



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MODEL AUTONOMNÍ KVADROPTÉRY

AUTONOMIC QUADCOPTER MODEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Eduard Medla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Bc. Eduard Medla
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	Ing. Daniel Zuth, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Model autonomní kvadroptéry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat realizací kvadroptéry s prvky autonomního pohybu v prostoru. Po rešeršní části bude vybrána vhodná řídicí jednotka a konstrukční prvky. Výstupem práce bude funkční model kvadroptéry a ukázka autonomního pohybu v prostoru.

Cíle diplomové práce:

Popište dostupné prvky pro model (pohony a řídicí jednotky).

Vyberte a popište vybrané prvky.

Otestujte funkčnost modelu.

Popište možné autonomní pohyby v prostoru.

Realizujte vybraný algoritmus pro autonomní pohyb.

Seznam doporučené literatury:

NOVÁK, Petr. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001411.

Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi. Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi [online]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/>.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce bylo popsat dostupné prvky pro model kvadroptéry, kvadroptéru sestavit, popsat možné autonomní pohyby v prostoru a vybraný algoritmus zrealizovat.

ABSTRACT

The aim of this work was to describe available elements from quadcopter model, build the model, describe possible autonomous behavior in space and realize chosen algorithm.

KLÍČOVÁ SLOVA

Model kvadroptéry, stavba kvadroptéry, autonomní chování, regulace výšky, ultrazvukové senzory HCSR04, mbed

KEYWORDS

Model of quadcopter, building quadcopter, autonomous behavior, height regulation, sonic sensor HCS404, mbed

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MEDLA, E. *Model autonomní kvadroptéry*, Brno, 2018. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Zuth Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu práce, panu Ing. Danielovi Zuthovi Ph.D. za pomoc během práci na této diplomové práci. Dále děkuji rodině za podporu během celého mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Ing. Daniela Zutha Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 21. 5. 2018

.....

Eduard Medla

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	MOTOR	11
2.1	Hmotnost dronu.....	11
2.2	Poměr tahu motoru k hmotnosti.....	12
2.3	Efektivita.....	12
2.4	Kroutící moment	12
2.5	Množství pólů	12
2.5.1	Značení.....	12
2.6	Tvar motoru – tvar sudu vs. disk.....	13
2.7	Nejpoužívanější motory současnosti.....	13
2.7.1	Coolplay syma x5c-1 x5c x5.....	13
2.7.2	Hobbymate quadcopter kit motor	14
2.7.3	Emax Mt2213 brushless motor	14
3	ŘÍDÍČÍ JEDNOTKA	16
3.1	Senzory a parametry.....	17
3.2	Řídící jednotky pro začátečníky.....	17
3.2.1	KK 2.X.....	17
3.3	Řídící jednotky pro závodění	18
3.3.1	CC3D	18
3.3.2	NAZE32.....	18
3.4	Řídící jednotky pro autonomní let a natáčení	19
3.4.1	ArduPilot APM	19
3.5	Řídící jednotky pro autonomní let	20
3.5.1	3DR Pixhawk	20
3.6	Řídící jednotka pro natáčení videí	21
3.6.1	DJI Naza M – V2	21
4	OSTATNÍ DOSTUPNÉ PRVKY PRO MODEL	22
4.1	Kontrolor otáček (Electronic Speed Controller)	22
4.1.1	Konfigurace kontroléru otáček.....	23
4.2	Li-Po baterie.....	25
4.2.1	Napěťová deska.....	26
4.3	Radio přijímač.....	27
4.4	Vrtulky	28
5	DISKRÉTNÍ REGULACE	31
5.1	Regulační obvod	31
5.2	A-D převodník	32
5.3	D-A převodník	32
5.4	Číslicové regulátory	33
5.5	Nastavení PSD pro regulaci výšky kvadroptéry	34
6	VLASTNÍ KONSTRUKCE	35
6.1	Motor a vrtulky	35
6.2	Řídící jednotka	36
6.3	ESC	37

6.4	Sekundární řídicí jednotka.....	37
6.4.1	Mbed.....	38
6.5	ESP8266	38
6.6	HCSR04.....	39
7	DALŠÍ SENZORY PRO DETEKOVÁNÍ PŘEKÁŽEK.....	41
7.1	Stereo kamera	41
7.2	Time-of-Flight (ToF) kamera	41
7.3	Lidar.....	42
7.4	Monokulární kamera.....	43
8	FUNKČNÍ MODEL.....	45
8.1	Kalibrace akcelerometru	46
8.2	Nastavení signálu vstupující do hlavní řídicí jednotky	46
8.3	Nastavení PID	47
8.4	Nastavení přijímače	47
8.5	Nastavení modu	48
8.6	Sekundární řídicí jednotka.....	49
8.7	Zhodnocení funkčnosti modelu	49
8.8	Možné autonomní pohyby	50
9	PROGRAM SEKUNDÁRNÍ ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY.....	53
9.1	Běh programu	53
9.1.1	Nezávislá vlákna.....	54
9.1.2	Závislá vlákna.....	54
9.1.3	Konfigurační soubor	54
9.1.4	Server.....	56
9.2	Regulace kanálů.....	57
9.3	Měření vzdálenosti před a za kvadroptérou.....	58
9.4	Způsob ovládání autonomního chování kvadroptéry	58
9.5	Zhodnocení funkčnosti programu.....	59
10	ZÁVĚR	61
11	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
12	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	67
13	SEZNAM PŘÍLOH.....	69
	PŘÍLOHA 1	71
	PŘÍLOHA 2	72
	PŘÍLOHA 3	73

1 ÚVOD

Kvadroptéry nejsou v dnešní době už používané pouze jako koníček a zpestření volného času, ale bývají čím dál více používány i jako pomocní pracovníci pro různé profese. Profese jako třeba kameraman nebo hasič, či záchranář. Kvadroptéry budou čím dál více pronikat mezi lidi a pomáhat jim při plnění rutinních úkolů nebo úkolů, které jsou pro člověka příliš nebezpečné. To může být třeba hlídání parkoviště, pole, nebo jiného pozemku nebo hledání přeživších při přírodních katastrofách.

Cílem této práce je především sestavit funkční model kvadroptéry, který je schopný nějakého autonomního pohybu. Měl by to být pohyb, který automatizuje nějaký rutinní pohyb. Bude sestaven model, s ohledem na finanční prostředky konstruktéra, který bude schopný hlídat např. parkoviště. Než ale bude tento model sestaven, bude část této práce věnována i jednotlivým prvkům, které jsou pro stavbu potřeba, a to hlavně současně nejvíce používaným motorům a řídicím jednotkám. Dále ale bude i řeč o ostatních stavebních prvcích jako třeba typy kontroléru otáček motorů, vrtulím a dalším. Po sestavení a vybrání vhodných prvků bude i ukázán průběh prvotní konfigurace primární řídicí jednotky. Po sestavení modelu bude následovat ukázka autonomního pohybu.

Pojem prostor je v této práci chápán jako uzavřený prostor bez GPS signálu. Snažením této práce je sestavit model, který dostává příkazy např. „let’ rovně“ a po detekci nějakého objektu by na to kvadroptéra měla být schopná zareagovat, způsobem takovým, aby nedošlo ke kolizi. Pro detekci bude použit ultrazvukový senzor HCSR 04 a příkazy budou zadávány přes mobilní zařízení. Po zadání příkazu přes mobilní zařízení bude kvadroptéra schopná sama vzlétnout do požadované výšky v této výšce se držet a vykonat nějaký autonomní pohyb.

Tato práce bude spíše orientována na detekci překážek než na pohyb po předem zvolené trase, protože v uzavřeném prostoru, kde je mnoho překážek, je detekce okolních předmětů základem. Proto také se bude kvadroptéra autonomně pohybovat pouze v těch směrech, ve kterých model dovede detekovat překážky.

Součástí této práce bude i výsledný program, který ovládá autonomní chování kvadroptéry. Tento program se stará o držení výšky kvadroptéry, tuto výšku bude možné zadat přes mobilní zařízení. Přes toto zařízení bude také možné měnit parametry PID regulátoru a spouštět samotný autonomní pohyb.

2 MOTOR



Obr. 1: Bezkartáčový motor pro kvadroptéry [1]

Pohony je základní součást výsledného modelu. Pokud víme, jakou kvadroptéru chceme sestavit, tak výběr motorů je součástí, u které začínáme, parametry ostatních součástí se od toho jenom vyvíjí. Motorů se dá sehnat nepřeberné množství, ale je potřeba dobře vybírat a nekupovat nejlevnější, zároveň ale nekupovat zbytečně drahý, protože kvadroptéry, oproti některým jiným modelům, se hůře ovládají, po selhání jednoho motoru dron spadne.

Účel motoru je jasný, a to roztáčet vrtule. V čem se motory od sebe liší je velikost kilovoltů. Čím vyšší hodnota kilovoltů, tím rychleji se motor otáčí při konstantním napětí. Při koupi motoru vám většina obchodů napoví, jaké vybrat ESC (Electronic Speed Controller) a jak velké vrtulky budou potřeba. [2]

K pohánění kvadroptér se používají převážně bezkartáčové motory kvůli snazší údržbě a vyšší efektivitě než motory kartáčové.

Nyní budou probrány nejdůležitější parametry při výběru motorů.

2.1 Hmotnost dronu

První kritériu při stavbě dronu je mít jasno jakou hmotnost bude výsledný model mít. Je dobré znát hmotnost jednotlivých součástí, konektorů, konektorů, rámu a baterie. V případě modelů vycházejícího z této práce je celková hmotnost 620 gramů kde pouze baterie váží 166 gramů. Jakmile je známá hmotnost dronů, tak můžeme vybírat správnou velikost vrtulí, což nakonec vede k výběru motoru podle jeho schopnosti tahu. [3]

2.2 Poměr tahu motoru k hmotnosti

Nepsané pravidlo pro správný výběr motoru je mít poměr tahu motoru k hmotnosti dronu na 50 %, tzn. že tah motoru je 2x větší než hmotnost celého dronu. Například dron s hmotností 600 g potřebuje motory, které dají dohromady tah schopný udržet ve vzduchu dron s hmotností 1,2 kg.

Zmiňovaný poměr nemusí být vždy 50 %. Dost záleží na účelu kvadroptéry. Závodní dron může mít poměr i nižší, naopak dron pro nahrávání videí a focení může zvolit poměr klidně i 70 %. Záleží na konstruktérovi a využití postaveného dronu. [4, 5]

2.3 Efektivita

Efektivita motoru je počítána podle poměru tahu motoru ku výkonu. Jednotka je g/W. Vyšší efektivita motoru pomáhá k delší výdrží kvadroptéry ve vzduchu. Při stavbě dronu je doporučeno mít efektivitu motoru alespoň 7 a výš. [5]

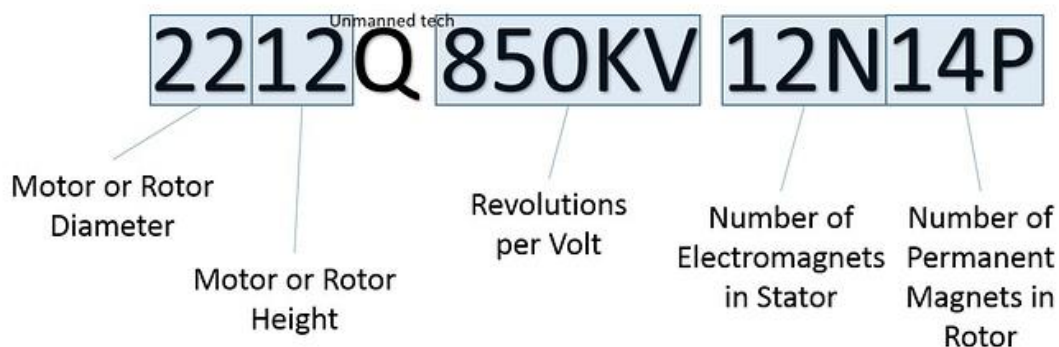
2.4 Kroutící moment

Kroutící moment poukazuje na schopnost motorů měnit rychle otáčky. Kvadroptéra s motory, které mají vysoký kroutící moment se více hodí na závodní využití, kvadroptéra je schopná rychlé akcelerace. Velký kroutící moment naopak způsobuje oscilace, které se špatně odstraňují. [5]

2.5 Množství pólů

Motory s větším množstvím pólů jsou schopny vykazat větší kroutící moment, ale za cenu vyšší spotřeby energie. Takovéto motory mají i nižší počet otáček za minutu neboli RPM (Round Per Minute). [4]

2.5.1 Značení



Obr. 2: Značení motorů [6]

Nejčastější je značení např. 2204-2300KV. RPM se vypočítá podle vzorce:

$$RPM = Kv * napětí$$

Čím vyšší napětí a Kv hodnota a počet článků v baterii, tím vyšší otáčky motor vydává. [6]

Jednotlivé motory nabízejí i tabulku zobrazující tah, efektivitu, výkon a otáčky v závislosti na výběru vrtulí a množství článku na baterii.

Tab. 1: Vztah baterií a vrtulí pro motor MT2204[7]

Napětí (V)	Velikost vrtulí (palce)	Proud (A)	Tah (G)	Výkon (W)	Efektivita (G/W)	Rychlost (RPM)
8	6x3	6,4	240	51,2	4,7	11910
12	5x3	7,5	310	90	3,4	20100
	6x3	11,5	440	138	3,2	16300

2.6 Tvar motoru – tvar sudu vs. disk

Motory ve tvaru disku se vyznačují menší vahou, vyšším kroutícím momentem a obvykle větším množstvím vinutí, což vede k většímu množství pólů, a tudíž nižší Kv hodnotě (nižším otáčkám). Pokud má motor nižší otáčky, ale vysoký kroutící moment, tak je nutné použít větší vrtule. Díky těmto vlastnostem mají dávají diskové motory stabilnější let a delší dobu letu s minimálními turbulencemi a hlukem.

Motory ve tvaru sudu jsou přesným opakem motoru diskových. Mají větší Kv hodnotu, takže mají větší RPM, ale přesto jsou diskové motory používanější i když jsou dražší. Díky Čínským internetovým ochodům je cena diskových motoru přijatelná i když je asi 2x větší. [4]

2.7 Nejpoužívanější motory současnosti

2.7.1 Coolplay syma x5c-1 x5c x5

Výhody:

- Mají mosazné převody které poskytují vysoce stabilní výkon a odolnost
- Nižší cena
- Zákaznická podpora

Nevýhody:

- Motory vydávají nepříjemný zvuk



Obr. 3: Coolplay syma x5c-1 x5c x5[23]

[5]

2.7.2 Hobbymate quadcopter kit motor

Výhody:

- Vydávají se v několik velikostech
- Kvalitní chladicí systém
- Delší výdrž baterie, vyšší efektivita, delší doba letu
- Menší hmotnost
- Méně vibrací

Nevýhody:

- Cena (asi 5x větší než Coolplay Syma x na značkových obchodech)

[5]



Obr. 4: Hobbymate quadcopter [5]

2.7.3 Emax Mt2213 brushless motor

Výhody:

- Maximální tah až 860 G
- Jednoduché zapojení
- Pěkný design

Nevýhody:

- Velmi drahé
- Vyšší váha



Obr. 5: Emax Mt2213[5]

[5]

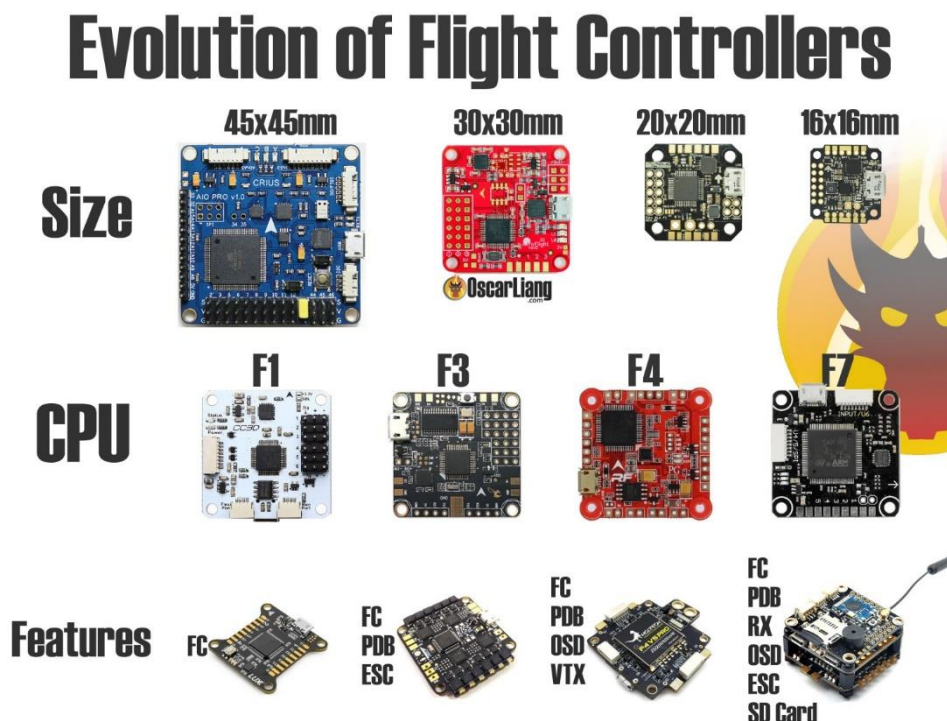
3 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA

Řídící jednotka je mozkiem celé kvadroptéry. Je to v podstatě obvodová deska se zabudovanými senzory, která ovládá kvadroptéru. Povelů vykonává podle výpočtu, které vykoná pomocí senzoru nebo podle povelů z přijímače rádiového signálu.

