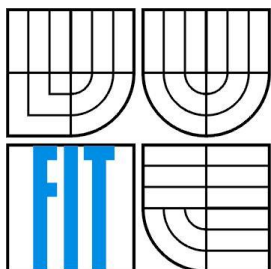


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

SYSTÉM ŘÍZENÍ LETOVÝCH CHARAKTERISTIK AUTONOMNÍHO DRONU

FLIGHT CHARACTERISTIC CONTROL SYSTEM FOR AUTONOMOUS DRONE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Červenka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Šimek

BRNO 2016

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je sestavení dronu a následná implementace bezpečnostního opatření při ztrátě signálu z RC vysílače a stabilizace v prostoru pomocí GPS a dostupných senzorů. Práce se postupně zabývá historií a vývojem dronů, jejich konstrukcí a součásti, ze kterých se samotný dron skládá. Praktická část se zabývá sestavením dronu, implementací autonomního chování a testováním celkového produktu.

Abstract

The goal of the bachelor thesis is to build a drone and implementation of safety measures in case of RC signal loss and also stabilizing the drone in the air using GPS and other available sensors. The thesis describes on history and development of the drones, their construction, components and parts of which it consists. Practical aspect focuses on building the drone, implementation of code for autonomous behaviour and testing of the final product.

Klíčová slova

Dron, gyroskop, GPS, Raspberry, PWM, řídicí jednotka, Pixhawk, koptéra, kvadrokoptéra

Keywords

Drone, gyroscope, GPS, Raspberry, PWM, control unit, Pixhawk, copter, quadcopter

System řízení letových charakteristik autonomního dronu

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Václava Šimka. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal a další informace mi poskytli technici z firmy Aerovision k.s..

.....
Ondřej Červenka
23. května 2016

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Václavu Šimkovi za odborné vedení, které mi pomohlo při vytváření této práce, dále bych rád poděkoval technikovi firmy Aerovision k.s. Lukáši Tunkrovi za cenné praktické i teoretické rady při stavbě dronu a na závěr děkuji mé za finanční a morální podporu.

© Ondřej Červenka, 2016

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

Obsah

Obsah	1
1 Úvod.....	3
2 Historie a vývoj.....	4
2.1 20. století	4
2.2 21. století	5
2.3 Klasifikace bezpilotních letadel.....	6
2.4 Využití v praxi	7
3 Rozdělení koptér	9
3.1 Trikoptéra	9
3.2 Kvadroptéra	10
3.3 Hexakoptéra.....	11
3.4 Oktakoptéra.....	11
4 Komponenty.....	13
4.1 Rám.....	13
4.2 Elektromotor	13
4.3 Regulátor motoru	14
4.4 Řídící jednotka.....	15
4.5 Vrtule	16
4.6 Akumulátor.....	16
5 Senzory	18
5.1 Gyroskop	18
5.2 Akcelerometr	18
5.3 Magnetometr.....	18
5.4 GPS.....	18
5.5 Barometr, sonar.....	20
5.6 Ovládání.....	20
5.7 FPV a záznamová zařízení.....	21
6 Princip letu	22
6.1 Obecný model.....	22
6.2 Ovládání.....	22
7 Praktická část	25
7.1 Stávající řešení.....	25
7.1.1 Bezpečnostní opatření při ztrátě signálu.....	25

7.1.2	System stabilizace.....	26
7.2	Výběr softwaru	27
7.3	Výběr komponent	29
7.3.1	Řídící jednotka Pixhawk.....	29
7.3.2	Ostatní komponenty.....	29
7.4	Stavba	30
7.5	Konfigurace řídicí jednotky.....	32
7.6	Implementace.....	33
7.6.1	Návrat do výchozí pozice při ztrátě řídicího signálu	33
7.6.2	Stabilizace dronu v prostoru	35
7.7	Testování	37
7.7.1	Testování funkčnosti a letových vlastností dronu.....	37
7.7.2	Testování v simulačním programu	38
7.7.3	Testování v dronu	39
8	Závěr	41
9	Literatura.....	42
	Přílohy	44
	Seznam příloh.....	45
A	Obsah CD.....	46
B	XML diagram zapojení dronu.....	47
C	Stavba dronu	48
D	Technické parametry dronu	51

1 Úvod

V současné době jde vývoj výpočetních technologií výrazně kupředu. V posledních letech se vývoj v oblasti výpočetních technologií vyvinul natolik, že jsou nezbytnou součástí našeho každodenního života. Zejména pak mikroprocesory (zkráceně μP či uP) a mikropočítače se vyvinuly natolik, že jejich vysoký výkon a malé rozměry umožnily jejich použití v různých odvětvích. Jedním z takovýchto odvětví je robotika. Zejména pak v oblasti bezpilotních letounů neboli dronů, anglicky Unmanned Aerial Vehicle (UAV).

Mohou být ovládány pilotem, z pozemní kontrolní stanice nebo autonomně na základě předem naprogramovaného letového plánu nebo komplexnějšího automatického systému. Bepilotní letouny neboli drony jsou díky svým vlastnostem využívány pro práci v jinak pro člověka těžko přístupných místech. Drony jsou využívány například pro kontrolu výškových staveb, jako jsou třeba mosty nebo chladírenské věže. Dále se využívají pro mapování lesních porostů a v nemalé části se využívají v povrchových dolech. Drony jsou skvěle ovladatelné a dokáží nést náklad o hmotnosti několika kilogramů. Jejich nevýhodou je, že jsou nestabilní a bez podpůrných systémů by byly člověkem zcela neovladatelné.

