

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ  
PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE  
OBOR GEOMATIKA



DIPLOMOVÁ PRÁCE  
KONSTRUKCE BEZPILOTNÍHO LETADLA PRO  
GEODETICKÉ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Vyskkočil, Ph.D.  
Katedra geomatiky

červen 2019

David ZAHRADNÍK



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kulovaná

Jméno: Tereza

Osobní číslo: 440796

Zadávající katedra: Katedra geomatiky

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geomatika

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh webového administrátorského rozhraní pro platformu GIS.lab

Název diplomové práce anglicky: GIS.lab Web Administration Console

Pokyny pro vypracování:

Cílem diplomové práce je návrh webového administrátorského rozhraní pro potřeby komplexní open source GISové platformy GIS.lab. Toto rozhraní by mělo rozšířit možnosti správy uživatelů této platformy, umožnit definovat jejich role a oprávnění. Webová aplikace bude navržena s ohledem na její maximální integraci do stávající architektury platformy GIS.lab.

Seznam doporučené literatury:

Pilgrim, M.: Dive Into Python, Createspace Independent, 2009, ISBN: 9781441413024

Holovaty, A., Kaplan-Moss, J.: The Definitive Guide to Django: Web Development Done Right, Second Edition, Apress, 2009, ISBN: 9781430219361

Turnbull, J.: The Docker Book: Containerization Is the New Virtualization, James Turnbull, 2014, ISBN: 9780988820203

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Landa, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 22. 2. 2019

Termín odevzdání diplomové práce: 19. 5. 2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se konstrukcí bezpilotního letadla pro geodetické účely na platformě Arduino s Arduino periferiemi

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

bezpilotní letadlo, dron, Arduino, Android,

## **ABSTRACT**

This thesis describes construction of unmanned uerial vehicle for surveying jobs using Arduino platform and Arduino moduls.

## **KEYWORDS**

UAV, dron, Arduino, Android

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Konstrukce bezpilotního letadla pro geodetické práce“ jsem vypracovala samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Zdeňku Vyskočilovi Ph.D. za pomoc a rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Bc. Lukáši Černému za poskytnuté vysvětlení, rady a připomínky k dané věci.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Rešerše</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Teorie</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Komponenty</b>	<b>15</b>
4.1	Kostra . . . . .	15
4.2	Baterie . . . . .	15
4.2.1	Parametry použité baterie . . . . .	16
4.2.2	Rady pro zacházení s LiPo bateriemi . . . . .	16
4.3	Distribuční deska . . . . .	16
4.3.1	Parametry distribuční desky . . . . .	16
4.4	Vrtule . . . . .	16
4.4.1	Parametry použitých vrtulí . . . . .	17
4.5	Bezkartáčové motory . . . . .	17
4.5.1	Parametry použitých motorů . . . . .	17
4.6	Regulátory otáček . . . . .	18
4.6.1	Parametry použitých regulátorů otáček . . . . .	18
4.7	IMU . . . . .	19
4.7.1	Akcelerometr . . . . .	19
4.7.2	Gyroskop . . . . .	19
4.7.3	Magnetometr . . . . .	19
4.7.4	Parametry použité IMU jednotky . . . . .	19
4.8	Komunikační zařízení . . . . .	20
4.8.1	Radio . . . . .	20
4.8.2	Parametry použitého Radiového zařízení . . . . .	20
4.8.3	Bluetooth . . . . .	21
4.8.4	Parametry použitého Bluetooth zařízení . . . . .	21
4.9	Řídící jednotka . . . . .	21
4.9.1	Arduino . . . . .	22
4.10	GNSS . . . . .	22

4.11	Výškoměr . . . . .	22
4.11.1	Barometr . . . . .	22
4.11.2	Použitý barometr . . . . .	23
4.12	Senzor překážek/vzdáleností . . . . .	23
4.12.1	Použitý laserový modul . . . . .	23
4.13	Kamera . . . . .	24
4.13.1	Použitá kamera . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Ovládání jednotlivých elektronických částí</b>	<b>25</b>
5.1	PWM . . . . .	25
5.2	Kalibrace regulátorů otáček . . . . .	25
5.3	Filtrace dat IMU . . . . .	26
5.3.1	Komplementární filtr . . . . .	27
5.3.2	Kalmanův filtr . . . . .	27
5.3.3	Mahonyho filtr . . . . .	27
5.4	PID regulátor pro synchronizaci motorů . . . . .	27
5.5	Létající kontrolér . . . . .	28
5.6	Překážkový kontrolér . . . . .	30
5.7	Navigační kontrolér . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Testování</b>	<b>37</b>
6.1	IMU filtry . . . . .	37
6.2	Létající kontrolér . . . . .	37
<b>7</b>	<b>Ovládání</b>	<b>40</b>
7.1	Hlavní obrazovka . . . . .	40
7.2	Manuální ovládání . . . . .	41
7.3	Autonomní ovládání . . . . .	41
	<b>Seznam zkratk</b>	<b>43</b>
	<b>Literatura</b>	<b>44</b>
<b>A</b>	<b>Dokumentace</b>	<b>45</b>
A.1	Flying Control . . . . .	45
A.2	Obstacle Control . . . . .	45

A.3 Navi Control . . . . .	45
----------------------------	----



# Seznam obrázků

3.1	Let určitým směrem . . . . .	13
3.2	Přehled vrtulí se CW a CCW orientací . . . . .	14
3.3	Úhly rotace/náklonů . . . . .	14
4.1	Distribuční deska - Matek PDB-XT60 . . . . .	17
4.2	Regulátor otáček - HGLRC BS30A . . . . .	18
4.3	Schéma zapojení motoru a regulátoru . . . . .	19
4.4	IMU - MPU9250 . . . . .	20
4.5	XBee . . . . .	21
4.6	Bluetooth - HC-05 . . . . .	21
4.7	Arduino UNO a Nano . . . . .	22
4.8	Barometr - BMP280 . . . . .	23
4.9	Laserový modul - VL53L0X . . . . .	24
5.1	Ukázka PWM . . . . .	25
5.2	Schéma zapojení pro kalibraci regulátoru otáček . . . . .	26
5.3	Schéma ovládání vrtulí podle úhlu náklonu . . . . .	29
5.4	Diagram komponent . . . . .	31
5.5	Diagram algoritmu létajícího kontroléru . . . . .	32
5.6	Schéma zapojení Létajícího kontroléru . . . . .	33
5.7	Diagram algoritmu překážkového kontroléru . . . . .	34
5.8	Schéma zapojení Překážkového kontroléru . . . . .	35
5.9	Schéma zpráv o cizím objektu . . . . .	35
5.10	Schéma zapojení napájení motorů . . . . .	36
5.11	Schéma zapojení napájení Arduina a modulů . . . . .	36
6.1	Inicializace IMU . . . . .	37
6.2	Náklon IMU jednotky . . . . .	38
6.3	Testování v konstrukci . . . . .	39
7.1	Screenshot hlavní obrazovky . . . . .	40
7.2	Screenshot obrazovky pro manuální ovládání . . . . .	41
7.3	Diagram RC soustavy . . . . .	42
7.4	Screenshot obrazovky pro autonomní ovládání . . . . .	42

# Seznam tabulek

# 1 Úvod

Bezpilotní letadla neboli drony jsou rychle vyvíjeným odvětvím v zeměměřičství. Nedostatek kvalitní pracovní síli nahrává automatizaci sběru dat, tedy dronům a skenerům.

V dnešní době dron plní funkci nosiče fotogrametrické kamery nebo skeneru. Využívají se tedy pro sběr objemných dat za velmi krátkou dobu. Výsledky po zpracování jsou ortofota, fotoplány, mračna bodů a z nich 3D modely.

V této diplomové práci je popisován stavba drona na otevřené platformě Aurduino, který by mohl nahradit výtyčku při různých zeměměřičských pracích.

Pokud by se na drona implementovala GNSS aparatura s RTK, dal by se dron využít pro vytyčování. Po zadání souřadnic uživatelem, dron by přeletěl na zadané místo a přistál by. Po příchodu uživatele by dron vzletěl, držel by pozici a uživatel by podle laserové stopy stabilizoval bod.

Dále by šlo vytvořit zařízení které by se skládalo z hranolu, podle kterého by dron udržoval polohu nad zařízením. Využití by se našlo v oblastech nepříznivých po GNSS (vysokýmé objekty: stromy, budovy). Dron s GNSS aparaturou by létal nad vysokými objekty s ideální konfigurací satalitů a uživatel se zařízením by na zemi měřil polohu přes GNSS. Výška drona by se měřila přes laserový dálkoměr.

Pokud by dron dokázal komunikovat s totální stanicí, získali bychom přesné souřadnice letu drona, které by se dali použít pro přesného definování letu. Využití by se našlo při mapování skal. Nápad propojit totální stanici s dronem napadl doktora Horu z firmy Exact. s.r.o.

Pro rozvinutí těchto projektů je potřeba znát problematika letu drona, proto se diplomová práce zabývá základní stavbou drona.

## 2 Rešerše

Bezpilotní letadla/drony jsou fenoménem dnešního stolení, zabývá se jimi spousta článků a projektů.