Všechny jednotky mají zabudovaný minimálně gyroskop a akcelerometr, které postačí na základní výpočty pro stabilizaci kvadroptéry, ale pokročilejší kontroléry mají i barometr, magnetometr (kompas). K pokročilejším řídicím jednotkám se dá připojit i GPS modul.

Většina řídicích jednotek pro začínající letce může být snadno konfigurována pomocí programu, který je možné na danou jednotku použít. Asi nejčastěji využívaný program pro hobby letce je Cleanflight pomocí kterého nastavujeme v podstatě veškeré chování kvadroptéry. Mnoho konfigurací není třeba ze začátku měnit, proto se ze začátku používá především na tuning, což zahrnuje převážně kalibraci PWM signálu posílaného do ESC a nastavení PID. Měnit nastavení řídicí jednotky lze přes PC. Co vše je potřeba nastavit u nového modelu bude ukázáno v 8. kapitole.

Vývoj řídicích jednotek stále pokračuje, jak se můžete podívat obrázku 6. Vše jde samozřejmě i s vývojem nových procesorů, ale co se týče řídicích jednotek, tak největší výhodou tohoto pokroku je integrace jednotlivých zařízení přímo do řídicí jednotky, např. není potřeba zvlášť PDB (Power Distribution Board) deska, ale je zabudovaná přímo do řídicí jednotky, což šetří místo, hmotnost i čas. [9]



Obr. 6: Evoluce řídicích jednotek [9]

Značení F1 až F7 je označení STM32 ARM procesorů. Čím vyšší značení, tím větší paměť, frekvence a výkon. [10]

Výběr vhodné řídicí jednotky závisí na preferencích konstruktéra. Pokud je kvadrotéra první dílem stavitele, tak se doporučuje nějaká levnější řídicí jednotka jako třeba CC3D, Naze 32 nebo SP Racing F3, které jsou také určeny spíše pro závodní kvadrotéry. Další důležitým kritériem při výběru jednotky je schopnost snadné konfigurace. Již zmíněné jednotky jsou kompatibilní s programy jako CleanFlight nebo OpenPilot, které tuto konfiguraci značně usnadňují.

3.1 Senzory a parametry

Kromě akcelerometru a gyroskopu, který mají všechny řídicí jednotky, tak je potřeba znát i další parametry při výběru vhodné jednotky.

Počet bitů v mikrokontroleru – Obvykle ve velikostech 8 nebo 32. 32bitové mikrokontrolery se vyznačují lepším ovládním kvadrotéry.

Barometr – Používá se pro držení výšky dronu. Převážně drony určené pro nahrávání videí a focení tento senzor ocení.

Magnetometr – Hodí se u dronů, kde je důležité držení směru letu, tzv. Head holding. Senzor cítí magnetické pole kolem sebe a rozpozná kde je sever. Funguje tedy jako kompas.

GPS – Používá se pro autonomní řízení v prostorech, kde je GPS signál. Některé řídicí jednotky dovedou tento senzor použít na funkci „Návrat domů“. Tato funkce se může spustit sama při slabé baterii nebo po aktivaci.

Typ dronu – Záleží na typu stavěného dronu. Většina jednotek podporuje i trikotéry, hexakotéry a další. [11]

3.2 Řídicí jednotky pro začátečníky

3.2.1 KK 2.X

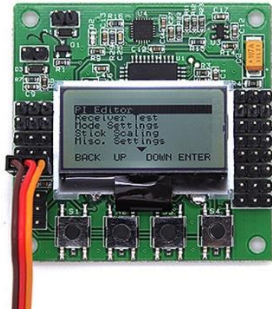
Výhody:

- Je levný
- Pomocí LCD obrazovky je možné jednotku snadno nastavit. Není potřeba kvůli každé změně zapojovat do PC.
- Spousta návodů na internetu, jak jednotku nastavit

Nevýhody:

- Je pomalý, používá pouze 8 bitový mikrokontroler
- Pomalejší mikrokontroler vede i k horšímu ovládním a stabilizaci kvadrotéry
- Neobsahuje pokročilejší prvky jako GPS nebo barometr.

[26]



Obr. 7: Řídící jednotka KK 2.X [12]

3.3 Řídící jednotky pro závodění

3.3.1 CC3D

Výhody:

- Levný
- 32bitový mikrokontroler
- Kompatibilní s konfiguračními programy jako OpenPilot a CleanFlight
- Snadný na nastavení

Nevýhody:

- Složitější na tuning oproti KK 2.X kvůli chybějící LCD obrazovce
- Neobsahuje pokročilejší prvky jako GPS a barometr

[11]



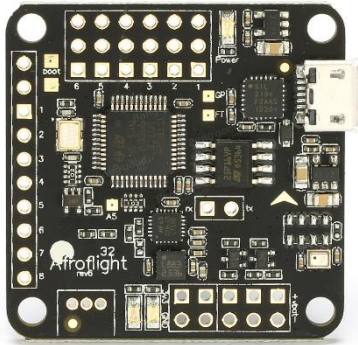
Obr. 8: Řídící jednotka CC3D [11]

3.3.2 NAZE32

NAZE32 je velmi podobný CC3D, ale vychází v několika verzích, kde lepší verze mají i GPS a barometr.

Výhody:

- Levný, speciálně Acro verze (verze bez přídatných senzorů)
- 32bitový mikrokontroler
- Kompatibilní s CleanFlight a BetaFlight programy
- Snadný na konfiguraci



Obr. 9: Řídící jednotka NAZE32 [13]

Další často zmiňovaná řídicí jednotka mezi závodníky je KISS. Je velmi podobná je již dvě zmiňované závodní jednotky. Rozdíl je v tom, že má vlastní konfigurační programy a není kompatibilní s programy jako CleanFlight, ale údajně často žádná konfigurace není potřeba, protože jednotka je dobře vyladěná už od výroby. Pokud ale na konfiguraci dojde, tak je to složitější i kvůli slabší dokumentaci. [11]

3.4 Řídící jednotky pro autonomní let a natáčení

3.4.1 ArduPilot APM

Výhody:

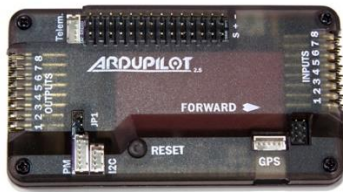
- Obsahuje GPS, magnetometr a barometr
- Možnost přidat další senzory
- Podporuje logging – ukládá na flash např. data o výstupu akcelerometru, gyroskopu a dalších senzorech
- Podporuje telemetrii – umožňuje vzdáleně měnit nastavení pro video vysílač přes OSD menu. OSD (On Screen Display) zobrazuje data o kvadrotéře (výška, úroveň baterie) na vašem video přijímači (mobil, brýle).
- Podporuje speciální APM program pro konfiguraci řídicí jednotky
- Podporuje funkci RTH (Return To Home). Kvadrotéra se dovede sama vrátit, při nízké úrovni nabití baterie nebo při ztrátě signálu od vysílačky.

Nevýhody:

- 8bitový mikrokontroler, konkrétně ATmega2560

- Složitější PID tuning

[26]



Obr. 10: Řídící jednotka ArduPilot APM [13]

3.5 Řídící jednotky pro autonomní let

3.5.1 3DR Pixhawk

Může být chápán jako nástupce jednotek od APM, i když není tak dobře otestovaný.

Výhody:

- Podporuje všechny druhy senzorů
- Podporuje telemetrii
- 32bitový mikrokontroler
- Jednoduchá konfigurace
- Podporuje mnoho letových režimů

Nevýhody:

- Vyšší cena
- Je potřeba připojit externí PPM enkodér pokud není použit S-BUS přijímač



Obr. 11: Řídící jednotka 3DR Pixhawk [13]

[26]

3.6 Řídicí jednotka pro natáčení videí

3.6.1 DJI Naza M – V2

Velmi populární kvůli známým DJI Phantom dronům. Nabízí méně vymožeností než zmíněný 3DR Pixhawk, protože Naza není open-source. Za to kvalita je vyšší a je považován za jeden z nejlepších řídicích jednotek pro focení a natáčení videí. DJI k těmto jednotkám prodává i různé přídatky.

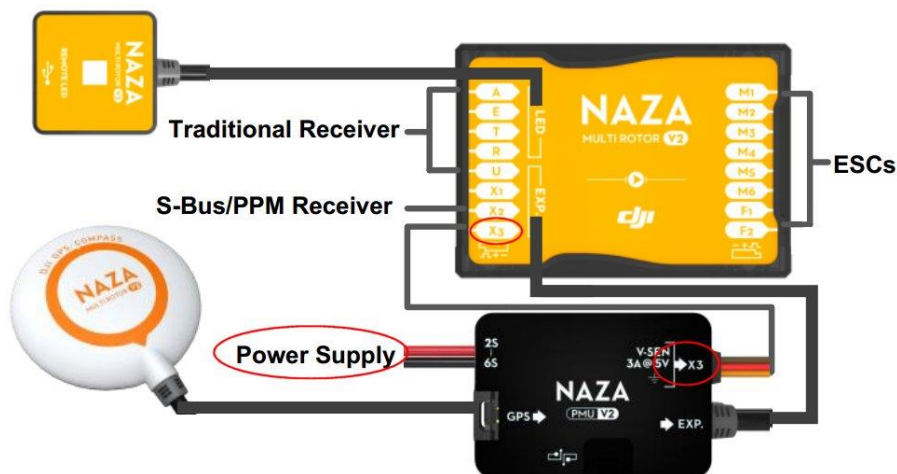
Výhody:

- Podporuje mnoho senzorů a telemetrii
- 32bitový mikrokontroler
- Výborná podpora

Nevýhody:

- Nepodporuje trikopty
- Velmi vysoká cena

[26]



Obr. 12: Řídicí jednotka DJI Naza M – V2 [14]

4 OSTATNÍ DOSTUPNÉ PRVKY PRO MODEL

Pokud si člověk staví kvadroptéru sám, tak sehnání součástek je důležitá součást vývoje. Na internetu je spousta obchodů, které nabízejí tyto součástky, ale v čem se tyto součástky liší je kvalita a cena, případně možnost reklamace vadných součástek a doba dodání.

Jsou dva hlavní přístupy, jak si součástky sehnat, buď přes místní obchody a internetové obchody nebo využít některý zahraniční internetový obchod. Při konstrukci bylo zvolena převážně druhá možnost, kvůli ceně. Součástky byly převážně koupeny přes Aliexpress, odkud byla objednána celá stavebnice modelu, vysílačka, náhradní ESC (Electronic Speed Controller), kvalitnější rádio přijímač, měřiče napětí se signalizací v baterii a náhradní vrtule. U součástek, kde si člověk není jistý kvalitou, tak ty je možné koupit z některého místního obchodu jako např. u Li-Po baterie a nabíječky.

Oba přístupy mají své výhody a nevýhody. V případě místních obchodů je možnost nakoupené zboží hned začít používat a je snadná možnost reklamace, ale na druhou stranu je za to zapláceno až o 50 % vyšší cenou. U např. zmíněného Aliexpressu, jsou součástky za mnohem levnější cenu, ale pokud si člověk nepříplatí za rychlejší dodání, tak čekací doba je většinou měsíc. Po kontrole recenzí člověk nemusí mít strach, že kupuje nekvalitní součástky. V případě součástek na model v této práci nebylo nutné uplatňovat reklamaci.

4.1 Kontrolor otáček (Electronic Speed Controller)



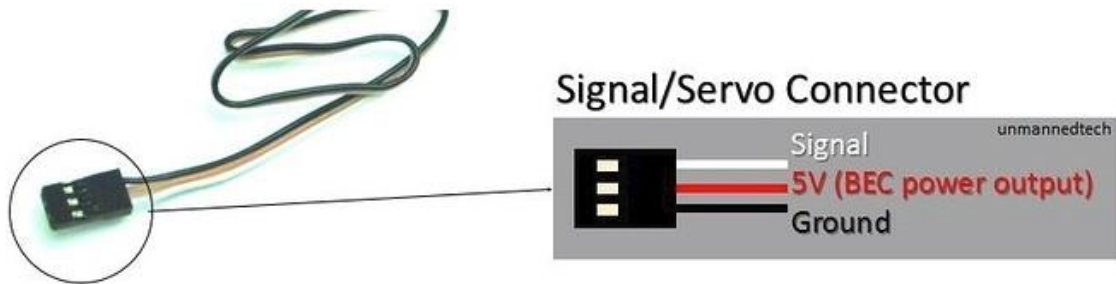
Obr. 13: ESC [15]

ESC se stará o rychlost otáček motoru. Nejdůležitější parametr je maximální množství ampér, který je schopný přijmout od baterie. Typické hodnoty se u kvadroptér pohybují od 12 do 40 ampér. Velikost ESC(ampér), závisí na výběru motoru, vrtulek a baterie. Další parametry jsou velikost napětí, které je často udáváno v množství článku zapojených v sérii u Li-Po baterií, a jakého typu kontrolor je.

Z ESC obvykle vedou 3 fáze do motoru. Do ESC vstupuje napětí přímo z baterie a signál, v případě kvadroptéry signál z řídicí jednotky.

Jsou dva hlavní typy kontrolérů, první je **BEC** (Battery eliminating Circuit), což znamená, že kontrolér má výstup s konstantním napětím, obvykle 5 V a 1-2 A. Konektor

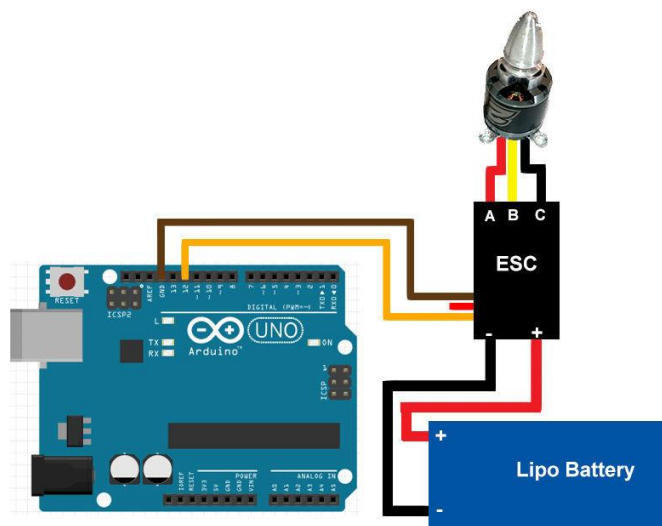
potom vypadá následovně jako typický Servo konektor. Pokud naše napájecí deska (PDB – Power Distribution Board) nemá samostatný 5V výstup, např. pro řídicí jednotku, rádio přijímač a další 5V součástky, tak můžeme BEC využít. [16]



Obr. 14: Servo konektor [16]

Další typ je **OPTO** ESC. OPTO znamená optoisolated. Ve zkratce je to ESC bez BEC, takže prostřední červený napěťový kabel není přítomen. [16]

Typické zapojení kontroloru otáček OPTO vypadá následovně (Arduino UNO je zde pouze pro ilustraci)

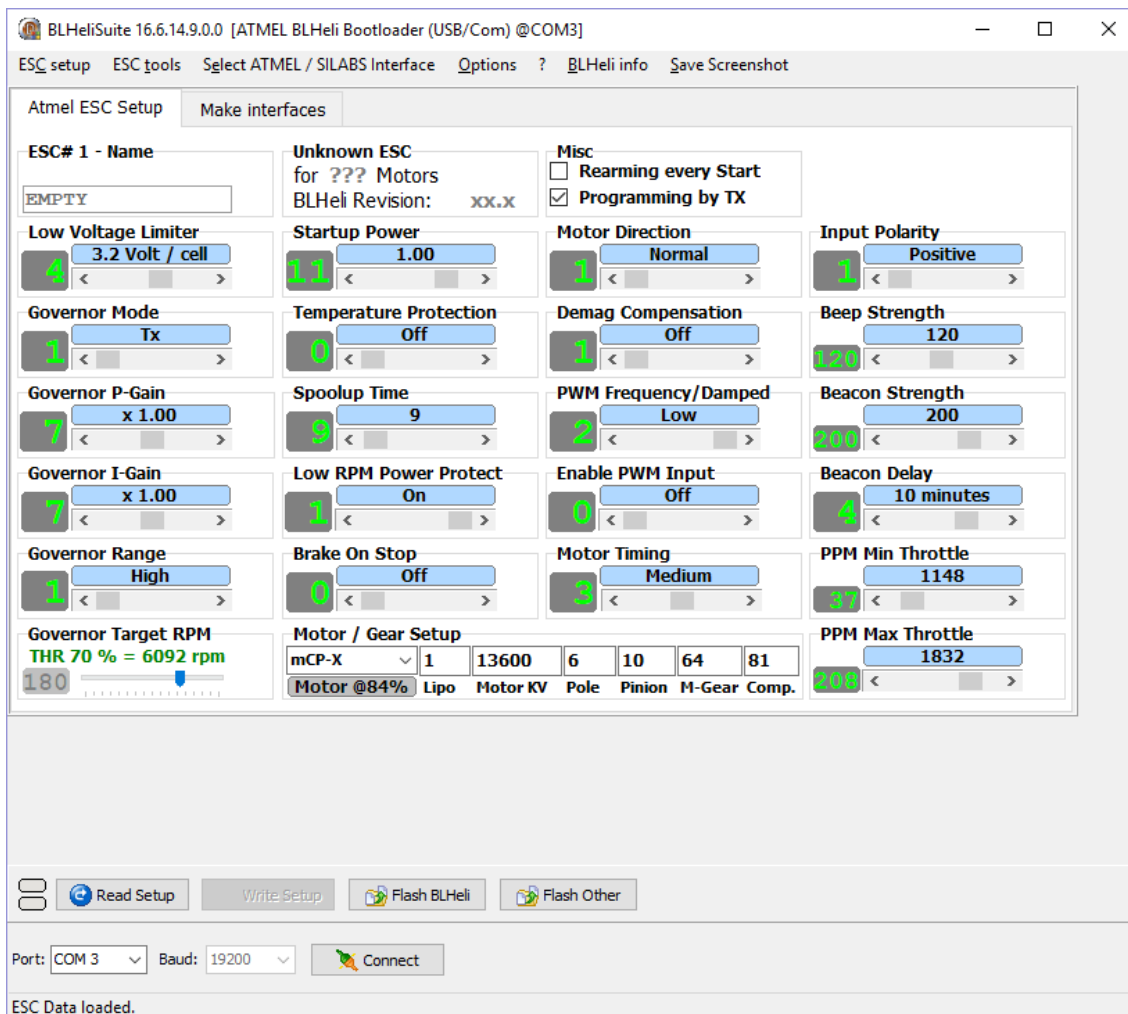


Obr. 15: ESC OPTO zapojení (Arduino jako řídicí jednotka) [16]

4.1.1 Konfigurace kontroléru otáček

Každé ESC je potřeba před používáním nakonfigurovat a pokud při konstrukci kvadroptéry bude používána výchozí konfigurace, tak stejně bude velmi pravděpodobně potřeba ESC zkalibrovat.