Existují různé konstrukce dronů a bezpilotních letadel. Mezi nejznámější patří tzv. kvadrokoptéra (anglicky quadcopter). Jedná se o konstrukci čtyř-rotorového dronu. Dále jsou také využívány drony s více či méně rotory jako jsou například trikoptéry (anglicky tricopters) nebo hexakoptéry (anglicky hexacopters). V této práci se popíšu všechny běžně používané konstrukce a technologie, které jsou využívány u multi-rotorových dronů neboli multikoptér.

Cílem této práce je zkonstruovat letuschopný dron, který je ovládatelný z mikropočítače připojeného k řídicí jednotce a který obsahuje mnou vytvořený bezpečnostní protokol a stabilizaci na bázi GPS a ostatních senzorů, kterými řídicí jednotka disponuje.

V 2. kapitole se věnuji historii a praktickému využití bezpilotních letounů. Ve 3. kapitole se zabývám rozdělením koptér dle konstrukce, 4. kapitola je věnována součástkám, ze kterých koptéra sestává. V kapitole 5 se čtenář dozví, jaké senzory a volitelné zařízení může koptéra obsahovat. Kapitola 6 je věnována principu letu a ovládání kvadrokoptéry. V praktické části se věnuji stávajícím řešením, samotné stavbě dronu, dále implementaci vlastního řešení a následně testováním.

2 Historie a vývoj

První myšlenky směřující k letounům bez pilota se objevily 22. srpna 1849, kdy Rakousko napadlo italské město Benátky pomocí bezpilotních balónů, které nesly výbušniny (viz. obrázek 2.1). Zatímco tyto rané návrhy bezpilotních letounů a dronů obecně nesplňují dnešní definici UAV (Unmanned Aerial Vehicle), koncept a potenciál byl dostatečně silný nato, aby přetrval do dnešní doby, kde se nadále vyvíjí. [1] [2]



Obr. 2.1: Bepilotní balon¹

2.1 20. století

K prvnímu letu bezpilotního letadla došlo po zapojení Spojených států amerických do první světové války. 21. listopadu 1917 v New Yorku odstartoval letoun s názvem Hewitt-Sperry Automatic Airplane, jehož účelem bylo využití jako vzdušné střely. Přesnost prozatím nebyla nijak závratná. Stroj dosahoval přesnosti dopadu od cíle zhruba tři kilometry. I přes všechna úskalí se stal letoun zlomovým bodem, neboť otevřel bránu bezpilotním letadlům. Mezi další bezpilotní letouny, které byly vytvořeny v meziválečném období, stojí zejména za zmínku letoun, který pocházel z britských ostrovů. Britové ve 20. letech pracovali na dálkově řízeném letounu, který by mohl být využíván jako cvičný terč a nebo jako zásobovací letadlo určené do válečné zóny. V roce 1936 ve Spojených státech amerických bylo vůbec poprvé použito pojmenování dron (trubec, včelí samec). Jednalo se o podobné letouny, které byly vytvořeny Brity.

Po skončení druhé světové války se znovu do obliby vracela bezpilotní letadla v roli cvičných terčů. Zejména se proslavil stroj Ryan Firebee (viz. obrázek 2.1.1), který byl vytvořen na začátku 50. let firmou Ryan Aeronautical. Dron byl velmi úspěšný a dočkal se i průzkumné varianty. Dron startoval

¹Převzato z: <https://understandingempire.files.wordpress.com/2012/05/intrepid.png?w=640>

z podvěsu pod křídlem letounu Lockheed DC-130. Byl masivně využíván během války ve Vietnamu, kde uskutečnil na tři tisíce misí.

Díky pokroku ve výpočetních technologiích, globálním navigačním systému (GPS) a satelitní komunikace, byly naplno rozvinuty schopnosti bezpilotních letadel. Jeden z hlavních milníků byl příchod zřejmě nejznámějšího bezpilotního letadla – Predátora. [2] [3]



Obr. 2.1.1: Bepilotní letoun Firebee²

2.2 21. století

Zásadním zlomem pro bezpilotní letouny byl příchod digitálních fotografií a satelitního spojení. Nyní bylo možné sledovat aktuální dění v reálném čase. O něco později s rozšiřováním přenosové rychlosti spojení začala být k dispozici i videa. Pohled na bojiště z ptáčích perspektivy v reálném čase a bez rizika byl snem pro každého vojevůdce.

Po vypuknutí konfliktu na Balkáně zatoužila Americká výzvědná agentura CIA po bezpilotním letounu, který byl vyvíjen pod označením GNAT-750. Letoun byl prozatím schopný operovat do vzdálenosti jen pár stovek kilometrů od řídicí stanice, ale již po prvních misích se z něj stal hit. V roce 1994 prošel několika úpravami. Byl zvětšen a dostal satelitní anténu, což znamenalo, že byl schopen operovat kdekoliv na světě mimo dosah řídicí stanice. V důsledku těchto úprav dostal nové jméno: Predátor (dravec). Později byl vyzbrojen raketami Hellfire a v roce 2001 došlo k prvnímu odpalu raket z tohoto letounu (viz. obrázek 2.2.1).