Projekt YMFC-32

Projekt popisuje stavbu drona/quadrocoptéry ovládaného přes RC soupravu. Pro ovládání motorů na dronu byla použita platforma Arduino a periferie Arduina (IMU, Bluetooth).

Univerzální software pro ovládání RC modelu

Software je používán pro stavbu drona na platformě Arduino. Software má předdefinované různé typy dronů a Arduino periférií.

Projekt Arduino quadrocopter

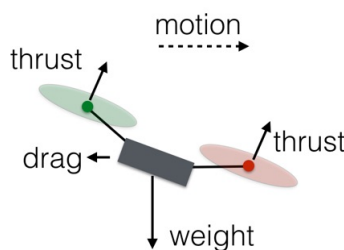
Projekt se zabývá stavbou quadrokopéry na platformě Arduino s využitím softwaru Multiwii.

### 3 Teorie

Před vynalezením malých mikroprocesorů pro řízení letu byl upřednostňován klasický způsob letu (letadla, vrtulníky) před drony. Po vynalezení těchto mikroprocesorů byl započat vývoj dronů.

Motory s vrtulemi fungují jako ventilátory, které ženou vzduch pod sebe. Bohužel rozložení hmotnosti drona a drobné rozdíly v motorech, zapříčiní různé tahy na jednotlivých motorech. Díky ovládání motorů podle mikroprocesorů, dokážeme vliv různých tahů vyrovnat a dron může létat.

Let drona je způsoben snížením výkonu na motory ve směru letu a zvýšením výkonu na motory v opačném směru letu. Rotace drona je uskutečněna zvýšením výkonu

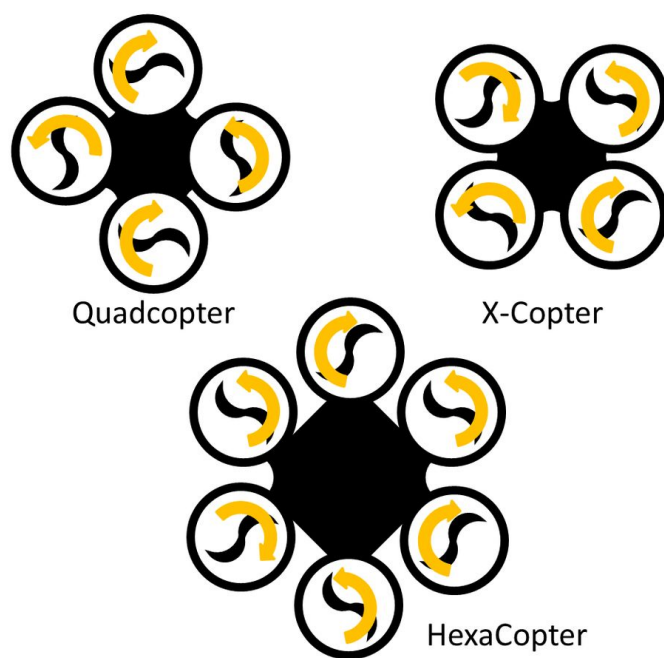


Obrázek 3.1: Let určitým směrem

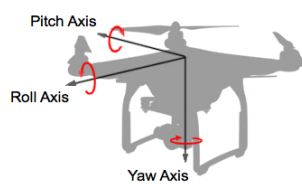
na různých typech vrtulí (CW a CCW orientace). Zvýšením výkonu na motorech s vrtulemi s orientací CW se dron otáčí po směru hodinových ručiček, s orientací CCW proti směru hodinových ručiček.

Důležitou rolí při letu drona hraje IMU jednoka, která určuje úhly náklonů. Roll je úhel rotace kolem osy X, pitch je úhel rotace kolem osy Y a yaw je úhel rotace kolem osy Z. Souřadný systém má střed v těžišti letadla. Osa X směřuje do směru letu, osa Y je na ni kolmá a osa Z je totožná s tížnicí.

Řízení drona probíhá přes jmenované úhly pitch, roll a yaw. Uživatel zadává chtěné úhly a mikroprocesor podle IMU dané úhly nastavuje. Nastavení úhlu vzniká přes ovládání jednotlivých motorů.



Obrázek 3.2: Přehled vtrulí se CW a CCW orientací



Obrázek 3.3: Úhly rotace/náklonů

## 4 Komponenty

Při stavbě drona je potřeba rozmyslet účel drona, nosnost a délku letu. Od těchto myšlenek (potřeb) se odvíjí dílčí součástky a jejich parametry. Základní součástky jsou kostra, baterie, vrtule, bezkartáčové motory, regulátory otáček, IMU, komunikační zařízení a řídicí jednotku.

Důležitým faktorem je i počet vrtulí/motorů. Podle počtu vrtulí dělíme drony na trikoptéry (3), quadrokopéry (4), hexakoptéry (6), a octokoptéry (8). Obecně platí čím více vrtulí dron má, tím více je stabilnější, dokáže létat i při selhání z jednoho motorů (hexakoptéra a octokoptéra). Zároveň stavba drona s vyšší počtem vrtulí je dražší a náročnější.

V této diplomové práci je popisována stavba hexakoptéry, jejíž kostra a motory byly použity z nefukčního drona of firmy Microkopter z laboratoře fotogrametrie.

### 4.1 Kostra

Kostra by měla být lehká a pevná, nejčastěji se používá karbon a hliník pro stavbu drona s vyšší nosností a plast pro ostatní drony. Kostra se skládá z centra, ramen, stojánku a držáků pro motory. Jak už bylo zmíněno, byla použita kostra od firmy Microkopter. Stojánek je vyroben z karbonu, centrum z plastu a ramena a držáky motorů z hliníku.

### 4.2 Baterie

Výběrovým kritériem pro baterie jsou kapacita, výstupní napětí, maximální vybíjecí proud. Nejpoužívanějšími bateriemi pro stavbu drona jsou LiPo baterie, které nejsou příliš těžké, nemají paměťový efekt, mají dlouhou životnost při správném zacházení a vysoký vybíjecí proud.

Kapacitu a výstupní napětí ovlivňuje množství článků baterie. Jeden článek má hodnotu nominálního napětí 3.7V, při plném nabití článku 4.2V. Maximální vybíjecí proud je dán hodnotou C. Pokud C je rovno 25 a kapacita baterie je 6750 mA, můžeme z baterie odebírat proud o velikosti cca 168 Ampérů.  $6.75 \cdot 25 = 168.75A$  Maximální odběr by neměl přesáhnout, protože potom se poškozuje baterie.

### 4.2.1 Parametry použité baterie

Počet článků: 4 (4S)

Napětí: 14.8V

Kapacita baterie: 6750mA

Maximální proudové zatížení: 25C (168.75A)

Maximální vybíjecí proud: 50C (337.5A)

Hmotnost: 605 g

### 4.2.2 Rady pro zacházení s LiPo bateriemi

Nabíjet baterie proudem s 1C tedy 6750mA dobíjet 6.75A proudem.

Nepřebíjet baterie nad hodnotu napětí 4.2V na článek.

Nepodbíjet baterie pod napětí 2.7V, hrozí poškození.

Při delším skladování vybit na hodnotu napětí 3.3V na článek.

Pro podrobnější instrukce je potřeba si přečíst příbalový leták.

## 4.3 Distribuční deska

Distribuční deska PCB neboli napájecí deska slouží k zapojení všech komponent na baterii. Jednotlivá napájená místa jsou zapojena paralelně, aby při zkratu jednoho ze zařízení, ostatní zařízení fungovala. K desce lze připojit i zařízení s jiným vstupním napětím než je napětí baterie (5V, 12V).

### 4.3.1 Parametry distribuční desky

Matek PDB-XT60

Množství LiPo článků: 3S-4S

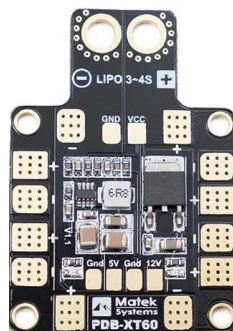
Vstup VCC, GND

Výstup, 6x + a -, 12V, 5V, 2x -

## 4.4 Vrtule

Vrtule generují tah dronu. Při stavbě dronu jsou potřeba dva typy vrtulí se směrem hodinových ručiček a proti. Dva typy vrtulí jsou potřeba pro rotaci drona kolem





Obrázek 4.1: Distribuční deska - Matek PDB-XT60

svislé osy. Další parametry vrtulí je jejich průměr a rozteč, nejčastěji uvedená v palcích. Materiál použit na výrobu vrtulí je plast nebo karbon. Doporučuji při stavbě drona a jeho testování použít plastové vrtule, jsou cenově méně náročné.

#### 4.4.1 Parametry použitých vrtulí

Materiál: plast Průměr: 12 palců

Rozteč: 3.8 palce

### 4.5 Bezkartáčové motory

BLDC motory mají výhodu především v dlouhé životnosti a plynulém kroku. BLDC motor se skládá z rotoru a statoru. Rotor je permanentní magnet, stator je prstenec uspořádaných cívek. Postupným pouštěním proudu do cívek (vytvařením magnetického pole) se rotor začne pohybovat. Cívky jsou rozdělené do skupiny A, B, C, což jsou i vstupní piny motorů. Nedílnou součástí motorů je regulátor otáček ESC, který řídí vstupní proud přes piny A, B a C a tím ovlivňuje rychlost motoru. Pin B je prostřední. Napájením pinů A a C určíme směr otáčení motoru, možnost otáčení lze i změnit v nastavení regulátoru otáček. Výběr motorů je závislý na parametrech baterie a parametrech regulátoru otáček.

