywania przemieszczenia miał być stosowany na platformie ROS, znaleziono zmodyfikowaną wersję algorytmu PTAM. Modyfikacje te odnosząły się głównie do kompatybilności kodu z platformą ROS oraz możliwości uruchomienia algorytmu na platformach z mocno ograniczoną możliwością obliczeniową [9]. Zmodyfikowana wersja PTAM korzysta z komponentów platformy ROS dzięki temu uzyskano możliwości:

- obraz wejściowy uzyskiwany jest z węzła, a obraz zweryfikowany wraz ze swoimi komponentami jest publikowany. Umożliwia to użytkownikowi kontrolę nad algorytmem bez interfejsu człowiek-maszyna.

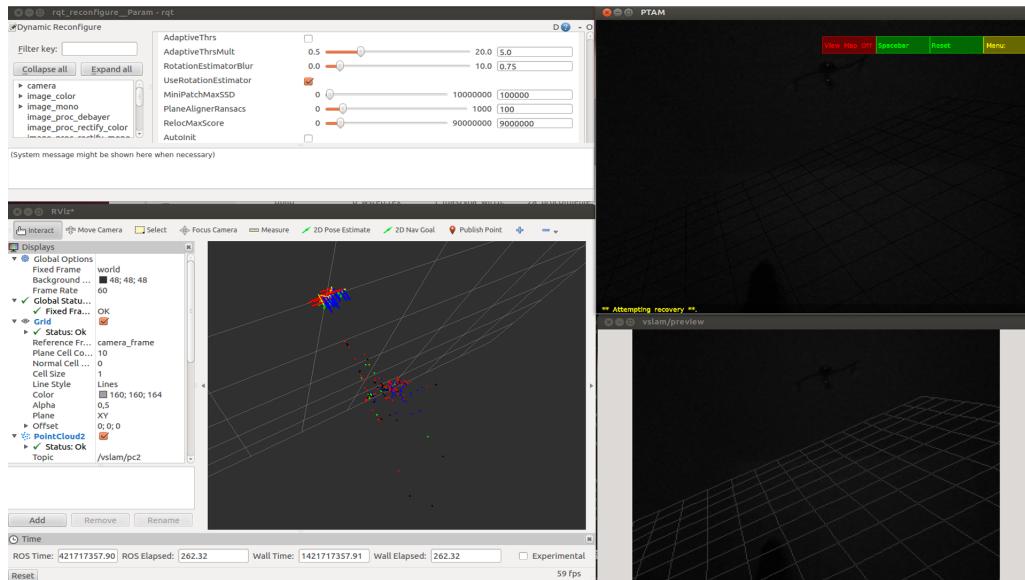


Rysunek 8.7: Przykład działania detekcji ruchu w oparciu o algorytm Lucasa-Kanade

- Wizualizacja trajektorii kamery i chmury punktów została przeniesiona do RVIZ<sup>1</sup> dzięki czemu można dokonać wizualizacji w stacji naziemnej, w razie potrzeby.
- Parametry regulacyjne mogą być zmieniane dynamicznie w specjalnym GUI.

### Uruchomienie kamery

Do uruchomienia algorytmu PTAM potrzebny jest monochromatyczny obraz z kamery, która została uruchomiona przy użyciu sterowników z paczki *gscam* oraz *image\_proc*. Dla ułatwienia uruchamiania algorytmu został napisany plik launch, który uruchamia kamerę, algorytm i komponenty wspomagające jego działanie jak: *rviz*, *rqt\_reconfigurator* 8.8.

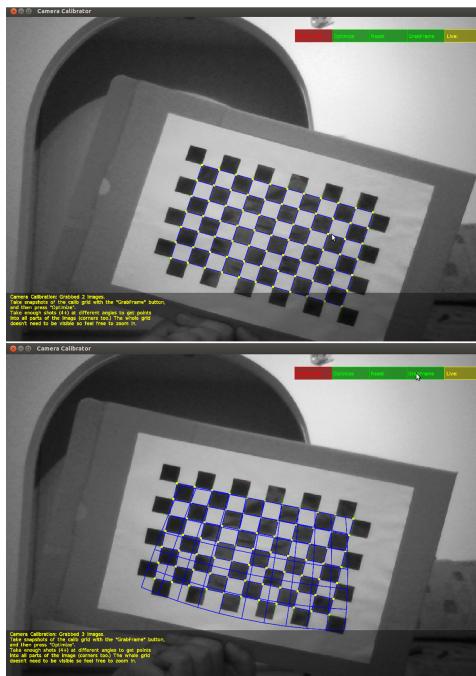


Rysunek 8.8: PTAM i komponenty wspomagające

<sup>1</sup> Rviz - moduł ROS do wizualizacji 3D. Umożliwia wyświetlanie danych z udostępnianych topiców jak: obraz z kamery, jej położenie, dane z sensorów itp.

## Kalibracja kamery

Do prawidłowego działania algorytmu ptam należy skalibrować używaną kamerę. Do tej czynności posłużył wbudowany w paczkę algorytmu moduł do kalibracji 8.9. Kalibracja kamery polegała na wykonaniu dziesięciu zdjęć „szachownicy”, a następnie pozwoleniu wykonania optymalizacji wbudowanemu modułowi. Wynikiem powyższej operacji był plik \*.yaml<sup>2</sup>.