Jsou 2 typy firmwaru, které se na konfiguraci ESC používají, a to SimonK a BLHeli, ale protože většina ESC se prodává s před konfigurovaným BLHeli, budeme se bavit jenom o BLHeli. Oba firmwary jsou velmi podobné a nejdůležitější parametry, které budou zmíněny, jsou všude stejné.



Obr. 16: Konfigurace ESC pomocí BLHeli

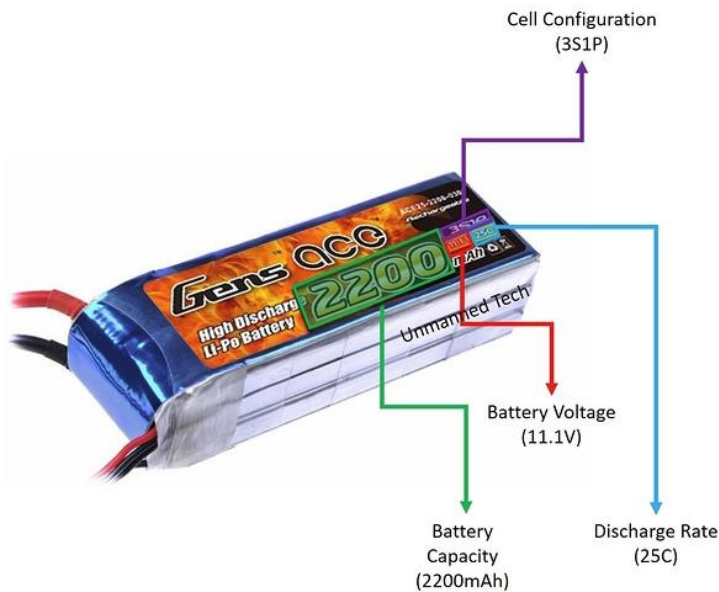
PPM Min Throttle a **PPM Max Throttle** – Nějaký signál, při spuštění kvadroptěře, vstupuje do ESC vždycky, ale tyto hodnoty určují, kdy bude vstupující signál roztáčet motory.

Motor Direction – z názvu je jasné o co jde, ale tuto funkci je dobré zmínit kvůli tomu, že je vždy snadnější zaškrtnout toto políčko, než měnit fáze mezi ESC a motorem pomocí pájky. Protože další možnost, jak změnit polaritu motoru, je prohodit spoje mezi ESC a motorem.

PWM Frequency - U novějších ESC je možnost vybrat 3 hodnoty. High, Low a Damped Light. PWM frekvence u High hodnoty je 20KHz a u Low je 8KHz. Low frekvence zajišťuje plynulejší přechod mezi jednotlivými rychlostmi. Ještě lepší ale je použít Damped Light, která má i funkci tzv. aktivního brzdění, takže jak rychle dovede ESC motory akcelarovat, tak stejně rychle je dovede i brzdít.

Enable PWM Input – Řídící jednotka vysílá buď servo signál anebo obyčejný PWM signál, kdy rychlost otáček motoru, bude závislá na střídě tohoto PWM signálu. S obojím dovede ESC pracovat. [17]

4.2 Li-Po baterie



Obr. 17: Parametry Li-Po baterie [18]

Pro menší kvadrotéry se používají 3S1P, což znamená, že v jedné sérii jsou po sobě 3 články. Nominální napětí jednoho článku je 3,6V, minimální 3V a maximální 4,2V. Maximální a minimální hodnoty nesmějí být překročeny, jinak hrozí zničení baterie případně i něco horšího, jako třeba vzplanutí. [19]

Platí, že čím vyšší kapacita, tak tím déle se kvadrotéra udrží ve vzduchu, ale také má vyšší hmotnost, proto je třeba zvážit oboje. Míra vybíjení (Discharge rate) je velmi důležitý parametr při vybírání baterie. Čím vyšší je C hodnota, tím víc si může kvadrotéra vzít energie, převážně ESC. Například baterie s 2200mAh a 25 C může poskytovat až $2,2 * 25 = 55A$, což v případě 12A ESC bohatě stačí. [19]

Li-Po baterie jsou velmi nebezpečné při neopatrné manipulaci, je potřeba mít kvalitní nabíječku, která hlídá, aby nedošlo k přebíjení baterie, vědět kolik ampér baterie při nabíjení snese a nejlépe vždy počítat s tím, že se baterie může vznítit, nemluvě o pádech

kvadroptéry při létání. Proto je dobře mít baterii uloženou v nějaké nehořlavé nádobě nebo baterii uchovávat ve speciálních nehořlavých vacích.



Obr. 18: Nehořlavý vak pro baterie [18]

Z baterie vystupuje jeden pár napěťových kabelů a JST/XH balancer, který se používá pro vybalancování napětí na jednotlivých článcích baterie a nebo pro do něj můžeme při létání zapojit tester napětí, který zobrazuje celkové napětí, napětí na jednotlivých článcích a v případě poklesu pod námi navolenou hodnotu začne tester hlasitě pípat. Při létání s kvadroptérou je toto zařízení v podstatě nutnost, pokud nemáme tyto údaje zobrazené někde jinde, třeba na vysílače. [19]

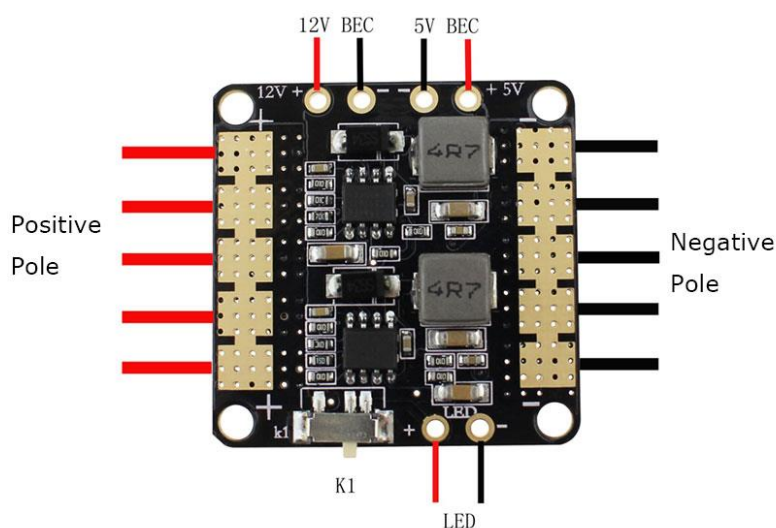


Obr. 19: Senzor napětí na baterii [20]

4.2.1 Napěťová deska

Napěťová deska (nebo také PDB – Power Distribution Board) se používá jako rozvaděč napájení kvadroptéry. Asi nejvíce používané výstupy na PDB jsou pro ESC, které je nezredukováné a 5V výstup, které se používá především pro napájení řídicí jednotky.

Na póly se připojí baterie a ESC. Výstup o 5 voltech bývá obvykle použit na napájení řídicí jednotky a výstup o 12 voltech bývá použit např. pro kameru.



Obr. 20: Ukázka PDB desky [21]

4.3 Radio přijímač

Rádio přijímač přijímá signál z vysílačky a posílá ho do řídicí jednotky. Většina přijímačů dovede přijímat i vysílat PPM signál. PPM komunikace zvyšuje přehlednost při zapojování kvadroptéry, protože namísto 6 konektorů si vystačíme jenom s jedním.

Některé přijímače disponují i zpětnou telemetrií, tzn. že můžeme na vysílače sledovat např. naši vzdálenost od létající kvadroptéry, proto je přijímač se zpětnou telemetrií velmi dobrá funkce speciálně pro začínající piloty.

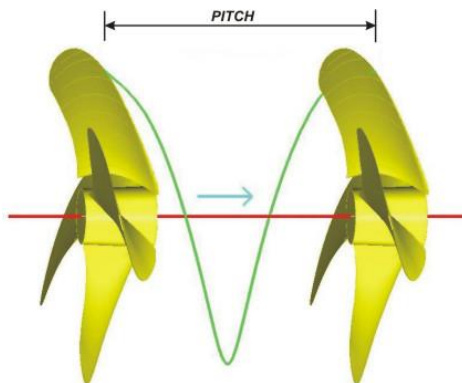


Obr. 21: Rádio přijímač FS-IA6B [22]

4.4 Vrtulky

Vrtulky ovlivňují chování kvadroptéry zásadním způsobem. Po výběru motoru, jsou vrtule další věc na zvážení. Opět je to o kompromisu mezi rychlostí akcelerace a výdrží baterie, mezi ladným pohybem a agresivním chováním.

Značení vrtulek se sestavuje ze dvou veličin, a to průměru plochy točících se vrtulek a stoupáním. Čím vyšší rozpětí a stoupání, tím vyšší potřeba proudu a krouťícího momentu a agresivnější létání a naopak. [23]



Obr. 22: Stoupání vrtulek [30]

Dalším důležitým parametrem vrtulek je tvar plochy jednotlivých vrtulí a jejich zakončení. Čím vyšší plocha, tím větší tah za cenu vyšší spotřeby energie. BN (Bull Nose) vrtule mají největší plochu záběru. Vrtulky se špičkou na konci se vyznačují nižší spotřebou a menším sklonem k turbulencím, ale také menším tahem. HBN (Hybrid Bull Nose) jsou kompromisem mezi dvěma výše zmíněnými. [23]



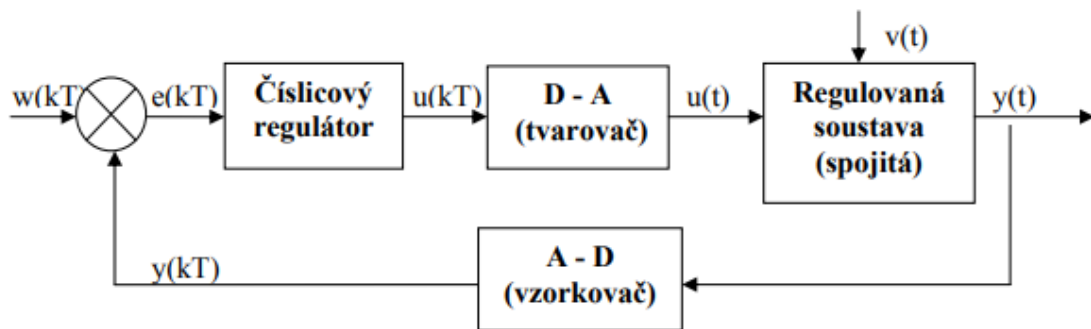
Obr. 23: Tvary vrtulek [23]

Znační vrtulí je v palcích, takže např. 5x4,5 nebo 5045 znamená 5 palců průměr a stoupání 4,5 palců. Za stoupáním se občas udává i počet lopatek, pokud je větší než 2.
[23]

5 DISKRÉTNÍ REGULACE

5.1 Regulační obvod

Diskrétní regulační obvod (obrázek 4.1) je takový obvod, ve kterém má alespoň jedna veličina tvar posloupnosti diskretních hodnot vytvářených např. v pravidelných časových okamžicích, které bývají vyjádřeny diskretní funkcí $f(kT)$.



Obr. 24: Blokové schéma diskretního regulačního obvodu

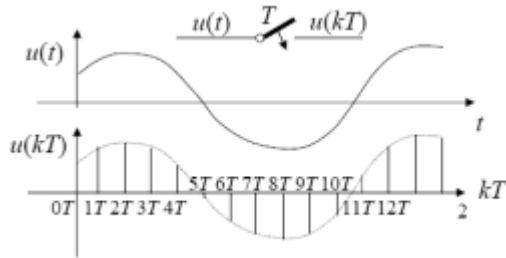
Diskrétní funkce vyjadřuje posloupnost hodnot v tzv. vzorkovacích okamžicích ($t = T, 2T, 3T, \dots$). Hodnota T se nazývá vzorkovací perioda a je vázána vztahem (5.1) se vzorkovací frekvencí ω_v , kde

$$\omega_v = \frac{2\pi}{T} \quad (5.1)$$

Jak je patrné z blokového schéma diskretního regulačního obvodu, jedná se o běžný typ regulačního obvodu. Regulovaná je zde spojitá soustava, proto máme spojitou také regulovanou veličinu $y(t)$. Ta je prostřednictvím analogově-digitálního převodníku vzorkována s periodou T a převedena do číslicového tvaru, tj. na diskretní funkci $y(kT)$. Číslicový regulátor poté vypočítá regulační odchylku $e(kT)$ a vlastní řídicí algoritmus počítače určí hodnotu zásahu $u(kT)$. Tato hodnota je poté digitálně-analogovým převodníkem převedena na spojitý signál $u(t)$, který prostřednictvím regulačního orgánu působí na regulovanou soustavu. Některé diskretní regulátory nepřevádí signál $u(kT)$ na spojitý signál, ale spojitou soustavu řídí nespojitě (diskretně) pomocí pulsně šířkové modulace (PWM).

5.2 A-D převodník

A-D převodník bývá velmi často nazývaný jako vzorkovač. Provádí periodické snímání hodnoty vstupní veličiny (např. $y(t)$). Její hodnotu měří v pravidelných intervalech ve formě vzorků. Na obrázku 4.2 je naznačen princip vzorkování.



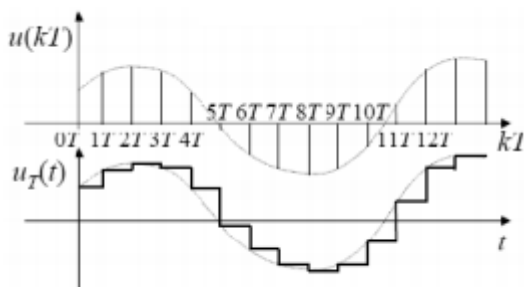
Obr. 25: Princip vzorkování [26]

Základní otázkou při vzorkování je délka periody T , tedy po jakou dobu může být regulovaná veličina bez sledování a regulovaná soustava bez akčního zásahu. Délka vzorkovací periody se proto odvíjí od druhu regulované soustavy. V případě kvadroptéry bude určitě potřeba kratší vzorkovací frekvence, než u regulování teploty v kotli. Pokud je to možné, tak je možnost určení vzorkovací frekvence pomocí mezní úhlové frekvence ω_m a Shannonovy podmínky vzorkování (5.2)

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_m} \quad (5.2)$$

5.3 D-A převodník

D-A převodník bývá velmi často nazývaný jako tvarovač. Působí-li diskretní signál jako vstupní veličina do spojité regulované soustavy, je zapotřebí ho upravit – tvarovat. Tvarování diskretního signálu je v podstatě jeho přeměna na spojitý signál. Výstupní veličina tvarovače je po celou délku periody T konstantní a je rovna amplitudě vstupního impulsu přivedeného na počátku této periody viz obrázek 26.



Obr. 26: Tvarování signálu [26]

5.4 Číslicové regulátory

Každý spojité regulátor má i svou číslicovou verzi. Pro spojité regulátory P, I, PD, PID se jejich číslicové verze označují P (proporcionální), S (sumační), PD (proporcionálně diferencní), PSD (proporcionálně sumačně diferencní).

Od číslicového regulátoru požadujeme stejnou funkci jako od regulátoru spojitého, a proto vycházíme z rovnice spojitého PID regulátoru (5.3), kde si vytkneme r_0 , abychom získali tvar s časovými konstantami (5.4).