#### 4.5.1 Parametry použitých motorů

Firma: Microkopter

Množství LiPo článků: 4S-6S

Provozní napětí: 25A

Maximální provozní napětí 30A

Rychlost bez zatížení: 500 rpm/V

Nosnost: 2200g

Váha: 121g

## 4.6 Regulátory otáček

Regulátory otáček (ESC) jsou nedílnou součástí BLDC motorů. Regulátor je řídicí jednotka motoru, která zajistí jeho plynulý chod.

Vstupní napětí závisí dle typu regulátoru. Regulátory se ovládají přes PWM signál s frekvencí 50Hz. Přes PWM signál se posílá údaj throttle, které uvádá výkon motoru. Každý regulátor má jinak definovanou minimální a maximální hodnotu throttle, proto je potřeba regulátory kalibrovat.

### 4.6.1 Parametry použitých regulátorů otáček

HGLRC BS30A

Vnitřní software: BLHeliSuite

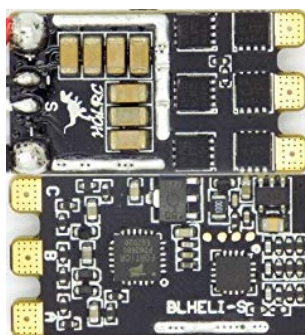
Vstup: VCC (7.4V - 18.5V), GND, -, S

Výstup: A, B, C

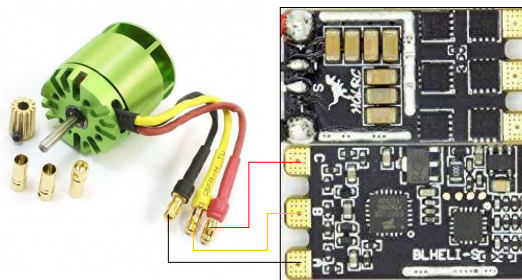
Maximální proud: 30A / 40A max

Množství LiPo článků: 2S-5S

Použitá knihovna: Servo



Obrázek 4.2: Regulátor otáček - HGLRC BS30A



Obrázek 4.3: Schéma zapojení motoru a regulátoru

## 4.7 IMU

IMU je zařízení, které měří úhlové rychlosti, zrychlení a sil magnetické pole ve třech osách. Skládá se z gyroskopu, akcelometru magnetometru. !9 stupnu volnosti!

### 4.7.1 Akcelometr

Akcelometr slouží k určování zrychlení. Elektronický akcelometr měří zrychlení na základě změny elektrické kapacity mezi pevnou částí a pohyblivou částí akcelometru.

### 4.7.2 Gyroskop

Gyroskop slouží k úhlové rychlosti. Elektronický gyroskop měří úhlové rychlosti také na základě změny elektroické kapacity, ale změnu měří ve dvou směrech na sobě kolmých. Z těchto dvou změn se vypočte úhel stočení.

### 4.7.3 Magnetometr

Magnetometr slouží k určování sil magnetického pole Země. Elektronický magnetometr využívá Hallův efekt, kdy vodivý plát je zasazen do elektronického obvodu. Při vlivu magnetického pole se na stranách plánu přidruží elektrony a protony. Měřené napětí na stranách plátu je úměrné k síle magnetického pole.

### 4.7.4 Parametry použité IMU jednotky

Arduino modul MPU9250

Obsahuje: akcelometr, gyroskop, magnetometr

Komunikace: I2C, SPI

Vstup: VCC (5V), GND

Výstup: SDA, SCL (I2C)

Použitá knihovna: MPU9250

Souřadný systém akcelerometru a gyroskopu je shodný, magnetometr má opačnou osu z a prohozené osy x a y.



Obrázek 4.4: IMU - MPU9250

## 4.8 Komunikační zařízení

Pro bezdrátové ovládání drona je použit radiový modul a bluetooth

### 4.8.1 Radio

Radiový modul je používán pro zvětšení dosahu ovládání drona. Pro stavbu byl použit bezdrátový modul XBee od firmy Digi. Modul plní funkce koncového zařízení, routeru nebo koordinátoru. Komunikace s XBee probíhá přes UART. Modul lze použít i pro čtení analogových a digitálních signálů různých senzorů.

### 4.8.2 Parametry použitého Radiového zařízení

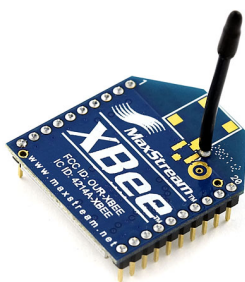
XBEE PRO SS

Provozní napětí: 3.3V

Provozní frekvence: 2.4GHz

Komunikační protokol: ZB ZigBee

Dosah: 12 km



Obrázek 4.5: XBee

### 4.8.3 Bluetooth

Pro bezdrátovou komunikaci s telefonem byl použit Arduino Bluetooth modul. Při zapojení je potřeba připojit RX pin modulu na TX pin Arduina a TX pin modulu na RX pin Arduina, aby komunikace fungovala.

### 4.8.4 Parametry použitého Bluetooth zařízení

HC-05

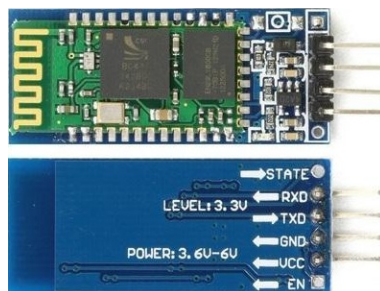
Bluetooth verze: 2.0

Výchozí rychlost komunikace: 9600 baudů

Vstup: VCC (5V), GND, RX, EN

Výstup: TX, STATE

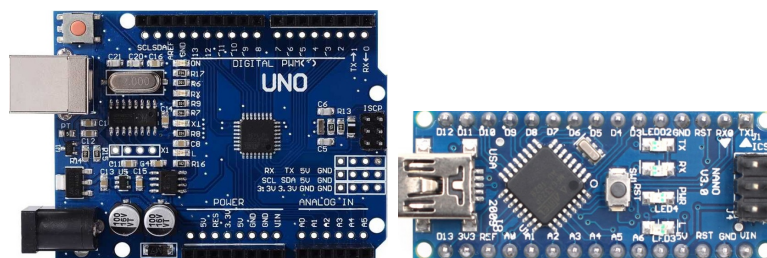
Použitá knihovna: SoftwareSerial



Obrázek 4.6: Bluetooth - HC-05

## 4.9 Řídící jednotka

Pro ovládání všech komponent byla použita platforma Arduino.



Obrázek 4.7: Arduino UNO a Nano

### 4.9.1 Arduino

Arduino je otevřená vývojová platforma, která využívá mikroprocesory od firmy Atmel. Programovat Arduino lze přes jazyk C nebo C++. Pro začínající uživatele byla vytvořena knihovna Wiring, která je velmi rozšířená. Knihovna je integrovaná do vývojového prostředí Arduino IDE. Na trhu existuje spousta typů desek např. Uno, Nano, Mega, Due.

Arduino lze napájet přes 12V konektor, USB nebo VIN, vstupní napětí má být v rozsahu 5V - 12V. Vstupy Arduino jsou Buď analogové nebo digitální. Rozsah analogových vstupů je 0-1023. Digitální vstupy mají hodnotu LOW nebo HIGH, přenos dat probíhá přes PWM, I2C nebo UART komunikaci. Pro každou komunikaci jsou definovány určité digitálních pinů. I2C komunikace je továrně nastavena na analogové piny dle typu desky.

Jelikož Arduino je open-source projekt, vzniká tak spousta klonů a nadstaveb. U projektu autonomního letadla byl použit levnější klon.

## 4.10 GNSS

Informace o GNSS aparatuře jsou k dispozici v diplomové práci Štěpána Hodíka.

## 4.11 Výškoměr

Pro funkci výškoměru byla použita dvě zařízení: barometr a gps.

### 4.11.1 Barometr

Barometrem měříme tlak a z tlaku lze vypočítat nadmořská výška.

### 4.11.2 Použitý barometr

BMP280

Vstup: VCC (3.3V), GND,

Výstup: SDA, SCL, SDO, CSB

Měřicí rozsah teploty: -40 až +85 stupňů

Měřicí rozsah tlaku: 300 až 1100 hPa

Přesnost měření teploty:  $\pm 1$  stupeň

Přesnost měření tlaku:  $\pm 100$  Pa

Použitá knihovna: Adafruit BMP280



Obrázek 4.8: Barometr - BMP280

## 4.12 Senzor překážek/vzdáleností

Pro automatizaci je důležité opatřit drona senzory měřící vzdálenosti pro předcházení srážek s objekty. Senzory byly připevněny na ramena vrtulí pro měření vzdáleností ve vodorovné rovině drona a pro měření ve svislém směru pro přistávání a detekce objektů pod dronem.