Rysunek 8.9: PTAM - kalibracja kamery

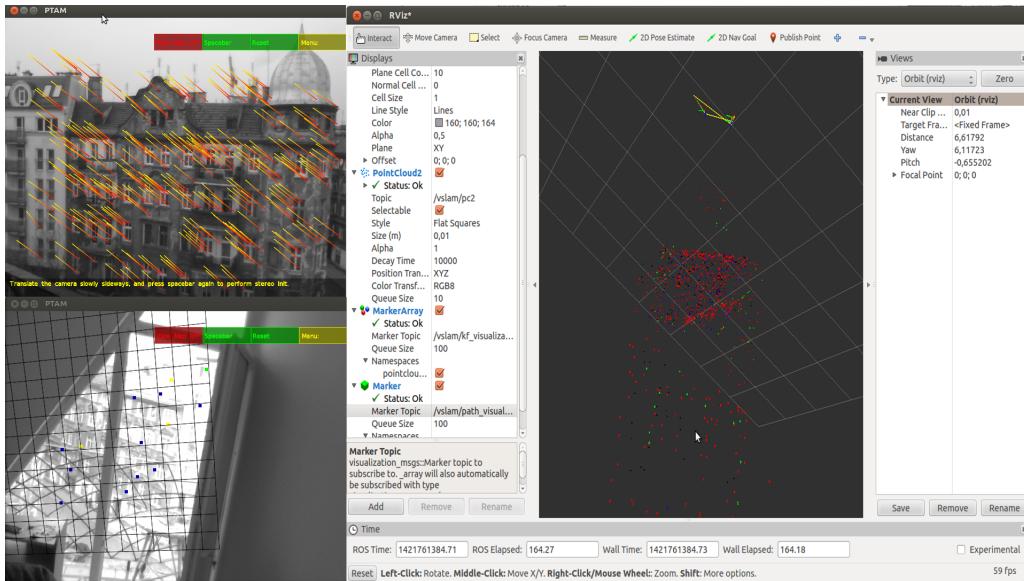
## Uruchomienie algorytmu

Po uzyskaniu obrazu monochromatycznego oraz skalibrowaniu kamery można przejść do uruchomienia algorytmu. Algorytm uruchamia wcześniej wspomniany plik launch, a dokonuje się tego komendą: `roslaunch ptam ptam.launch`. Po uruchomieniu mamy dostęp do podglądu z kamery, chmury punktów i ścieżki przesunięcia w *rvizie* oraz gui z dynamiczną konfiguracją umożliwiającą dostosowywanie działania algorytmu do naszych potrzeb. Kolejnym krokiem jest inicjalizacja pierwszego przesunięcia. Dokonać jej można przez naciśnięcie spacji, przesunięcie kamery i ponowne naciśnięcie spacji. Należy pamiętać, aby przesuwając kamerę rzeczywiście zmienić jej pozycję, a nie tylko kąt obrotu. Ilustruje to rysunek 8.10. Po wykonaniu inicjalizacji przesunięcia, możemy obserwować w *rvizie* zbieraną chmurę punktów oraz przesunięcie kamery reprezentowane przez małe układy współrzędnych połączone żółtą linią.

## Pozycja kamery

Paczka algorytmu PTAM publikuje pozycje kamery w topicu `/vslam/pose`. Struktura topicu i uzyskanie dostępu do niego jest takie same jak w algorytmie SV0 i zostało to opisane w kolejnym rozdziale.

<sup>2</sup> Uwaga, otrzymany plik jest specjalnie dopasowany dla algorytmu PTAM



Rysunek 8.10: PTAM - działanie algorytmu

## Modyfikacje

Na potrzeby projektu zautomatyzowano proces inicjalizacji pierwszego przesunięcia.

### 8.2.3. Algorytm SVO

#### Uruchomienie kamery

Do działania algorytmu SVO jest potrzebny obraz z kamery, która została uruchomiona dzięki sterownikom zaimplementowanym w paczce *usb\_cam*. Po uruchomieniu algorytmu, należy uruchomić plik launchowy, dostarczający obraz z kamery. Poniższy wydruk przedstawia uruchomienie kamery.

Wydruk 8.1: Uruchomienie kamery

```
<launch>
  <node name="usb_cam" pkg="usb_cam" type="usb_cam_node"
    / output="screen" >
    <param name="video_device" value="/dev/video0" />
    <param name="image_width" value="640" />
    <param name="image_height" value="480" />
    <param name="pixel_format" value="mjpeg" />
    <param name="camera_frame_id" value="usb_cam" />
    <param name="io_method" value="mmap"/>
  </node>
</launch>
```

