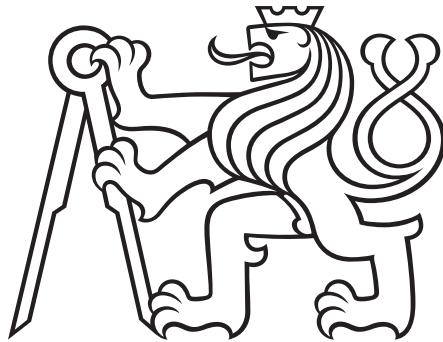


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ  
PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE  
OBOR GEOMATIKA



DIPLOMOVÁ PRÁCE  
KONSTRUKCE BEZPILOTNÍHO LETADLA PRO PRÁCE

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

červen 2019

David ZAHRADNÍK



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta staveb

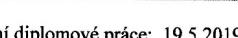
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Zahradník Jméno: David Osobní číslo: 439248  
Zadávající katedra: K155 - Katedra geomatiky  
Studijní program: Geodézie a kartografie  
Studijní obor: Geomatika

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	<u>Konstrukce bezpilotního letadla pro geodetické práce</u>
Název diplomové práce anglicky:	<u>Construction UAV for surveying jobs</u>
Pokyny pro vypracování:	
Sestavení elektronické části ovládání UAV	
Vytvoření řídícího programu na platformě Arduino	
Vytvoření ovládací aplikace pro Smartphone	
Testování	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce:	<u>Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.</u>
Datum zadání diplomové práce:	<u>22. 2. 2019</u>
Termín odevzdání diplomové práce:	<u>19.5.2019</u>
Údaj uveděte 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“.

22.2.2019

**Datum převzetí zadání**

Podpis studenta(ky)

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá 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 aerial 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 práce“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne ..... . . . . .

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Zdeňkovi Vyskočilovi Ph.D. za pomoc a rady při zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Lukášovi Černému za poskytnuté rady a vysvětlení témat týkajících se elektrotechniky.

# 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>16</b>
4.1	Kostra . . . . .	16
4.2	Baterie . . . . .	16
4.3	Distribuční deska . . . . .	17
4.4	Vrtule . . . . .	18
4.5	Bezkartáčové motory . . . . .	18
4.6	Regulátory otáček . . . . .	19
4.7	IMU . . . . .	20
4.7.1	Akcelerometr . . . . .	21
4.7.2	Gyroskop . . . . .	21
4.7.3	Magnetometr . . . . .	21
4.8	Komunikační zařízení . . . . .	22
4.8.1	Radio . . . . .	22
4.8.2	Bluetooth . . . . .	23
4.9	Řídící jednotka . . . . .	23
4.9.1	Arduino . . . . .	24
4.10	GNSS . . . . .	24
4.11	Výškoměr . . . . .	25
4.11.1	Barometr . . . . .	25
4.12	Laserový dálkoměr . . . . .	25
4.13	Kamera . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Konstrukce</b>	<b>28</b>
5.1	Ovládání ESC (regulátorů otáček) . . . . .	28
5.2	Kalibrace regulátorů otáček . . . . .	29
5.3	Filtrace dat IMU . . . . .	32
5.3.1	Komplementární filtr . . . . .	33

5.3.2	Kalmanův filtr . . . . .	33
5.3.3	Mahonyho filtr . . . . .	34
5.4	PID regulátor pro synchronizaci motorů . . . . .	34
5.5	Komunikační protokol . . . . .	36
5.6	Radiová komunikace XBEE . . . . .	37
5.7	Letový kontrolér . . . . .	38
5.8	Překážkový kontrolér . . . . .	42
5.9	Navigační kontrolér . . . . .	44
5.10	Finální sestavení . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Testování</b>	<b>50</b>
6.1	Letový kontrolér . . . . .	50
6.1.1	IMU filtry . . . . .	51
6.2	Překážový kontrolér . . . . .	53
6.3	Navigační kontrolér . . . . .	53
<b>7</b>	<b>Ovládání</b>	<b>54</b>
7.1	Hlavní obrazovka . . . . .	54
7.2	Manuální ovládání . . . . .	55
7.3	Autonomní ovládání . . . . .	56
7.4	Kamera . . . . .	57
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>59</b>
<b>Seznam zkratek</b>		<b>61</b>
<b>Literatura</b>		<b>63</b>
<b>A</b>	<b>GIT repozitář</b>	<b>67</b>

# Seznam obrázků

3.1	Let určitým směrem(motion-směr, thrust/drag-tah, weigth-váha) . . . . .	13
3.2	Přehled vtrulí se CW a CCW orientací . . . . .	14
3.3	Úhly rotace (Axis - Osa) . . . . .	15
4.1	Distribuční deska - Matek PDB-XT60 . . . . .	18
4.2	Regulátor otáček - HGLRC BS30A . . . . .	20
4.3	Schéma zapojení motoru a regulátoru . . . . .	20
4.4	IMU - MPU9250 . . . . .	22
4.5	XBee . . . . .	23
4.6	Bluetooth - HC-05 . . . . .	23
4.7	Arduino UNO a Nano . . . . .	24
4.8	Barometr - BMP280 . . . . .	25
4.9	Laserový modul - VL53l0x . . . . .	26
4.10	Kamera TX02 s přijímačem pro smartphone . . . . .	27
5.1	Ukázka PWM . . . . .	29
5.2	Schéma zapojení pro kalibraci regulátoru otáček . . . . .	30
5.3	Ukázka kalibrace v programu HLBelisuite před kalibrací . . . . .	31
5.4	Ukázka kalibrace v programu HLBelisuite po kalibraci . . . . .	31
5.5	Schéma Komplementárního filtru . . . . .	33
5.6	Schéma PID regulátoru . . . . .	35
5.7	Schéma všech PID regulátorů při stavbě dronu . . . . .	36
5.8	XBEE shield . . . . .	38
5.9	Schéma ovládání dronu podle úhlu náklonu . . . . .	39
5.10	Diagram PWM signálu . . . . .	40
5.11	Diagram algoritmu letového kontroléru . . . . .	41
5.12	Schéma zapojení letového kontroléru . . . . .	42
5.13	Diagram algoritmu překážkového kontroléru . . . . .	43
5.14	Schéma zapojení Překážkového kontroléru . . . . .	43
5.15	Schéma zpráv o překážce . . . . .	44
5.16	Schéma zapojení Navigačního kontroléru . . . . .	45
5.17	Diagram navigačního kontroléru . . . . .	46
5.18	Schéma zapojení napájení Arduina a modulů . . . . .	47

5.19	Diagram komponent	48
5.20	Schéma zapojení napájení motorů	49
6.1	Testování v konstrukci	51
6.2	Inicializace IMU	52
6.3	Náklon IMU jednotky	53
7.1	Screenshot hlavní obrazovky	54
7.2	Schreenshot obrazovky pro manuální ovládání	55
7.3	Diagram RC soustavy	56
7.4	Schreenshot obrazovky pro autonomní ovládání	57
7.5	Schreenshot aplikace FPViewer	58

# Seznam tabulek

5.1	Analogové komunikační protokoly pro regulátory otáček . . . . .	28
5.2	Digitální komunikační protokoly pro regulátory otáček . . . . .	28
5.3	Komunikační protokol přes seriové rozhraní UART . . . . .	37
5.4	Zpráva o překážce . . . . .	44
6.1	Komplementární filtr . . . . .	52
6.2	Mahonyho filtr . . . . .	52

# 1 Úvod

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

V dnešní době dron plní funkci nosiče fotogrammetrické kamery nebo skeneru. Využívá se 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 popisována stavba dronu na platformě Arduino, který by mohl nahradit výtyčku při různých zeměměřických pracích.

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

Další možnosti by bylo připevnění laserového dálkoměru na dron a implementaci automatického cílení dle hranolu drženého uživatelem na zemi, dron by držel pozici nad hranolem. Využití by se našlo v nepříznivých oblastech pro GNSS aparatury (vysoké objekty: stromy, budovy). Dron s GNSS aparaturou by létal nad vysokými objekty s ideální konfigurací satelitů a uživatel by s hranolem na zemi měřil polohu přes GNSS na dronu.

Pokud by dron dokázal komunikovat s totální stanicí, získali bychom přesné souřadnice letu dronu, které by se daly použít pro přesné definování letové dráhy. Využití by se našlo při měření skal, mostů a sloupů.

Pro uskutečnění nápadů je potřeba znát problematiku letu dronu, proto se diplomová práce zabývá konstrukcí dronu. V práci se čtenář dozví o teorii letu dronů, použitých komponent pro stavbu a následném sestavování.

## 2 Rešerše

Bezpilotní letadla/drony jsou fenoménem dnešní doby a zabývá se jimi spousta článků a projektů. Jsou zde uvedené projekty, které se zabývají stavbou dronu na platformě Arduino.

### **Projekt YMFC-32**

Projekt popisuje stavbu dronu/quadrocoptéry ovládaného přes RC soupravu. Pro ovládání motorů na dronu byla použita platforma Arduino a periferie Arduina (IMU, Bluetooth). [37]

### **Univerzální software pro ovládání RC modelů;**

Software je používán pro stavbu drona na platformě Arduino. Software obsahuje předdefinované různé typy dronů a Arduino periferíí. [26]

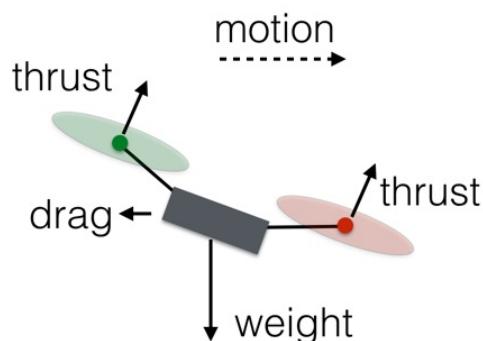
### **Projekt Arduino quadrocopter**

Projekt se zabývá stavbou quadrokoptéry na platformě Arduino s využitím softwaru Multiwii. [27]

### 3 Teorie

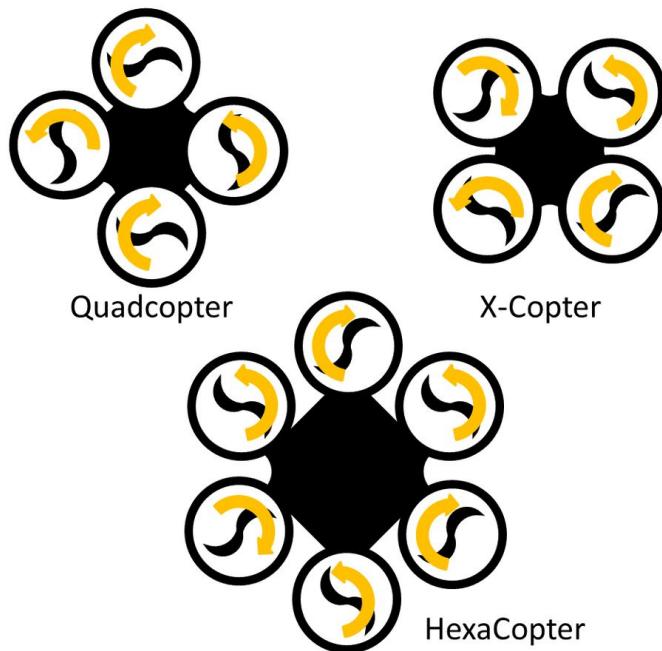
Nejdůležitějšími prvky dronu jsou motory s vrtulemi, řídící jednotka a IMU. Motory s vrtulemi fungují jako ventilátory, které ženou vzduch určitým směrem, pokud všechny motory ženou vzduch proti zemi, dron by měl vzlétnout. Proč je tedy potřeba řídící jednotka a IMU? Bohužel rozložení hmotnosti dronu a drobné mechanické rozdíly v motorech zapříčiní různé tahy jednotlivých motorů. Díky ovládání motorů podle řídící jednotky, dokážeme vliv různých tahů vyrovnat a dron může letat.

Jakým způsobem vykonává dron pohyb? Let dronu v určitém směru je způsoben snížením výkonu motorů ve směru letu a zvýšením výkonu motorů v opačném směru letu, viz obrázek č. 3.1. Rotace dronu je uskutečněna zvýšením výkonu motorů s různými typy vrtulí, po směru hodinových ručiček a proti (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, viz obrázek 3.2.



Obrázek 3.1: Let určitým směrem(motion-směr, thrust/drag-tah, weight-váha)

[29]



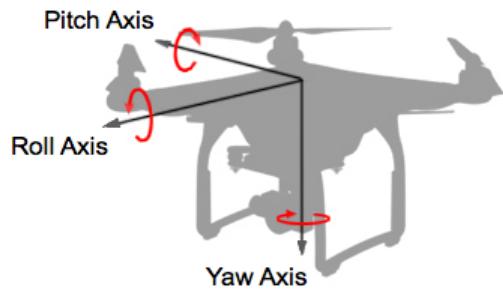
Obrázek 3.2: Přehled vtrulí se CW a CCW orientací

[33]

Důležitou roli při letu dronu hraje IMU jednotka, která určuje úhly rotace. 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 težišti dronu. Osa X směruje do směru letu, osa Y je na ni kolmá a osa Z je totožná s tížnicí, viz obrázek 3.3.