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(t) dt + r_1 e'(t) \quad (5.3)$$

$$u(t) = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5.4)$$

s přenosem

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (5.5)$$

Číslicovou verzi PID regulátoru získáme, když integrál nahradíme sumací (5.6) a derivaci zpětnou diferencí (5.7).

$$\int_0^t e(t) dt \rightarrow T \sum_{i=0}^k e(iT) \quad (5.6)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \rightarrow \frac{\nabla e(kT)}{T} \quad (5.7)$$

Kde $\nabla e(kT)$ je zpětná diference definovaná vztahem (5.8)

$$\nabla e(kT) = e(kT) - e[(k-1)T] \quad (5.8)$$

Tomuto algoritmu číslicového regulátoru se říká polohový algoritmus. Hodnota integrálu se získává sumací a hodnota derivace pomocí diference. Proto se tyto regulátory nazývají proporcionálně-sumačně-diferencní, a označují se zkratkou PSD. Diferencní rovnice PSD pro diskretní čas (kT) je vyjádřena vztahem

$$u(kT) = r_0 \left[e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(iT) + \frac{T_D}{T} \nabla e(kT) \right] \quad (5.10)$$

(čerpáno z [25, 26])

5.5 Nastavení PSD pro regulaci výšky kvadroptéry

Rovnice (5.10) je používána v programu Sekundární řídicí jednotky pro výpočet regulace výšky kvadroptéry. Typ PSD regulátoru použitý na regulaci výšky kvadroptéry je polohový. Z důvodu co nejvyšší plynulosti pohybu, je nejdůležitější složka integrační (sumační), tato složka se mění v průběhu letu. Pokud kvadroptéra stojí na zemi, je časová složka T_i menší, za účelem rychlejšího nabrání otáček a vzletu. Po dosažení žádané hodnoty se časová složka T_i zvyšuje, čímž je zabráněno rozkmitání a je naopak dosaženo plynulejší regulace menších odchylek.

Stav nulové odchylky $e(kT)$ je nastaveny na 2 % pro zabránění rozkmitání.

6 VLASTNÍ KONSTRUKCE

Pro základní konstrukci kvadroptéry byla vybrána zavodní verze s rozpětím os motoru v nejširším místě 240 cm. Konečná hmotnost i s baterií dronu je 620 g.

Tento typ závodních kvadroptér se vyznačuje menší velikostí a váhou, což umožňuje rychlejší akceleraci a pohyblivost.

Většina součástí pro kvadroptéru byla objednána z Číny přes e-shop aliexpress.com z důvodu ceny.



Obr. 27: Základní kostra kvadroptéry [27]

6.1 Motor a vrtulky

Jako pohonná jednotka byl zvolen motor s označením 2204 s Kv hodnotou 2300 společně s vrtulkami 5045x3 HBN (3 lopatky). Podle oficiální dokumentace v [28] je uvedeno, že motor od Wdiy s vrtulkami 5030 vyvine tah zhruba 130 g při 50 % záběru, což odpovídá celkovému tahu 520 g, avšak zvolené vrtulky mají 3 lopatky a větší stoupání, a proto vyvíjejí tah zhruba 187 g (K použitým vrtulkám bohužel nebyla nalezena tabulková hodnota). K tomuto výsledku bylo dopočítáno pomocí testování, kvadroptéra měla tendenci vzlétnout už při hodnotě throttle kanálu 1400, tzn. při 40 %.

Podle počtů tabulkových hodnot bylo zjištěno, 100 % záběr podle příkazu z vysílačky, je okolo 130 % 50tiprocentního záběru v gramech, což znamená, že motory mohou vyvinout tah až 486 g, což znamená, že tah motorů na plný plyn 3x převyšuje samotnou hmotnost kvadroptéry. [29]

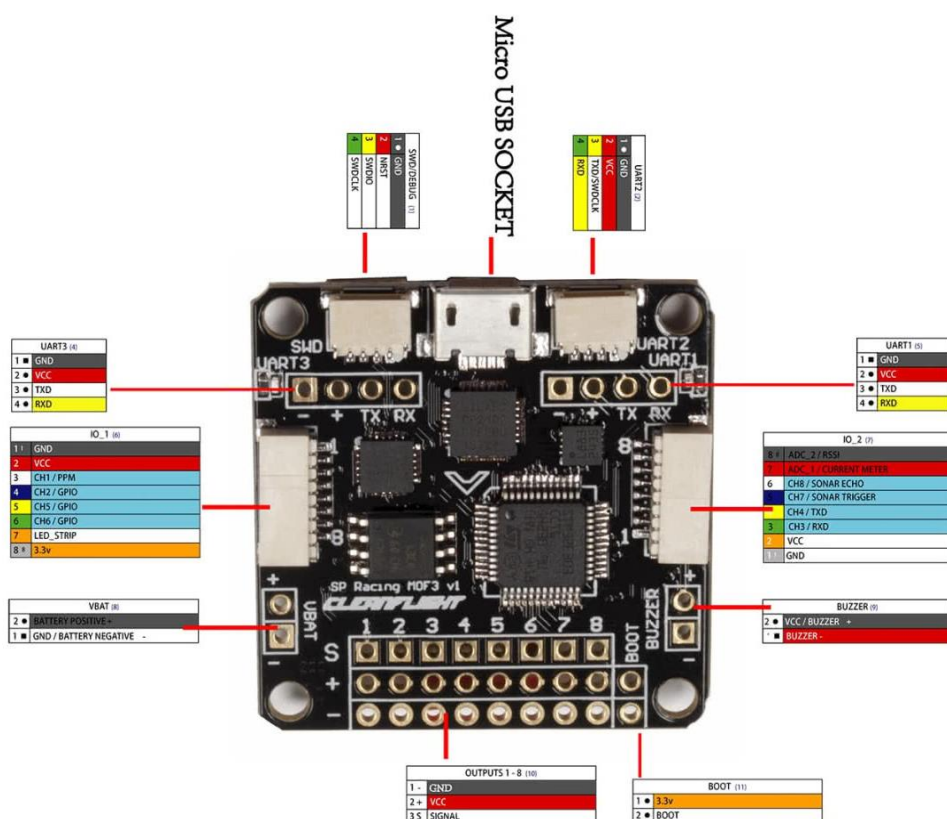


Obr. 28: Motor s označením 2204 [28]

6.2 Řídicí jednotka

Jako řídicí jednotku modelu byl zvolen SP Racing F3 Acro. Jednotka obsahuje gyroskop a akcelerometr, což pro základní manévrování a seznámení se s problematikou konfigurací řídicích jednotek stačí. Jednotka se řadí mezi závodní řídicí jednotky. Dá se pořídit i dražší jednotka SP Racing F3 Deluxe, která obsahuje i barometr a kompas.

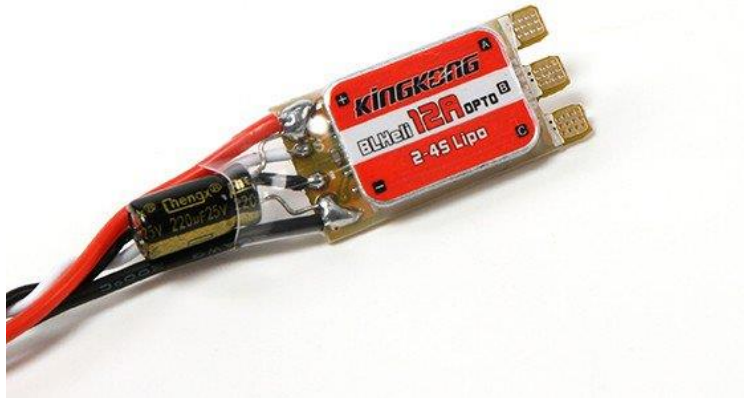
Jednotka přijímá PWM i PPM signál, má 8 servo výstupů, je možné na ni připojit kameru i GPS. Je to levná, ale moderní řídicí jednotka.



Obr. 29: Řídicí jednotka SP Racing F3 [30]

6.3 ESC

Neboli elektronický kontrolér otáček byl vybrán KingKong 12 A pro 2-4 sériovou LiPo baterii. ESC je typu OPTO, což znamená že napájení baterie-motor je oddělené od servo signálu přijímaného z řídicí jednotky kvadroptéry. Do ESC vstupují jeden napájecí kabel a zem které se připojují přímo na baterii a dále jedna dvojice servo kabelů (signál a zem), které vstupují do řídicí jednotky.



Obr. 30: ESC KINGKONG 12A [31]

6.4 Sekundární řídicí jednotka

Sekundární řídicí jednotka je jednotka, která se stará o regulaci výšky, vzdálenosti a celkové autonomní chování. Princip její funkce je přijímat signál z rádiového přijímače a tento signál posílat upravený dál do řídicí jednotky kvadroptéry. Tento signál je upravován podle vzdálenosti získané z ultrazvukových senzorů a přímých pokynů ze serveru, na který je možné se napojit přes webové rozhraní pomocí wifi a mobilu.

Jako sekundární řídicí jednotka byl použit LPC1768, který je dostatečně malý, obsahuje vysoce výkonný ARM procesor, který má kmitočet 96Mhz, 32KB RAM a 512KB flash, ale hlavní důvod, proč byla vybrána tato deska je ten, že podporuje programování pomocí mbed, který celý programování desky urychluje.

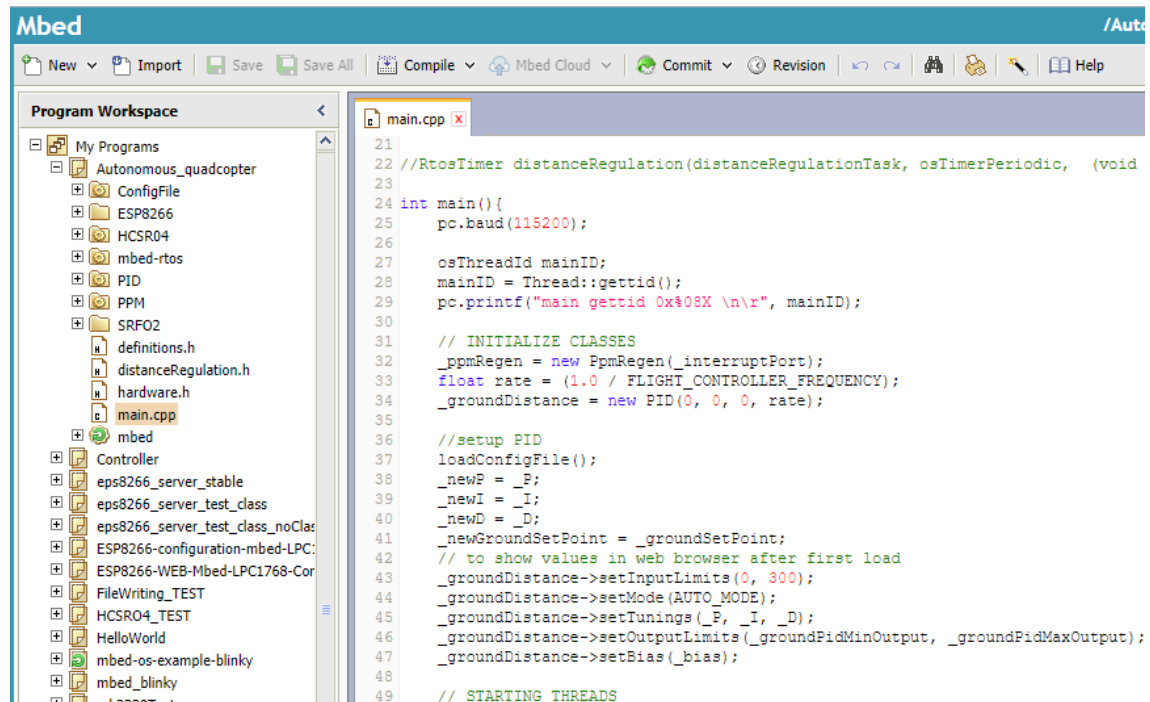


Obr. 31: Sekundární řídicí jednotka LPC1768 [32]

6.4.1 Mbed

Mbed je cloudová služba umožňující snadnější programování Arm procesorů pomocí cloudového rozhraní, které usnadňuje vývoj aplikací a využívání funkcí jednotlivých Arm procesorů. Tato služba je převážně koncipována pro IoT a sdílení jednotlivých programů a knihoven mezi jednotlivými uživateli této služby. [33]

Mbed poskytuje přímo cloudové vývojové prostředí přes které můžeme programovat, kompilovat a stahovat výsledný soubor, který nahrajeme na desku. Na stránkách mbed.com je i spousta příkladů a návodů na programování a používání různých druhů modulů pro jednotlivé desky.

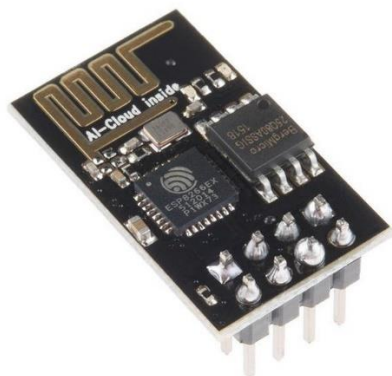


Obr. 32: Vývojové prostředí mbed

6.5 ESP8266

ESP8266 je wifi modul podporující TCP/IP a obsahující vlastní mikrokontroler. Tento mikrokontroler se konfiguruje pomocí AT příkazu.

V našem modelu kvadrotéry tento modul používám pro komunikaci s LPC1768 na kterém běží server pomocí kterého je možné spustit regulaci vzdálenosti, nastavovat PID parametry a vzdálenost kvadrotéry od země, kterou je možné měnit i za letu.



Obr. 33: WiFi modul ESP8266 [34]

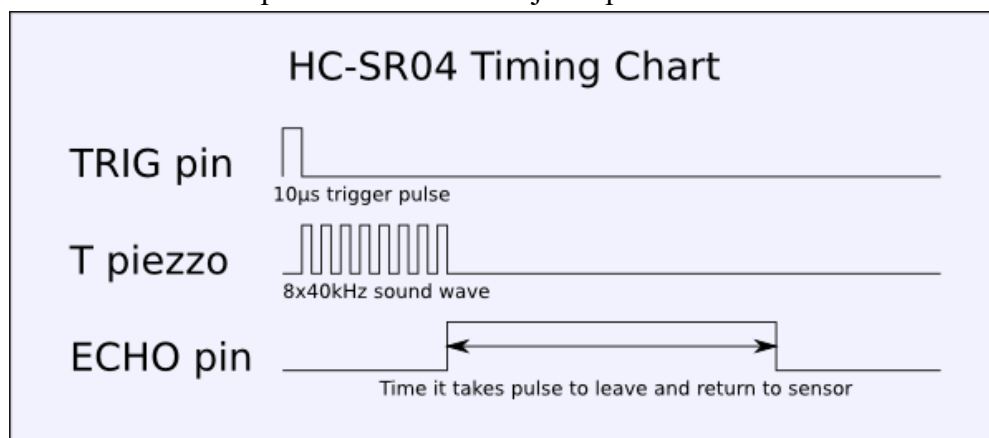
6.6 HCSR04

HCSR04 je ultrazvukový senzor na měření vzdálenosti a jeho pracovní rozsah je 2-450 cm s přesností až na 3 mm.



Obr. 34: Ultrazvukový senzor HCSR 04 [35]

Princip funkce je vysílání zvukových vln a měření času do jejich návratu na detektoru čímž si můžeme snadno dopočítat vzdálenost objektu před senzorem.



Obr. 35: Princip funkce HCSR 04 [36]

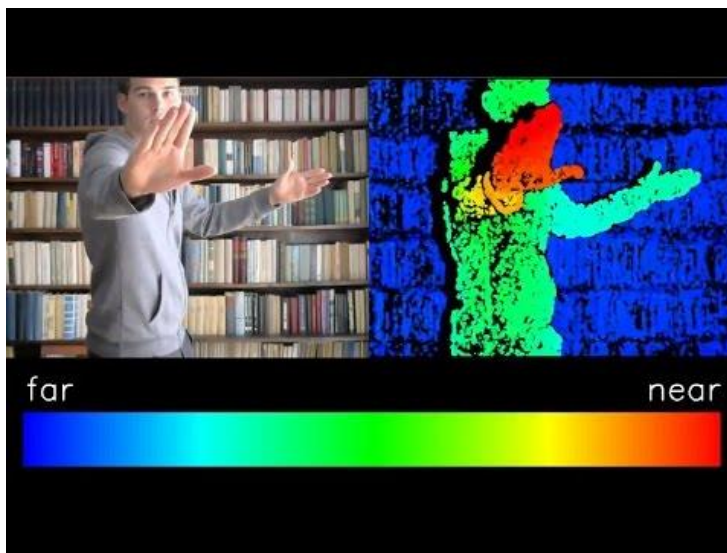
Jeho výhodou je, že je velmi levný, ale hlavní nevýhodou je, že senzor musí mířit přímo kolmo na tvrdý povrch nebo s maximálním náklonem 15°.

7 DALŠÍ SENZORY PRO DETEKOVÁNÍ PŘEKÁŽEK

Kromě ultrazvukových senzorů jsou i jiné a mnohem efektivnější metody k detekování překážek. Následující způsoby detekce překážek používají i neznámější výrobci autonomních kvadroptér. [37]

7.1 Stereo kamera

Stereo kamera funguje v podstatě na principu vidění lidského oka. Pomocí dvou kamer a triangulace si kamera sestaví hloubkový obraz. [38]



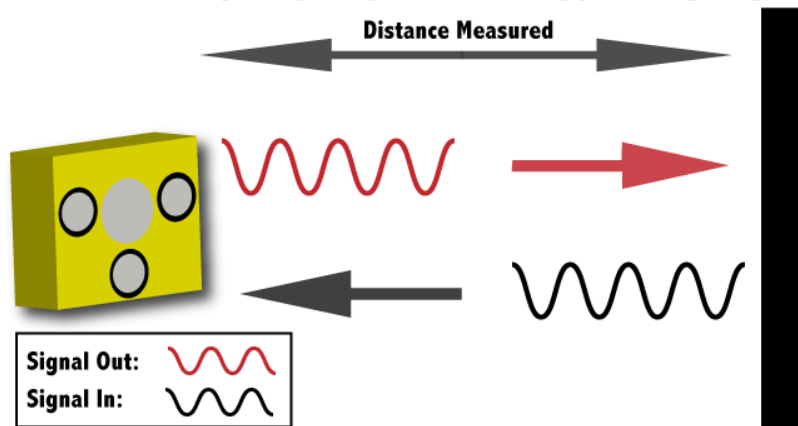
Obr. 36: Vyhodnocení vzdálenosti pomocí stereo kamery [39]

7.2 Time-of-Flight (ToF) kamera

Time-of-Flight kamera se skládá z čočky, integrovaného světelného zdroje a senzoru. Tato kamera je schopná zaznamenávat hloubku a intenzitu každého pixelu ve stejném čase, což způsobuje, že kamera zpracovává obraz velmi rychle.