Úspěchy Predátora a nový rozměr boje, který přinesl, byly sledovány armádami po celém světě. Díky tomu nastal velký zájem o bezpilotní letouny. Bepilotní letouny určené pro armádu nebyly jediné, které začaly zaplavovat trh. Začaly se objevovat stroje pro civilní využití. Zejména se jedná o malé vrtulníky vybavené nejčastěji čtyřmi elektromotory s vrtulemi, které jsou označovány jako

² Převzato z: https://theaviationist.com/wp-content/uploads/2012/03/teledyne-ryan_5-473x367.jpg

kvadrokoptéry a zastávají skupinu MAV (Micro Aerial Vehicle). Existuje několik druhů, které se zejména liší svým tvarem a počtem elektromotorů. Například hexakoptéry (6 elektromotorů), oktokopty (8 elektromotorů) a tak dále. Dalším rozdílem je použití materiálů, liší se taky velikostí a výpočetním výkonem palubního počítače, vybavením a různými vlastnostmi. Důležitou roli hraje také cena, která se v dnešní době pohybuje v řádu tisícikorun. [2] [3]



Obr. 2.2.1: Dron Predátor³

2.3 Klasifikace bezpilotních letadel

Bezpilotní letouny řadíme do následujících kategorií: [2] [4]

- Cíle a návnady – poskytují pozemní a vzdušné cíle simulující nepřátelská letadla nebo střely
- Průzkumné – poskytují informace o bojišti
- Bojové – schopné útoku ve velmi rizikových misích
- Logistické – UAV speciálně navržené pro logistické účely
- Výzkumné a vývojové – používáme k dalšímu vývoji UAV technologií
- Civilní a komerční – UAV speciálně navržené pro civilní nebo komerční aplikace

Dále se bezpilotní letouny dělí dle typu, využití, ovládání a pohonu. Oficiální rozdělení neexistuje, ale logicky se dají rozdělit: [2] [4]

- Typ – letadlo, vrtulník, N-koptéra
- Pohon – elektrický, spalovací, tryskový, hybridní
- Využití – vojenské, foto a video, mapování terénu a mnoho dalších
- Ovládání – manuální, autonomní

³ Převzato z: http://www.delappe.net/files/gimsgs/64_predator-drone.jpg

2.4 Využití v praxi

Mnoho lidí si myslí, že využití dronů je pouze pro zábavu. Ale není to pravda. Jak jsme již zjistili, vývoj bezpilotních letounů tedy dronů má za sebou dlouhou cestu, která začala ve vojenském průmyslu. V armádě se využívají především pro letecké snímkování, ale také pro zaměření a zneškodnění různých cílů. V České Republice jsme mohli drony vidět v praxi při výbuchu muničního skladu ve Vrběticích (viz. obrázek 2.4.1), kde zaznamenávaly práci pyrotechniků. Pod větší drony lze zavěsit například pyrotechnického robota, který slouží pro zneškodnění výbušnin. Drony se také používají pro sběr vzorků v zamořených oblastech, jsou také nasazovány při pátracích akcích, kdy je riskantní vyslat vrtulník, nebo pokud je potřeba rychle dopravit zásoby munice či zdravotnického materiálu jednotkám v nouzi a to s maximální přesností.



Obr. 2.4.1: Dron BRUS ve službách pyrotechniků AČR⁴

Svou pozici má i u hasičů, kde pomáhá při vyhledávání ohnisek požáru za použití termo kamery. Díky svým vlastnostem se značně využívají pro kontroly a revize chladírenských věží, mostů, výškových budov, elektrický sloupů a také hrází.

V zemědělství mají drony velký potenciál. Zemědělci pomocí infračervené kamery můžou sledovat zdraví rostlin. Při využití normální kamery se zase dá zjistit stav úrody. V budoucnu by mohl dron sám aplikovat pesticidy či hnojiva, nebo být využívám při zavlažování. V dnešní době pracuje firma Aerovision na prototypu takového stroje, který dokáže autonomně létat nad polem a hnojit případně zavlažovat rostliny.

Největší pozornosti se drony těší v oblasti filmování a fotografování. Zejména v nedostupných podmínkách je jejich využití, co se natáčení týká bezkonkurenční. Pro záběry z ptačí

⁴ Převzato z: <http://www.ozbrojeneslozky.cz/clanek/potencial-vyuziti-dronu-v-armade-ceske-republiky>

perspektivy postupně nahradily helikoptéry a letadla, kdy řešení pomocí dronů je finančně výhodnější a časově méně náročné. Využití našly i při vytváření 3D map, kdy se série zachycených fotografií dané oblasti pomocí počítače a specializovaného softwaru převede na 3D model. V praxi mluvíme například o mapování pozemních dolů, kde je možné z takového 3D modelu získat bližší informace o vytěženém materiálu, rozloze apod.. [5] [6]

3 Rozdělení koptér

S rozvojem výpočetní techniky vznikaly nové typy bezpilotních letounů. V této kapitole se budu věnovat dronům, které pro svůj let nevyužívají křídla, ale elektromotory osazené vrtulemi. Existují různé konstrukce multi-rotorových dronů, které mají své výhody, ale i nevýhody. Kombinací jednotlivých konstrukcí mohou být tyto nevýhody eliminovány.