#### Kalibracja kamery

Do uruchomienia algorytmu potrzebny jest plik kalibracyjny. Kalibrację kamery wykonano standardowym narzędziem zaimplementowanym w ROSie w paczce *camera\_calibration*. Wynikiem tej operacji jest plik \*.yaml. Na potrzeby algorytmu przekonwertowano plik \*.yml na format \*.yaml. Rysunek 8.11 przedstawia ręczne przekonwertowanie pliku kalibracyjnego.

```

cam_model: Pinhole
cam_width: 640
cam_height: 480
cam_fx: 626.747758
cam_fy: 625.606308
cam_cx: 317.435978
cam_cy: 240.345658
cam_d0: 0.124513
cam_d1: -0.313055
cam_d2: -0.001146
cam_d3: -0.001040
image_width: 640
image_height: 480
camera_name: narrow_stereo
camera_matrix:
  rows: 3
  cols: 3
  data: [626.747758, 0, 317.435978, 0, 625.606308, 240.345658, 0, 0, 1]
distortion_model: plumb_bob
distortion_coefficients:
  rows: 1
  cols: 5
  data: [0.124513, -0.313055, -0.001146, -0.00104, 0]
rectification_matrix:
  rows: 3
  cols: 3
  data: [1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1]
projection_matrix:
  rows: 3
  cols: 4
  data: [632.876465, 0, 316.387552, 0, 0, 632.346741, 239.493128, 0, 0, 0, 1, 0]

```

Rysunek 8.11: Konwersja pliku \*.yml na \*.yaml

## Pozycja kamery

Do dalszego przetwarzania informacji dostarczonych z działającej paczki SVO można wykorzystać wiadomość publikowaną poprzez topic `/svo/points`. Rysunek 8.12 pokazuje strukturę kluczowego topicu SVO. Typ wiadomości to `visualization_msgs`. Wiadomość ta jest zbiorem informacji używanych przez takie pakiety jak, np. `rviz`. Główną wiadomością w tym topicu jest `visualization_msgs/Marker`. Do dalszego przetwarzania użyto komunikatu zawierającego informację o pozycji kamery. Można tą informację uzyskać poprzez subskrybowanie się do tego topicu.

## Modyfikacja

Algorytm SVO posiada wątek użytkownika. Zdecydowano się na wyłącznie tego wątku. Program zmodyfikowano tak, by działał automatycznie, bez czekania na akcję użytkownika, który decydował o starcie algorytmu, przy jego wcześniejszym resecie.

## 8.3. Stabilizacja w poziomie

Problem stabilizacji w poziomie sprowadza się do utrzymania zadanej orientacji. Do stabilizacji można wykorzystać czujniki inercyjne (akcelerometr, żyroskop), czujniki odległości czy kamery (przetwarzanie obrazów). Stabilizacja poziomu dla quadrocoptera jest istotna, ponieważ minimalna odchyłka od poziomej orientacji powoduje zmianę kierunku siły ciągu i destabilizuje układ. Dodatkowo zachowanie orientacji horyzontalnej znacznie ułatwia sterowanie obiektymi latającymi. W tej sekcji będzie mowa o stabilizowaniu w poziomie z wykorzystaniem wielu sensorów.

### 8.3.1. Fuzja sensoryczna

Fuzja sensoryczna to proces polegający na łączeniu informacji wniesionych przez pojedyncze czujniki aby uzyskać informację o stanie dynamicznym obiektu. Sygnały pocho-

```
header:  
  seq: 5892  
  stamp:  
    secs: 1418673322  
    nsecs: 170325262  
    frame_id: /world  
ns: trajectory  
id: 8195  
type: 1  
action: 0  
pose:  
  position:  
    x: -0.00851521046703  
    y: -0.00349843886924  
    z: 0.0106530645546  
  orientation:  
    x: 0.0  
    y: 0.0  
    z: 0.0  
    w: 0.0  
scale:  
  x: 0.006  
  y: 0.006  
  z: 0.006  
std_msgs/Header header  
  uint32 seq  
  time stamp  
  string frame_id  
string ns  
int32 id  
int32 type  
int32 action  
geometry_msgs/Pose pose  
  geometry_msgs/Point position  
    float64 x  
    float64 y  
    float64 z  
  geometry_msgs/Quaternion orientation  
    float64 x  
    float64 y  
    float64 z  
    float64 w  
geometry_msgs/Vector3 scale  
  float64 x  
  float64 y  
  float64 z
```