### 4.12.1 Použitý laserový modul

laserový modul VL53L0X

Vstup: VCC (5V), GND, XSHUT, GPIO1

Výstup: SDA, SCL (I2C)

vlnová délka: 940 nm

měřicí rozsah: 0 - 1200 mm

přesnost: 3 procenta měřené délky

Použitá knihovna: VL53L0X



Obrázek 4.9: Laserový modul - VL5310x

Při používání pouze jednoho modulu stačí propojit pouze 4 pin VIN, GND, SCL, SDA. Pro více modulů je potřeba zapojit pin XSHUT na některý z digitálních pinů. Pin XSHUT k přepnutí modulu do stan-by režimu, pro definování adresy, přes I2C komunikaci, na používaném modulu.

## 4.13 Kamera

Pro obrazový věm letu drona byl nainstalován systém FPV. FPV se skládá z kamery, vysílače, přijímače a obrazového media. Kamera předává obrazová data radiovému vysílači, který je na určité frekvenci posílá přijímači. Přijímač signál dekoduje a zobrazí na mediu.

### 4.13.1 Použitá kamera

Eachine TX02

Vstup: VCC (5V), GND

Výstup: radiový signál s frekvencí 5.8GHz

FOV: 120 stupnu

Rozlišení: 600TVL

Použitá Android aplikace: FPViewer

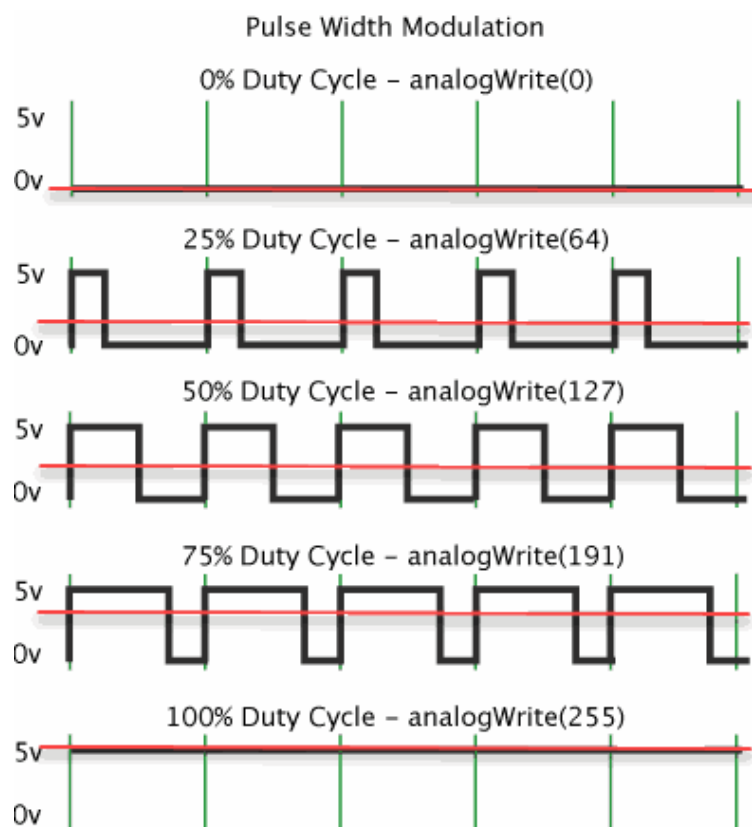


## 5 Ovládání jednotlivých elektronických částí

### 5.1 PWM

Pro komunikaci regulátorů otáček a ovládání motorů je nutné znát pulzně šířkovou modulaci. Tato podkapitola stručně popíše princip a funkci PWM.

PWM modulace je určená pro přenos analogového signálu pomocí dvou hodnot (Low a High), přenos probíhá na digitálních pinech. Přenášená hodnota je zaimplementovaná do poměru High/Low. Poměru se nazývá střída a nabývá hodnot 0-100 procent. Hodnoty Low a High se zapisují v cyklu. Pro příjem signálu je důležité znát frekvenci cyklu, aby mohlo dojít k dekodování a určení zasláné hodnoty.



Obrázek 5.1: Ukázka PWM

### 5.2 Kalibrace regulátorů otáček

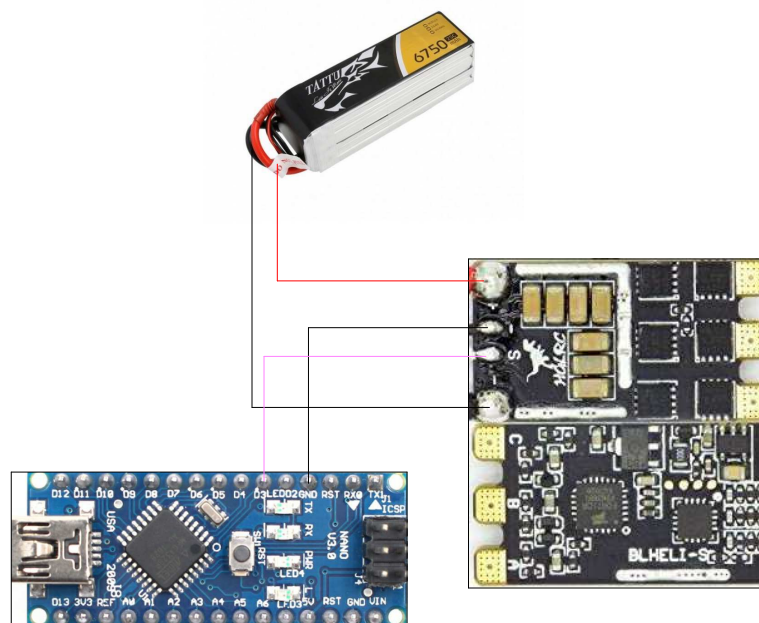
Pro kalibraci je potřeba kalibrovaný regulátor, propojovací dráty a Arduino Nano. V programu BLHeliSuite lze kalibrovat i s jinou platformu Arduino, bohužel kalibrace se podařila pouze s Arduino Nano.

Zapojení regulátoru se proveve přes schéma na obrázku.

Po zapojení komponent a nastavení šablony se vybere seriový port pro komunikaci mezi počítačem a Arduinem. Přes tlačítko Read Setup se načte tovární nastavení regulátoru.

Nastaví se PPM Min Throttle hodnota na 1000, PPM Max Throttle na 2000 a PPM Center Throttle na 1500. Zapiše se hodnota do regulátoru. Doporučuji znovu zkontrolovat, někdy se stalo, že hodnoty se nenahrály. Tím se zkalibrovali vstupní hodnoty časování pulzu do intervalu 1000;2000.

Při každém zapnutí motoru je potřeba kalibrace a to posláním příkazu s hodnotou Min Throttle a následně Max Throttle.



Obrázek 5.2: Schéma zapojení pro kalibraci regulátoru otáček

### 5.3 Filtrace dat IMU

Surová data ze všech tří senzorů nejsou samostatně použitelná pro ovládání drona. Surová data obsahují nepřesnosti a šum, proto je potřebná filtrace, ze které dostaneme úhly pitch, roll a yaw. Surová data z IMU lze filtrovat různými způsoby.

### 5.3.1 Komplementární filtr

Komplementární filtr je nejjednodušší z uvedených filtrů. Využívá data z akcelerometru a gyroskopu.

Data z gyroskopu jsou unášena v čase, tedy když gyroskop je v klidu, měřená data se mění integračně. Z krátkodobého hlediska data z gyroskopu jsou přesná, proto pro další použití je potřeba použít High Pass filtr.

Opakem toho jsou data z akcelerometru, data jsou ovlivňována malými silami, které ruší výsledné zrychlení. Z dlouhodobého hlediska jsou data z akcelerometru přesná, proto je potřeba použít Low Pass filtr.

Kombinací High Pass filtru a Low Pass filtr vzniká komplementární filtr, který pro použití při stavbě drona je dostačující.

### 5.3.2 Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je dynamický filtr, který pracuje s predikcí. Pro výpočet je potřeba stanovit model systému, u kterého bude filtr predikovat stavy. Pokud v oblasti predikovaného stavu najdeme skutečný stav, provede se korekce skutečného stavu a oblast predikovaného stavu bude menší/přesnější. Nenalezne-li se v oblasti predikovaného stavu skutečný stav, oblast se zvětší/zhorší se přesnost.

Bohužel Kalmanův filtr nemohl být použit z důvodu malé výpočetní síly platformy Arduino.

### 5.3.3 Mahonyho filtr

Mahonyho filtr využívá Quaternions, což je čtyř dimensonální numerický systém využívaný pro popis rotace objektu v počítačové grafice a robotice. Filtr používá data z gyroskopu, akcelerometru a magnetometru, přičemž z nich počítá úhly pitch, roll a yaw. Při výpočtu použita knihovna MahonyAHRS.

## 5.4 PID regulátor pro synchronizaci motorů

Proportional Integral Derivative PID regulátor slouží k regulaci požadovaného stavu za co nejkratší dobu a to za pomoci zvyšování a snižování vlivu, který napomáhá se dostat do požadovaného stavu.