3.1 Trikoptéra

Trikoptéra je třírotorový stroj (viz. obrázek 3.1.1). Její konstrukce je poměrně nenákladná z důvodu, že obsahuje pouze tři elektromotory. Hlavním stavebním kamenem jsou tři ramena, která vůči sobě svírají úhel 120° . Elektromotory trikoptéry jsou umístěny na konci každého ramene. Trikoptéra musí být dokonale vyvážená. Z důvodu obtížného dosáhnutí rovnováhy mezi tahem a momentem setrvačnosti, mají všechny elektromotory stejný směr otáčení a jejich moment setrvačnosti je eliminován příčným klopením zadního elektromotoru. Výhodou klopení zadního elektromotoru je vysoká obratnost. Jedná se o nejobratnější stroj z rodiny koptér. Nevýhodou je nízká stabilita, malý zdvih elektromotorů a vysoká spotřeba elektrické energie. Vysoká spotřeba elektrické energie je zapříčiněna tím, že elektromotory se musí točit neefektivně rychle a v případě výpadku jednoho elektromotoru se neudrží ve vzduchu.



Obr. 3.1.1: Trikoptéra⁵

⁵ Převzato z: http://cdn3.bigcommerce.com/s-wrwm6/product_images/uploaded_images/tricopter-1-.jpg?t=1456213528

3.2 Kvadrokoptéra

Kvadrokoptéra je jedna z nejoblíbenějších a nejrozšířenějších multikoptér (viz. obrázek 3.2.1). Její konstrukce je poměrně snadná, vyznačuje se nízkou cenou a snadným návrhem řídicího systému. Díky těmto vlastnostem je velmi oblíbená mezi modeláři a amatérskými fotografy. Široké uplatnění tohoto typu dronu také nalezneme v oblasti vědy. Konkrétně při vývoji hardwaru a softwaru pro drony z rodiny multikoptér. Máme několik variant konstrukcí. Nejpoužívanější konstrukce kvadrokoptér jsou do tvaru písmene H, X případně +. Dále existují různé kombinace těchto konstrukcí. Zajímavá je konstrukce do písmene Y, kdy se na zádi blízko sebe nachází dva protichůdné motory.

Výhodou tohoto typu dronu oproti trikoptérám je, že odpadá nutnost naklápění zadního rotoru a tudíž se pohyb dronu ovládá změnou otáček jednotlivých elektromotorů. V případě výpadku jednoho elektromotoru není stroj schopen letu. Kvadrokoptéra je stabilnější než trikoptéra, ale podstatně méně obratnější. Platí zde pravidlo, že polovina elektromotorů musí být pravotočivá a druhá polovina levotočivá. Je to z toho důvodu, aby byl zachován nulový moment setrvačnosti v klidu.



Obr. 3.2.1: Kvadrokoptéra⁶

⁶ Převzato z: <http://n-factory.de/onlineshop/bilder/produkte/gross/DJI-F450-ARF-Bausatz-DJI-Naza-M-Lite-GPS-Quadrocopter.jpg>

3.3 Hexakoptéra

Hexakoptéra sestává z šesti elektromotorů, které jsou rozmístěny po obvodu (viz. obrázek 3.3.1). Konstrukce je tvořena ve tvaru pravidelného šesti-úhelníku. Stejně jako u kvadroptéry i zde platí pravidlo, že polovina elektromotorů musí být pravotočivých a druhá polovina levotočivých.

Hlavní výhodou této konstrukce je schopnost bezpečného přistání při výpadku jednoho elektromotoru, dále větší zdvih, který jen mírně navyšuje spotřebu elektrické energie. Díky více elektromotorům je dron stabilnější a výkonnější, což znamená že dron můžeme osadit více zařízeními. Například fotoaparátem, který při zvýšené stabilitě znamená kvalitnější snímky. Mezi nevýhody tohoto dronu patří vyšší náročnost při stavbě, větší rozměry a vyšší cena.



Obr. 3.3.1: Hexakoptéra⁷

3.4 Oktakoptéra

Oktakoptéra se skládá z osmi elektromotorů. Její konstrukce je ve tvaru pravidelného osmi-úhelníku jak můžeme vidět na obrázku 3.4.1. Stejně jako u kvadroptéry a hexakoptéry zde platí pravidlo, že polovina elektromotorů musí být pravotočivých a druhá polovina levotočivých.

Výhodou tohoto dronu je, že i při výpadku jednoho elektromotoru je schopen letu bez jakýchkoliv následků a při výpadku několika elektromotorů je schopen bezpečně přistát. Proto je vhodný k přenosu drahého vybavení, jako jsou například zrcadlové fotoaparáty nebo profesionální videokamery. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a rozměry dronu.

⁷ Převzato z: <https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSex96seWjBnqe6tqOfPZoDyzRFZZG0hl6PJkeYgHoySOHqDnV0qA>



Obr. 3.4.1: Oktakoptéra⁸

⁸ Převzato z: http://static.dji.com/uploads/post_picture/name/1/s1000_01.JPG

4 Komponenty

Cílem této kapitoly je seznámit čtenáře se základními stavebními prvky kvadrokoptéry, k čemu slouží a proč jsou důležité. Dále zde uvedu i volitelný hardware, který nemusí být součástí jednotlivých řídicích desek.