Řízení dronu probíhá přes jmenované úhly pitch, roll a yaw. Uživatel zadává úhly a mikrokprocesor podle IMU zadané úhly nastavuje. Nastavení úhlu vzniká pomocí zvyšování a snižování výkonu na jednotlivých motorech. Popis řízení dronu je podrobněji vysvětlen v kapitole Ovládání jednotlivých elektronických částí u Letového kontroléru.

Existuje vícero překladů úhlů pitch, roll a yaw (např. vybočení, klonění a klopení, nebo příčný náklon, podélný sklon a zatáčení), pro zjednodušení bude v textu ponecháno pojmenování v anglickém jazyce.



Obrázek 3.3: Úhly rotace (Axis - Osa)

[13]

## 4 Komponenty

Při stavbě dronu je potřeba rozmyslet jeho účel, nosnost a délku letu. [14]

Od těchto myšlenek (potřeb) se odvíjí dílčí součástky a jejich parametry. Základními součástkami jsou kostra, baterie, vrtule, motory, regulátory otáček, IMU, komunikační zařízení a řídící jednotka.

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

V této diplomové práci je popisována stavba hexakoptéry, jejíž kostra a motory byly použity z nefunkčního dronu of firmy Microkopter zapůjčeného z laboratoře fotogrammetrie.

### 4.1 Kostra

Kostra by měla být lehká a pevná. Nejčastěji se používá karbon a hliník pro stavbu dronu 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, ramena a držáky motorů z hliníku.

### 4.2 Baterie

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

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 konstantou C. Je-li konstanta C rovna 25 a kapacita baterie je 6750 mA, lze bezpečně odebírat proud o velikosti cca 168 Ampérů. Maximální odběr nesmí být větší, mohlo

by dojít k poškození baterie.

### Výpočet proudového zatížení

$$6.75A * 25C = 168.75A$$

#### 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

Cena: 2500 Kč

[4]

#### Rady pro zacházení s LiPo bateriami

Nabíjet baterie proudem s 1C, tedy baterii s kapacitou 6750mA dobíjet proudem o velikosti 6.75A.

Nepřebíjet baterie nad hodnotu napětí 4.2V na článek.

Nepodbíjet baterie pod napětí 2.7V.

Při delším skladování vybít 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).

#### Parametry distribuční desky

Matek PDB-XT60

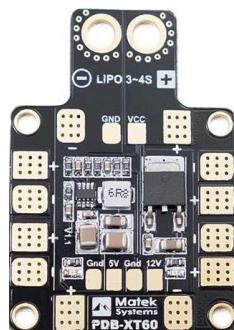
Množství LiPo článků: 3S-4S

Vstup VCC, GND

Výstup, 6x + a -, 12V, 5V, 2x -

Cena: 130 Kč

[28]



Obrázek 4.1: Distribuční deska - Matek PDB-XT60

## 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 dronu kolem svislé osy. Další parametry jsou průměr a rozteč, nejčastěji uvedená v palcích. Materiál používaný na výrobu vrtulí je plast nebo karbon. Doporučují při stavbě dronu a jeho testování používat plastové vrtule, jsou cenově méně náročné.

### Parametry použitých vrtulí

Materiál: plast

Průměr: 12 palců

Rozteč: 3.8 palce

Cena: 6 x 100 Kč

## 4.5 Bezkartáčové motory

Motor se skládá z rotoru a statoru. Rotor je permanentní magnet, stator je prstenec uspořádaných cívek. Postupným pouštěním proudu do cívek (vytvářením 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 rychlosť motoru. Prohozením pinů A a C určíme směr otáčení motoru, možnost otáčení lze změnit i při kalibraci regulátoru otáček.[21]

Výběr motorů je závislý na konstatně Kv, parametrech baterie a parametrech regulátoru otáček. Hodnota Kv neboli rpm/V je konstanta, která popisuje rychlosť otáčení motoru v závislosti na napětí baterie. Platí úměra, čím menší je hodnota Kv, tím větší je tah motoru a menší rychlosť otáčení. Naopak čím větší je hodnota Kv, tím je menší tah a větší rychlosť otáčení. U závodních dronů se používají motory s větší hodnotou Kv, pro fotogrammetrii motory s menší hodnotou Kv.[19] [34]

### Parametry použitých motorů

Firma: Microkopter

Množství LiPo článků: 4S-6S

Provozní napětí: 25A

Maximální provozní napětí 30A

Rychlosť bez zatížení: 500 rpm/V

Nosnost: 2200g

Váha: 121g

Cena: 6x 1500 Kč

[24]

## 4.6 Regulátory otáček

Regulátory otáček (ESC) jsou nedílnou součástí BLDC motorů. Regulátor je řídící jednotka motoru, která zajistí plynulý chod. Regulátor se ovládá přes různé komunikační protokoly, které jsou popsány v kapitole Konstrukce.

### Parametry použitých regulátorů otáček

HGLRC BS30A

Vnitřní software: BLHeliSuite

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

Výstup: A, B, C

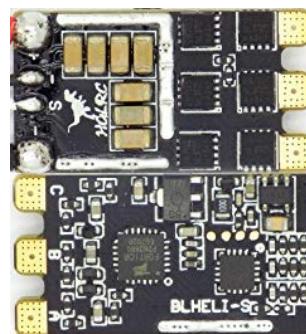
Maximální proud: 30A / 40A max

Množství LiPo článků: 2S-5S

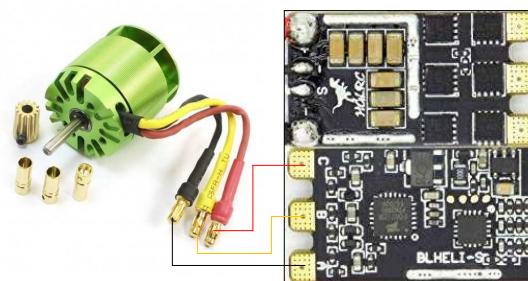
Použitá knihovna: Servo

Cena: 200 Kč

[16]



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 orientaci v magnetickém poli ve třech osách. Skládá se z gyroskopu, akcelerometru a magnetometru. Všechna tři zařízení dohromady tvoří devět stupňů volnosti. Použité IMU má shodný souřadný systém akcelerometru a gyroskopu, magnetometr má opačnou osu z a prohozené osy x a y.[18]

### 4.7.1 Akcelerometr

Akcelerometr slouží k určování zrychlení. Elektronický akcelerometr měří zrychlení na základě změny odporu mezi pevnou částí a pohyblivou částí akcelerometru.

### 4.7.2 Gyroskop

Gyroskop slouží k měření úhlové rychlosti. Elektronický gyroskop měří úhlové rychlosti také na základě změny odporu, 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 plátu hromadí elektrony a protony. Měřené napětí na stranách plátu je úměrné k síle magnetického pole.

#### Parametry použité IMU jednotky

Arduino modul MPU9250

Obsahuje: akcelerometr, gyroskop, magnetometr

Komunikace: I2C, SPI

Vstup: VCC (5V), GND

Výstup: SDA, SCL (I2C)

Cena: 300 Kč

[25]



Obrázek 4.4: IMU - MPU9250

## 4.8 Komunikační zařízení

Pro bezdrátové ovládání dronu byl použit radiový modul a bluetooth.

### 4.8.1 Radio

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

#### Parametry použitého Radiového zařízení

XBEE PRO SS

Provozní napětí: 3.3V

Provozní frekvence: 2.4GHz

Komunikační protokol: ZB ZigBee

Dosah: 1.5 km

[35]



Obrázek 4.5: XBee

#### 4.8.2 Bluetooth

Pro bezdrátovou komunikaci s telefonem byl použit Arduino Bluetooth modul. Bluetooth modul využívá seriové rozhraní UART.

##### Parametry použitého Bluetooth zařízení

HC-05

Bluetooth verze: 2.0

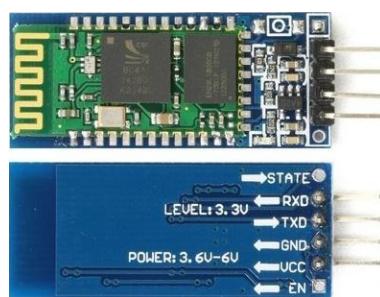
Výchozí rychlosť komunikace: 9600 baudů

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

Výstup: TX, STATE

Použitá knihovna: SoftwareSerial

Cena: 200 Kč



Obrázek 4.6: Bluetooth - HC-05

### 4.9 Řídící jednotka

Pro ovládání všech komponent byla použita platforma Arduino.

### 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 integrována 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 je v rozsahu 5V - 12V. Vstupy Arduina jsou analogové, nebo digitální. Rozsah analogových vstupů je 0-1023. Digitální vstupy mají hodnotu LOW nebo HIGH, nominální napětí na pinech je 5V, pouze na Arduino DUE je hodnota napětí 3.3V. Desky podporují komunikaci přes PWM, I2C(piny SCL, SDA), SPI (piny SCLK, MOSI, MISO, SS) nebo UART (piny TX, RX). Pro každou komunikaci jsou definovány určité digitální piny.

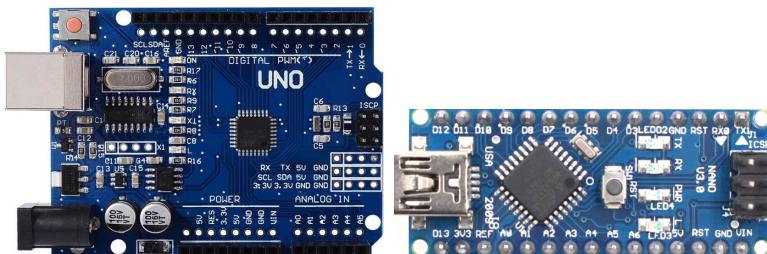
#### Použité desky Arduino

Arduino Uno- (ATmega328, 8bit, 16 MHz, 700 Kč)

Arduino Nano- (ATmega328, 8bit, 16 MHz, 700 Kč)

Arduino Due- (AT91SAM3X8E, 32bit, 84 MHz, 900 Kč)

Cena: 200 - 1000 Kč



Obrázek 4.7: Arduino UNO a Nano

### 4.10 GNSS

Při konstrukci měla být použita GNSS aparatura s podporou RTK z diplomové práce Štěpána Hodíka. Bohužel zatím není GNSS aparatura implementována.

## 4.11 Výškoměr

Pro funkci výškoměru byla požita dvě zařízení: barometr a GNSS.

### 4.11.1 Barometr

Barometrem měříme tlak. Z rozdílů tlaků na startovním místě a ve vzduchu lze spočítat výšku letu dronu.

#### Použitý barometr

BMP280

Vstup: VCC (3.3V), GND,

Výstup: SDA, SCL, SDO, CSB

Měřící rozsah teploty:-40 až +85 stupňů

Měřící rozsah tlaku:300 až 1100 hPa

Přesnost měření teploty: +- 1 stupeň

Přesnost měření tlaku: +- 100 Pa

Použitá knihovna: Adafruit BMP280

Cena: 80 Kč

[6]



Obrázek 4.8: Barometr - BMP280

## 4.12 Laserový dálkoměr

Pro automatizaci je důležité opatřit dron senzory měřící vzdálenost pro detekci překážek. Senzory byly připevněny na ramena vrtulí pro měření vzdáleností ve vodorovné rovině a pro měření ve svislém směru pro přistávání a detekci objektů pod dronem. Použitý laserový dálkoměr měří vzdálenost pomocí tranzitního času.

### Použity laserový modul

laserový modul VL53L0X

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

Výstup: SDA, SCL (I2C)

vlnová délka: 940 nm

měřící rozsah: 0 - 1200 mm

přesnost: 3 procenta měřené délky

Použitá knihovna: VL53L0X

Cena: 230 Kč

[20]



Obrázek 4.9: Laserový modul - VL53L0X

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. Všechny moduly mají továrně nastavenou totožnou adresu pro komunikaci. Pin XSHUT slouží k přepnutí modulu do stan-by režimu pro změnu adresy komunikace.

## 4.13 Kamera

Pro obrazový vjem letu dronu 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 dekóduje a zobrazí na mediu.

### Použitá kamera

Eachine TX02

Vstup: VCC (5V), GND

Výstup: radiový signál s frekvencí 5.8GHz

Zorné pole: 120 stupňů

Rozlišení: 600TVL

Použitá Android aplikace: FPViewer

Cena: 800 Kč



Obrázek 4.10: Kamera TX02 s přijímačem pro smartphone

## 5 Konstrukce

### 5.1 Ovládání ESC (regulátorů otáček)

Regulátor je ovládán přes různé komunikační protokoly. Komunikační protokoly jsou buď analogové nebo digitální. Mezi analogové protokoly patří standartní PWM signál, OneShot125, OneShot42 a MultiShot, mezi digitální patří DSHOT300, DSHOT600 a DSHOT1200. [9]

Standartní PWM signál není klasický PWM signál, kterým se například reguluje výkon žárovky. Standartní PWM signál definuje nulový výkon motoru pro pulz o délce 1ms a maximální výkon o délce 2ms. Teoretická frekvence je 500Hz, lze tedy měnit rychlosť motorů 500krát za vteřinu.

Ostatní protokoly jsou sice rychlejší, ale nemá smysl je implementovat na platformu Arduino z důvodu malého výkonu platformy.