Názorný příklad: Chceme aby dron dokázal balancovat, chceme tedy aby proměně pitch a roll z IMU byly nulové. Kdybychom měli ideálního drona s přesným vyvážením hmotnosti a se stejně fungujícími motory, bylo by to snadné. Pouze by stačilo zaplat stejnou hodnotu na všechny motory a dron by bez problémů vzlétl. Bohužel ideálního drona nemáme, proto musíme motory ovládat individuálně.

PID regulátor reaguje na tzv. error (odchylky od požadovaného stavu) a následně přes koeficienty  $k_p$ ,  $k_i$  a  $k_d$  spočte hodnoty pro ovládání motorů. PID regulátor má tři složky: proporcionální, integrační a derivační.

Proporcionální složka ovlivňuje ovládání motorů lineárně. Pokud je odchylka velká zvýší se rychlost na motorech, pokud je odchylka nulová, motory se plně zastaví a spustí se až když je odchylka není nulová.

Integrační složka ovlivňuje ovládání motorů v závislosti na předchozím stavu. Pokud je odchylka velká, integrační složka se zvětšuje do doby dokud nepřesáhne požadovaný stav, potom se integrační složka zmenšuje a mění svoje znaménko.

Derivační složka reaguje na změnu rychlosti odchylky. Čím rychleji se bude zvyšovat odchylka tím rychleji se bude zvětšovat rychlost na motorech. Derivační složka reaguje proti P a I složce.

Pro stabilizaci drona budou odchylky představovat náklony pitch and roll s opačným znaménkem. Po vyčíslení proporciální, integrační a derivační složky, se nastaví rychlost jednotlivých motorů.

## 5.5 Létaající kontrolér

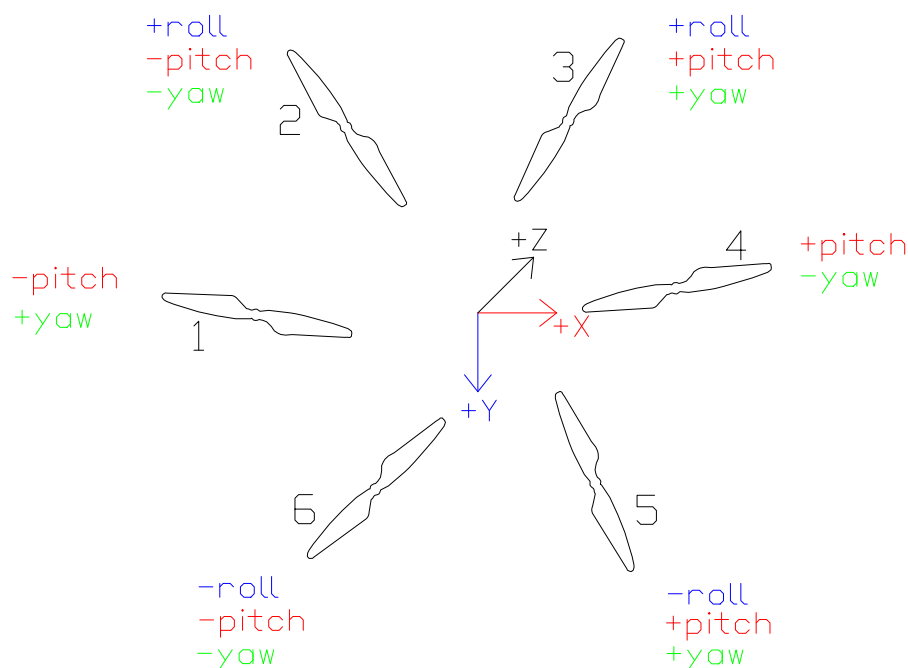
Vstup: IMU, Navigační kontrolér

Výstup: ESC

Létaající kontrolér slouží k synchronizaci a ovládání motorů drona. Létaající kontrolér zpracovává měření z IMU a porovnává je s daty z navigačního kontroléru (pitch, roll a yaw). Pokud úhly náklonů nejsou totožné, kontrolér přes PID regulátor změní rychlost motorů, tak aby úhly ztotožnil.

Při spuštění létaající kontrolér provede kalibraci regulátorů otáček tím, že zapíše minimální a maximální hodnotu výkonu.

Po proběhnutí kalibrace regulátorů otáček, čte data z IMU, fitruje je přes Mahonyho filtr a počítá pitch, roll a yaw. Úhly jsou použitelné po jedné minutě, potom je



Obrázek 5.3: Schéma ovládání vrtulí podle úhlu náklonu

možné ovládat motory.

Z navigačního kontroléru jsou získávána data, která jsou následně separována a interpolována do požadových hodnot. Hodnoty se rozlišují prvním bytem, který je písmeno definující o jakou hodnotu se jedná. Další dva byte definují číslo od 0 do 99, které se vyinterpoluje na požadovaný rozsah.

Byte	Zpráva	Od	Do
T	Throttle	1000 uS	1700 uS
P	Pitch	-25°	+25°
R	Roll	-25°	+25°
Y	Yaw	0°	360°

Hodnota výkonu motoru/throttle se vyinterpoluje jenom do 1700, protože k hodnotě se ještě přičítá údaje z PID regulátoru. Pokud bychom zapsali hodnotu vyšší než 2000 spálil by se regulátor otáček.

Hodnota náklonů pitch a roll může být nejvýše 25 stupňů, kdyby byla hodnota větší hrozilo by přerácení dronu.

## 5.6 Překážkový kontrolér

Vstup: 6x laserový modul

Výstup: Navigační kontrolér

Překážkový kontrolér má za úkol zabránit kolizi drona s cizím objektem. Laserové moduly jsou nasměrovány do směrů pohybu drona podle úhlů pitch a roll a jsou nastaveny na neustálé měření vzdáleností. Pokud v blízkosti dronu bude cizí objekt kontrolér pošle zprávu o existující překážce navigačnímu kontroléru a její poloze.

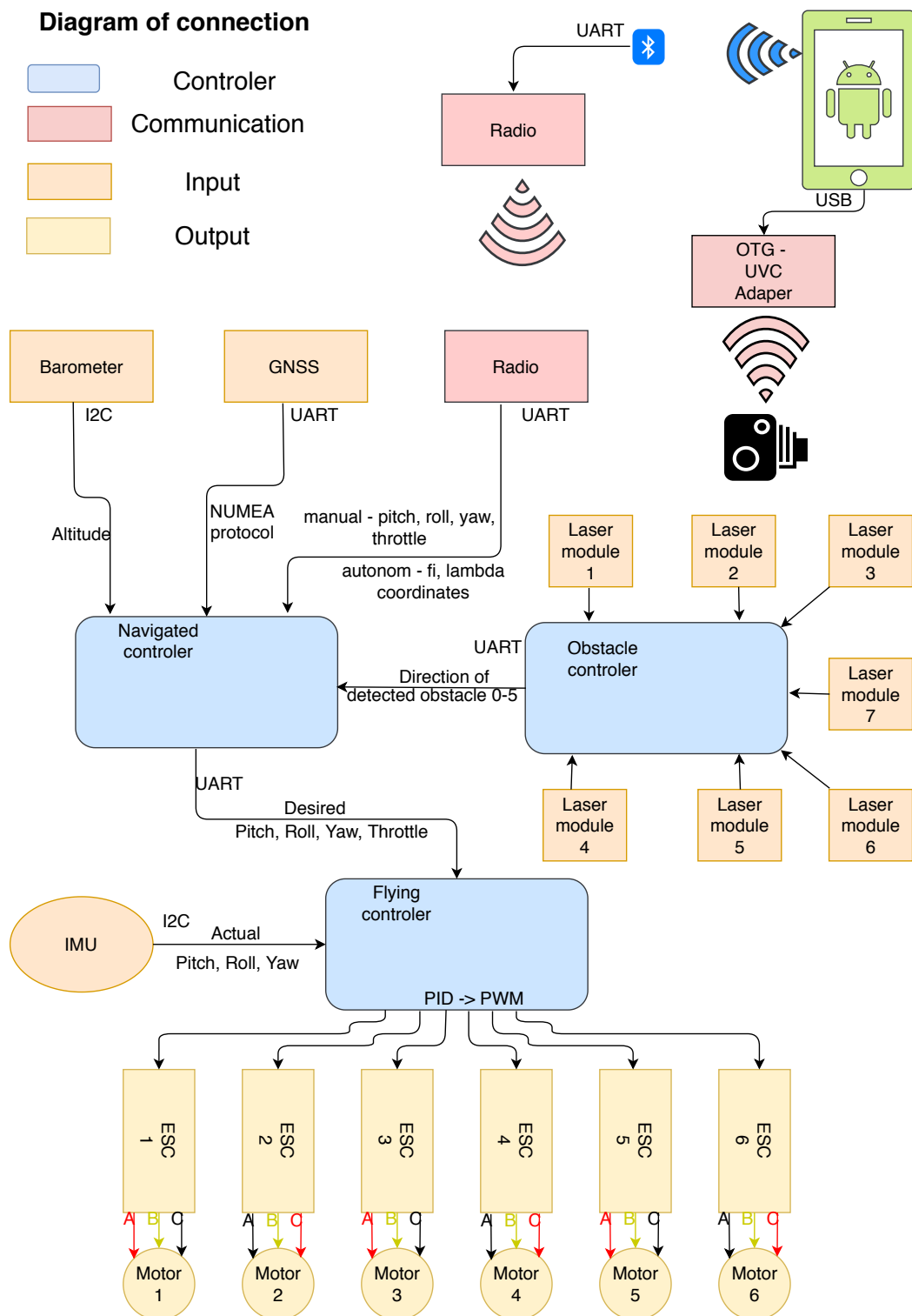
+/-	Úhel	Zpráva
+	roll	2
-	roll	4
-	pitch	1
+	pitch	3