Princip funkce ToF je osvětlení prostoru a pak snímání odraženého světla, protože rychlost světla je známá, proto získáme vzdálenost každého pixelu dopočítáním času od vypuštění světla a jeho detekci. Protože ToF kamera dovede sestavit jeden hloubkový obraz za jedno osvětlení, je považována, za jednu z nejrychlejších metod sestavování 3D obrazu. [37]

Time-of-Flight (ToF) Technology Using Light



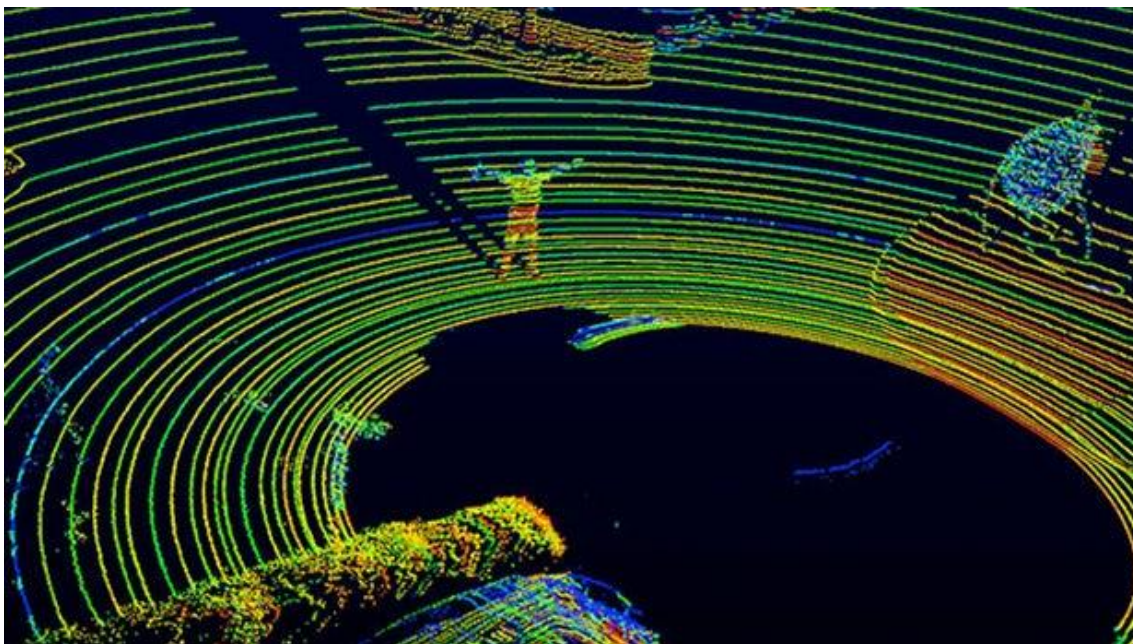
Obr. 37: Time of Flight princip funkce [40]

7.3 Lidar

Lidar neboli Light Detection and Ranging, senzory fungují na velmi podobném principu jako ultrazvukové senzory, akorát na místo zvukového signálu, lidar technologie vypouští laserový puls s rychlostí světla. [37]

Některé Lidar senzory jsou bodové, ale jsou i Lidar senzory rotační, které dovedou sestavit 3D obraz okolí. Takovéto druhy senzorů se používají, kromě u kvadroptér, i u autonomních vozidel. Autonomní GoogleMobil používá právě jeden z druhů těchto Lidar technologií. [37]

Rozdíl mezi ToF a Lidar senzorem je, že ToF skenuje celou oblast na 1 pulz, ale Lidar senzor skenuje pouze jeden bod, proto je možné se pro ToF setkat s názvem Flash Lidar. Nejmodernější Lidar senzory dovedou změřit vzdálenost až pro milion bodů za sekundu. [41]

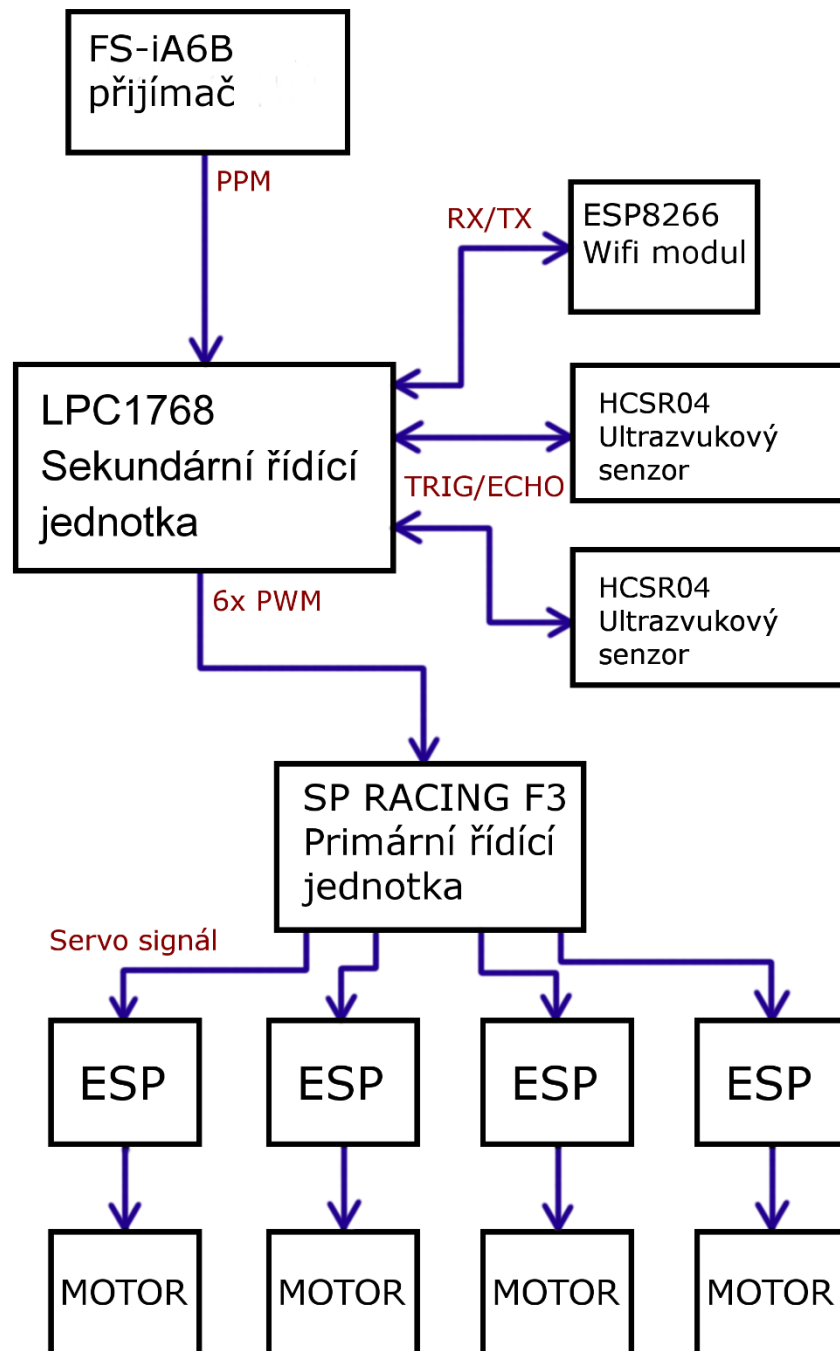


Obr. 38: Snímání okolí pomocí Lidar senzoru [37]

7.4 Monokulární kamera

Monokulární kamera neboli kamera s jednou čočkou, je schopná vytvořit 3D obraz za pomoci pouze jednoho snímku. Algoritmus, který vytváří tento 3D obraz funguje na principu porovnávání velikostí jednotlivých objektu pomocí kterých si zjišťuje skutečnou vzdálenost od těchto objektů. Objekt, který je blíž je větší než objekt, který je v dálce a objekt, který je blíž se pohybuje rychleji než objekt, který je v dálce. Většina dronu je vybavená monokulární kamerou, ale většinou ji nepoužívají pro detekci vyhýbání se překážkám, ale spíš pro rozpoznávání objektu i za použití strojového učení. [37]

8 FUNKČNÍ MODEL



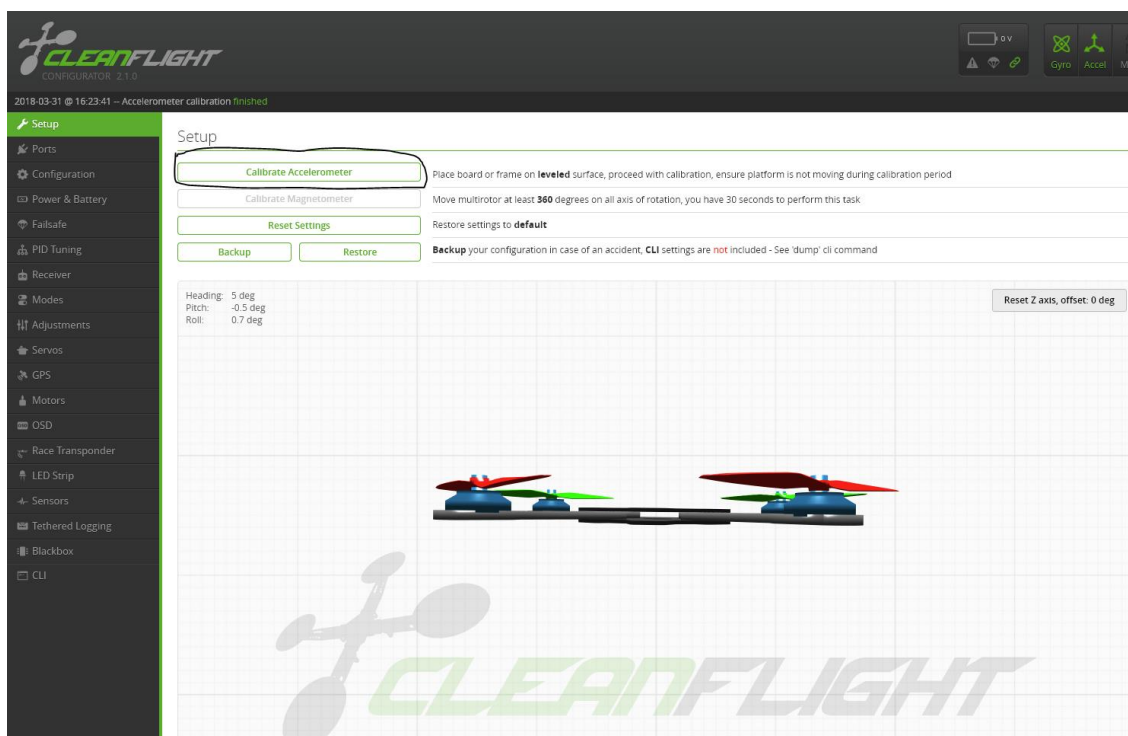
Obr. 39: Schéma zapojení modelu

Po sestavení kvadroptéry je nutné správně nakonfigurovat některé parametry, aby byl let co nejplynulejší bez velkého kmitání. Avšak takto malý model se závodní řídicí jednotkou na naprosto plynulý chod nastavit nejde. Tento model je spíše vhodný na závodní létání. U těchto dronů je nutná rychlá akcelerace a schopnost rychle měnit směr než pomalé plynulé létání.

Následně bude ukázána základní konfigurace sestaveného dronu pomocí programu Cleanflight.

8.1 Kalibrace akcelerometru

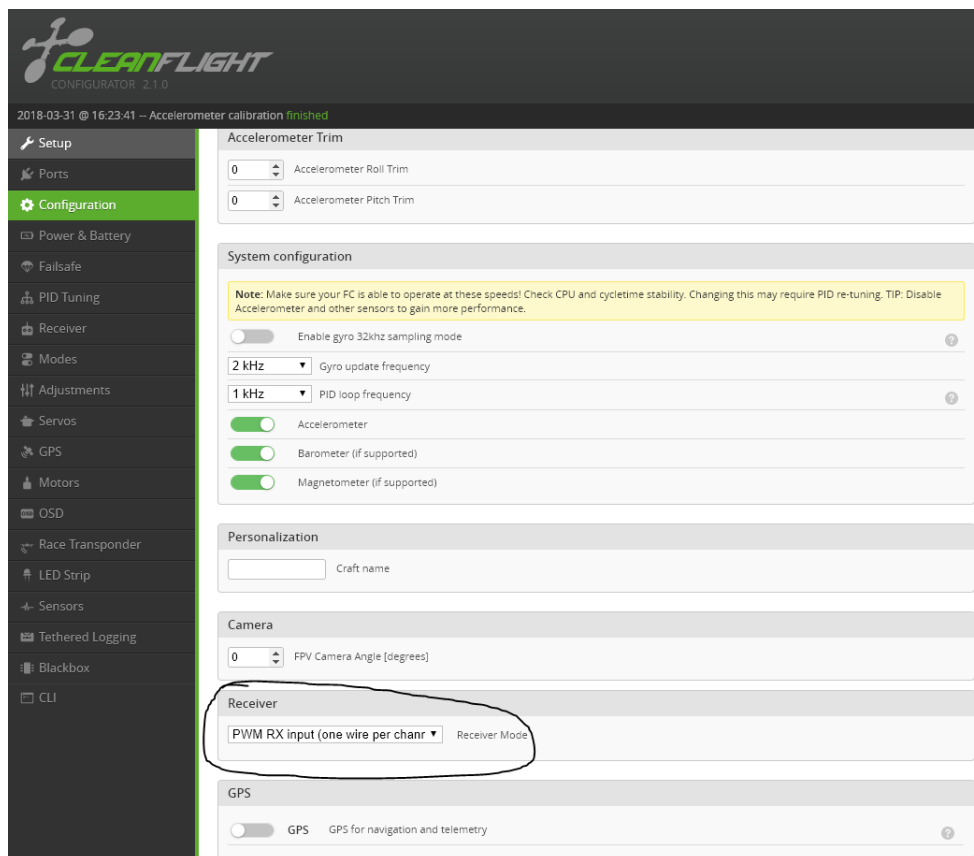
Primární řídicí jednotku propojíme s PC přes USB a spustíme Cleanflight. Postavením drona na rovnou, vodorovnou plochu a stisknutím tlačítka Calibrate Akcelerometr zkalibrujeme akcelerometr do správné polohy. V levém horním rohu na obrazovce můžeme vidět i aktuální hodnoty naklonění modelu. Tyto hodnoty naklonění nejsou příliš přesné, protože nastavujeme jednotku SP Racing F3 kde přesnost měření náklonu jde na úkor velikosti náklonu.



Obr. 40: Kalibrace akcelerometru

8.2 Nastavení signálu vstupující do hlavní řídicí jednotky

Kvadroptéra může zpracovávat PWM, PPM, ale i SPEKSAT, SBUS, SUMD a MSP. V našem případě máme nastavení na PWM, protože naše sekundární řídicí jednotka posílá signál PWM přes 6 kanálů.



Obr. 41: Nastavení přijímaného signálu

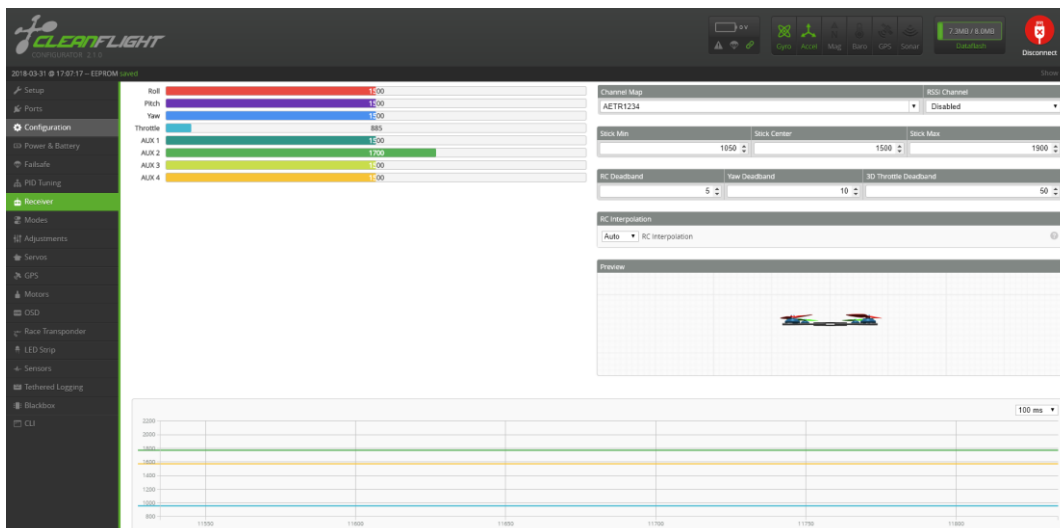
8.3 Nastavení PID

Výchozí hodnoty regulátoru se obvykle dají rovnou použít, což platilo i v mém případě. PID měněno nebylo, ale je možné že by bylo dosažené lepší manévrovatelnosti s kvadroptérou s jinými PID hodnotami.