Protokol	Frekvence	Min pulz	Max pulz
Standart PWM	500 Hz	1000 µs	2000 µs
OneShot125	4 kHz	125 µs	250 µs
OneShot42	12 kHz	42 µs	84 µs
MultiShot	40 kHz	12.5 µs	25 µs

Tab. 5.1: Analogové komunikační protokoly pro regulátory otáček

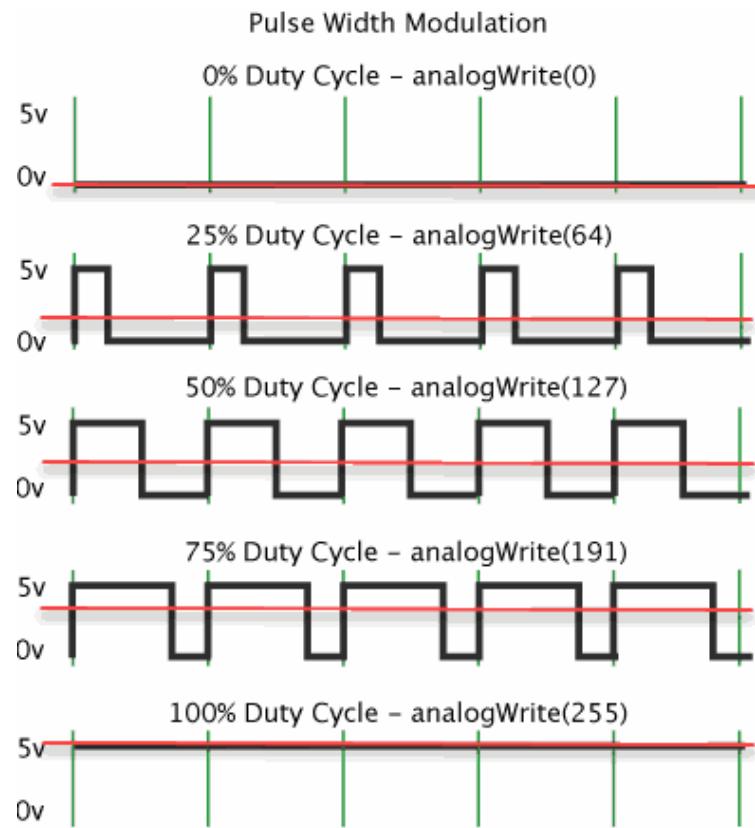
Protokol	Rychlosť komunikace
DSHOT150	150 000 bps
DSHOT300	300 000 bps
DSHOT600	600 000 bps
DSHOT1200	1200 000 bps

Tab. 5.2: Digitální komunikační protokoly pro regulátory otáček

#### PWM

PWM modulace je určená pro přenos analogového signálu pomocí dvou hodnot

(Low a High), přenos probíhá na digitálních pinech. Přenášená hodnota je zaimplementována do poměru High/Low. Poměr se nazývá střída a nabývá hodnot 0-100 procent. Hodnoty Low a High se zapisují v cyklu.[32]



Obrázek 5.1: Ukázka PWM

[31]

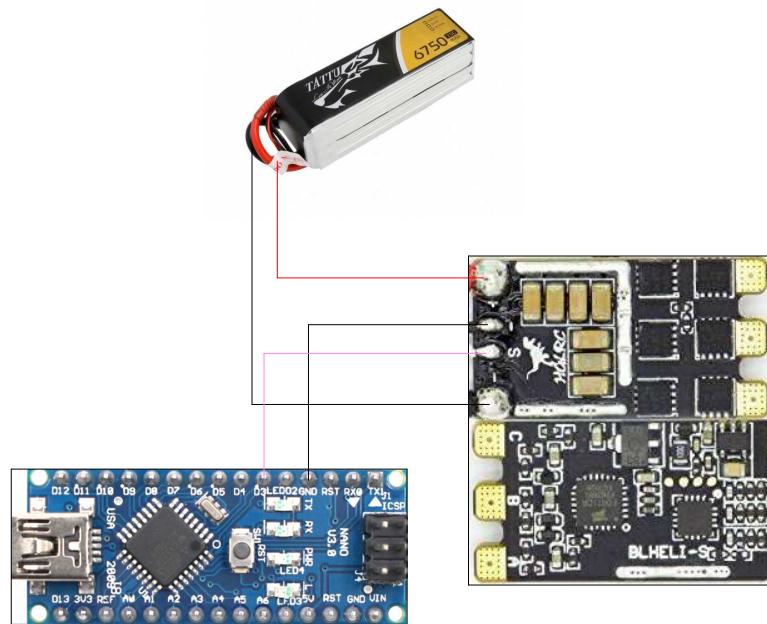
## 5.2 Kalibrace regulátorů otáček

Kalibrace regulátorů je nutná pro definování komunikačního protokolu a různých funkcí.

Pro kalibraci je potřeba kalibrovaný regulátor, propojovací dráty a Arduino Nano. V programu BLHeliSuite lze kalibrovat i s jinou platformou Arduino, bohužel kalibrace se podařila pouze s deskou typu Nano. Zapojení regulátoru se provede přes schéma na obrázku 5.2.

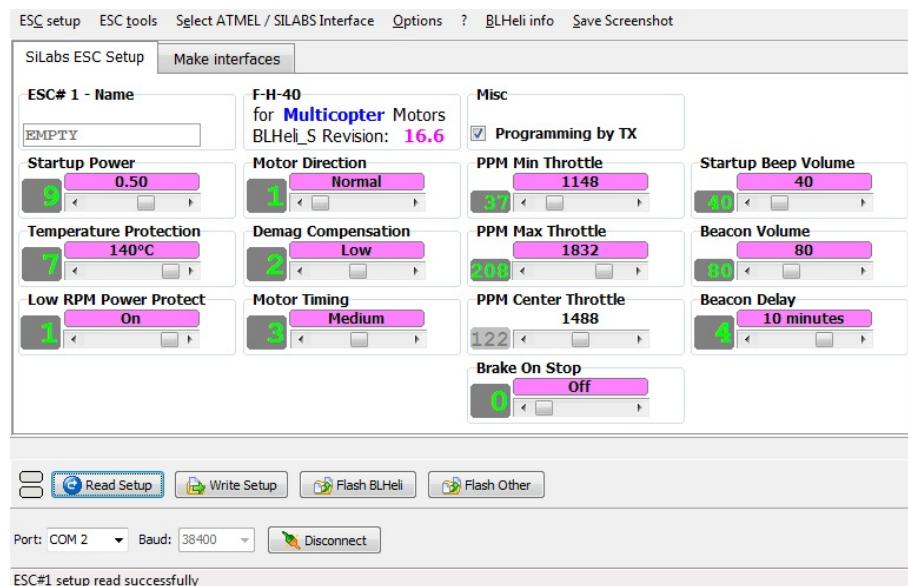
Po zapojení komponent a nastavení šablony se vybere sériový port pro komunikaci mezi počítačem a Arduinem. Přes tlačítko Read Setup se načte tovární nastavení

regulátoru.[5]

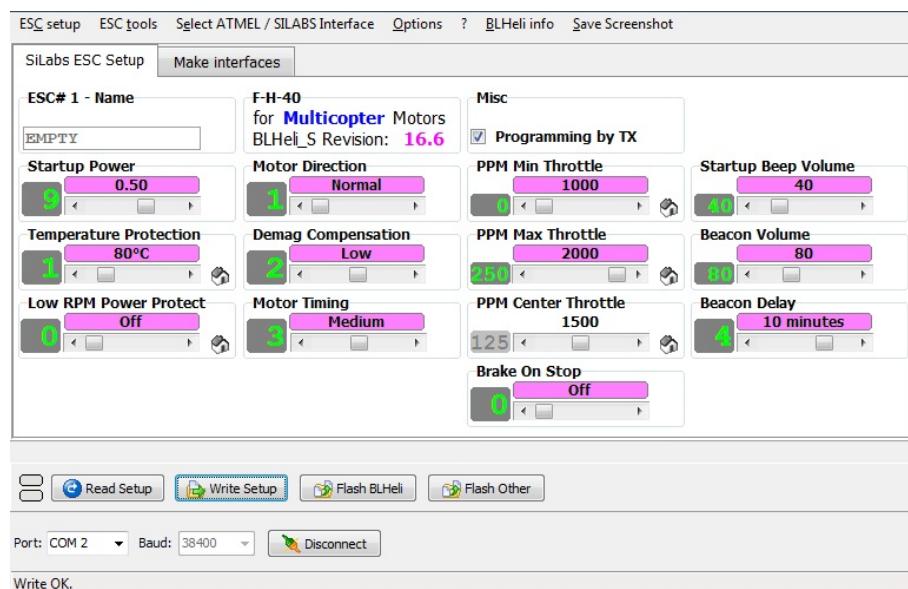


Obrázek 5.2: Schéma zapojení pro kalibraci regulátoru otáček

Nastaví se PPM Min Throttle hodnota na 1000, PPM Max Throttle na 2000 a PPM Center Throttle na 1500. Zapíš se hodnota do regulátoru. Výsledkem jsou zkalibrované vstupní hodnoty pulzu do intervalu  $<1000;2000>$ . PPM je jiný typ modulace než PWM, k ovládání regulátorů otáček stačí znát pouze PWM modulaci.



Obrázek 5.3: Ukázka kalibrace v programu HLBelisuite před kalibrací



Obrázek 5.4: Ukázka kalibrace v programu HLBelisuite po kalibraci

## 5.3 Filtrace dat IMU

**Výpočet úhlů pitch a roll z dat akcelerometru.**

$$pitchAcc = atan2(yAcc, \sqrt{xAcc^2 + zAcc^2})$$

$$rollAcc = atan2(xAcc, \sqrt{yAcc^2 + zAcc^2})$$

**Výpočet úhlů pitch a roll z dat gyroskopu**

Jelikož gyroskop měří úhlovou rychlosť, úhly pitch a roll jsou určeny integrací z počátečního stavu. Pokud IMU jednotka nebude v počátečním stavu ve vodorovné poloze, úhly pitch a roll nebudou absolutní.

$$pitchGyro = pitchGyro + xGyro * dt$$

$$rollGyro = rollGyro + yGyro * dt$$

$$yawGyro = yawGyro + zGyro * dt$$

**Výpočet úhlů yaw z dat magnetometru.**

Při výpočtu úhlu yaw z dat magnetometru je nutné zahrnout magnetickou deklinaci, které je závislá na zeměpisných souřadnicích. [11]

$$yawMag = atan2(yMag, xMag) + declinationMag$$

Surová data ze všech tří senzorů nejsou použitelná pro výpočet úhlů náklonu, obsahují nepřesnosti a šum, proto je potřebná filtrace.

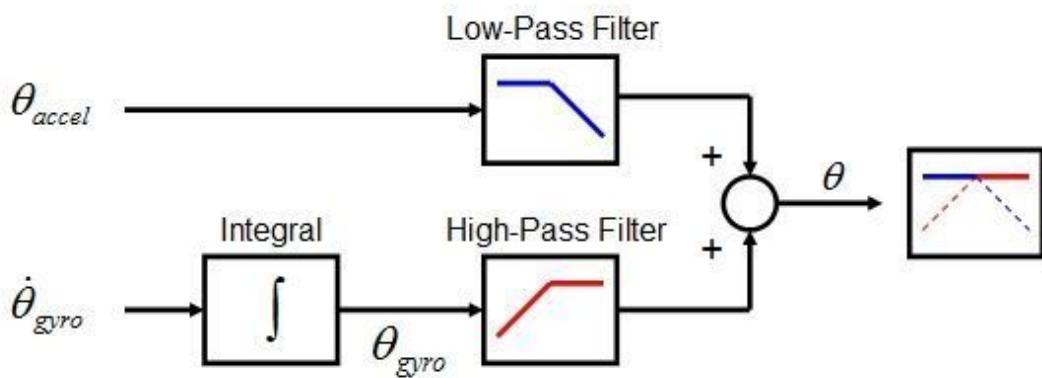
### 5.3.1 Komplementární filtr

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

Z dlouhodobého hlediska data z gyroskopu konvergují. Z krátkodobého hlediska jsou přesná, proto 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 filtru vzniká komplementární filtr, který je pro ovládání dronu dostačující.



Obrázek 5.5: Schéma Komplementárního filtrovače

[8]

$$pitch = 0.996 * (pitch + xGyro * dt) + 0.004 * pitchAcc$$

$$roll = 0.996 * (roll + yGyro * dt) + 0.004 * rollAcc$$

### 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 stav. Pokud v oblasti predikovaného stavu najdeme skutečný stav, provede se korekce skutečného stavu

a oblast predikovaného stavu bude menší/přesnější. Není-li nalezen skutečný stav v oblasti predikovaného stavu, oblast predikovaného stavu se zvětší a tím se zhorší přesnost výpočtu.

Bohužel Kalmanův filtr nemohl být použit z důvodu malého výpočetního výkonu platformy Arduino.

### 5.3.3 Mahonyho filtr

Mahonyho filtr využívá Quaternions, což je čtyř dimenzionální 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 byla použita knihovna MahonyAHRS. [22]

## 5.4 PID regulátor pro synchronizaci motorů

PID regulátor slouží k regulaci požadovaného stavu v nejkratší době a to pomocí zvyšování a snižování vlivu, který napomáhá dostat se do požadovaného stavu.