4.1 Rám

Rám je jeden ze základních stavebních prvků každé koptéry (viz. obrázek 4.1.1). Je nezbytný, neboť se na něj upevňují všechny komponenty, které koptéra obsahuje. Existují různé varianty rámu. Liší se svou velikostí, váhou a počtem ramen. Například pro kvadrokoptéru bude rám vypadat jinak a mít jiné vlastnosti než pro oktokoptéru. Řadíme ho mezi pasivní prvky koptér. Nemá kladný vliv na délku letu, proto se využívají takové materiály, které zajistí pevnost rámu s co nejmenší možnou hmotností. Proto se využívají materiály jako karbon, plast, balza, hliník nebo letecký dural. Použité materiály se následně odráží na ceně. U rekreačních a výzkumných koptér se zejména používá plast. U větších koptér, které nesou dražší náklad jako třeba fotoaparát, se spíše využívá karbon.



Obr. 4.1.1: Rám DJI F450⁹

4.2 Elektromotor

Koptéry využívají dva typy motorů, střídavé a stejnosměrné. Jak samotný motor vypadá, můžeme vidět na obrázku 4.2.1. Stejnosměrné motory jsou napájeny stejnosměrným proudem, jeho princip byl objeven v roce 1873. Jedná se tedy o nejstarší typ motoru. Princip motoru spočívá ve využití minimální energie. Proud protékající smyčkou se chová jako permanentní magnet, který se může otáčet. Díky

⁹ Převzato z: <https://www.sierrarc.com/images/450.jpg>

komutátoru se navíc dvakrát za otáčku změní jeho polarita. Jelikož souhlasné póly magnetů se odpuzují, tak pokud je komutátor nastavený tak, že se polarita magnetů změní v okamžiku, kdy jsou si jejich opačné póly nejbližší, tak budou na pohyblivý magnet neustále působit síly, které ho budou nutit k pohybu. Výhody tohoto typu motoru spočívají ve snadném řízení a lineární charakteristice závislosti otáček na budícím napětí na rotoru. Mezi nevýhody patří zejména konstrukční náročnost a rozměry. [7] [8]

U větších koptér se používají střídavé motory, které fungují na principu působení sil na vodič protékající proudem. Tento vodič je umístěn v magnetickém poli. Na komutátor se přivede stejnosměrný proud. Proud začne protékat cívkou kotvy, na kterou, díky umístění v magnetickém poli, začne působit magnetická síla. Směr této síly se určuje pomocí Flemingova pravidla levé ruky. Aby se kotva otáčela o 360°, musí se smysl proudu, při přechodu jednoho pólu ke druhému, změnit. Tuto změnu proudu v rotorovém vinutí zařizuje komutátor. Výhodou toho typu motoru je vyšší výkon, nižší spotřeba a delší životnost než u stejnosměrného motoru. [9] [10]



Obr. 4.2.1: Elektromotor Axi¹⁰

4.3 Regulátor motoru

Elektronická součástka, která v sobě zahrnuje výkonovou i řídicí elektroniku (viz. obrázek 4.3.1). Na regulátory je přiveden elektrický proud. Výstupem regulátoru je trojice kabelů, které vedou do motorů. Motory jsou třífázové, proto jsou na výstupu regulátoru právě tři kabely. Přehozením pořadí kabelů na výstupu regulátoru docílíme opačného chodu motoru. Řídicí jednotka vysílá PPM nebo PWM signál do regulátoru a ten následně reguluje otáčky motoru. Existují také regulátory pro stejnosměrné motory. Většina moderních regulátorů je vybavena obvodem BEC. Jedná se o jednoduchý stabilizátor napětí, který slouží k tomu, aby všechny komponenty měly stejný zdroj proudu. Některé regulátory také obsahují systém PCO, který hlídá stav vybití napájecích článků. Tato funkce je velmi praktická zejména při použití Li-pol baterie. Pokud klesne napětí baterie pod určitou mez, regulátor sníží otáčky motoru

¹⁰ Převzato z: <http://www.sczmodelshop.cz/obrazky/13173/elektromotor-axi-5345-16hd-3el105646-original.jpg>

nebo pilota upozorní jiným způsobem. Pokud nastane situace, že stav baterie je kritický, dojde k úplnému omezení ovládání motorů, aby nedošlo k poškození baterie. Napájení přijímače a ostatní elektroniky je stále zachováno. [10] [11]



Obr. 4.3.1: Regulátor elektromotoru¹¹

4.4 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je centrálním mozkiem celé koptéry. Přijímá signály od pilota nebo v případě autonomního chování z řídicího systému. V mém případě přijímá příkazy z RC vysílače a v případě výpadku signálu z ovladače přebírá řízení mnou vytvořený skript. V reálném čase také analyzuje data, která získává z různých senzorů a modulů. Výstupem z řídicí jednotky jsou hodnoty, které jsou následně posílány do regulátorů.

Existují různé typy řídicích jednotek. Rozlišují se dle vlastností, velikosti, senzorů, firmware atd.. Pro mě jako pro vývojáře je důležité, zda daná deska je open source či nikoliv. Open source jednotky je možné programovat svépomocí. Zasahovat do samotného zdrojového kódu. Což je výhoda, pokud chceme něco změnit či přidat. Jednotky, které nepovolují zásah do zdrojového kódu, lze pouze nastavit v software, který je dodáván spolu s řídicí deskou. K řídicím jednotkám je možné připojit volitelné moduly jako třeba GPS modul, avšak některé jednotky připojení externím modulů nepodporují. Jak taková jednotka vypadá, můžete vidět na obrázku 4.4.1. Vzhled každé jednotky je odlišný.