Co bylo „vylepšováno“ jsou hodnoty Strength a Transition pro mód Angle a Horizon. Tyto módy jsou převážně vhodné pro začátečníky, protože po uvolnění páčky na vysílače se kvadroptéra sama snaží vrátit do stabilizované polohy a Angle mód vám nedovolí přetočit model, protože povoluje jenom určitý maximální úhle naklonění. Strength a Transition ovlivňují rychlost a plynulost návratu do stabilizované polohy.

8.4 Nastavení přijímače

Při nastavování přijímače vidíme aktuální hodnoty jednotlivých kanálů které řídící jednotka zpracovává. Je zde možné nastavit i krajní hodnoty kanálu, což jsou hodnoty se kterými jednotka začíná pracovat a také mrtvé zóny, které určují vzorkování příchozích hodnot.

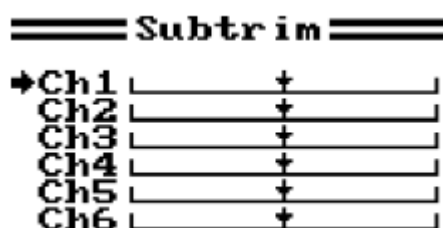


Obr. 42: Kalibrace přijímaného signálu

Toto je nutná konfigurace, protože se může stát, že například ROLL kanál nebude v klidu na hodnotě 1500, ale jednotka ho bude číst jako hodnotu 1510, což způsobí, že nám kvadropťera vždy poletí dopředu.

Dále je nutné vzít v potaz, že signál vysílaný z rádiové vysílačky jde do rádiového přijímače, dále do sekundární řídicí jednotky a teprve potom do hlavní řídicí jednotky, proto je nutné tento signál odladit a nastavit, aby ROLL, PITCH a YAW byli na hodnotě 1500 a THROTTLE mírně nad 1000.

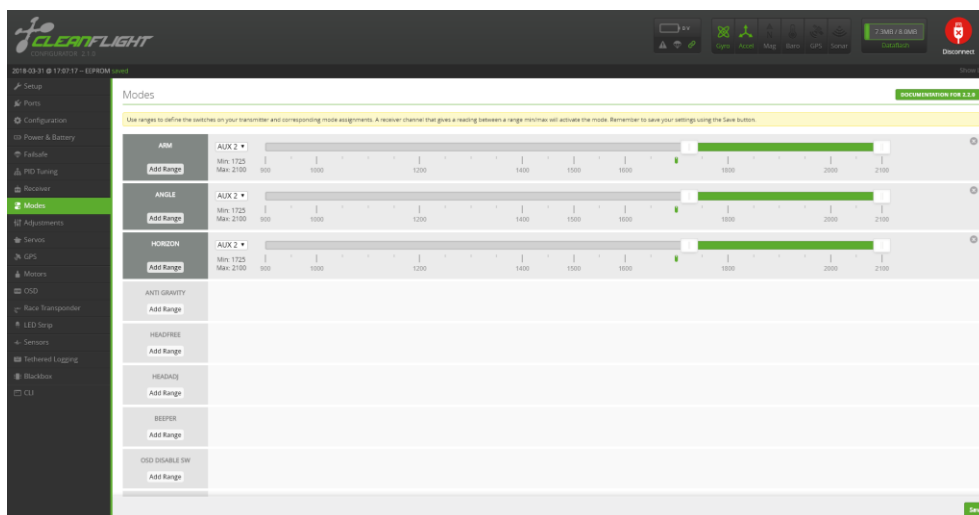
Jeden ze způsobů odladění odchylky je pomocí funkce Subtrim na vysílače, pomocí které můžeme pozměnit vysílaný signál a tím vyrovnat odchylku na řídicí jednotce.



Obr. 43: Kalibrace kanálů na vysílače

8.5 Nastavení modu

Pomocí AUX kanálů můžeme měnit chování kvadropťery. V případě mého modelu je použit kanál AUX2 pro spuštění motorů a nastavení módu Angle a Horizon.



Obr. 44: Nastavení módů

Ale pomocí dalších módů je možné například spustit Blackbox, což je ukládání hodnot akcelerometru a gyroskopu, generovaného signálu do jednotlivých motorů do log souboru na flash řídicí jednotky, což nám může pomoci odhalit různé problémy jako třeba špatné odizolování řídicí jednotky vedoucí k rezonanci a tím způsobující kmitání kvadroptéry zapříčiněný šumem v akcelerometru a gyroskopu. Další užitečný mód je Beeper, který po aktivaci rozezná pípátka, což se hodí v případě, že model ztratíme z dohledu.

8.6 Sekundární řídicí jednotka

Sekundární řídicí jednotka přijímá signál z rádiového přijímače, tento případně upravuje a posílá do hlavní řídicí jednotky. Signál je upravován v závislosti na spuštěných funkcích přes wifi modul. Těmito funkcemi je regulace výšky a autonomní pohyb. Bude detailně rozebráno v 9. kapitole.

8.7 Zhodnocení funkčnosti modelu

Pokud hodnotíme samotnou kvalitu ovládání a plynulost letu, tak tyto vlastnosti se primárně odvíjí od součástek základní sestavy, tzn. bez použití sekundární řídicí jednotky a modulu k ní připojených. Při použití kvalitnější řídicí jednotky s více senzory, jako např. magnetometrem, by bylo dosaženo lepších letových vlastností modelu. Sekundární řídicí jednotka pouze posílá signál do primární řídicí jednotky a jak s tímto signálem bude naloženo už neřeší. Hlavními výhodami tohoto přístupu je, že nepřicházíme o již hotové funkce, které hlavní jednotka nabízí, že můžeme jednotku kdykoli odpojit za účelem rekreačního létání anebo naopak jakékoli jiné jednotce připojit. Nevýhodou je vyšší hmotnost modelu, což způsobuje kratší dobu letu.

Létání se závodním dronem není bezpečné pro samotného nezkušeného letce ani pro jeho okolí, proto je doporučeno létat co nejdál od lidí a obydlených oblastí. I podle zákonné vyhlášky není povoleno létat poblíž jiných osob do 50 m. Kvadroptéra by měl být ideálně vybavena funkcí RTH (Return To Home) v případě ztráty spojení nebo docházející baterie. [42]

Kvadroptéra je opravdu velmi agresivní a citlivá na jakýkoli pohyb. Byla snaha o tuning PID takový, aby se kvadroptéra chovala plynuleji a méně citlivě, ale nebylo dosaženo žádného velkého pokroku, s komponenty, které má, není vhodná na plynulé létání. Vhodnější by bylo změna vrtulek na 2lopatkové se stoupáním 3" vedené do špičky, jiná řídicí jednotka a motory s menší Kv hodnotou, slabším kroučícím momentem a vyšší efektivitou. Vhodnější by byl také rám s větším rozstupem usazení motorů s kryty po stranách motoru. Nicméně na základní otestování autonomního chování bude tento model dostačující.

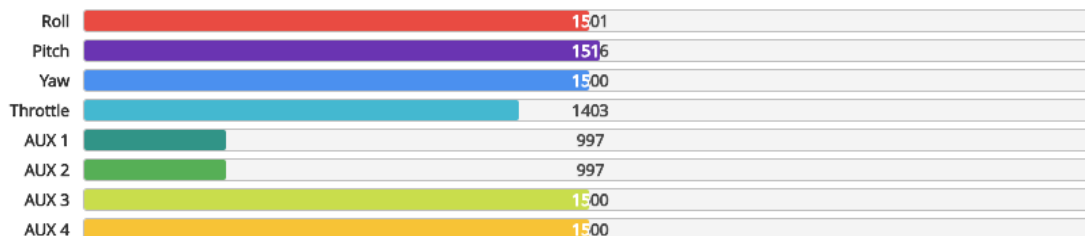


Obr. 45: Hotová kvadroptéra

8.8 Možné autonomní pohyby

Kvadroptéra dovede vzlétnout a držet výšku, letět vpřed a při detekování překážky couvat, dokud nenarazí na překážku za sebou, poté opět letět vpřed a tímto způsobem létat tam a zpátky. S připevněnou kamerou a určitými úpravami se dá takovýto autonomní pohyb použít např. na hlídání parkoviště, ale jedná se spíše o prototypní model. Pokud bychom chtěli nějaké praktické použití, bylo by potřeba pořídit primární řídicí jednotku alespoň i s magnetometrem pro lepší držení směru letu, místo ultrazvukových senzorů HCSR-04 asi za cenu 100 Kč, použít laserové senzory LidarLite za zhruba 3000 Kč, kterým nezáleží na úhlu sklonu detekované překážky a měří rychleji a větší vzdálenosti.

Na obrázku 46 můžeme vidět jaké PWM signály posílá sekundární řídicí jednotka do primární řídicí jednotky v případě, že zadní senzor zaznamená vzdálenost menší než 40 cm. Vidíme, že Pitch hodnota je o 15 bodů vyš od středu, což způsobí, že kvadroptéra poletí směrem vpřed. Po zaznamenání překážky před kvadroptérou, se Pitch hodnota změní na 1485 a model poletí pozpátku.



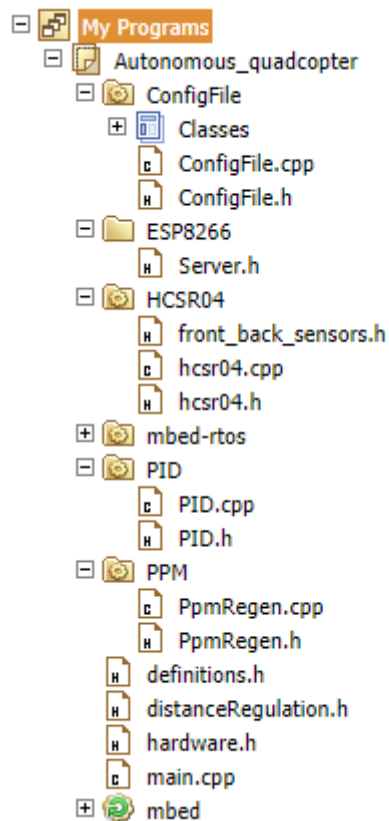
Obr. 46: Detekce překážky za modelem

Kvadroptéra dovede i na pokyn přes vysílačku pomalu snižovat regulovanou výšku a po snížení výšky na méně jak 6 cm, tak vypnout motory. Během vykonávání autonomního pohybu je možné model nadále ovládat přes vysílačku.

9 PROGRAM SEKUNDÁRNÍ ŘÍDÍČÍ JEDNOTKY

Namísto komunikace přijímače přímo s hlavní řídicí jednotkou, jde tento PPM signál do sekundární řídicí jednotky, která tento signál zpracuje na jednotlivé kanály. V této sekundární řídicí jednotce probíhá veškerá regulace autonomního chování kvadroptéry. Podle zadaného autonomního chování přeposílá upravené servo signály do hlavní řídicí jednotky ve formě PPM signálů, tzn. přes 6 konektorů.

Hlavní řídicí jednotka neví, že signál, který dostává je někde upravovaný, její úkol je regulace samotného letu.

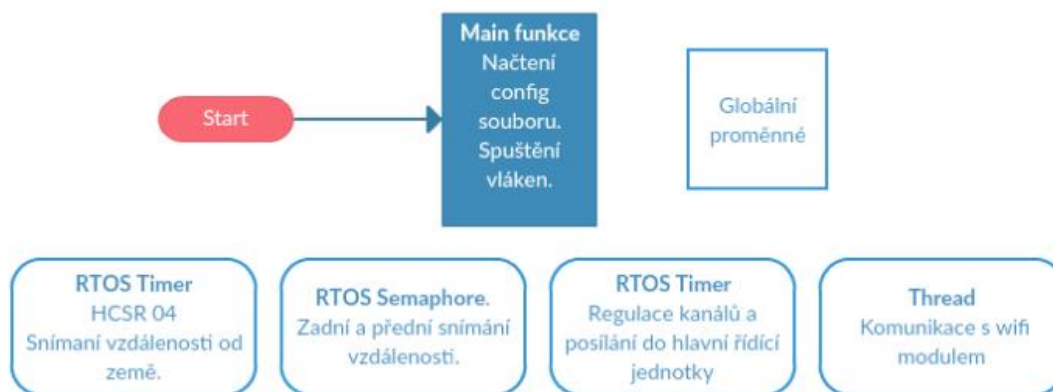


Obr. 47: Seznam souborů

9.1 Běh programu

Program, který běží na sekundární řídicí jednotce, se skládá z několika vláken za použití RTOSu od mbed.org, který je součástí samotné cloudové služby.

Některá funkce běží v samostatném vlákně, která běží minimálně tak dlouho, dokud nedoběhnou všechny příkazy, jsou tzv. nezávislé. Jiné funkce mají jenom omezený čas, který mohou běžet, protože na nich závisí samotný průběh regulace.



Obr. 48: Běh programu Sekundární řídicí jednotky

9.1.1 Nezávislá vlákna

Jako nezávislá vlákna jsou značena ty vlákna, která nijak pevně nesouvisí s frekvencí výpočtu regulace PID regulátoru (vzorkováním).

Nezávislá vlákna jsou tato:

- Server, který komunikuje s uživatelem přes mobilní aplikaci
- ultrazvukové senzory (kromě senzoru měřící výšku kvadroptéry), které neregulují vzdálenost od překážky před a z kvadroptérou, ale pouze detekuje.

Po dokončení funkce, která běží v nezávislém vláknu, obvykle následuje z důvodu šetření výpočetního výkonu sekundární jednotky, obvykle 100 ms.

9.1.2 Závislá vlákna

Závislá vlákna přímo souvisí s regulací kvadroptéry a samotným vzorkováním PID regulátoru neboli také chováním PSD regulátoru. Rychlost tohoto vzorkování se odvíjí od nastavené globální frekvence, stejně jako všechna ostatní závislá vlákna. Tyto vlákna běží za pomoci RTOS Timeru s frekvencí 100 Hz.

Závislá vlákna jsou:

- Regulace kanálů – funkce, ve které běží regulace jednotlivých kanálů a jejich posílání do hlavní řídicí jednotky. Tato funkce má if a else větev. Která z těchto větví poběží, závisí na spuštění regulace přes mobilní zařízení.
- Spodní ultrazvukový senzor – tento senzor snímá vzdálenost od země a také musí vracet naměřenou vzdálenost v pravidelných časových úsecích.

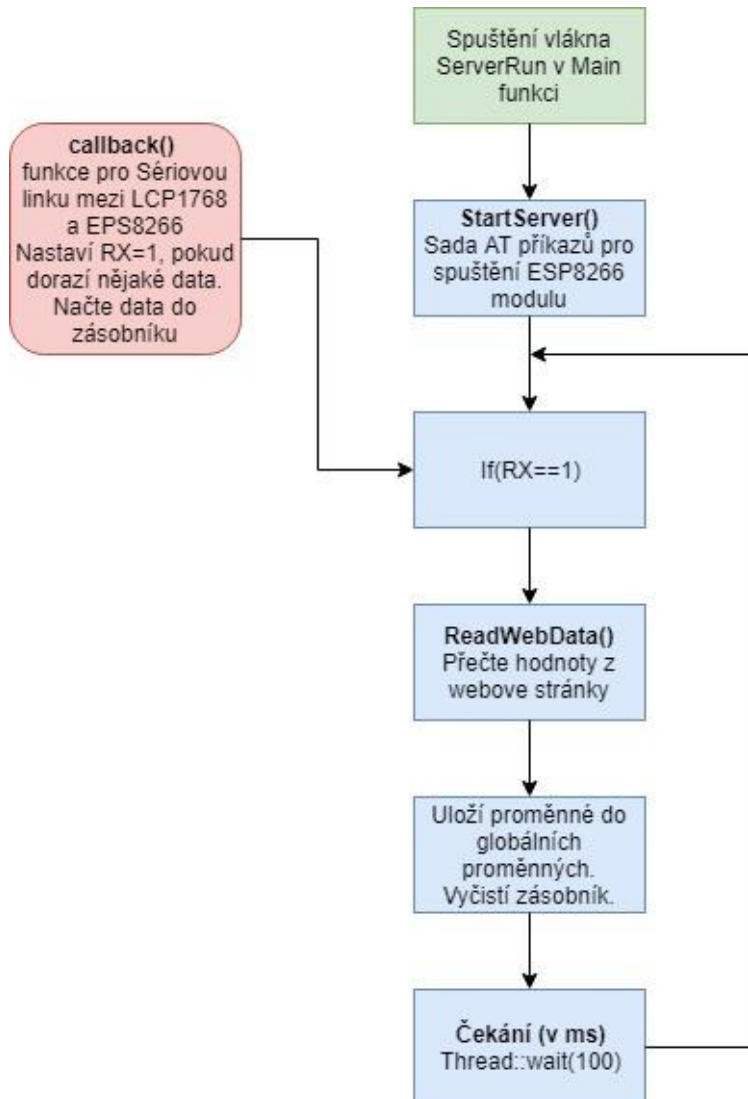
9.1.3 Konfigurační soubor

Všechny uživatelem zadávané hodnoty jako hodnoty PID regulátoru, bias, omezení výstupu z PID regulátoru, posledně nastavená výška regulace se ukládají do konfiguračního souboru, který se jmenuje config.txt. Tento soubor je umístěn přímo na ve flash paměti sekundární řídicí jednotky. Po každém resetování řídicí jednotky a po

každém uložení nových hodnot se tento konfigurační soubor nahrává do paměti program, případně aktualizuje.