## 5.7 Navigační kontrolér

Vstup: Rádio, Bluetooth, Barometr, GNSS, Překážkový kontrolér

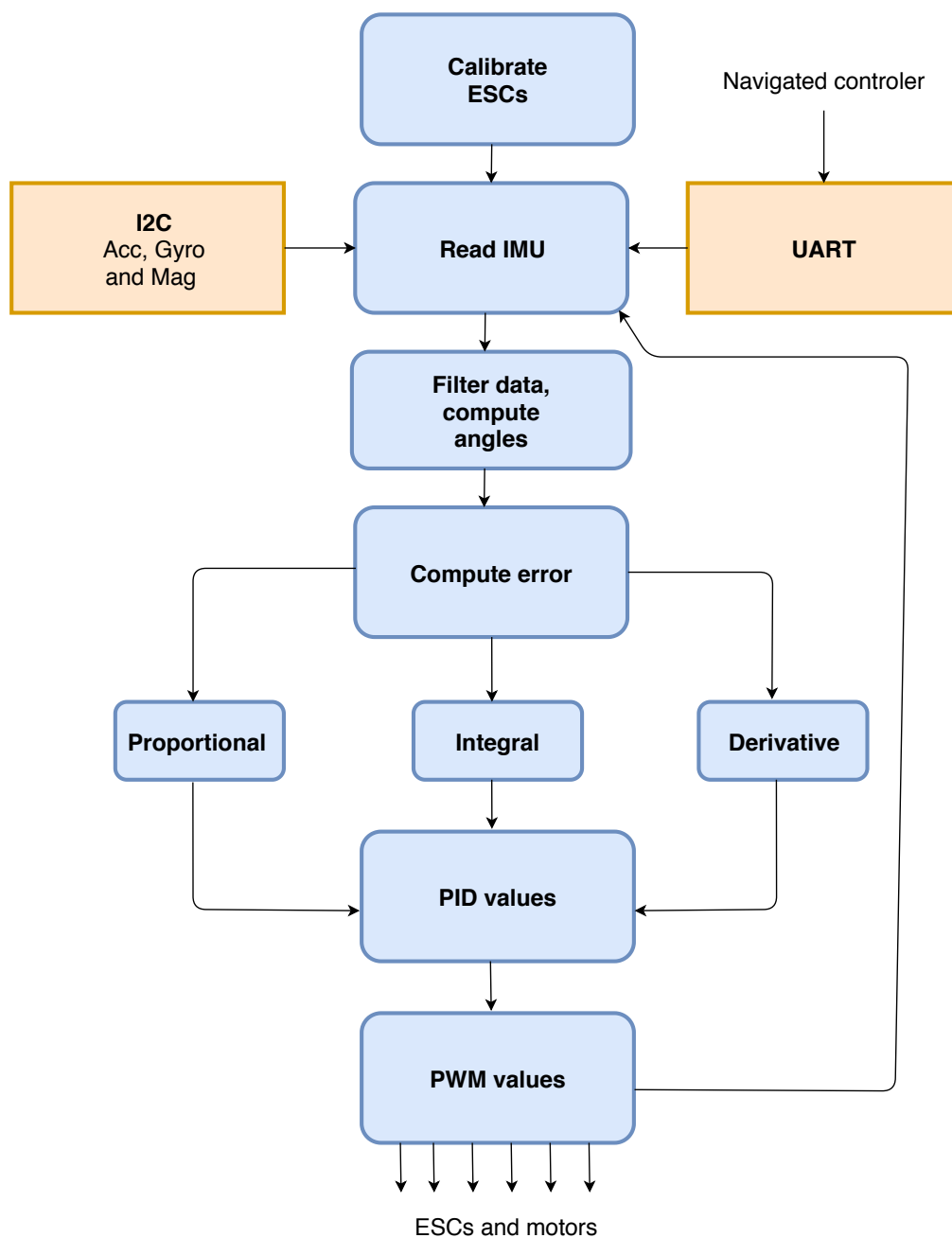
Výstup: Létající kontrolér

Navigační kontrolér složí ke komunikaci s ovládacím zařízením, sběru dat z gnss, barometru a překážkového kontroléru, vyhodnocení polohy a v závislosti na tom všem ovládat létající kontrolér pro pohyb drona.



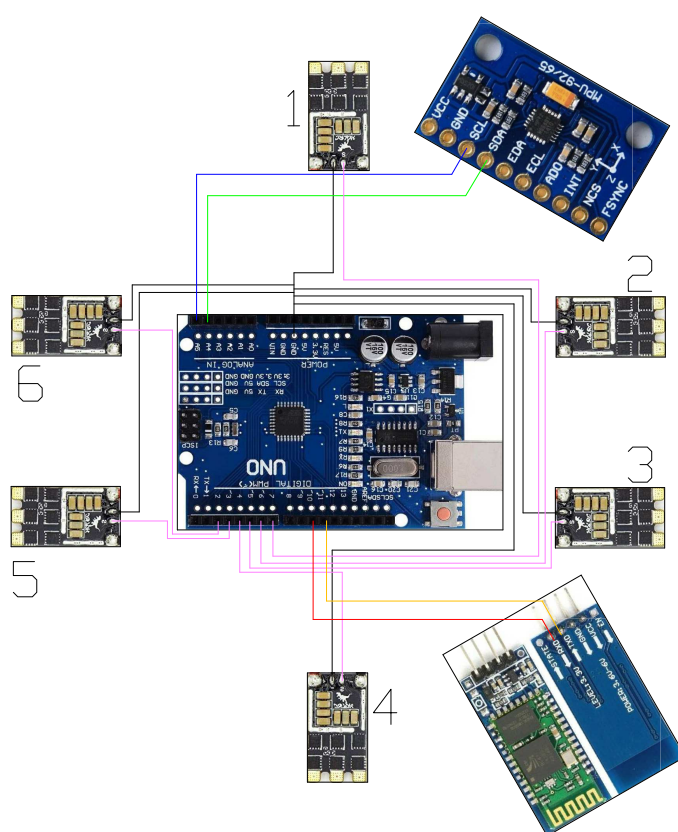
Obrázek 5.4: Diagram komponent

### Flying Controller



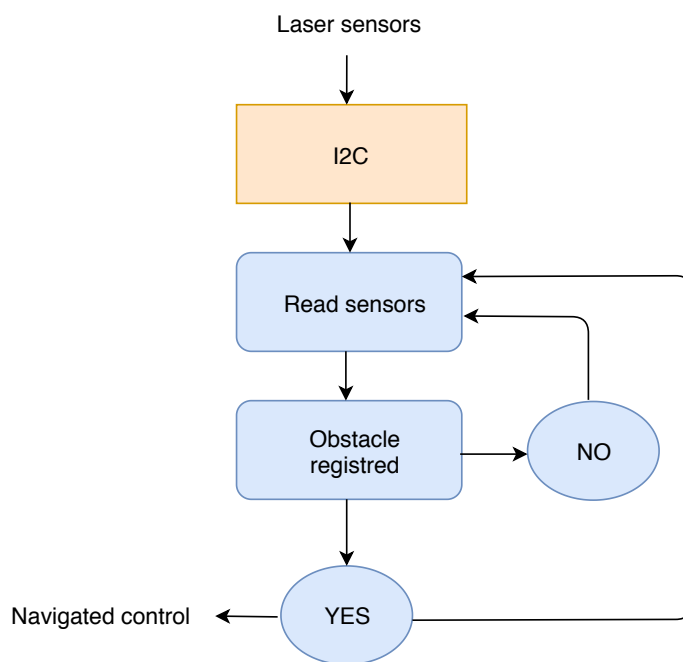
Obrázek 5.5: Diagram algoritmu létajícího kontroléru