Názorný příklad: Požadujeme, aby dron držel stabilní polohu. Chceme, aby úhly pitch a roll z IMU byly nulové. Kdybychom měli ideální dron s přesným vyvážením hmotnosti a se stejně fungujícími motory, bylo by to snadné. Pouze by stačilo zapsat stejnou hodnotu na všech motorech a dron by bez problémů vzletnul. Bohužel ideální dron nemáme, proto motory musí být ovládány individuálně. PID regulátor počítá výkon motoru v závislosti na rozdílu skutečných úhlů od požadovaných.

PID regulátor reaguje na tzv. errory (odchylky od požadovaného stavu) a následně přes koeficienty kp, ki a kd spočte hodnoty pro ovládání motorů. PID regulátor má tři složky: proporcionální (kp), integrační (ki) a derivační (kd).

Proporcionální složka ovlivňuje výkon motoru lineárně. Pokud existuje odchylka zvýší se výkon motorů. Pokud je odchylka nulová, proporcionalní složka neovlivňuje výkon motorů.

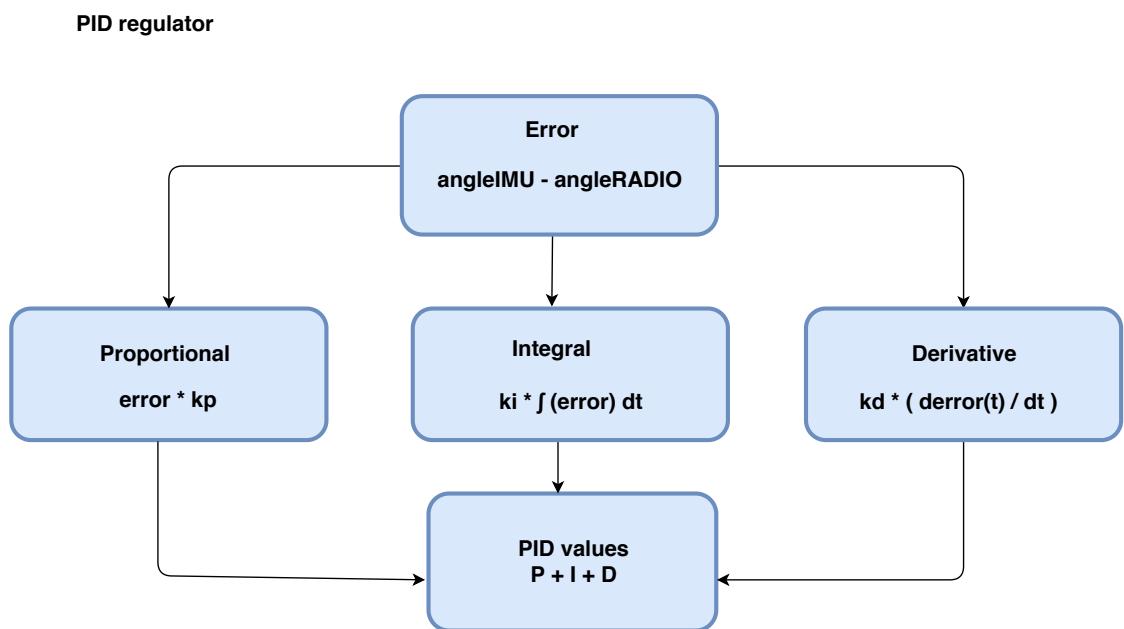
Integrační složka ovlivňuje výkon motorů v závislosti na předchozím stavu. Pokud dron není v požadovaném stavu, integrační složka se zvyšuje, dokud není dosažen požadovaný stav.

Derivační složka reaguje na změnu rychlosti odchylky. Čím rychleji se bude odchylka měnit, tím větší bude vliv derivační složky. Derivační složka reaguje proti P

a I složce.

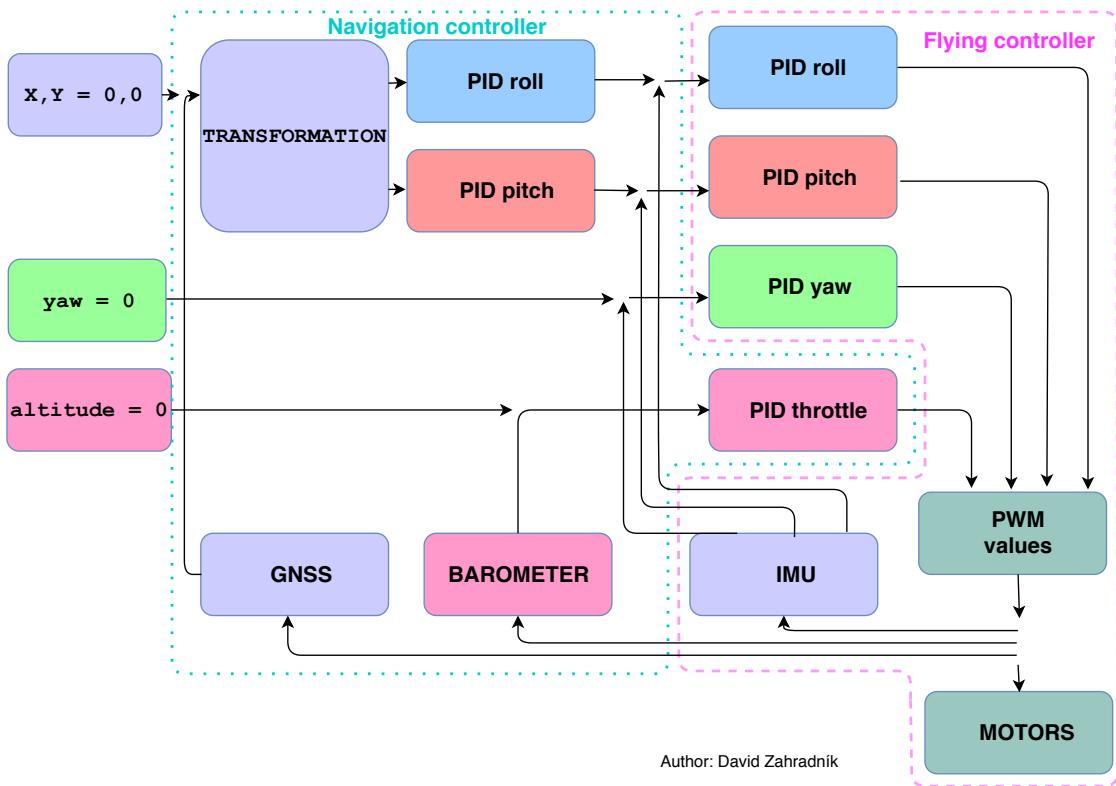
Pro autonomní řízení dronu je potřeba celkem šest PID regulátorů viz obr. 5.7. Základem jsou tři PID regulátory pro úhly pitch, roll a yaw. S těmito třemi regulátory, lze lézt s dronem přes manuální ovládání. Kontrolu nad těmito regulátory obstarává letový kontrolér (flying controller).

Navigační kontrolér (navigation controller) ovládá další tři regulátory. PID regulátor výkonu (throttle) reaguje na nadmořskou výšku dronu, reguluje konstantní výkon všech motorů pro let ve výšce zadané uživatelem. PID regulátory pro roll a pitch korigují směr letu dronu v závislosti na jeho poloze měřenou GNSS aparaturou.[30] [17]



Author: David Zahradník

Obrázek 5.6: Schéma PID regulátoru



Obrázek 5.7: Schéma všech PID regulátorů při stavbě dronu

## 5.5 Komunikační protokol

Pro propojení dronu a smartphonu je použita bluetooth a radiová komunikace. Komunikace je realizována přes sériové rozhraní UART, pro projení se používají piny RX a TX. UART lze implementovat pouze mezi dvěma zařízeními. Pro realizaci komunikace je nutné nastavit stejnou rychlosť komunikace (bps).

Pro použití rozhraní UART byl vytvořen komunikační protokol pro ovládání dronu. Začátek zprávy je definován znakem < a konec zprávy >. Hodnoty potřebné pro ovládání jsou určeny prvním bytem (znakem) a hodnota následující dvěma byty. Hodnota dána čísly 0-99 se interpoluje do rozsahu uvedeného v tabulce.

Znak	Typ hodnoty	Od	Do
T	Výkon	1000 $\mu$ S	1700 $\mu$ S
P	Pitch	-25 °	+25 °
R	Roll	-25 °	+25 °
Y	Yaw	0 °	360 °
D	Stupně	48 (12) °	- 52 (15) °
M	Minuty	0 '	60 '
S	Sekundy	0 ''	60 ''
C	kalibrace	null	null
H	návrat	null	null
F	zem. šířka	null	null
L	zem. délka	null	null

Tab. 5.3: Komunikační protokol přes seriové rozhraní UART

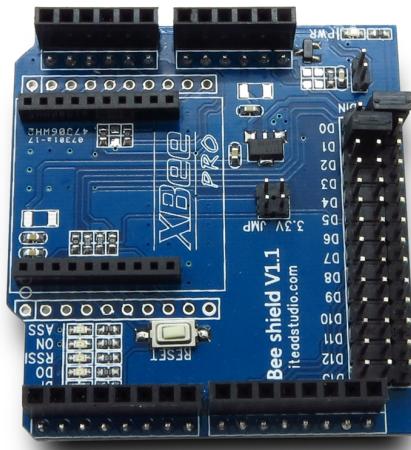
## 5.6 Radiová komunikace XBEE

Před zahájením komunikace mezi radiovými moduly je nutné provést jejich konfiguraci. Ke konfiguraci slouží program XCTU (Linux, Windows) od výrobců modulů XBEE. Pro propojení počítače a modulu lze použít shield (nadstavbové zařízení k mikrokontrolérům) od firmy Digi, nebo je možné využít platformu Arduino a Arduino XBEE shield.

K propojení radiového modulu a počítače s pomocí platformy Arduino, je nutno provést několik kroků. V první řadě je do platformy nahrán jednoduchý kód, který bude mít za úkol číst data z počítače a posílat je radiovému modulu. V kódu je třeba definovat, na kterých pinech bude prováděna komunikace s radiovým modulem. Druhý krok je nastavení pinů pro komunikaci s radiovým modulem na shieldu. V posledním kroku jsou dílčí součástky spojeny.

Nejdůležitějšími nastaveními radiových modulů jsou definování funkce, rychlosť komunikace (bps) a ID sítě. V síti radiových modulů je potřeba jeden koordinátor, na počtu routerů a koncových zařízení nezáleží. Koordinátor obstarává inicializaci sítě a umožnuje dalším modulům připojení do sítě. Router funguje jako prostředník při přenosu dat. Koncové zařízení slouží buď k příjmu nebo odesílání zpráv. Rychlosť

komunikace je dána přenosem bitů za sekundu (bps) a musí být totožná na všech zařízeních v síti. ID sítě slouží k uzavření komunikace jenom mezi určitými radiovými moduly. [36]



Obrázek 5.8: XBEE shield

## 5.7 Letový kontrolér

**Vstup:** IMU, Navigační kontrolér

**Výstup:** ESC

Letový kontrolér slouží k synchronizaci a ovládání motorů dronu. Letový kontrolér zpracovává měření z IMU a porovnává jej s daty z navigačního kontroléru (pitch, roll a yaw). Pokud úhly náklonů nejsou totožné, kontrolér přes PID regulátory změní výkon motorů tak, aby úhly ztotožnil.

Při spuštění letový kontrolér provede kalibraci regulátorů otáček zapsáním minimální a maximální hodnoty výkonu.

Po kalibraci regulátorů otáček, kontrolér čte data z IMU, probíhá filtrace pomocí komplementárního filtru a počítá úhly pitch, roll a yaw.

Z navigačního kontroléru jsou získávána data, která jsou následně separována a interpolována do požadovaných hodnot. Hodnoty jsou rozlišovány prvním bytem, který definuje o jakou hodnotu se jedná. Další dva byty představují číslo od 0 do 99, které

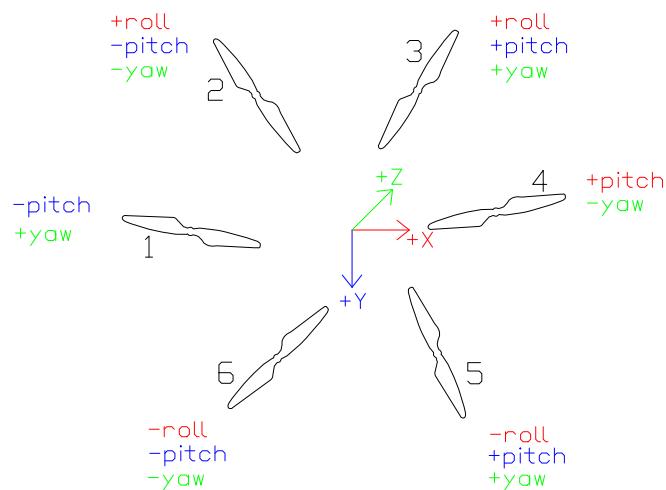
je interpolováno na požadovaný rozsah.

Hodnota výkonu motoru/throttle se vyinterpoluje pouze do 1700  $\mu\text{S}$ , protože ke konstantnímu výkonu jsou připočítávány údaje z PID regulátoru. Rozsah dat z PID regulátoru je  $<-300;300>$ , pokud by se zapsal konstaní výkon větší než 1700  $\mu\text{S}$ , PID regulátor by byl omezen.