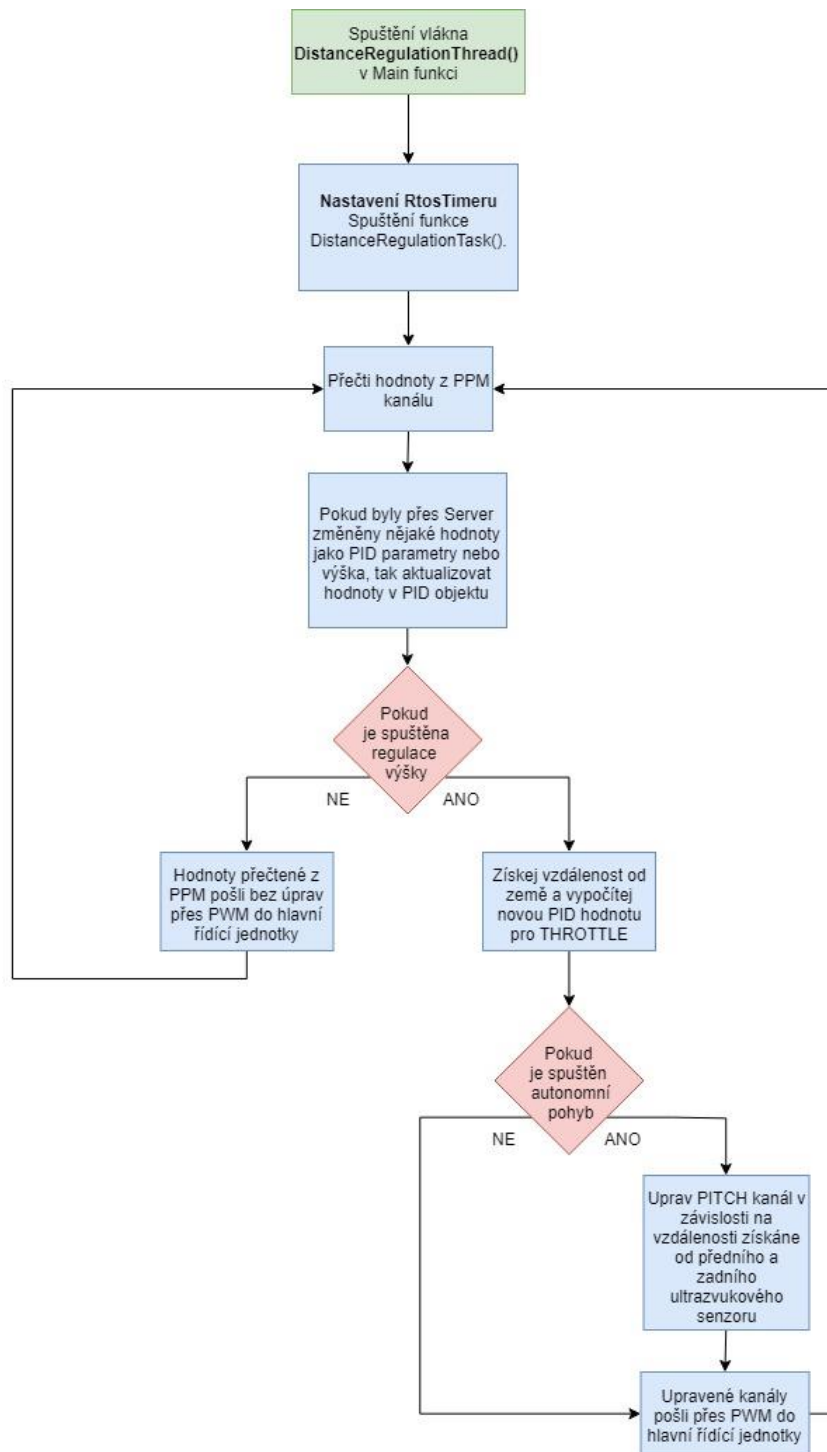
9.1.4 Server

Na sekundární řídicí jednotce běží http server v samostatném vláknu. Toto vlákno komunikuje s modulem ESP8266 a je možné se připojit pomocí téměř jakéhokoli zařízení, které podporuje WiFi komunikaci. U některých specifických zařízení, jako třeba zařízení od Apple, byly zjištěny potíže s připojením. Je to dáno pravděpodobně vyššími bezpečnostními požadavky těchto zařízení. Wifi momentálně neumožňuje HTTPS.



Obr. 49: Běh vlákna pro server

9.2 Regulace kanálů



Obr. 50: Regulace kanálů

9.3 Měření vzdálenosti před a za kvadroptérou

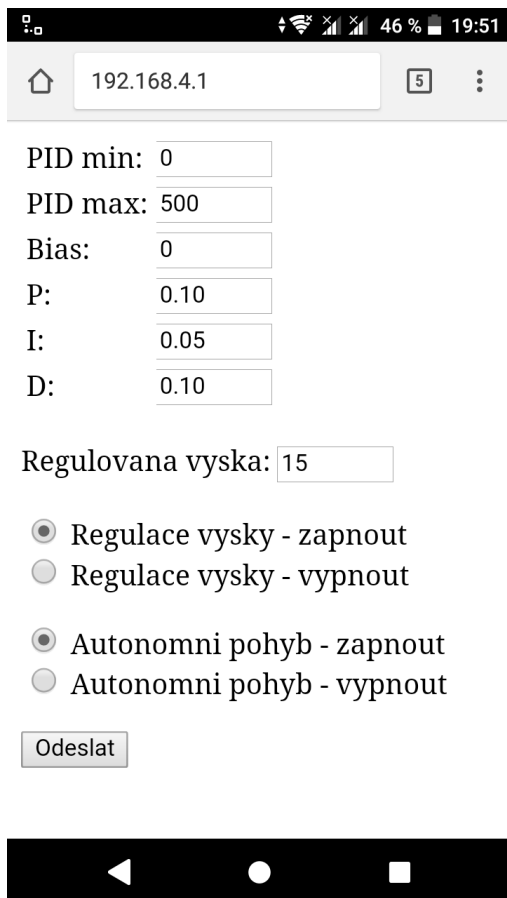
Kvadroptéra je vybavena ultrazvukovými senzory na přední a zadní straně kvadroptéry, které měří všechny kolmé překážky nebo s maximálním úhlem 15° . Překážka musí být také dostatečně tvrdá, aby ultrazvukové senzory fungovaly správně (zvukový signál se musí od povrchu odrazit).

Jakmile vzdálenost kvadroptéry klesne pod námi stanovenou hodnotu, tak kvadroptéra změni směr a to o 180 stupňů.

Vzdálenost je měřena pomocí 2 funkcí (pro každý senzor zvlášť), které běží přes RTOS Semafor, který umožňuje šetřit výpočetní výkon pro ostatní vlákna. Pomocí Semaforu se tyto 2 funkce střídají, tzn. že v jednu chvíli je měřena pouze jedna vzdálenost, a to buď před nebo za kvadroptérou.

9.4 Způsob ovládání autonomního chování kvadroptéry

Kvadroptéru postavíme na zem, spustíme motory, přes wifi se připojíme na server běžící na sekundární řídicí jednotce, který standardně běží na adrese 192.168.4.1.



Obr. 51: Komunikace přes wifi

V centimetrech zadáme výšku, v jaké by se kvadroptéra měla držet, zaškrtneme tlačítko pro spuštění regulace a stiskneme „Odeslat“, tím se přes metodu POST odešlou hodnoty na vlákno, který ve kterém běží server. Toto vlákno přečte doručené hodnoty a uloží do globálních proměnných. Vlákno, ve kterém běží regulace výšky pravidelně kontroluje, pokud není spuštěná regulace výšky, pokud je, tak žádanou hodnotu výšky v centimetrech posílá do metody PID pro výpočet nové hodnoty THROTTLE a tu posílá do hlavní řídicí jednotky přes PWM kanál. Tyto výpočty probíhají s frekvencí 100 Hz, neboli 1x za 10 ms. Pokud je zapnutá možnost autonomního pohybu, tak kvadroptéra bude vykonávat i autonomní pohyb.

Vlákno pro regulaci výšky běží vždy, rozdíl je v tom, pokud přes webové rozhraní spustíme samotnou regulaci nebo ne. Pokud regulace spuštěná není, THROTTLE signál přijímaný z rádiového přijímače není nějak měněn a je přímo posílán do hlavní řídicí jednotky kvadroptéry, jak je vidět na obrázku 41.

9.5 Zhodnocení funkčnosti programu

Program je funkční a s určitým zacházením nenastávají velké problémy, ale určitě by bylo co vylepšovat. Hlavní problém je měření vzdálenost od země pomocí ultrazvukového senzoru přes RTOS Timer. V ideálním případě zvládne senzor každý cyklus svého vlákna změřit vzdálenost od země a ukončit se. Problém nastává, pokud senzor nezaznamená vyslaný trigger signál a čeká, než ho získá zpět. V takovém případě je nutné cyklus násilím ukončit, což ruší princip vzorkování PSD regulátoru a tím destabilizuje regulaci výšky.

Program je poměrně snadno rozšířitelný, pokud by měla nastat změna nějakého senzoru, případně všech. Víceméně stačí zapojit senzor, vytvořit nové vlákno, změřené hodnoty ukládat do globální proměnné a upravit funkčnost, pokud bude potřeba.

Díky tomu, že program běží na samostatné sekundární řídicí jednotce není problém ji zapojit na úplně jinou kvadroptéru, stačí vést konektor z rádiového přijímače přes popisovanou jednotku.

Program není psaný v Arduinu, ale v c++, což dává větší prostor pro reálné nasazení jednotky do provozu.

10 ZÁVĚR

Cílem práce bylo popsat dostupné prvky pro stavbu kvadroptéry, kvadroptéru sestavit, otestovat funkčnost, popsat možné autonomní algoritmy a vybraný algoritmus zrealizovat. Těchto cílů bylo dosaženo. Funkční model kvadroptéry je schopen autonomně vzlétnout, držet zadanou výšku a vykonat autonomní pohyb tam a zpět podle detekování překážek před a za kvadroptérou.

Jako senzory překážek byly použity ultrazvukové senzory, které ověřují základní vlastnosti autonomního letu. Za použití kvalitnějších senzorů, např. Lidar, by se zlepšila detekce okolních překážek. Případně za použití kvalitnější primární řídicí jednotky by kvadroptéra vykazovala i lepší letové vlastnosti. Nicméně model je funkční a místo pro přidání dalších senzorů je možné.

Byly rozebrány momentálně nejvíce používané motory a řídicí jednotky, byly rozebrány jejich výhody a nevýhody, ale vývoj kvadroptér a jejich prvků jde rychle kupředu. Jedna kapitola byla věnována i ostatním prvkům, které jsou pro stavbu kvadroptéry nezbytné, a to právě ESC, typu vrtulí, typu baterií, PDB deskám a rádiovému přijímači.

Po vybrání vhodných prvků pro stavbu kvadroptéry, s ohledem na finanční prostředky konstruktéra, byl model sestaven a rozebrán způsob prvotní konfigurace primární řídicí jednotky.

Část práce byla i věnována dalším možným prvkům pro detekci překážek, a to různým kamerám a pokročilejším senzorům. Tyto pokročilejší senzory by byly nutností, pokud by kvadroptéra měla být opravdu nasazena do terénu. Konstruovaný model je spíše demonstrací, že postup v této práci je možný i s rozpočtem do 6000 Kč (i s pájkou, nabíječkou baterií, náhradními díly asi 10000 Kč), ale pro nasazení do praxe by model vyžadoval více peněz, lidí a času.

V 9. kapitole byl rozebrán program Sekundární řídicí jednotky. Program byl vyvíjen v prostředí mbed, které umožňovalo rychlejší programování i z důvodu dostupných knihoven a snadnějšímu využívání jednotlivých funkcí desky LPC1768. Nevýhodou tohoto prostředí je chybějící debugger a další prvky vyspělých vývojových prostředí jako třeba našeptávání. Debugovat je možné pouze pomocí výpisu hodnot přes sériovou linku. Vhodnější by bylo použít nějaké IDE od výrobce, které umožňuje využívat výhod moderních vývojových prostředí, ale mbed byl vybrán z důvodu rychlosti a jednoduchosti. Mbed umožňuje exportování programu do určitých IDE, tento způsob vývoje byl dříve testován, ale bez uspokojivého výsledku. Export programu od mbed je stále ve vývoji, sice přibyly nové možnosti exportu, ale nebyly otestované autorem této práce.

Na závěr práce byl popsán možný autonomní pohyb a jeho využití, a to kontrola parkoviště, či jakéhokoli jiného objektu, kde si kvadroptéra vystačí s pohybem v x-ové ose. Hlavní zhodnocení programu a modelu bylo popsáno na závěr kapitoly 8 a 9.

11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Quadcopter Parts List | What You Need to Build a DIY Quadcopter. *Quadcopter Garage* [online]. Quadcopter Garage, 2013 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://quadcoptergarage.com>
- [2] Moteur 2204 CW 2300kv pour Eachine Racer 250. In: *Studio Sport* [online]. France, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.studiosport.fr/moteur-2204-cw-2300kv-pour-eachine-ec250-a10064.html>
- [3] Triangulace. In: *Wikimedia* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Distance_by_triangulation.svg
- [4] QUADCOPTER MOTORS: UNDERSTANDING THE DRIVING FORCE OF THE DRONES. *Drone lab* [online]. 2018 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://mydronelab.com/accessories/quadcopter-motors.html>
- [5] Drone Motors: Choose the Best Motors for Your Quadcopter. *Filmora* [online]. 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://filmora.wondershare.com/drones/drone-motors.html>
- [6] Brushless motors - how they work and what the numbers mean. *Drone Test* [online]. 2014 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.dronetrest.com/t/brushless-motors-how-they-work-and-what-the-numbers-mean/564>
- [7] , Alex a Sam. How to choose the right motor for your multicopter drone. *Drone Test* [online]. Drone Test, 2017-09-15 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.dronetrest.com/t/how-to-choose-the-right-motor-for-your-multicopter-drone/568>
- [8] HOW TO CHOOSE FLIGHT CONTROLLER FOR QUADCOPTER. *Oscar Liang* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://oscarliang.com/best-flight-controller-quad-hex-copter/>
- [9] Evolution of Flight Controllers for Mini Quad and Racing Drone. In: *Imgur* [online]. 2017 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://imgur.com/gallery/mVH5FdS>
- [10] Best Flight Controller 2018 (quadcopter/drone flight controllers). *FPV FRENZY* [online]. 2018 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://fpvfrenzy.com/quadcopter-flight-controller-shootout/>
- [11] Openpilot STM32 CC3D Flight Controller With Cable Set. In: *Hacktronics* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://hacktronics.co.in/aeromodelling/openpilot-stm32-cc3d-flight-controller-with-cable-set>

- [12] Hobbyking KK2.1.5 Multi-rotor LCD vô Conseilho de Controle Com 6050MPU E Atmel 644PA. In: *HobbyKing* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://hobbyking.com/pt_pt/hobbyking-kk2-1-5-multi-rotor-lcd-flight-control-board-with-6050mpu-and-atmel-644pa.html
- [13] NAZE32 REV6a MPU6500 32-bit 6 DOF/10 DOF Flight Controller for Multicopter for RC Drone FPV Racing. In: *Bang good* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.banggood.com/DALRC-NAZE32-REV6-MPU6050-32-bit-6-DOF10-DOF-Flight-Controller-for-Multicopter-p-1020774.html?cur_warehouse=CN
- [14] Finde Fehler nicht: NAZA reagiert auf Taranis nicht. In: *KopterForum* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.kopterforum.de/topic/54418-finde-fehler-nicht-naza-reagiert-auf-taranis-nicht/>
- [15] Emax Simonk Series 12A 20A 25A 30A 40A ESC For Quadcopter QAV250. In: *Bang good* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.banggood.com/Emax-Simonk-Series-12A-20A-25A-30A-40A-ESC-For-Quadcopter-QAV-250-p-918126.html?cur_warehouse=CN
- [16] What to consider when buying a ESC for your multirotor. *Drone Test* [online]. 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.dronetrest.com/t/what-to-consider-when-buying-a-esc-for-your-multirotor/1305>
- [17] BLHeli - 100% Explained. *YouTube* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=0Bi1XcdpnQI>
- [18] LiPo Batteries - A guide to using and looking after your batteries. *Drone Test* [online]. 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.dronetrest.com/t/lipo-batteries-a-guide-to-using-and-looking-after-your-batteries/1278>
- [19] A Guide to Understanding LiPo Batteries. *Roger's Hobby Center* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://rogershobbycenter.com/lipoguide/>
- [20] 1S-8S Lipo Battery Tester Buzzer Alarm. In: *RCKING* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.rcking.eu/cs/testery-a-merice-aku/83285-1s-8s-lipo-battery-tester-buzzer-alarm.html>
- [21] EMAX Power Distribution Board 0512 5V/12V. In: *EMAX* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.emaxmodel.com/emax-power-distribution-board-5v-12v.html>
- [22] Flysky FS - i6S 2.4G 6CH OSD Transmitter + FS - iA6B Receiver RC Multicopter Accessory - COLORMIX VERSION 2. In: *GearBest* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.gearbest.com/multi-rotor-parts/pp_345672.html
- [23] HOW TO CHOOSE PROPELLER FOR MINI QUAD. *OscarLiang* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://oscarliang.com/choose-propellers-mini-quad/#size>