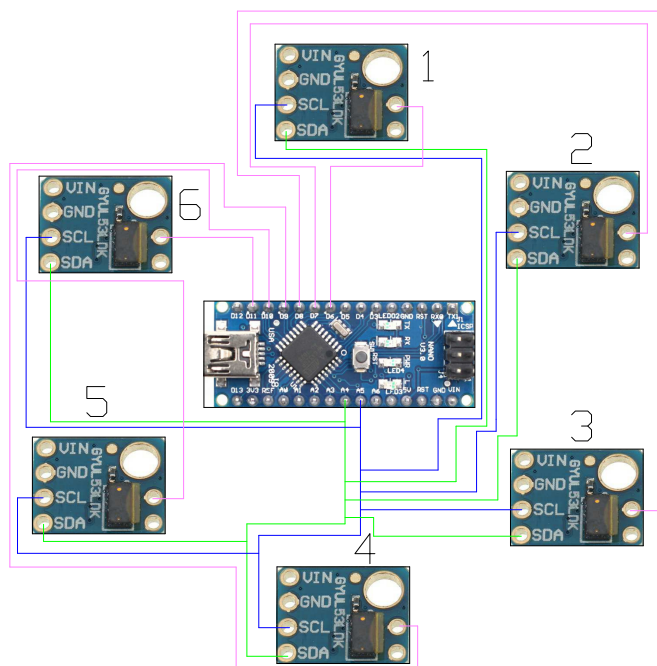


Obrázek 5.6: Schéma zapojení Létajícího kontroléru

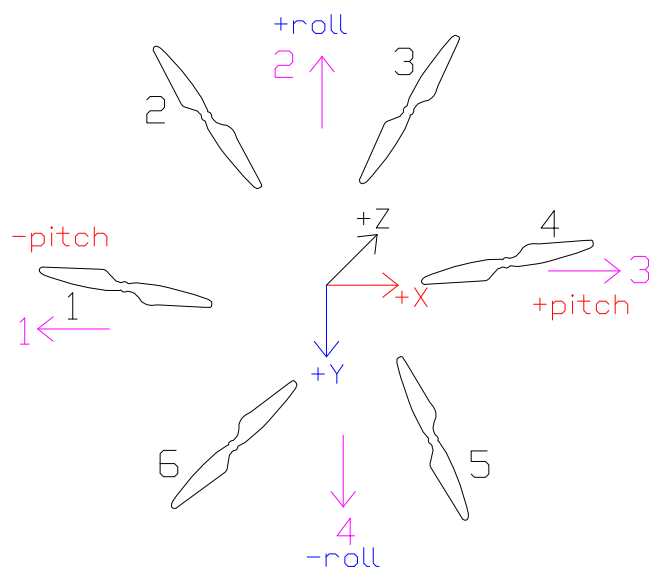
### Obstacle control



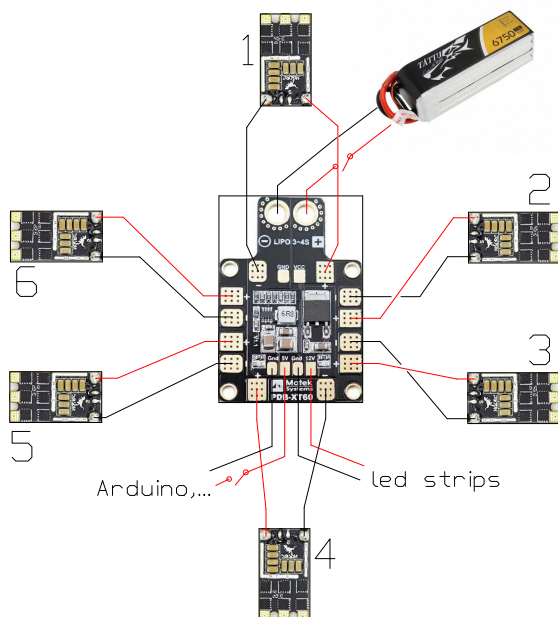
Obrázek 5.7: Diagram algoritmu překážkového kontroléru



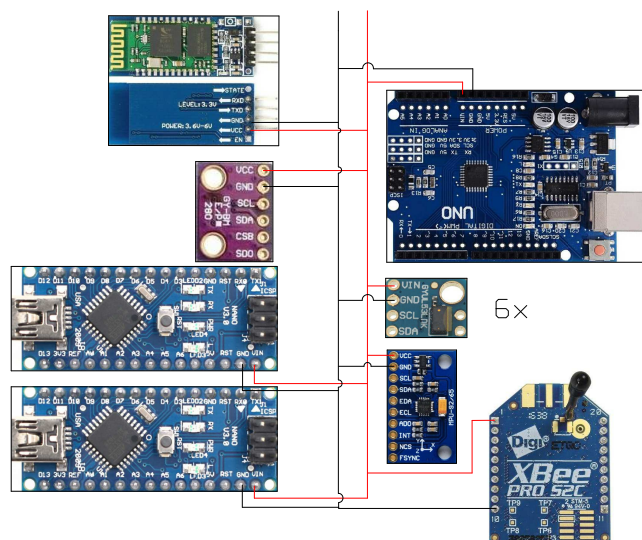
Obrázek 5.8: Schéma zapojení Překážkového kontroléru



Obrázek 5.9: Schéma zpráv o cizím objektu



Obrázek 5.10: Schéma zapojení napájení motorů



Obrázek 5.11: Schéma zapojení napájení Arduina a modulů

## 6 Testování

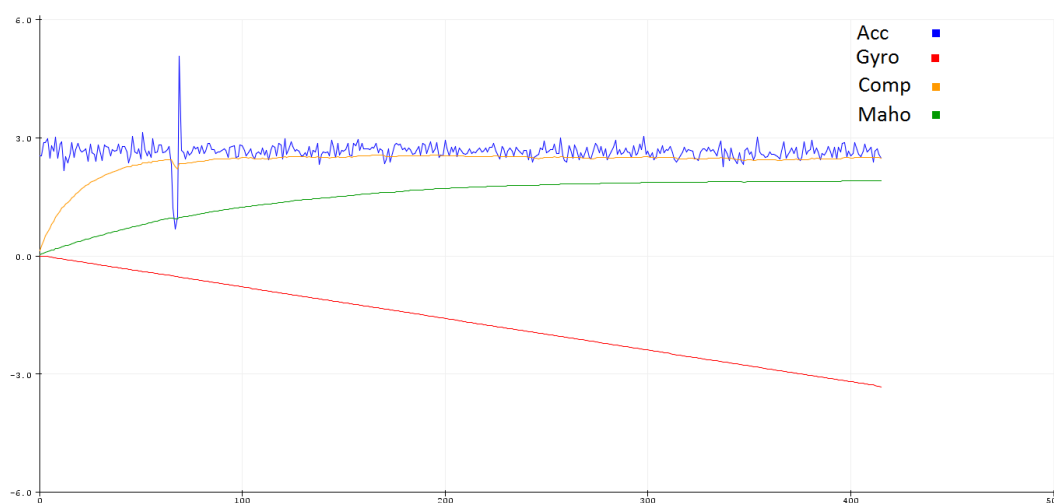
### 6.1 IMU filtry

Pro použití ovládání drona byly uvažovány dva filtry Mahonyho a komplementární. Jednotlivé filtry byly testovány, jak obrazově tak i numericky.

Obrazově byla testována reakce na pohyb a ustálení polohy. Po reakční stránce a ustálení polohy byl lepší komplementární filtr. Vzhledem k jednoduchosti filtru, reakční doba IMU jednotky je minimální. Výsledky jsou patrné z grafů.

Numericky byl testován rozptyl střední hodnoty. Byla použita data po ustálení polohy v časovém intervalu čtyř minut. Výsledky byly rovnocenné, oba filtry měly rozptyl střední hodnoty v řádek setin stupně.

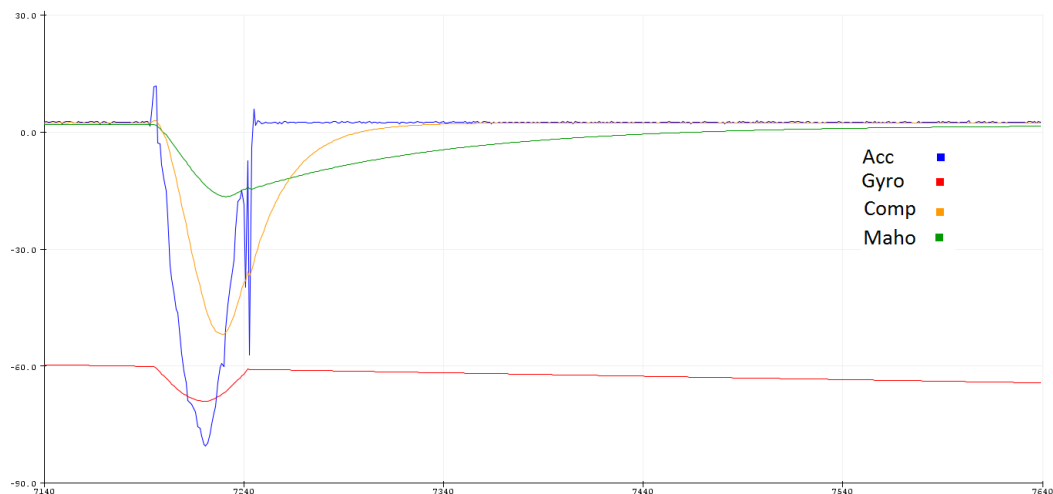
Pro ovládání drona je potřebná rychlá reakce IMU, proto byl použit komplementární filtr.



Obrázek 6.1: Inicializace IMU

### 6.2 Létaající kontrolér

Testování algoritmu létajícího kontroléru bylo prováděno na vyrobené konstrukci. Konstrukce se skládá ze čtyř latěk, které tvoří rám. Uprostřed je upevněná kovová trubka, na které se pohybuje dron. Dron je pevně připevněn k trubce tak, aby pohyboval po obvodu trubky. Na stranách trubky jsou umístěny molitanové pruhy kvůli tlumení nárazu stojánku drona. Konstrukcí je docíleno simulování stavu letu s



Obrázek 6.2: Náklon IMU jednotky

jedním stupněm volnosti.