Rysunek 8.12: Wycinek informacji zawartych w topicu `/svo/points`

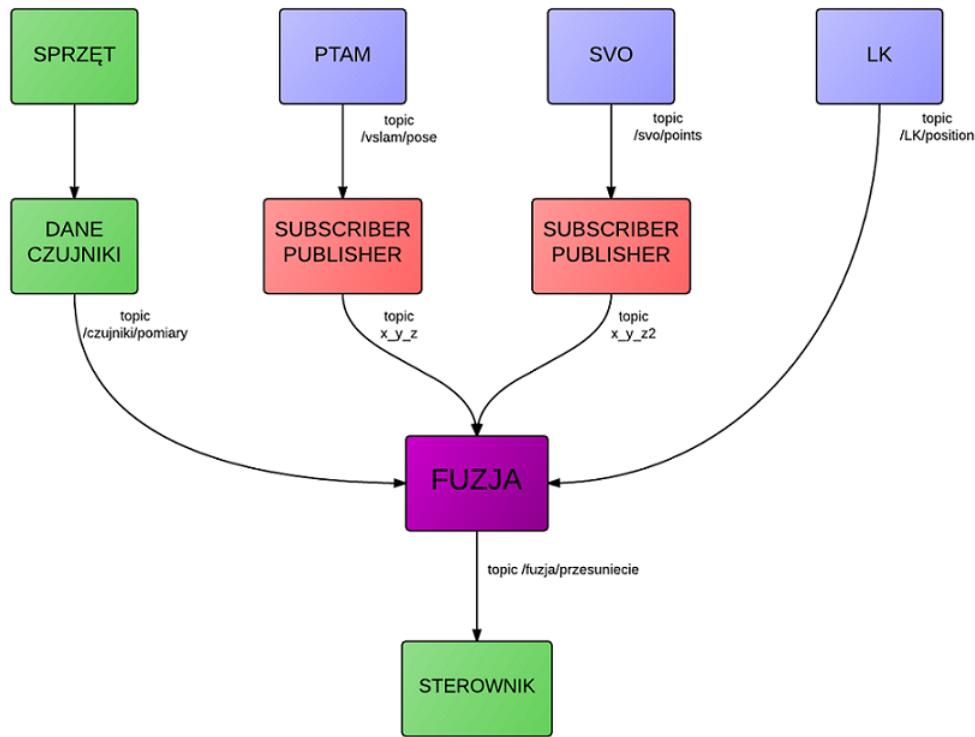
dzące z fuzji są bardziej wartościowe gdyż proces ten eliminuje zaszumione lub błędne próbki. W praktyce fuzja sygnałów to zastosowanie matematycznego algorytmu filtracji oraz algorytmu decydującego, który pomiar jest wiarygodny.

## Czujniki wykorzystywane w fuzji

Do fuzji wykorzystano czujniki odległości zorientowane na quadrocopterze horyzontalnie (5 czujników SHARP) oraz kamerę.

## Realizacja

Rysunek 8.13 przedstawia schemat realizacji fuzji sygnałów z czujników odległości oraz z kamery.



Rysunek 8.13: Schemat fuzji sygnałów z czujników odległości oraz z kamery

Do realizacji fuzji z algorytmu SVO oraz PTAM pozyskiwane są informacje o pozycji kamery. Dzięki znanej pozycji początkowej  $[x_0, y_0, z_0]$  kamery można obliczyć przesunięcie. Na tej podstawie wysyłana jest wiadomość do sterownika o przesunięciu, uzyskanym z algorytmu wizualnego. Pozycję kamery należy przekonwertować na pozycję quadrocoptera przez odpowiednią macierz rotacji  $Rot(Y, \alpha)$ . Kamera zamontowana jest w dolnej, centralnej części quadrocoptera, skierowana jest w pionowo w dół.

$$Rot(Y, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & 0 & \sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Wiadomość wysyłana do sterownika jest umieszczana w temacie o typie *geometry-msg/Vector3*. Poniższy wydruk pokazuje funkcję rosową *Callback*, która uzyskuje informację o pozycji kamery z tematu **/svo/points**, którego typ to *visualization-msgs/Marker*.

Wydruk 8.2: Pobranie wartości położenia kamery

```

1 void chatterCallback(const visualization_msgs::
2 /Marker::ConstPtr& msg)
3 {
4     t[0][0]=msg->pose.position.z;
5     t[0][1]=msg->pose.position.y;
6     t[0][2]=msg->pose.position.x;
7 }
```

W taki sam sposób uzyskiwany jest pomiar pozycji kamery z algorytmu PTAM z tematu **/vslam/pose**. Wiadomość ta jest typu *geometry-msgs/PoseWithCovarianceStamped*. Podczas testów algorytmów wizualnych spostrzeżono lepsze działanie algorytmu PTAM.

Dlatego zdecydowano się oprzeć fuzję sensoryczną na pomiarach dostarczonych z tego algorytmu. Jeżeli program się zawiesi, wtedy pobierane są informacje z programu SVO. Jeżeli i ten zawiedzie, informacja o przesunięciu jest dostarczona z czujników odległości.

Wydruk 8.3: Część fuzji wykorzystująca wizualne algorytmy wykrywania przesunięcia oraz czujniki odległości

```

1 geometry_msgs::Vector3 Msg;
2 if((t[1][0]-x_0)==0 && (t[1][1]-y_0)==0 && (t[1][2]-z_0)==0)
3 {
4     if((t[0][0]-xx_0)==0 && /
5 (t[0][1]-yy_0)==0 && (t[0][2]-zz_0)==0)
6     {
7         //czujniki
8         czujniki_ref[0]=d[0]; //linia 1 X
9         czujniki_ref[1]=d[1]; //linia 1 X
10        czujniki_ref[4]=d[4]; //linia 2 X
11        czujniki_ref[5]=d[5]; //linia 2 X
12        Msg.x(czujniki_ref[5]-d[5]);
13        Msg.y(czujniki_ref[6]-d[6]); // Y
14    }
15    else{
16        Msg.x=t[1][0]-xx_0;
17        Msg.y=t[1][1]-yy_0;
18        Msg.z=t[1][2]-zz_0;
19    }
20    else{
21        Msg.x=t[0][0]-x_0;
22        Msg.y=t[0][1]-y_0;
23        Msg.z=t[0][2]-z_0;
24    }
25    chatter_pub.publish(Msg);