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

Z rozdílu úhlů z IMU a navigačního kontroléru se vypočtu odchylky. Podle odchylek se vyčíslí proporcionalní, integrační a derivační složka PID regulátoru každého úhlu. Součet všech tří složek představuje změnu výkonu motoru pro jednotlivý úhel. Dle pohybových rovnic jsou vypočteny výkony motorů.

Pro zápis výkonu motorů byl implementován komunikační protokol s frekvencí 250 Hz (viz obrázek 5.10), který vychází ze standartního PWM signálu. První fázi je prováden výpočet komplementárního filtru, výpočet hodnot PID regulátorů a čtení dat za navigačního kontroléru. Ve druhé fázi jsou čtena data z IMU jednotky a zapisovány hodnoty výkonu pro regulátory otáček(ESC). Doba trvání obou faz je čtyři milisekundy, frekvence tedy je 250 Hz. V druhé fázi, kdy zapisování hodnot výkonu trvá jednu až dvě milisekundy, jsou pro úsporu času v první milisekundě čtena data z IMU jednotky.



Obrázek 5.9: Schéma ovládání dronu podle úhlu náklonu

## Pohybové rovnice

$$motor1 = throttle - pidPitch + pidYaw$$

$$motor2 = throttle - pidPitch + pidRoll - pidYaw$$

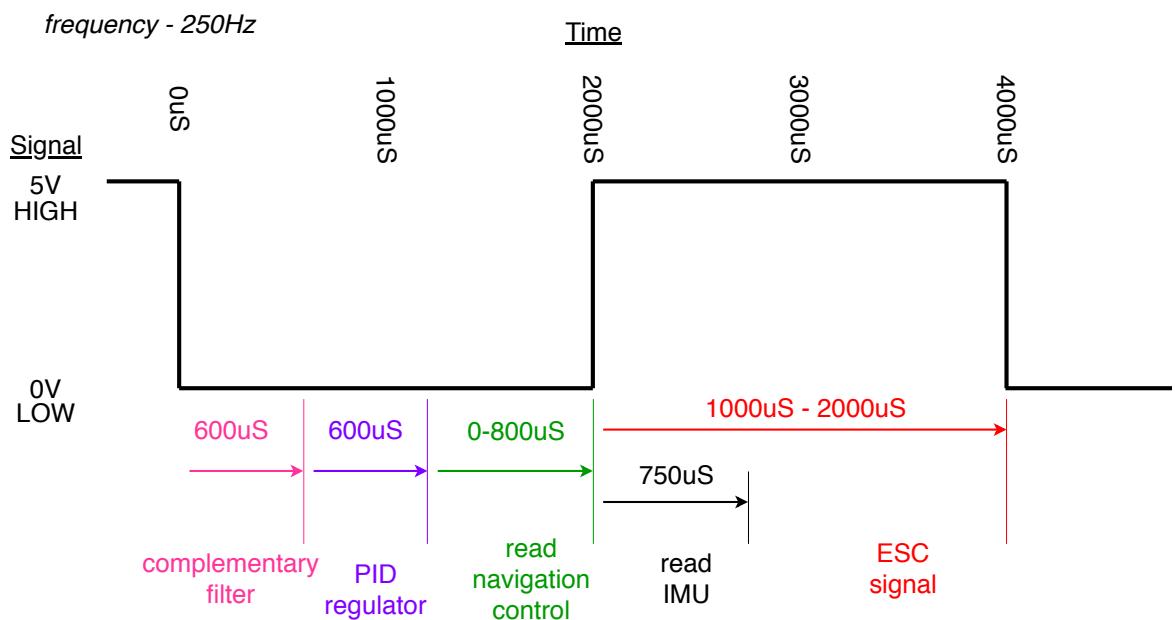
$$motor3 = throttle + pidPitch + pidRoll + pidYaw$$

$$motor4 = throttle + pidPitch - pidYaw$$

$$motor5 = throttle + pidPitch - pidRoll + pidYaw$$

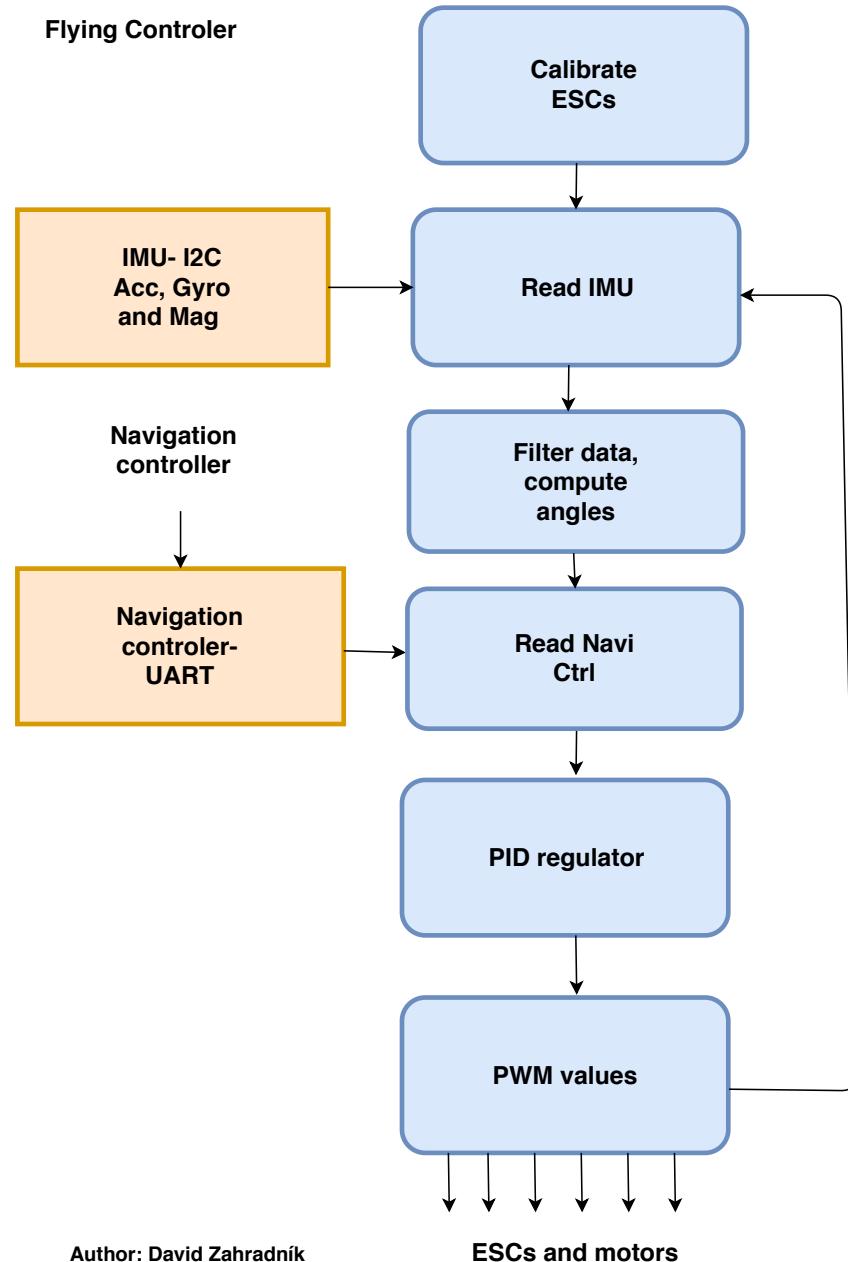
$$motor6 = throttle - pidPitch - pidRoll - pidYaw$$

## PWM signal for ESC

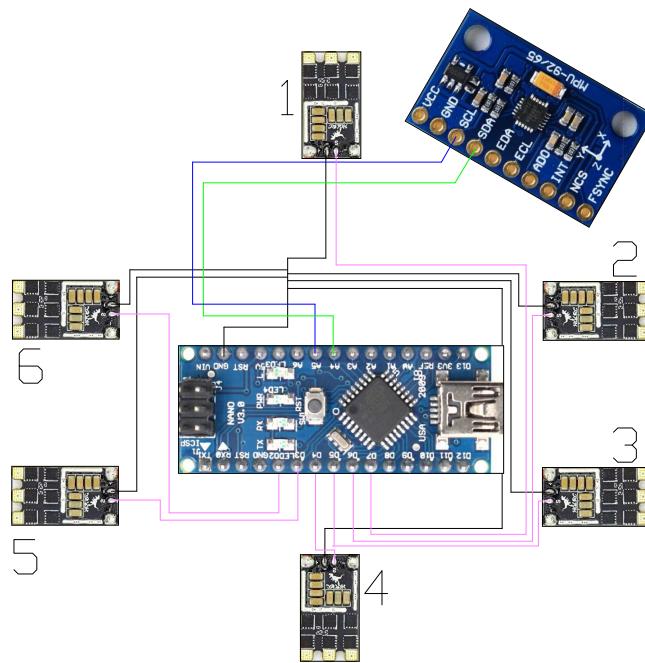


Author: David Zahradník

Obrázek 5.10: Diagram PWM signálu



Obrázek 5.11: Diagram algoritmu letového kontroléru



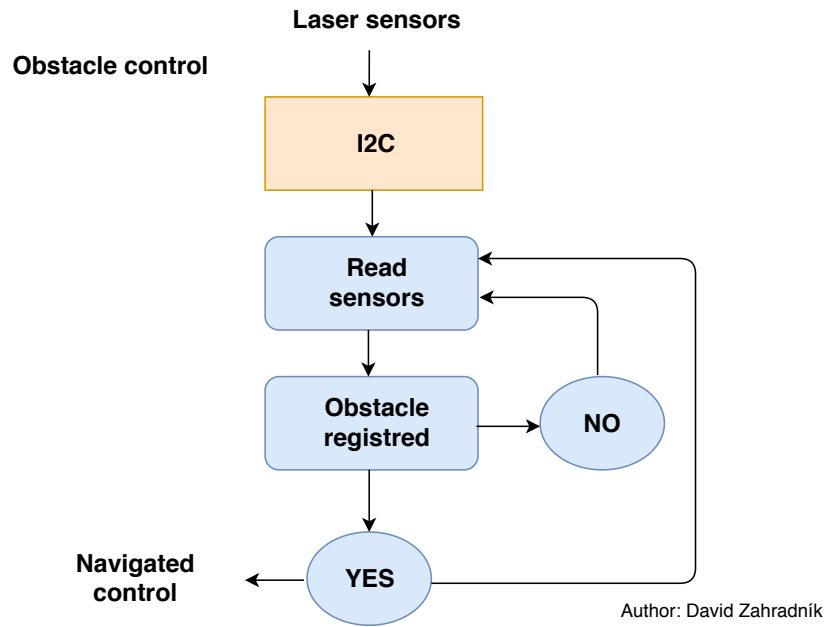
Obrázek 5.12: Schéma zapojení letového kontroléru

## 5.8 Překážkový kontrolér

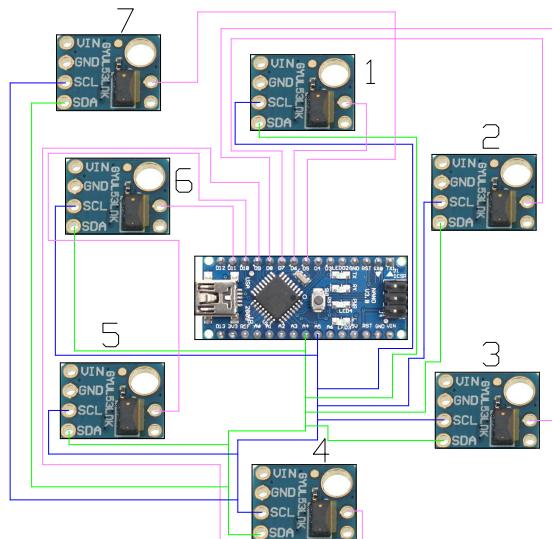
**Vstup:** 7x laserový modul

**Výstup:** Navigační kontrolér

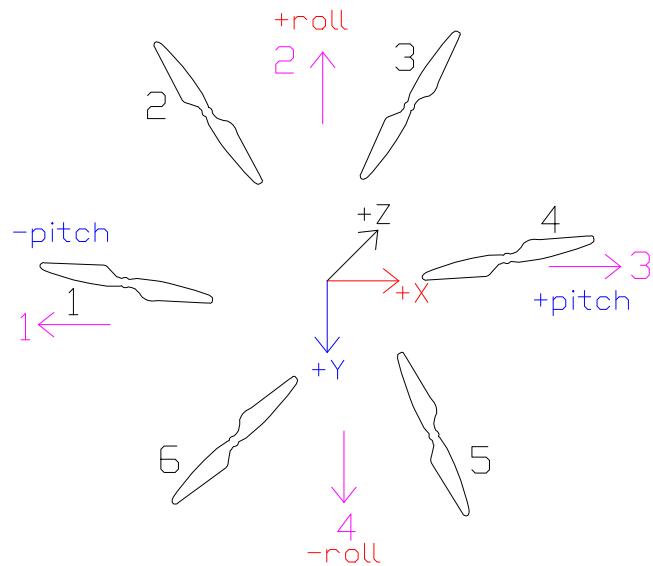
Překážkový kontrolér upozorňuje navigační kontrolér o existenci cizího objektu v okolí dronu. Laserové moduly jsou nasměrovány do směrů pohybu podle úhlů pitch, roll a jeden laser je nasměrován po svíslici pro přistávání. Lasery jsou nastaveny na kontinuální měření vzdáleností. Pokud se v blízkosti nachází cizí objekt, kontrolér pošle zprávu o překážce navigačnímu kontroléru a její poloze.