Na konstrukci byla prováděna kalibrace PID regulátoru pro úhly pitch a roll. Kalibrace byla úspěšná při dostažení stabilizace drona na trubce. Kalibrace byla prováděna pro úhel pitch, výsledky kalibrace se použijí i pro úhel roll.

Prvně byl zjišťován koeficient pro proporcionální složku. Koeficient byl navyšován do doby, než výkon vrtule dokázal drona srovnat z nakloněné polohy do vodorovné. Derivační koeficient byl zvyšován do doby, kdy PD regulátor dokázal drona stabilizovat ve vodorovné poloze. Integrační koeficient pouze doladil průběh PID regulátoru.



Obrázek 6.3: Testování v konstrukci

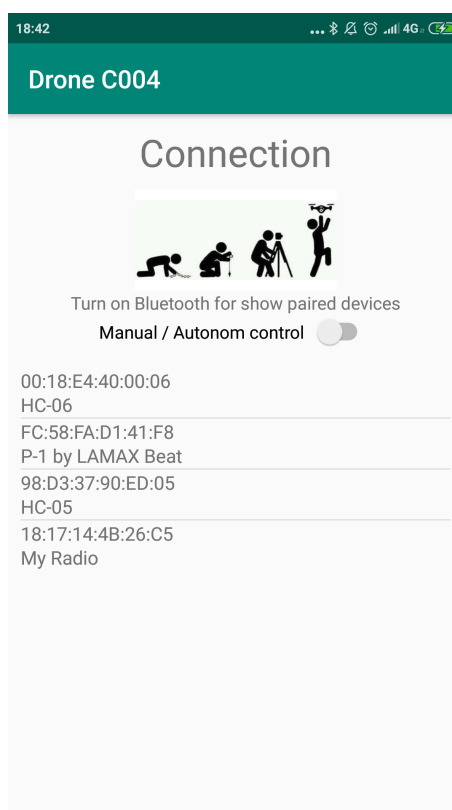
## 7 Ovládání

Pro ovládání drona byla vytvořena jednoduchá aplikace pro Adroid. Aplikace byla napsána v programovacím jazyku Java a programovacím prostředí Android studio.

Aplikace využívá Bluetooth, GNSS mobilu. Přes bluetooth modul probíhá přenos dat pro ovládání drona, GNSS slouží pro zjišťování polohy uživatele a zobrazí na widgetu Google Maps.

### 7.1 Hlavní obrazovka

Při otevření aplikace se na display zobrazí hlavní obrazovka. Zde má uživatel na výběr zda využije manuální či autonomní ovládání. Po rozkliknutí jednoho ze spárovaných bluetooth zařízení, aplikace otevře okno pro ovládání.

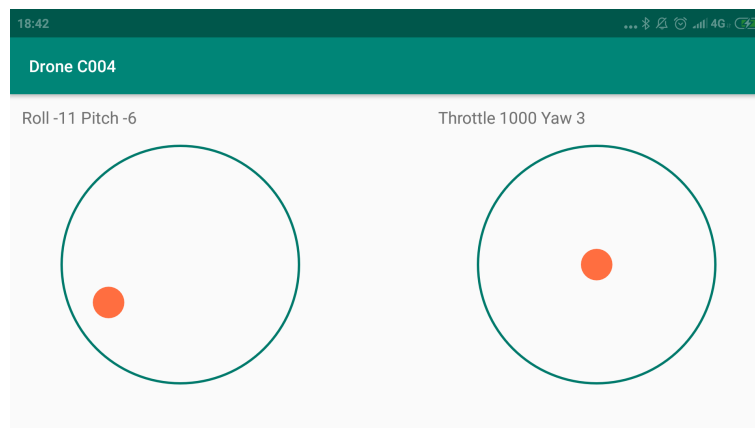


Obrázek 7.1: Screenshoot hlavní obrazovky



## 7.2 Manuální ovládání

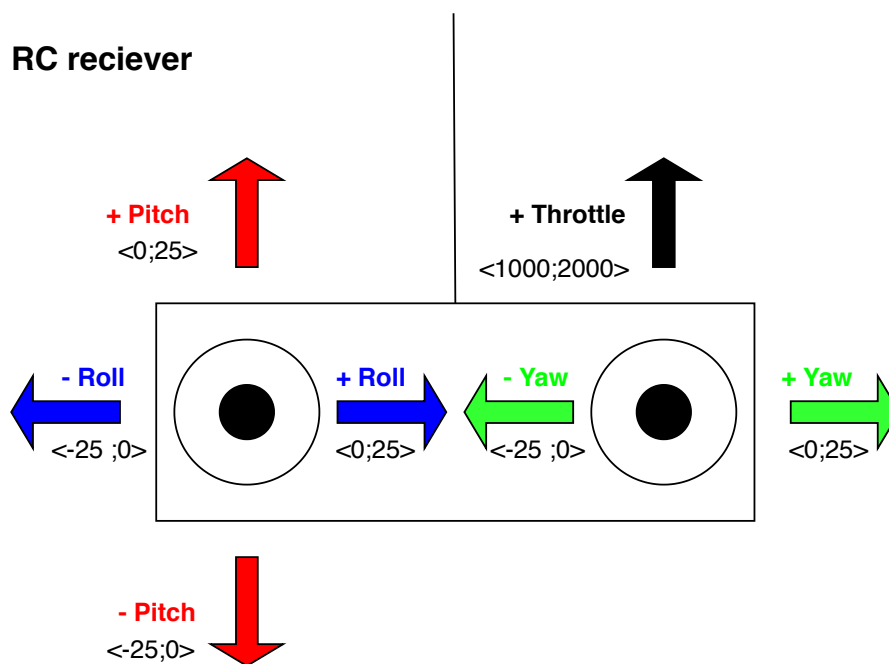
Manuální ovládání funguje totožně jako RC soustava. Levý joystick slouží k ovládání náklonů pitch a roll, pravý joystick složí k ovládání throttle a yaw.



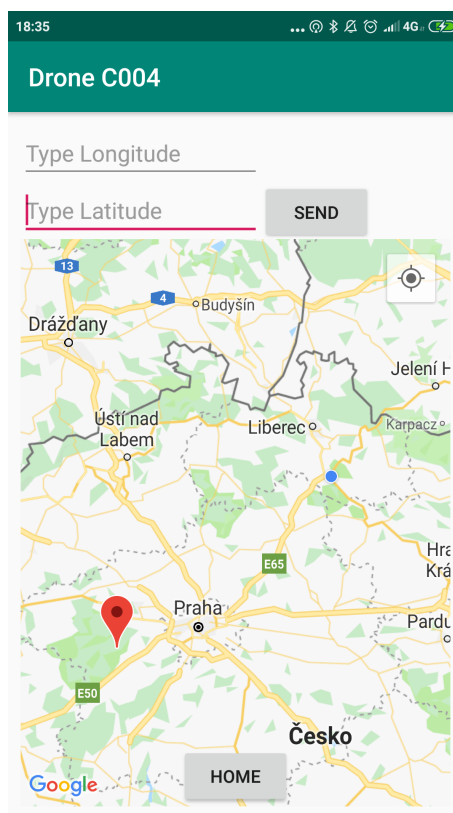
Obrázek 7.2: Schreenshoot obrazovky pro manuální ovládání

## 7.3 Autonomní ovládání

Pro autonomní ovládání stačí pouze zadat souřadnice v systému WGS-84. Přes tlačítko SEND je zaslat dronovi a uživatel může na mapě sledovat, kde se dron nachází. Spodní tlačítko Home slouží k návratu drona a startovní místo.



Obrázek 7.3: Diagram RC soustavy



Obrázek 7.4: Schreenshoot obrazovky pro autonomní ovládání

## Seznam zkratek

LiPo	Lithium-polymerový akumulátor
PDB	distribuční deska (Power Distribution Board)
CCW	údaj o směru otáčení proti směru hodinových ručiček (counter clockwise)
CW	údaj o směru otáčení po směru hodinových ručiček (clockwise)
BLDC	Bezkartáčové stejnosměrné motory (brush less direct curent)
ESC	Regulátor otáček (Electronic speed control)
VCC	Open Source Geospatial Foundation
GND	Zem (Ground)
S	Ovládací pin (Signal pin)
IMU	Inerciální měřicí jednotka (Inertial Measurement Unit)
GNSS	Globální družicový polohový systém (Global Navigation Satellite System)
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
RTK	Metoda GNSS (Real Time Kinematic)
USB	Metoda GNSS (Real Time Kinematic)
FPV	Pohled z první osoby (First person view)

## Literatura

- [1] ČÚZK, Terminologická. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/slovník>.
- [2] PILGRIM, Mark. *Dive Into Python*. Apress, 2004. ISBN 978-1-59059-356-1.
- [3] ŠVEC, Jan. Učebnice jazyka Python (aneb Létaující cirkus), 2002. Dostupné z: <http://www.root.cz/knihy/ucebnice-jazyka-python/>. Česká verze knihy Python tutorial od Guida van Rossuma a Freda L. Drakea.
- [4] *General Python FAQ* [online].

## A Dokumentace

### A.1 Flying Control

### A.2 Obstacle Control

### A.3 Navi Control