¹¹ Převzato z: http://www.dronpilot.cz/wareImages/3/5/003559_or.jpg



Obr. 4.4.1: Řídící jednotka Naza v2¹²

4.5 Vrtule

Vrtule je technické zařízení, které umožňuje přeměňovat energii rotačního pohybu na tah nebo naopak tah na rotační pohyb. Při rotaci vrtule ve vzduchu působí na každou část listu vrtule aerodynamická síla, podobně jako na křídle letadla, tedy v důsledku rozdílu tlaků vzniklých obtékáním profilu vrtule. Každá část listu se pohybuje stejnou úhlovou rychlostí, ale díky rozdílné vzdálenosti od osy otáčení poloměru jinou obvodovou rychlostí. Proto je list zkroucen tak, aby součin obvodové rychlosti a součinitele vztlaku a tím i rozložení vztlaku po délce listu bylo stálé.

Vrtule mohou mít různý počet listů. V dnešní době se koptéry osazují zejména dvou nebo tří listovou vrtulí. Čtyřlísté vrtule se používají zejména u závodních koptér z důvodu většího tahu při menších otáčkách, ale existuje zde také riziko přehřátí motorů. Z důvodu zachování pevnosti materiálu při co nejmenší váze se používají materiály jako je plast, karbon a balza.

Při výběru vrtule je nutné vycházet z parametrů motorů. Pokud chceme docílit toho, aby koptéra byla stabilní, je nutné používat vrtule s maximálním možným průměrem a s malým stoupáním. Parametr stoupání vrtule udává, o jakou maximální vzdálenost se vrtule posune po jedné otáčce. [12] [13]

4.6 Akumulátor

Největší slabinou dronů a všeobecně bezpilotních letounů v dnešní době je zdroj energie. Existuje mnoho druhů akumulátorů, ale pro potřeby dronů je třeba využívat baterie s maximální možnou kapacitou a vysokými vybíjecími proudy. Nejčastěji jsou využívány baterie typu Li-Pol a Li-Ion-

Lithium-polymerový akumulátor je poměrně nový typ elektronického akumulátoru. Výroba těchto akumulátorů je technologicky i energeticky náročná, proto je pořizovací cena těchto akumulátorů dále jen baterií poněkud vyšší. Co se týče parametrů, tak plně nabitý článek má až 4,23 V. Pokud jeho

¹² Převzato z: <http://www.helicomicro.com/wp-content/uploads/2013/12/Naza-M.jpg>

napětí klesne po 2,7 V, může být nenávratně zničen. Aby se předešlo zničení baterie důsledkem přehřátí, přílišnému vybití nebo přebití, je článek chráněn vnitřním elektronickým obvodem. Objem kapacity článku se pohybuje od 100 mAh do 5000 mAh. Mezi hlavní výhody Li-Pol baterií patří velká kapacita na malém rozměru, minimální samovybití, dlouhá životnost, rychlonabíjení a vysoký vybíjecí proud. Mezi nevýhody tohoto typu baterií patří možnost vznícení nebo výbuchu, vyšší pořizovací cena, zvětšování tlaku uvnitř baterie. [14] [15]

Lithium-Iontová baterie je o něco starší než Li-Pol baterie. Prodává se od roku 1991. Mezi výhody patří především to, že ji není třeba formátovat, může být vyrobena v různých tvarech a má velmi vysokou hustotu energie. Hlavní nevýhodou je to, že baterie stárne a ztrácí maximální kapacitu nehledě na to, zda je využívána nebo ne. Také je háklivá na úplné vybití. Pokud její napětí klesne pod 2,8 V, je velmi obtížné ji oživit. Pro nabíjení obou typů baterií je nutné vlastnit mikroprocesorem řízenou nabíječku. [16]

5 Senzory

Senzory dělíme na dvě kategorie. Ty, které jsou nezbytné proto, aby byla koptéra schopná letu a ty, které poskytují doplňkové funkce a tím ulehčují nebo zkvalitňují letové vlastnosti. Senzory, které poskytují doplňkové funkce, jako je například GPS mohou být připojeny k řídicí jednotce externě.

5.1 Gyroskop

Jedná se o senzor, který měří úhlovou rychlost v jednotlivých osách x , y , z . Pomocí integrace můžeme získat informaci o náklonu kolem jednotlivých os koptéry. Pokud známe počáteční podmínky, tak je možné zjistit náklon vůči povrchu země. Hlavní slabinou je integrace vstupní hodnoty, která bývá zatížena chybou, která se postupnou integrací dále zvětšuje. Řešením tohoto problému je kalibrace gyroskopu a vhodné filtrování vstupních dat. Pro samotný let koptéry je tento senzor nezbytnou součástí. [17]

5.2 Akcelerometr

Elektronický senzor, který měří velikost a směr zrychlení. Umožňuje nám měřit zrychlení ve všech třech osách x , y , z . Pomocí integrace podle času a na základě zrychlení jsme schopni vypočítat rychlost a následně i dráhu v průběhu času. Pro stabilitu a bezproblémový let koptéry je tento senzor nezbytný. [18]

5.3 Magnetometr

Jedná se o doplňkový senzor. Slouží k měření velikosti a směru magnetického pole. Je velmi nápomocný při doplňujícím měření natočení koptéry vůči zemi. Skládá se ze tří senzorů, u kterých se využívá magnetorezistančního jevu, který funguje na principu změny odporu magnetického materiálu vlivem působení slabého magnetického pole. [19]