Obrázek 5.13: Diagram algoritmu překážkového kontroléru



Obrázek 5.14: Schéma zapojení Překážkového kontroléru



Obrázek 5.15: Schéma zpráv o překážce

+/-	Úhel	Zpráva
+	roll	2
-	roll	4
-	pitch	3
+	pitch	1
	down	5

Tab. 5.4: Zpráva o překážce

## 5.9 Navigační kontrolér

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

**Výstup:** Letový kontrolér

Navigační kontrolér složí ke komunikaci s ovládacím zařízením, sběru dat z gnss, barometru a překážkového kontroléru.

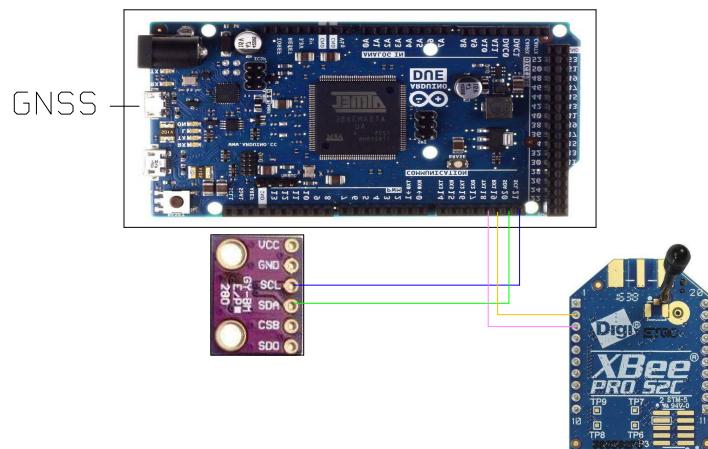
Po zapnutí bude kontrolér čekat na zprávu ze smartphonu. Podle typu příchozích dat kontrolér nastaví autonomní nebo manuální řízení.

Používá-li uživatel manuální ovládání, navigační kontrolér pouze ověří zda existuje překážka, pokud existuje, zámezí srážce. Neexistuje-li překážka kontrolér pošle data letovému kontroléru.

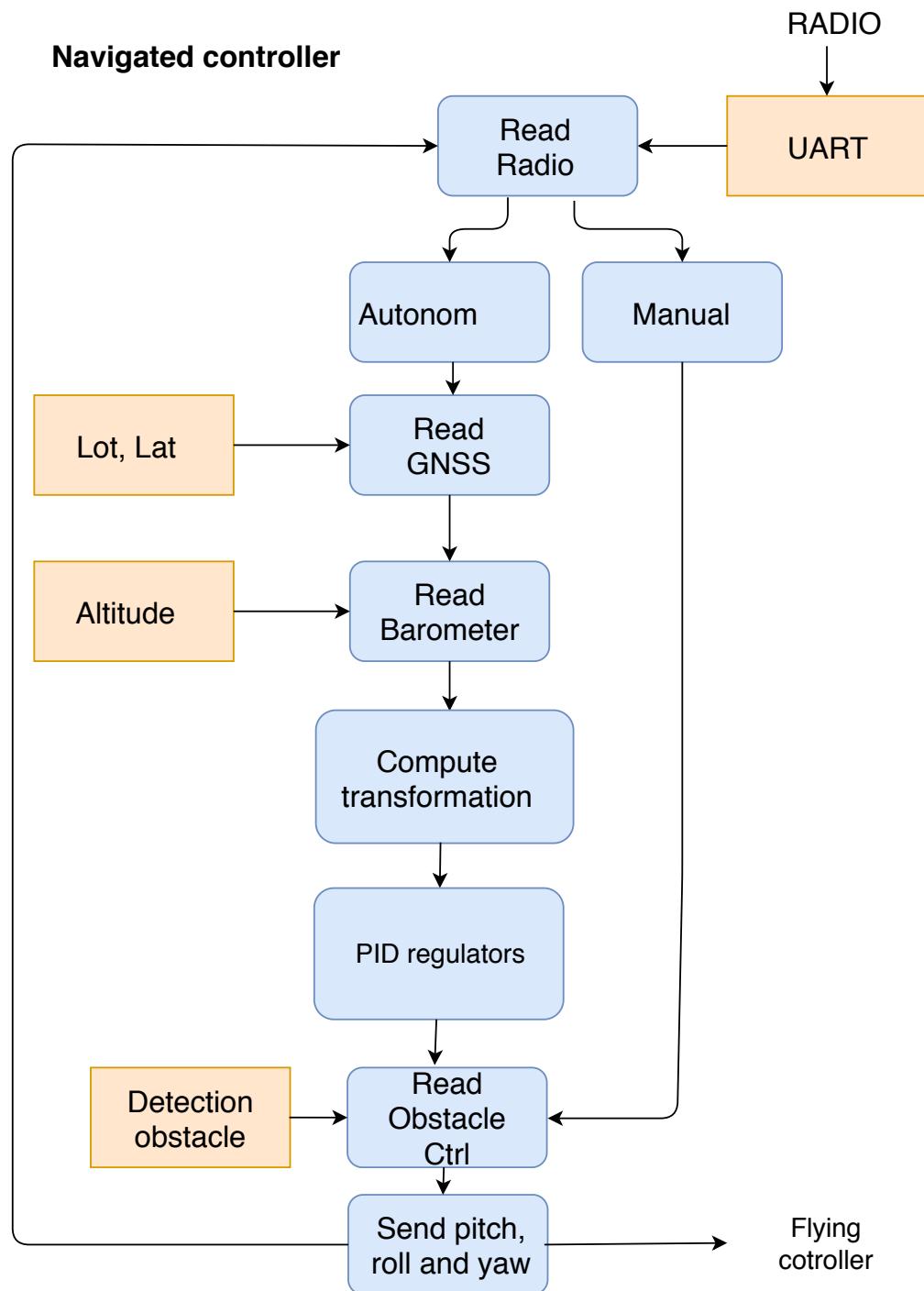
Při autonomním ovládání kontrolér porovná data z GNSS aparatury a zadané souřadnice. Pokud souřadnice nejsou totožné, vypočte se směr a vzdálenost z polohy dronu a zadaných souřadnic. Provede se shodnostní transformace ze souřadnicového systému GNSS aparatury do souřadnicového systému dronu. Vstupní data pro PID regulátor budou souřadnicové rozdíly v souřadnicovém systému dronu a výstupní data budou úhly pitch a roll.

Při držení určité nadmořské výšky se zvou použije PID regulátor. Vstupním datem bude nadmořská výška z GNSS aparatury nebo z barometru, výstupem bude výkon motoru, který bude konstatní pro všechny motory.

Bude definována funkce návrat, při které se dron vrátí na startovní místo. Pozice startovního místa bude změřena GNSS aparaturou automaticky před startem dronu.



Obrázek 5.16: Schéma zapojení Navigačního kontroléru



Author: David Zahradník

Obrázek 5.17: Diagram navaigačního kontroléru

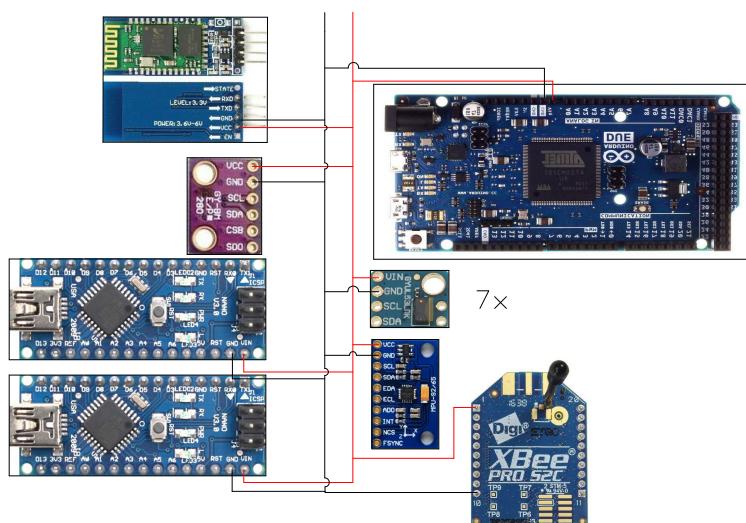
## 5.10 Finální sestavení

Z důvodu nízkého výpočetního výkonu platfromy Arduino je komplexní ovládání sestaveno ze tří plafotrem Arduino. Letový kontrolér ovládá jednotlivé motory, překážkový kontrolér detektuje případné překážky a navigační kontrolér komunikuje s ovladačem a řídí let.

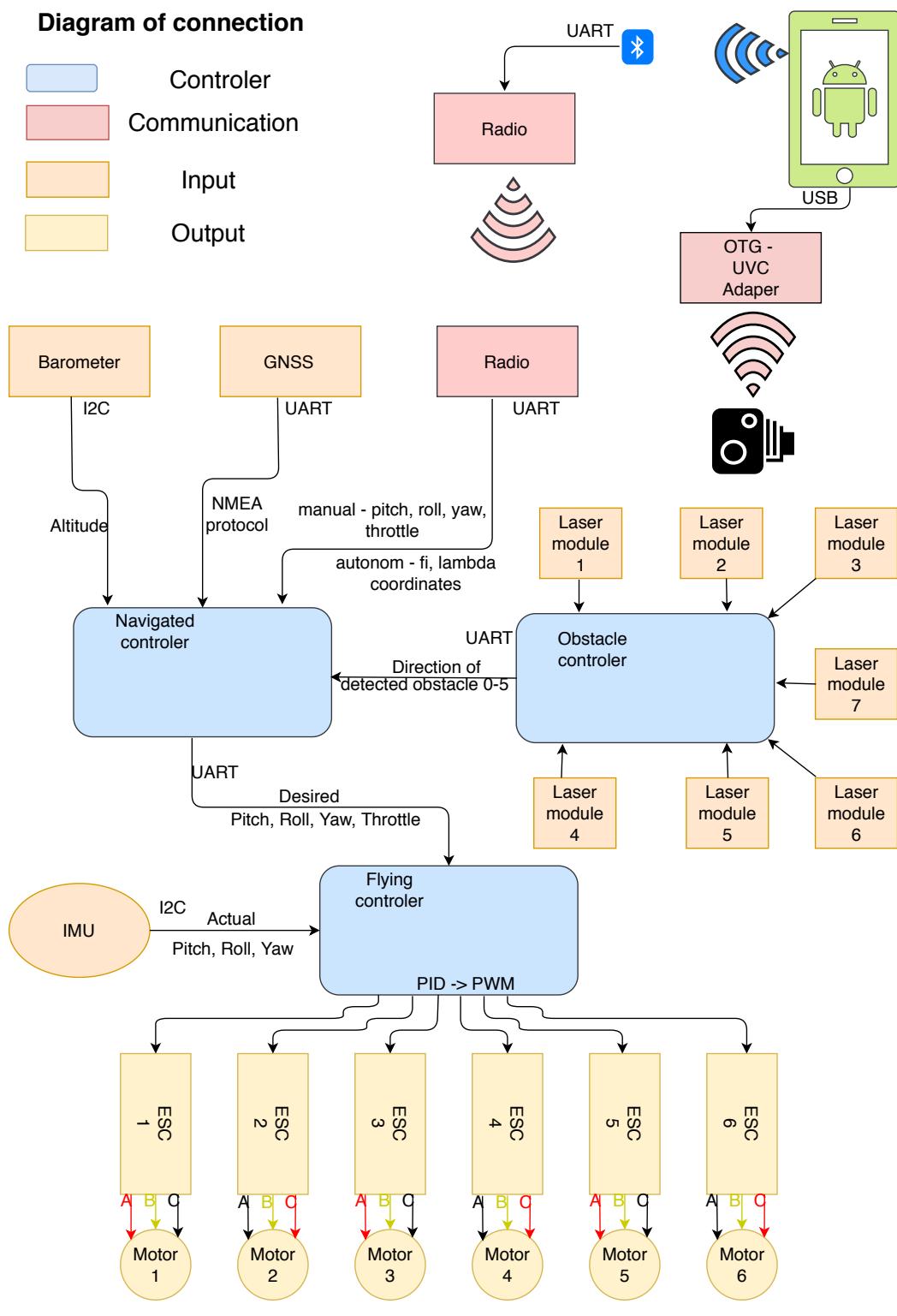
Distribuční deska s regulátory otáček jsou umístěny ve spodní části dronu pod baterii. Byl zjištěn negativní vliv magnetického pole regulátorů pro ovládací prvky. Magnetické pole bylo tak silné, že ovládací prvky byly neovladatelné. Ovládací prvky jsou umístěny na vrchní části dronu. Barometr a GNSS aparatura jsou vyvýšené nad vrtulemi, aby tlak vzduchu neovlivňoval jejich funkčnost.

Dron je ovládán smartphonem přes uzlové zařízení. Uzlové zařízení se skládá z bluetooth a radiového modulu. Tok dat probíhá ze smartphonu přes bluetooth do uzlového zařízení a ze zařízení do navigačního kontroléru přes radiový signál.