```

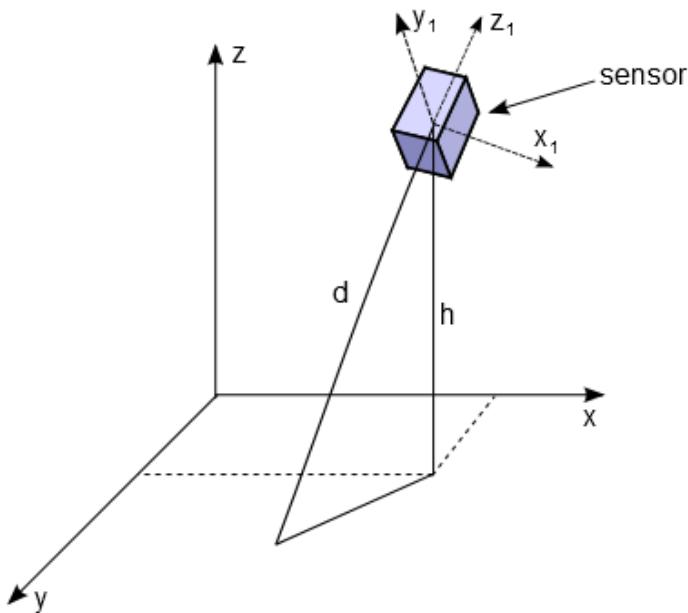
Czujniki odległości dostarczają przesunięcia liniowe w lokalnym układzie współrzędnych.

## 8.4. Stabilizacja w pionie

### 8.4.1. Fuzja sensoryczna

W celu zapewnienia stabilizacji wysokości quadrocoptera realizowany jest algorytm sterowania, wykorzystujący fuzję danych z sensorów odległości Sharp oraz orientacji quadrocoptera. Zadaniem fuzji danych pomiarowych jest obliczenie rzeczywistej wysokości quadrocoptera względem podłoża. Obliczenie tej wysokości posiadaając jedynie pomiary z sensorów odległości nie jest możliwe, ze względu na znaczne zmiany orientacji robota w trakcie lotu, co eliminuje bezpośrednie wykorzystanie zmierzonej wartości jako wysokości.

Na rysunku 8.14 przedstawiono zewnętrzny układ odniesienia:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  oraz układ lokalny:  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $z_1$ , związany z sensorem odległości i jednocześnie robotem latającym. Posiadając orientację quadrocoptera odczytaną ze sterownika Pixhawk, wykorzystując zależności geometryczne, można wyznaczyć wysokość rzeczywistą  $h$  na podstawie zmierzonej odległości  $d$ .



Rysunek 8.14: Zależności geometryczne rzeczywistej wysokości od mierzonej odległości

### Algorytm stabilizacji wysokości

Dane wejściowe:

- $d_1, d_2$  – pomiary z dwóch czujników odległości: górnego i dolnego,
- $q$  – orientacja quadrocoptera względem zewnętrznego układu odniesienia, w postaci kwaternionu (z Pixhawka),

Dane wyjściowe:

- $F_z$  – siła w osi  $z$  quadrocoptera.

Kroki algorytmu:

1. Obliczenie rzeczywistych odległości od podłożu i sufitu na podstawie odczytów sensorów oraz orientacji quadrocoptera względem zewnętrznego układu odniesienia.
2. Wybranie do stabilizacji odległości, która wolniej się zmienia (mniejsza pochodna). Celem jest uniezależnienie wysokości od niewielkich przeszkód.
3. Regulator PID:
  - wejście: wybrana wysokość  $h$ ,
  - wyjście: sterowanie w postaci siły w osi  $Z$ .

### Czujniki wykorzystywane w fuzji

#### Realizacja

Algorytm stabilizacji wysokości zrealizowano w postaci pakietu środowiska ROS. Zasada działania pakietu opiera się na pobieraniu pomiarów czujników odległości z topiku /pomiary oraz orientacji quadrocoptera ze sterownika Pixhawk za pośrednictwem protokołu mavlink, pakietu mavros oraz topiku /mavros/imu/data. Wysokość robota publikowana jest w topiku /height.

W celu obliczenia rzeczywistej wysokości quadrocoptera, jego orientacja w postaci kwaternionu jest konwertowana do reprezentacji w postaci kątów RPY (Roll, Pitch, Yaw), z wykorzystaniem przedstawionej poniżej funkcji.

Wydruk 8.4: Funkcja konwertująca orientację w postaci kwaternionów do kątów RPY

```

1 void quaternionsToRPY(double q0, double q1, double q2,
2                         double q3, double *roll, double *pitch, double *yaw)
3 {
4     *roll = atan2(2*(q0*q1+q2*q3), 1-2*(q1*q1+q2*q2))*180/M_PI;
5     *pitch = asin(2*(q0*q2-q3*q1)) * 180 / M_PI;
6     *yaw = atan2(2*(q0*q3+q1*q2), 1-2*(q2*q2 + q3*q3))*180/M_PI;
7 }
```

Dane wejściowe z czujników odległości są wstępnie filtrowane, a następnie na ich podstawie oraz na podstawie orientacji obliczana jest rzeczywista wysokość. W dalszej części przedstawiono sposób pobierania danych o orientacji z odpowiedniego topika oraz sposób wyznaczania wysokości quadrocoptera.