5.4 GPS

GPS, neboli Global positioning systém je v současné době nejrozšířenějším satelitním systémem pro určování polohy na zemi, který je provozován Ministerstvem obrany Spojených států amerických. Je schopen určit vaši polohu kdekoliv na zemském povrchu, a to bez ohledu na počasí a na dobu, kdy měříte. Přesnost lokalizace systému GPS se pohybuje okolo tří až deseti metrů. Vývoj tohoto systému započal ve Spojených státech amerických v 60. letech minulého století. Prvotním záměrem bylo

vytvoření navigačního systému pro rakety a námořní plavidla. Od roku 1993 je GPS zpřístupněna civilnímu obyvatelstvu. Kosmický segment byl projektován na 24 družic, ale momentálně je využíván až na mezní počet 32 družic. Družice obíhají ve výšce 20 350 km nad povrchem země. Pohybují se rychlostí 3,8 km/s, s dobou oběhu kolem země za 11 hodin a 58 minut. V České republice je nejčastější viditelnost 8 družic, minimum pak 6 a maximum 12 družic.

Každá družice vysílá informace o své poloze, přesný čas z atomových hodin a dále přibližné polohy ostatních družic. Přijímač pro výpočet polohy využívá časového rozdílu mezi okamžikem vyslání a okamžikem přijetí dat. Pokud získá a zpracuje data nejméně ze 4 družic, je schopen určit svou aktuální polohu. Čím více přijímá signálů, tím se výpočet aktuální pozice zpřesňuje. Přijímač musí mít samozřejmě přímou viditelnost na oblohu.

Mezi další zástupce navigačních systému patří zejména evropský Galileo, který má být spravován civilním sektorem. Bohužel tento systém není stále dokončen. Jeho dokončení se odhaduje na rok 2018. Mezi další zástupce patří i ruský Glonass.

V našem případě GPS využíváme například pro autonomní létání, kdy předem naprogramujeme řídicí jednotku tak, aby dron letěl do námi vybraných bodů. Slouží k tomu například takzvaná pozemní řídicí stanice, což je program, který obsahuje mapu, a pomocí GPS souřadnic předem definujeme body, kterými dron poletí. Námi vytvořená mise se následně pomocí USB či Wi-Fi spojení nahraje do dronu. Dále se dá GPS využít pro bezpečný návrat do výchozího bodu v případě, že nám selže manuální ovládání nebo nastane jiný problém. Používá se i pro zafixování určité pozici a setrvání v ní. Jak samotný modul GPS vypadá, můžeme vidět na obrázku 5.4.1. [20] [21]



Obr. 5.1: GPS modul NAZA v2¹³

¹³ Dostupné z: <http://www.riseabove.com.au/assets/full/DJI-PH3-GPS-P1.jpg>

5.5 Barometr, sonar

Mezi další senzory, které usnadňují orientaci dronu v prostoru patří barometr a sonar. Barometr slouží k určení výšky podle atmosférického tlaku. Přesnost určené výšky se pohybují okolo 0,1 m.

Sonar je využíván k lokalizaci a měření vzdálenosti překážek. Sonar funguje na principu měření času mezi vysláním akustického impulzu a jeho následným přijetím. Po vyslání akustických impulzů se vysílač přepne do režimu přijímače a čeká na příchozí impulzy. Pokud známe typ, teplotu a tlak okolního prostředí můžeme velmi přesně stanovit vzdálenost od překážky, na které došlo k odrazu vyslaných impulzů. V našem případě se sonar využívá pro zjištění dané výšky a následné stabilizace v dané výšce. Informace, které získáváme ze sonaru, jsou přesné do 7 metrů nad povrchem země. Ve větších výškách se používá barometr. Dalším případem, kdy se využívá sonar je vyhýbání se překážkám a dále u autonomního startu a přistání. [22] [23]

5.6 Ovládání

Drony můžeme na dálku ovládat různými způsoby. Mezi nejčastější způsoby patří dálkové ovládání pomocí RC vysílače (viz. obrázek 5.6.1). Využívá se zde 2,4 GHz pásmo. V tomto pásmu může na jednom místě fungovat poměrně velký počet RC vysílačů. Udává se počet až 40 aktivních zařízení. Pokud je pásmo plné, neměl by pokus o zapnutí dalšího zařízení ovlivnit ta stávající. Dosah takového vysílače je pak až 3 km.

Další možností je zde využívat Wi-Fi a dron ovládat pomocí počítače či tabletu za použití specializovaného software. Zde nastává problém s dosahem, neboť Wi-Fi není stavěná na přenos signálu na velkou vzdálenost. V mém případě budu využívat RC vysílač, abych mohl demonstrovat výpadek řídicího spojení mezi dronem a vysílačem. [24]



Obr. 5.6.1: RC vysílač¹⁴

¹⁴ Dostupné z: <http://www.modelarina.cz/images/rc-soupravy/Graupner-SJ-S1005-CZ-AKCE.jpg>

5.7 FPV a záznamová zařízení

Volitelným vybavením jsou záznamová zařízení, která se upevňují na dron. U menších dronů můžeme často vidět malé kamerky, které slouží buď k FPV (First person view) létání nebo k pořizování videa a fotografických snímků. U levnějších kamer se setkáváme s nižší kvalitou záznamu. U větších dronů je běžné, že se pro pořizování snímků používají profesionální fotoaparáty a pro FPV let levnější kamerky. Existují kombinace, kdy je dron vybaven fotoaparátem, kvalitní kamerou pro záznam videa a kamerkou pro FPV. Volitelná vybavení lze různě kombinovat. Nevylučuje se ani použití termovizí, nebo různých specializovaných zařízení. Pro zobrazení FPV videa slouží buď externí LCD displej nebo brýle, které nahrazují již zmíněné LCD displeje. V případě brýlí se obraz přenáší přímo před oči pilota.