- [24] What is Propeller Pitch?. In: *Propeller pages.com* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.propellerpages.com/?c=articles&f=2006-03-08_what_is_propeller_pitch
- [25] PAZOUR, Z. Víceparametrový regulátor oběhového čerpadla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 80 s., 7 příl., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [26] ŠVARC, Ivan. *Automatické řízení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [27] FPV QAV250 quadcopter SP Racing F3 6DOF Flight Control Wdiy 2204 motor WST 20A ESC for cross racing drone. In: *AliExpress* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/FPV-QAV250-quadcopter-SP-Racing-F3-Flight-Control-Wdiy-2204-motor-WST-12A-ESC-for-cross/32709204055.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.6X3lIV>
- [28] Wdiy 2204 2205 Motor 2300KV multirotor high quality Support 4S Battery for mini cross racing quad. *Wdiy* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://www.wdiyrc.com/index.php?route=product/product&product_id=48
- [29] Sunnysky X2204 2300KV Thrust Test - 2S + 3S. *RCGroups* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2112708-Sunnysky-X2204-2300KV-Thrust-Test-2S-3S>
- [30] SP Racing F3. In: *Team NcRc* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.team-ncrc.com/magaza/urun/sp-racing-f3-ucus-kontrol-karto-acro-6-dof>
- [31] KINGKONG 12A OPTO ESC BLHeli (2-4S). In: *HobbyKing* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/2-4s-12a-esc-opto.html
- [32] Mbed LPC1768. In: *Arm mbed* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/>
- [33] Mbed LPC1768. In: *Mbed ARM* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/>
- [34] Internet věci je tady! TCP/IP WIFI ESP8266 ESP-01. In: *ARDUINO-SHOP.CZ* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/arduino/911-internet-veci-je-tady-tcp-ip-wifi-esp8266-1420990568.html>
- [35] HC-SR04 Ultrasonic Module Distance Measuring Sensor. In: *Core Electronics* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://core-electronics.com.au/hc-sr04-ultrasonic-module-distance-measuring-sensor.html>

- [36] The HC-SR04 Ultrasonic Sensor + Atmel ATtiny13 + AVR Assembly Language. *EZDenki* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.ezdenki.com/ultrasonic.php>
- [37], Fintan Corrigan. Top Collision Avoidance Drones And Obstacle Detection Explained. *DroneZon* [online]. 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/top-drones-with-obstacle-detection-collision-avoidance-sensors-explained/>
- [38] Stereo vision. *Optometrists network* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.vision3d.com/stereo.html>
- [39] Stereo Vision - Depth map. *YouTube* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=bsA6RKUUA3M>
- [40] Time-of-Flight Principle. In: *TeraBee* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/time-of-flight-principle/>
- [41] 12 Top Lidar Sensors For UAVs And So Many Great Uses. *DroneZon* [online]. 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/best-lidar-sensors-for-drones-great-uses-for-lidar-sensors/>
- [42] Předpisy pro létání s drony v ČR. *DroneWeb* [online]. 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/legislativa-provozu-dronu/item/37-predpisy-pro-letani-s-drony-v-cr>

12 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

Zkratky

ESC	Electronic Speed Controller
BEC	Battery Eliminating Circuit
OPTO	Optoisolated
RMP	Round Per Minutes
PDB	Power Distribution Board
BN	Bull Nose
HBN	Hybrid Bull Nose
TOF	Time Of Light
RTOS	Real Time Operating Systém
RTH	Return To Home

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Bezkartáčový motor pro kvadroptéry [1]	11
Obr. 2: Značení motorů [6]	12
Obr. 3: Coolplay syma x5c-1 x5c x5[23].....	14
Obr. 4: Hobbymate quadcopter [5]	14
Obr. 5: Emax Mt2213[5].....	15
Obr. 6: Evoluce řídicích jednotek [9].....	16
Obr. 7: Řídicí jednotka KK 2.X [12]	18
Obr. 8: Řídicí jednotka CC3D [11].....	18
Obr. 9: Řídicí jednotka NAZE32 [13]	19
Obr. 10: Řídicí jednotka ArduPilot APM [13].....	20
Obr. 11: Řídicí jednotka 3DR Pixhawk [13].....	20
Obr. 12: Řídicí jednotka DJI Nava M – V2 [14]	21
Obr. 13: ESC [15]	22
Obr. 14: Servo konektor [16]	23
Obr. 15: ESC OPTO zapojení (Arduino jako řídicí jednotka) [16]	23
Obr. 16: Konfigurace ESC pomoci BLHeli	24
Obr. 17: Parametry Li-Po baterie [18]	25
Obr. 18: Nehořlavý vak pro baterie [18].....	26
Obr. 19: Senzor napětí na baterii [20].....	26
Obr. 20: Ukázka PDB desky [21]	27
Obr. 21: Rádio přijímač FS-IA6B [22]	27
Obr. 22: Stoupání vrtulek [30]	28
Obr. 23: Tvary vrtulek [23].....	28
Obr. 24: Blokové schéma diskretního regulačního obvodu.....	31

Obr. 25: Princip vzorkování [26].....	32
Obr. 26: Tvarování signálu [26]	32
Obr. 27: Základní kostra kvadrotéry [27].....	35
Obr. 28: Motor s označením 2204 [28]	36
Obr. 29: Řídící jednotka SP Racing F3 [30].....	36
Obr. 30: ESC KINGKONG 12A [31]	37
Obr. 31: Sekundární řídící jednotka LPC1768 [32]	37
Obr. 32: Vývojové prostředí mbed.....	38
Obr. 33: WiFi modul ESP8266 [34].....	39
Obr. 34: Ultrazvukový senzor HCSR 04 [35]	39
Obr. 35: Princip funkce HCSR 04 [36]	39
Obr. 36: Vyhodnocení vzdálenosti pomocí stereo kamery [39].....	41
Obr. 37: Time of Flight princip funkce [40].....	42
Obr. 38: Snímání okolí pomocí Lidar senzoru [37]	42
Obr. 39: Schéma zapojení modelu.....	45
Obr. 40: Kalibrace akcelerometru	46
Obr. 41: Nastavení přijímaného signálu.....	47
Obr. 42: Kalibrace přijímaného signálu	48
Obr. 43: Kalibrace kanálů na vysílače.....	48
Obr. 44: Nastavení módů.....	49
Obr. 45: Hotová kvadrotéra.....	50
Obr. 46: Detekce překážky za modelem.....	51
Obr. 47: Seznam souborů	53
Obr. 48: Běh programu Sekundární řídící jednotky	54
Obr. 49: Běh vlákna pro server.....	56
Obr. 50: Regulace kanálů	57
Obr. 51: Komunikace přes wifi	58
Obr. 52: Kvadrotéra zepředu	73
Obr. 53: Kvadrotéra seshora.....	74
Obr. 54: Kvadrotéra zezadu.....	75
Obr. 55: Kvadrotéra zleva	76
Obr. 56: Hotová kvadrotéra.....	76

Seznam tabulek

Tab. 1: Vztah baterií a vrtulí pro motor MT2204[3].....	13
---	----

13 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: CD s ukázkou autonomního letu a exportovaným programem do GNU ARM Netbeans

PŘÍLOHA 2: Odkaz na program

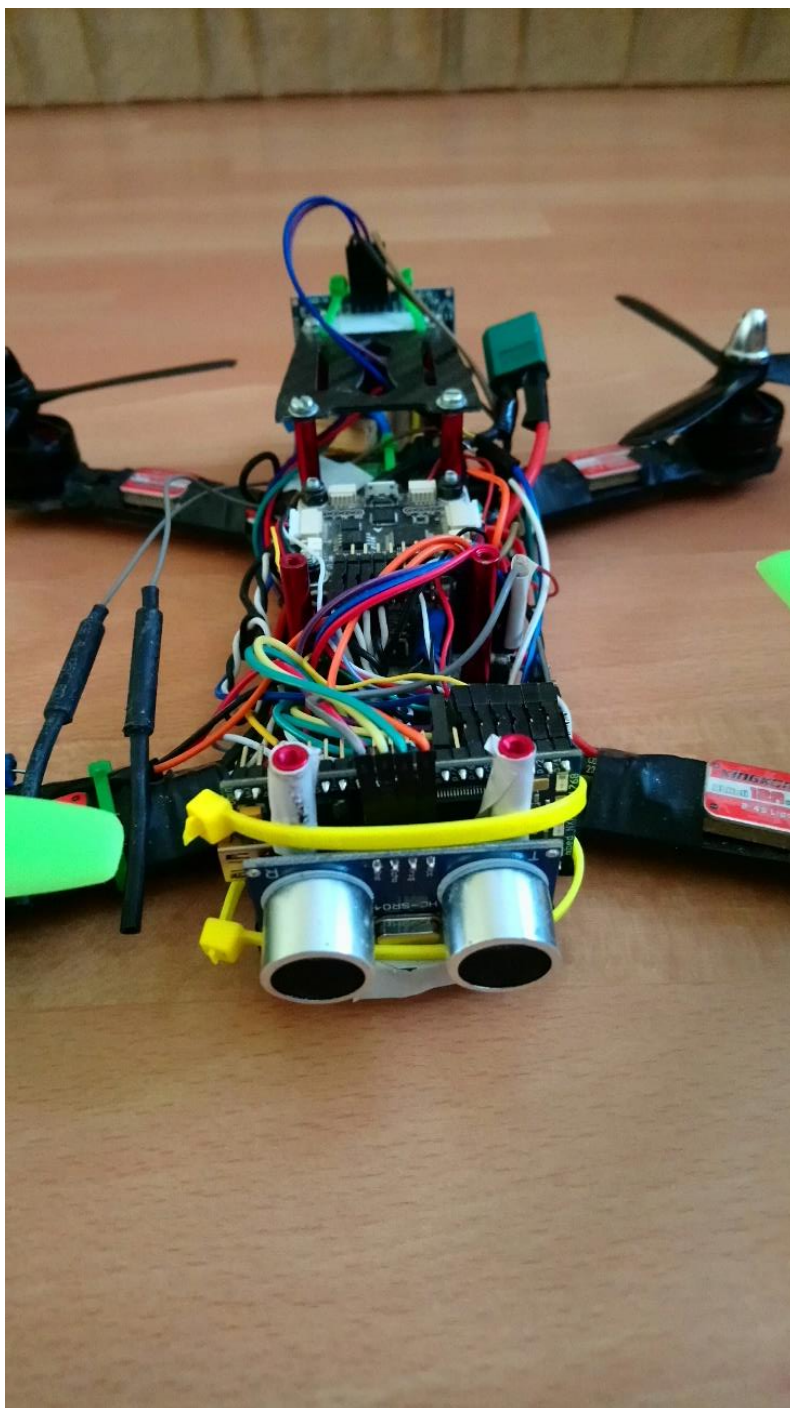
PŘÍLOHA 3: Fotky kvadroptéry

PŘÍLOHA 1

PŘÍLOHA 2

https://os.mbed.com/users/edy05/code/Autonomous_quadcopter/

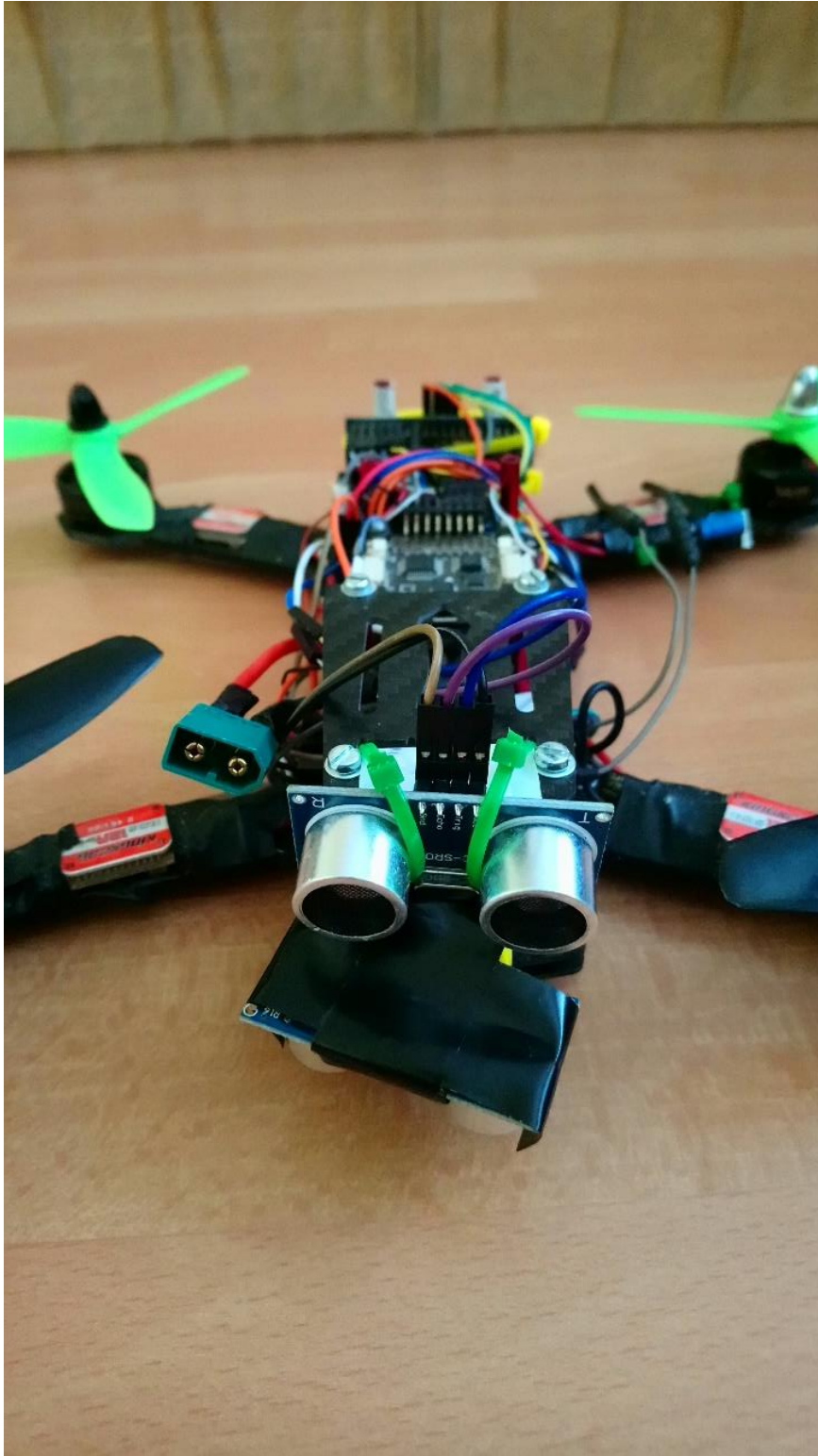
PŘÍLOHA 3



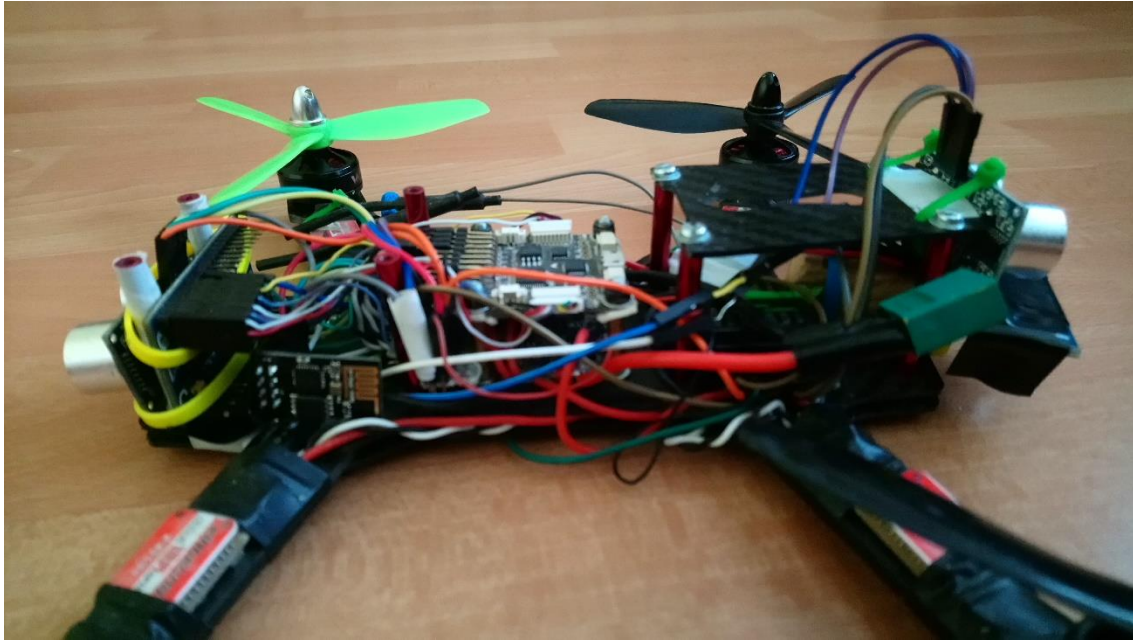
Obr. 52: Kvadroptéra bez horního krytu zepředu



Obr. 53: Kvadrotéra bez horniho krytu seshora



Obr. 54: Kvadroptéra bez horního krytu zezadu



Obr. 55: Kvadroptéra bez horního krytu zleva



Obr. 56: Hotová bez horního krytu kvadroptéra