Wydruk 8.5: Pobieranie danych o orientacji quadrocoptera

```

1 void HeightQuadro::sensorsCallback(
2         const height_control::Sensors::ConstPtr& msg)
3 {
4     _upMeasurements[_measureIter] = msg->dane[UP_SENSOR_NR];
5     _downMeasurements[_measureIter] = msg->dane[DOWN_SENSOR_NR];
6
7     if (++_measureIter >= PREFILTER_A)
8         _measureIter = 0;
9     preFilter();
10    heightFromDistance();
11 }
```

Wydruk 8.6: Obliczanie wysokości robota

```

1 void HeightQuadro::heightFromDistance()
2 {
3     double _roll, _pitch, _yaw;
4     quaternionsToRPY(_orientation.x, _orientation.y,
5                       _orientation.z, _orientation.w, &_roll, &_pitch, &_yaw);
6     _realUpHeight = _filteredUp[1]/(cos(_roll)*cos(_pitch));
7     _realDownHeight = _filteredDown[1]/(cos(_roll)*cos(_pitch));
```

# 9. Stabilizacja w pomieszczeniu

## 9.1. Sterownik nadzędny

W celu realizacji zadania stabilizacji w pomieszczeniu zastosowano klasyczny regulator PID z dodatkowym członem podwójnego różniczkowania (wejście siłowe) - wprowadzony w celu wprowadzenia sterowania od pozostałych sterowników.

Jego implementacja znajduje się w module *ahsoka\_control*.

### 9.1.1. Zdarzeniowy sterownik antykolizyjny

Sterownik antykolizyjny pełni ważną rolę w autonomicznym locie quadrocoptera. Ma za zadanie wykrywać obiekty znajdujące się na kolizyjnej trajektorii lotu, odpowiednio je interpretować i reagować w postaci siłowego sprzężenia zwrotnego podawanego na regulator nadzędny quadrocoptera.

#### Analiza wykonalności

Do wykonania sterownika niezbędne są elementy zaprezentowane poniżej.

- Dostęp do danych sensorycznych quadrocoptera.  
Realizacja odbywać się będzie z wykorzystaniem paczek danych publikowanych w odpowiednich Topicach systemu.
- Dostęp do obrazu kamery 3D.  
Dostęp do chmury punktów kamery 3D wraz z przypisanymi do nich odległościami.
- Zastosowanie odpowiednich filtrów danych wejściowych.  
Nałożenie filtrów uśredniających, wybierających odpowiednią część obrazu do analizy, progowanie wartości odległości.
- Algorytm wyliczający wektor sił odpychających.  
Algorytm wyliczający wektory sił odpychających na podstawie danych wejściowych odpowiednio je przy tym skalując i normalizując.
- Przesłanie danych do sterownika nadzędneg  
Mechanizm umożliwiający publikację wyliczonych danych w systemie przekazywania informacji zaimplementowanym na quadrocopterze.

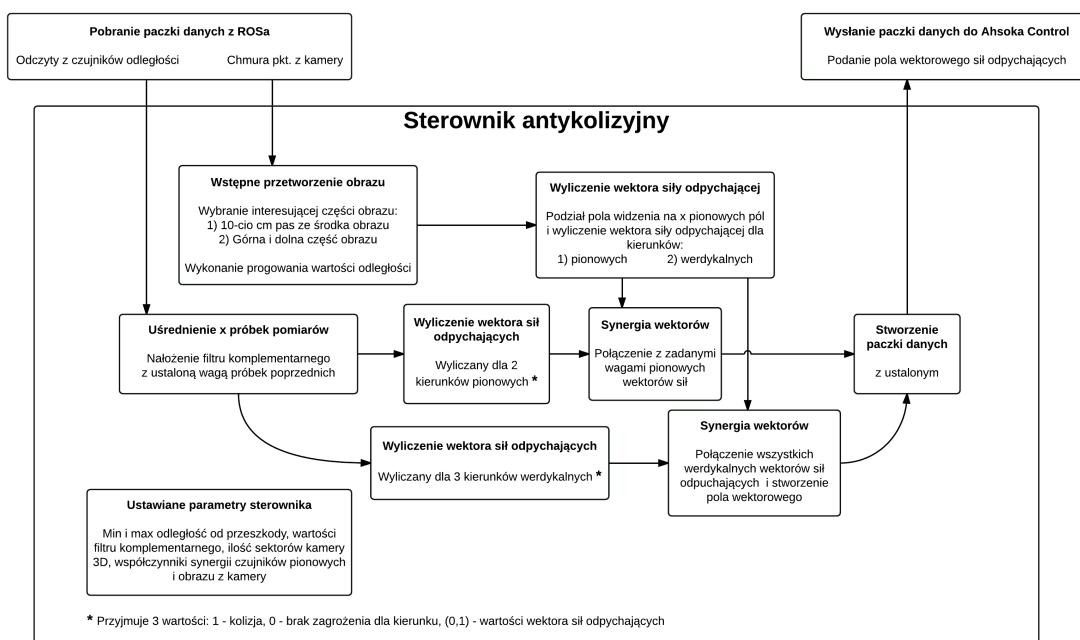
#### Specyfikacja

Specyfikacja potrzeb została przedstawiona na rys. 9.1

### 9.1.2. Lot wzdłuż ściany

W celu przeszukiwania pomieszczenia należało ustalić scenariusz działania i lotu quadrocoptera. Ustalono, że najbardziej efektywnym, a zarazem najbezpieczniejszym dla pojazdu scenariuszem przeszukiwania będzie lot wzdłuż ściany.