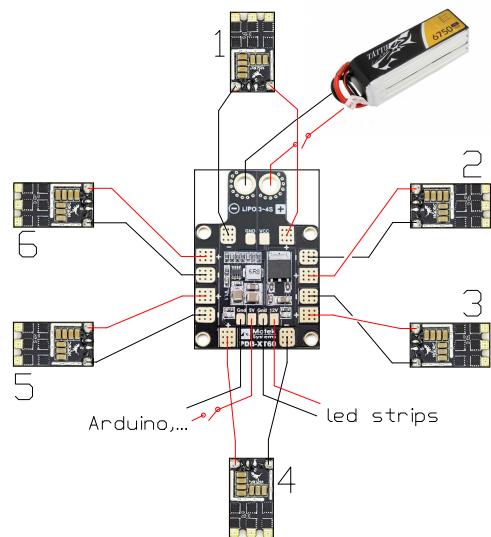
Kamera posílá data smartphonu nezávisle na ovládání dronu. Kamera obsahuje vlastní radiový vysílač, který vysílá data přijímači připojeného k smartphonu skrze miniUSB. Pro správnou funkci kamery musí smartphone podporovat funkci OTG. Při připevnění IMU jednotky kovovými šrouby na konstrukci dronu, byl zjištěn negativní vliv kovu na data z IMU, proto všechny řídící komponenty jsou připevněny k nepájivému poli.



Obrázek 5.18: Schéma zapojení napájení Arduina a modulů



Obrázek 5.19: Diagram komponent



Obrázek 5.20: Schéma zapojení napájení motorů

## 6 Testování

### 6.1 Letový kontrolér

Testování algoritmu letového 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 připevněn k trubce tak, aby se dron pohyboval po obvodu trubky. Na stranách trubky jsou umístěny molitanové pruhy kvůli tlumení nárazu stojánku dronu.

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

Prvně byl zjištován koeficient pro proporcionalní složku. Koeficient byl zvyšován do doby, než výkon vrtule dokázal dron srovnat z nakloněné polohy do vodorovné. Derivační koeficient byl zvyšován do doby, kdy PID regulátor dokázal dron stabilizovat ve vodorovné poloze. Integrační koeficient pouze doladil průběh PID regulátoru. Kalibrace PID regulátorů je závislá na parametrech motorů a konstrukci dronu, zjištěné koeficienty nebudou platit pro jiný dron.



Obrázek 6.1: Testování v konstrukci

### 6.1.1 IMU filtry

Pro použití ovládání dronu 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. Z testování vyplunulo, že komplementární filtr má kratší reakční dobu. 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 řádů setin stupně.

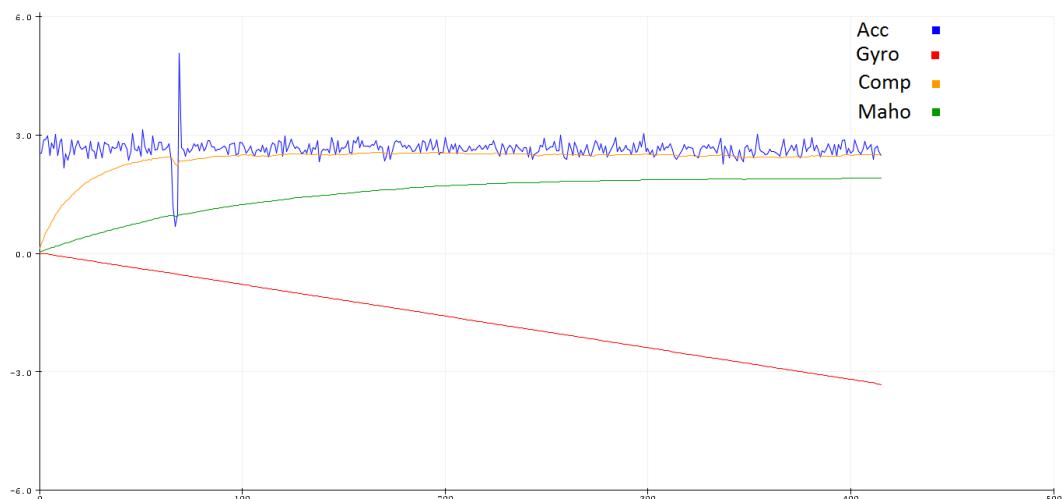
Pro ovládání dronu je potřebná rychlá reakce IMU jednotky, proto byl použit komplementární filtr.

Úhel	Hodnota	Rozptyl
roll	-0.730 °	0.015 °
roll	-0.667 °	0.014 °
pitch	0.6390 °	0.0030 °
pitch	0.6880 °	0.0030 °

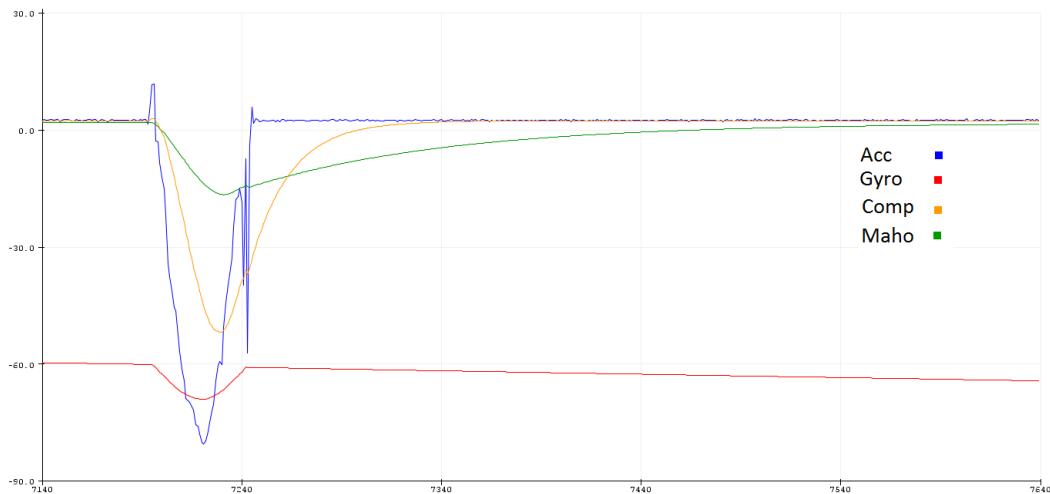
Tab. 6.1: Komplementární filtr

Úhel	Hodnota	Rozptyl
roll	-0.739°	0.015°
roll	-0.716 °	0.013°
pitch	0.7054 °	0.0030°
pitch	0.7132 °	0.0030°

Tab. 6.2: Mahonyho filtr



Obrázek 6.2: Inicializace IMU



Obrázek 6.3: Náklon IMU jednotky

## 6.2 Překážový kontrolér

Testovány byly laserové dálkoměry. U laserových dálkoměrů byla ověřena přesnost měření a dosah. Překážkový kontrolér tedy dokáže upozornit na existující překážku ve vzdálenosti 120 cm od konce ramene. Přesnost laserových dálkoměrů je v řádu centimetrů, přesnost je dostačující pro detekci překážek. Čas mezi jednotlivými měřením je kratší než 1 ms.

## 6.3 Navigační kontrolér

Navigační kontrolér je ve fázi vývoje, zatím nebyl testován. Otestován byl pouze barometr, barometrem lze určit výšku letu s přesností jednoho metru, pro přesnější měření se budou používat data z GNSS aparatury.

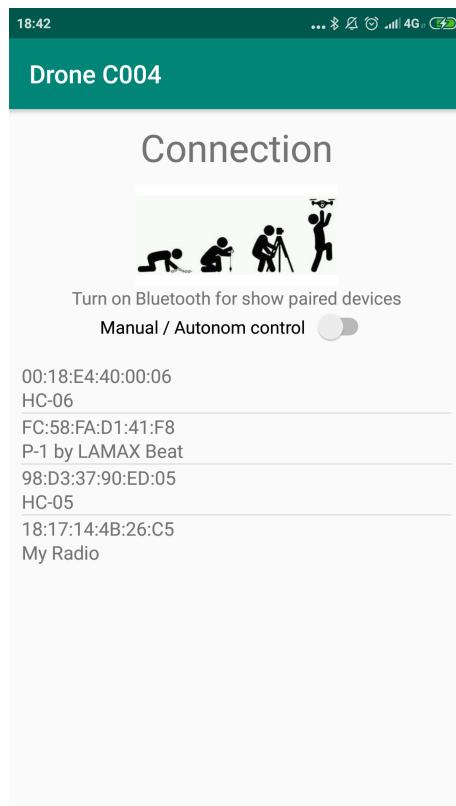
## 7 Ovládání

Pro ovládání dronu byla vytvořena aplikace pro mobilní operační systém Android. Aplikace byla napsána v programovacím jazyku Java a programovacím prostředí Android studio.[2] [7]

Aplikace využívá Bluetooth a GNSS mobilu. Přes bluetooth modul probíhá přenos dat pro ovládání dronu, GNSS slouží pro zjišťování polohy uživatele a zobrazení na okně s 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.

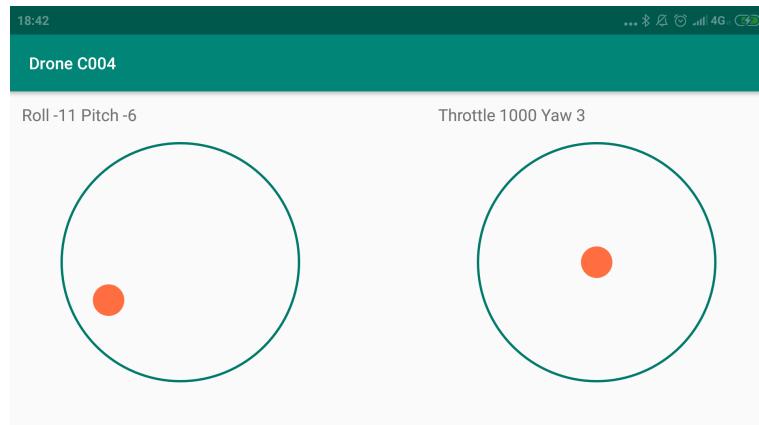


Obrázek 7.1: Screenshot hlavní obrazovky

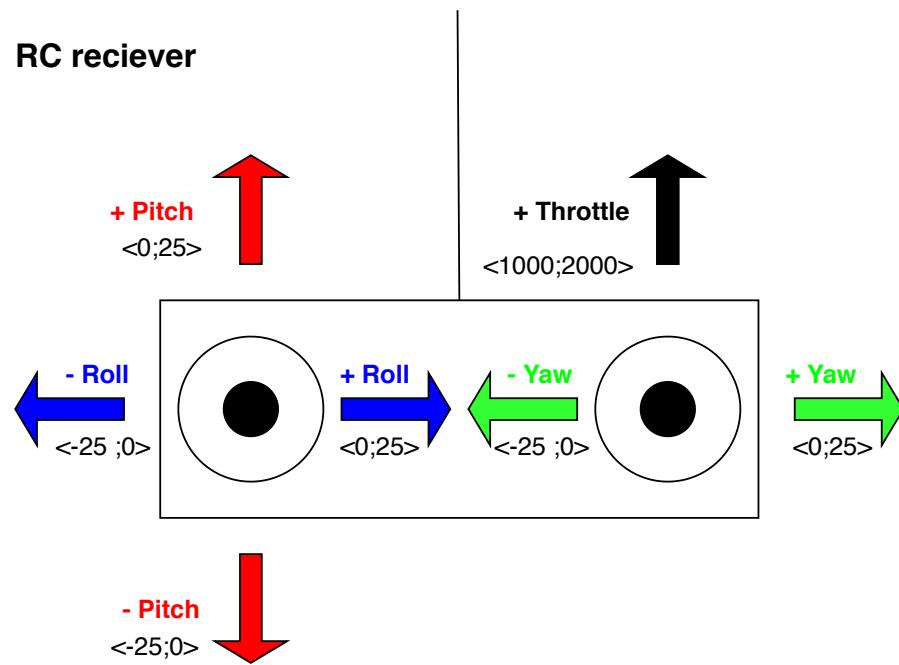
## 7.2 Manuální ovládání

Manuální ovladání funguje totožně jako RC soustava. Levý joystick slouží k ovládání náklonů pitch a roll, pravý joystick slouží k ovládání throttle a yaw. Informace o poloze joysticků jsou posílány přes bluetooth komunikaci do uzlového zařízení. Typ zprávy je popsán v kapitole komunikační protokol.

Při tvorbě joysticků byla použita knihovna Virtuální joystick, u kterého byl upraven rozsah snímaných souřadnic ukazatele a definování jiných předávaných parametrů. Předávácí parametry byly polární souřadnice, po změně jsou předávány kartézské souřadnice joysticku. [? ]



Obrázek 7.2: Schreenshot obrazovky pro manuální ovládání



Obrázek 7.3: Diagram RC soustavy

### 7.3 Autonomní ovládání

Pro autonomní ovládání stačí zadat souřadnice v systému WGS-84. Přes tlačítko SEND je zaslat dronu a uživatel může na mapě sledovat, kde se dron nachází. Spodní tlačítko Home slouží k návratu dronu a startovní místo. Autonomní ovládání je též ve vývoji, zprovoznění bude možné až po dokončení navigačního kontroléru.

Mapa je generována ze serverů Google Maps přes API. API je možné používat po registraci pro google vývojáře a nastavení API pro aplikaci.