W tym celu, po wlecieniu do pomieszczenia, quadrocopter ustawia się tyłem, równolegle do ściany i utrzymuje bezpieczną od niej odległość wykorzystując sterownik antykolizyjny. Lot odbywa się w jednym stałym kierunku ( w prawo lub w lewo) aż do napotkania przez



Rysunek 9.1: Schemat blokowy działania sterownika antykolizyjnego

czujniki znajdujące się na jego bokach następnej ściany. Wtedy pojazd obraca się tak, aby ponownie jego tył znalazł się równolegle do następnej ściany, a cały proces powtarza się aż do znalezienia się w punkcie początkowym.

Ustalono że taki scenariusz lotu pozwoli na:

- uniknianie przeszkód na drodze,
- dokładne zeskanowanie pomieszczenia
- utworzenie dokładnej mapy pomieszczenia
- bezpieczny powrót do punktu początkowego po wcześniejszej trasie.

### Analiza wykonalności

Do wykonania takiego sterownika w najbardziej prymitywnej wersji, niezbędne są dane ze wszystkich czujników, algorytm wyliczający odpowiedni obrót oraz algorytm odpowiadający za utrzymywanie odpowiedniej odległości od ściany przy jednoczesnym zadawaniu funkcji lotu do przodu i odbieranie sygnałów. Niestety, algorytm w tak podstawowej wersji nie poradziłby sobie w większości pomieszczeń. Dlatego niezbędne w tym celu jest użycie działającego sterownika antykolizyjnego oraz mapy pól potencjałów do wyznaczenia trasy.

Dokładna specyfikacja sterownika antykolizyjnego została podana wcześniej w tym rozdziale.

### Specyfikacja

Sam sterownik nie został zaimplementowany, a więc podana poniżej specyfikacja jest poglądowa i może się różnić od wersji finalnej.

Quadcopter, w momencie kiedy znajdzie się w nowym pomieszczeniu nie posiada żadnej wcześniejszej wiedzy o otoczeniu. Dlatego też musi reagować na bieżąco oraz zapamiętywać niektóre dane tak, aby dało je się wykorzystać w przyszłości np. do znalezienia wyjścia. Ogólną zasadę można przedstawić w następujących krokach:

1. Lot do przodu aż do napotkania ściany (nie wiemy gdzie się znajdujemy).  
Pryz użyciu sterownika antykolizyjnego oraz mapy pól potencjałów musimy rozróżnić ścianę od przeszkody np. kolumny.
2. Skręt w lewo.
3. Lot do przodu, przy zachowanej odpowiedniej odległości od ściany, aż do napotkania kolejnej ściany, równocześnie omijając napotkane po drodze przeszkody.
4. Po napotkaniu ściany znów skręt w lewo.
5. Powtarzanie dwóch powyższych czynności aż do momentu, kiedy quadcopter znajdzie się w bliskiej okolicy punktu, w którym pierwszy raz wykrył ścianę.
6. Podjęcie decyzji, na podstawie zebranych informacji o otoczeniu, wyliczonej mapy pól potencjałów oraz danych z sterownika nadzawanego.

To jaka decyzja zostanie podjęta, jest uzależnione od zaplanowania i implementacji sterownika decyzyjnego, który musiałby zostać specjalnie stworzony do tego celu.

# 10. Zadania dodatkowe

## 10.1. Center Plate

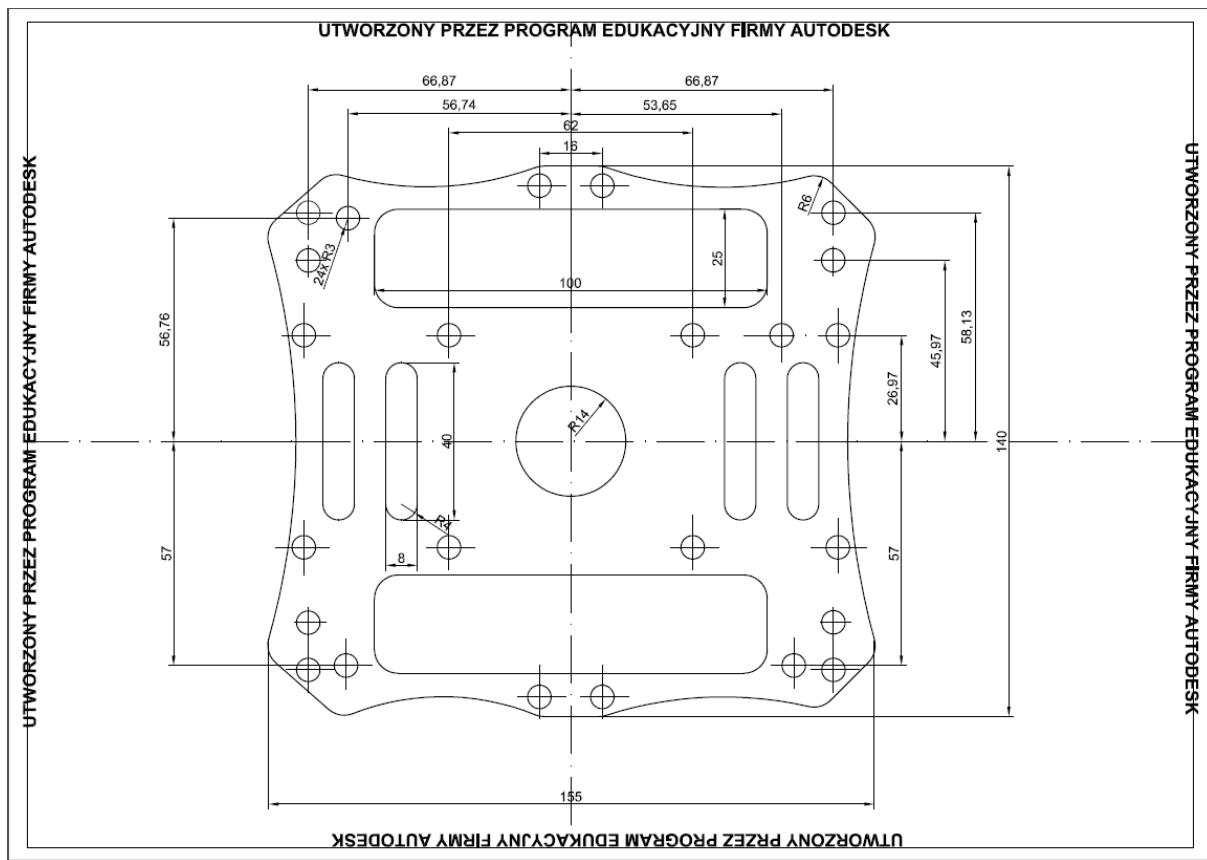
W pewnym momencie projektu zapadła decyzja o zmianie platformy na której będziemy budować quadrocopter. W tym celu postanowiono o zaprojektowaniu i wykonaniu nowych **Center Plate’ów** dla platformy. Center Plate są to dwie płytki, znajdujące się na środku ramy, do których mocowane są ramiona i podzespoły quadrocoptera takie jak:

- sterownik i odbiorniki
- GPS
- bateria
- komputer pokładowy (sterownik nadrzędny)
- moduł FPV
- podwozie
- oraz pozostałe elementy wyposażenia drona

Nowozaprojektowane płytki musiały odpowiadać pewnym założeniom. Otwory do montażu ramion i podwozia musiały być łatwo dostępne. Dodatkowo należało umieścić otwory montażowe dla sterownika nadrzędnego, odbiorników, baterii itd.

Projekt powstał w programie *AutoDesk AutoCAD 2014*. Wykonany został rysunek wykonawczy płytki górnej oraz dolnej [10.1](#). Dodatkowo zadbane o zastosowanie odpowiednich wycięć dla uzyskania niższej masy własnej.

Pomimo, że Center Plate został wykonany, ostatecznie postanowiono wykorzystać gotowy produkt **DJI F450 KIT** zakupiony w sklepie [www.abc-rc.pl/DJI-F450-DJI0233](http://www.abc-rc.pl/DJI-F450-DJI0233).



Rysunek 10.1: Projekt płytki Center Plate wykonany w programie AutoCAD 2014

## **11. Podsumowanie**

W ramach pracy nad projektem zrealizowano zadania: uruchomienie i montaż komputera pokładowego, uruchomienie i montaż kamery 3D, uruchomienie i montaż dodatkowych odległości, uruchomienie komunikacji ROS — komponenty, zaimplementowanie algorytmów rozpoznawania przesunięcia, realizacja fuzji sensorycznej dla stabilizacji w pionie i w poziomie, przygotowanie teoretyczne do stabilizacji w pomieszczeniu.

Realizacja tego projektu uzmysłowiła grupie projektowej stopień trudności zarządzania tak dużym przedsięwzięciem. Wspólna praca wymagała wypracowania odpowiednich mechanizmów komunikacji oraz przepływu danych.

# Bibliografia

- [1] Mavlink protocol.
- [2] Ros wiki - creating a ros package.
- [3] Ros wiki - migrating from rosbuild to catkin.
- [4] S. S. Beauchemin, B. J. L. *The computation of optical flow*. ACM New York, USA, 1995.
- [5] A. Björck. *Numerical Methods for Least Squares Problems*. SIAM, 1996.
- [6] D. S. Ch. Forster, M. Pizzoli. *Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA),, 2014.
- [7] V. Ermakov. Mavros – mavlink extendable communication node for ros with udp proxy for ground control station.
- [8] B. D. Lucas, T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, strony 121 – 130, 1981.
- [9] S. L. Markus Achtelik, Stephan Weiss. Modified version of the monocular slam framework ptam.
- [10] S. L. Markus Achtelik, Stephan Weiss. The monocular slam framework ptam.
- [11] L. Meier. Mavlink micro air vehicle communication protocol.