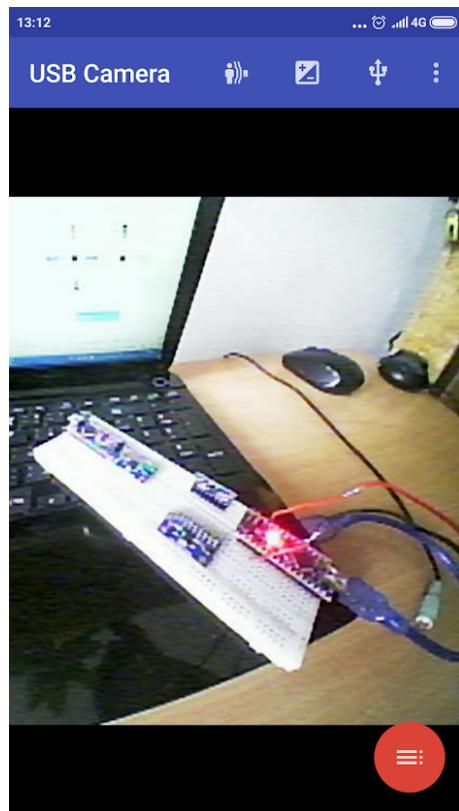


Obrázek 7.4: Schreenshot obrazovky pro autonomní ovládání

## 7.4 Kamera

Bylo v plánu implementovat obraz z kamery z dronu do mobilní aplikace. Bohužel pro nedostatek času a málo zkušeností s Android studiem je tato část pouze rozpracovaná. Pro zobrazení obrazu v aplikaci byla použita více platformová knihovna libusb a libuvc.

Obraz z kamery lze sledovat přes mobilní aplikaci FPViewer. Po zapojení přijímače obrazového signálu se aplikace automaticky zapne.



Obrázek 7.5: Schreenshot aplikace FPViewer

## 8 Závěr

Stavba dronu není lehký úkol, zvlášť pro někoho, kdo neumí elektrotechniku, ale pokud existuje nápad, jak dál rozvíjet geodezii, je potřeba se ho chytit.

Původně se práce měla věnovat nadstavbovým geodetickým úlohám nad dronem od firmy Microkopter. U zapůjčeného dronu nefungovala pouze radiová komunikace. Chtěl jsem vyměnit komunikační zařízení a s dronem začít létat, bohužel ovládací prvky se nedaly přeprogramovat a ani nefungovala komunikace prvků s počítačem. Z dronu byly odebrány kontroléry a zůstala kostra s motory a regulátory otáček. Po několika testování jedna z regulátorů zkratoval a jelikož byl regulátor od firmy Microkopter drahý, byl nahrazen jiným (uvedený v komponentách).

Tím začala stavba dronu od nuly. Nové regulátory měly odlišný způsob komunikace a jiný způsob zapojení. Bohužel i zapůjčené baterie byly poškozené, z důvodu dlouhodobého nepoužívání.

Pro komunikaci kontroléru s regulátory byla prvně použita knihovna Servo. Většina projektů používá Ardunino Servo knihovnu pro komunikaci s regulátory otáček. Po pár neúspěšných testech letového kontroléru, jsem zjistil, kde spočívá problém. Knihovna Servo dokáže komunikovat s regulátory, ale pouze s frekvencí 50Hz. Pro let dronu musí být frekvence ovládání regulátorů větší než 100Hz. Proto jsem musel implementovat standartní PWM komunikační protokol pro regulátory. Komunikační protokol je závislý na době trvání výpočtu. S použitím platformy Arduino byla docílena frekvence ovládání regulátorů 250Hz.

S IMU jednotkou byly tež problémy. Při použití knihovny pro modul MPU9250, bylo čtení dat z modulu pomalé. Proto byl nastudován popis modulu a modul byl ovládán přes komunikaci I2C za použití registrů.

Pro ovládání byla vytvořena aplikace pro operační systém Android v programovacím jazyku Java. Jedná se o první aplikaci, kterou jsem kdy dělal. Na internetu je spousta návodů, podle kterých se dá naučit programovat aplikaci. Hodně mi pomohla dokumentace Android Developers. Bohužel se nepodařilo do aplikace implementovat obraz z kamery. Pro zprovoznění kamery bylo potřeba importovat knihovny v jiných programovacích jazycích a nastavit jejich sestavení. Nynější stav je, že kamera je připojená k aplikaci, ale nic nezobrazuje.

Jak bylo zmíněno na začátku, stavba dronu není lehký úkol. Proto se práce zabývá

pouze stavbou a už ne geodetickými nadstavbami. S konstrukcí dronu bych chtěl pokračovat a zrealizovat nápady uvedené v úvodu.

Při konstrukci dronu byly zničeny čtyři desky Arduino UNO, šest regulátorů otáček, tři plastové vrtule a jedna IMU jednotka. Při konstrukci nebylo zraněno žádné zvíře ani osoba. Testování probíhalo ve vnitřních prostorách laboratoře FSv ČVUT.

## Seznam zkratek

CCW	údaj o směru otáčení proti směru hodinových ručiček (counter clockwise)
CW	údaj o směru otáčení po směru hodinových ručiček (clockwise)
I2C	počítačová sériová sběrnice (Inter-Integrated Circuit)
LiPo	Lithium-polymerový akumulátor
SCL	vodič pro přenos hodinové signálu (Serial Clock)
SDA	vodič pro přenos datového signálu (Serial Data)
SPI	sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface)
SCLK	vodič pro přenos hodinové signálu (Serial Clock)
MOSI	vodič pro jednosměrnou komunikaci hlavního do vedlejšího zařízení (Master Out, Slave In)
MISO	vodič pro jednosměrnou komunikaci vedlejšího do hlavního zařízení (Master In, Slave Out)
SS	vodič pro určení vedlejšího zařízení (Slave Select)
PDB	distribuční deska (Power Distribution Board)
BLDC	Bezkartáčové stejnosměrné motory (brush less direct current)
ESC	Regulátor otáček (Electronic speed control)
VCC	Napětí na společném kolektoru (Voltage at the Common Collector)
GND	Zem (Ground)
S	Ovládací pin (Signal pin)
IMU	Inerciální měřící jednotka (Inertial Measurement Unit)
GNSS	Globální družicový polohový systém (Global Navigation Satellite System)
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)

PPM	Pulzně polohová modulace (Pulse position Modulation)
RTK	Metoda GNSS (Real Time Kinematic)
USB	Univerzální seriový konektor (Universal Serial Bus)
FPV	Pohled z první osoby (First person view)
RPM	otáčky za minutu (revolutions per minute)
bps	bity za sekundu (bit per second)
OTG	funkce USB (On The Go)
API	Rozhraní pro programování aplikací (Application Programming Interface)

# Literatura

- [1] ČÚZK, Terminologická. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/slovnik>.
- [2] Android Developers. *Android Developers* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://developer.android.com/>.
- [3] Arduino Home [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>.
- [4] GENS ACE LIPO TATTU serie - 6750 mAh 14,8V 4S1P) [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/ta-25c-6750-4s1p-gens-ace-lipo-tattu-serie-4s-6750-mah-25c>.
- [5] BLHeli32 ARM [online]. Copyright © 2019. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: [https://github.com/bitdump/BLHeli/tree/master/BLHeli\\_32%20ARM](https://github.com/bitdump/BLHeli/tree/master/BLHeli_32%20ARM).
- [6] GitHub, Adafruit BMP280 Library, Arduino Library for BMP280 sensors [online]. Copyright © 2019. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_BMP280\\_Library](https://github.com/adafruit/Adafruit_BMP280_Library).
- [7] CodingWithMitch [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://codingwithmitch.com/>.
- [8] Self Balancing Robot Using Mpu6050 Accelerometer [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.robotshop.com/community/forum/t/self-balancing-robot-using-mpu6050-accelerometer/5093>.
- [9] Joshua Bardwell [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/channel/UCX3eufnI7A2I7IkKHZn8KSQ>.
- [10] ATmega48P,88P,168P,328P datasheet [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/ATMega328.pdf>.
- [11] Find the magnetic declination at your location [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.magnetic-declination.com/>.

- [12] *Flowchart Maker and Online Diagram Software* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.draw.io/>.
- [13] *Design, Build and Improve a Quadcopter* [online]. Copyright ©. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Design-Build-and-Improve-a-Quadcopter>.
- [14] *Multicopter Calculator, Motor Calculator on the Web for RC Pilots* [online]. [cit. 2019-05-11].
- [15] *ELECTRONOOPS, Electronics tutorials, Arduino, basic circuits, 3D printing, robotics. ELECTRONOOPS, Electronics tutorials, Arduino, basic circuits, 3D printing, robotics* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.electrooops.com>.
- [16] *HGLRC BS30A* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.rotorama.cz/regulatory/hglrc-bs30a>.
- [17] *Drone Basics PID Hackster.io, The community dedicated to learning hardware* [online]. Copyright ©. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.hackster.io/ElvisWolcott/drone-basics-pid-83da06>.
- [18] *MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer and Arduino. How To Mechatronics* [online]. Copyright © 2019 HowToMechatronics.com. All rights reserved. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino>.
- [19] *Brushless Motor Kv Constant Explained, Learning RC Knowledge and Information for the RC Community* [online]. Copyright © 2019. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://learningrc.com/motor-kv/>.
- [20] *GitHub, vl53l0x, arduino, Pololu Arduino library for VL53L0X time of flight distance sensor* [online]. Copyright © 2019. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://github.com/pololu/vl53l0x-arduino>.
- [21] *Learn Engineering* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/channel/UCqZQJ4600a9wIfMPbYc600Q>.

- [22] *GitHub, PaulStoffregen, MahonyAHRS* [online]. Copyright © 2019. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://github.com/PaulStoffregen/MahonyAHRS>.
- [23] *MikrokopterWiki* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://wiki.mikrokopter.de/en>.
- [24] *MK3640/34 5mm* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: [https://www.mikrocontroller.com/index.php?main\\_page=product\\_info&cPath=73&products\\_id=887&zenid=e5f2c8d548f2a39747a4ed06d306a37f](https://www.mikrocontroller.com/index.php?main_page=product_info&cPath=73&products_id=887&zenid=e5f2c8d548f2a39747a4ed06d306a37f).
- [25] *MPU-9250 Product Specification Revision 1.1* [online]. Copyright ©. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>.
- [26] *Multiwii* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.multiwii.com>.
- [27] *How to Build Arduino Quadcopter Drone: Step-by-Step DIY Project. MyDroneLab: Best Drones For Sale, Expert Reviews and Guides* [online]. Copyright © MyDroneLab. All rights reserved. Reproduction of any portion of this website only at the permission of MyDroneLab. The information provided on this site is for educational use only. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://mydronelab.com/blog/arduino-quadcopter.html>.
- [28] *Matek PDB s 5V 12V, Rotorama - Závodní drony* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.rotorama.cz/prislusenstvi/matek-pdb-s-5v-12v>.
- [29] *The Physics of How Drones Fly / WIRED. WIRED* [online]. Copyright © 2018 Condé Nast. All rights reserved. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.wired.com/2017/05/the-physics-of-drones/>.
- [30] *Plynulá regulace PID, Regulace od Jardy* [online]. Copyright © 2000. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://valter.byl.cz/plynula-regulace-pid>.
- [31] *Picture Pulse With Modulation* [online]. Copyright © 2019. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://1oomzzme3s617r8yzr8qutjk-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2017/04/Fig-1-pwm.gif>.

- [32] *Pulzně šířková modulace – Wikipedie* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B\\_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1\\_modulace](https://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace).
- [33] *Picture of rotation angles* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://devusa.djicdn.com/images/flightController-concepts/altitude-7e757661b6.png>.
- [34] *SiiEEFPV* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/channel/UCbZ81vU3NT\\_Wp3hijL57ecg](https://www.youtube.com/channel/UCbZ81vU3NT_Wp3hijL57ecg).
- [35] *UK Distributor of Sparkfun, Arduino, BBC Micro Bit, Adafruit - Proto-PIC* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: [https://www.proto-pic.co.uk/user/products/large/08665-03-L\\_99538\\_33841.jpg](https://www.proto-pic.co.uk/user/products/large/08665-03-L_99538_33841.jpg).
- [36] *XBee S2 Quick Reference Guide, Cheat Sheet and Video Tutorials to Getting Started - TunnelsUP. TunnelsUp - Tools and Information for Network Engineers* [online]. Copyright © 2019. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.tunnelsup.com/xbee-guide/>.
- [37] *Projekt YMFC* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.brokking.net>.

## A GIT repozitář

Veškeré přílohy jsou dostupné z gitu uživatele zahrada a repozitáře 2018-thesis-drone. <https://github.com/zahrada/2018-thesis-drone>

### Adresáře

arduinoXbeeShield - arduino kód pro komunikaci meyi XCTU a XBEE  
bluetooth - testování bluetooth komunikace  
diagrams - diagramy z textu diplomové práce  
droneBelheli - letový kontrolér verze 1  
dronebeli - letový kontrolér verze 2  
flyCtrl - letový kontrolér verze 3  
MyApplication2 - android aplikace  
naviCtrl - navigační kontrolér  
obstacleSensor - překážkový kontrolér  
testingIMU - testování IMU jednotky  
text - text diplomové práce v LaTeX