6 Princip letu

V následující kapitole se pokusím popsat princip letu dronu konkrétně kvadrokoptéry, tak aby to srozumitelně pochopil každý čtenář. U ostatních typů se princip liší pouze v konkrétních algoritmech ovládání.

6.1 Obecný model

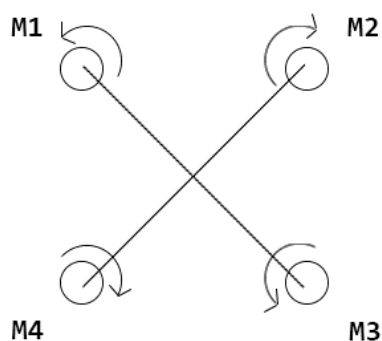
K tomu, aby kvadrokoptéra byla schopná vzlétnout a následně i letět je potřeba dosáhnout potřebného vztlaku, který je tvořen otáčivým pohybem vrtulí. Využívá se zde podobný princip, se kterým se můžeme setkat u vrtulníků. Avšak na rozdíl od vrtulníků, kvadrokoptéra nevyužívá techniku natáčení listů, neboť jsou pevně fixovány v jedné pozici. To celý princip kvadrokoptéry výrazně zjednodušuje na rozdíl od principu vrtulníku. A proto je nutné kvadrokoptéru řídit jiným způsobem než je možné v případě vrtulníku.

Vztlak tvořený otáčivým pohybem vrtulí musí být natolik silný, aby překonal vnější síly, které na kvadrokoptéru působí. Z toho plyne, že jakmile bude vztlak větší než velikost vnějších sil, které na kvadrokoptéru působí, musí být kvadrokoptéra schopna vykonávat posuvný a sférický pohyb. Tento obecný pohyb odpovídá šesti stupňům volnosti. Samotné ovládání pohybu stroje je pak zapříčiněno zvyšováním nebo snižováním výkonu jednotlivých motorů. Aby byla kvadrokoptéra bezpečná a odpovídala standardům, musí být tah. [25] [26]

6.2 Ovládání

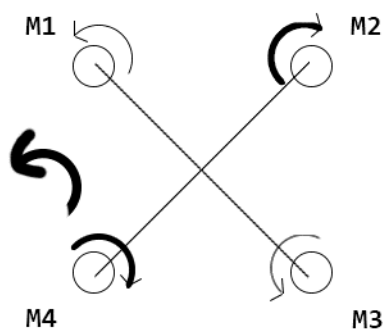
Jelikož můj testovací model kvadrokoptéry je do tvaru písmenem X, využiji ho zde pro vysvětlení principu ovládání kvadrokoptéry. Podrobným fyzikálním modelem se zde zabývat nebudu, neboť to není předmětem této práce.

Jak jsem již zmiňoval, u koptér je nutné, aby polovina motorů byla pravotočivých a polovina levotočivých, aby se zachoval nulový moment setrvačnosti dronu v klidu (viz. obrázek 6.2.1). Směr otáčení motorů můžete vidět na obr. 6.1. Nezáleží na směru otáčení motorů. Je možné směr otáčení obrátit, ale musí být vždy dodrženo, že polovina motorů musí mít opačný chod.



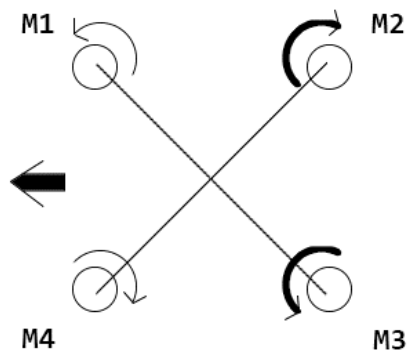
Obr. 6.2.1: Schéma motorů

Každá z vrtulí, která je upevněna na motoru dosahuje určité úhlové rychlosti, a to zapříčiňuje tah a reakční moment. Regulací otáček motorů lze zvýšit nebo naopak snížit tah motoru, který vytváří moment síly. Pokud chceme docílit rotace dronu proti směru hodinových ručiček, je zapotřebí zmenšit úhlovou rychlost na motorech 1 a 3, v důsledku toho se zmenší tah motorů a změní celkový moment působící kolem svislé osy. Tento moment je dán součtem momentů všech motorů. Výsledkem tedy bude pouze změna kursu doleva nikoliv však naklonění či sklon. Názorná ukázka změny kursu je na obrázku 6.2.2.



Obr. 6.2.2: Změna kursu doleva

Pokud chceme docílit pohybu směrem doprava, je nutné změnit výkon motorů 1 a 4 a zároveň zmenšit výkon motorů 2 a 3. To stejné platí, pokud chceme, aby dron letěl doleva. Zvýší se výkon motorů 2 a 3 a sníží se výkon motorů 1 a 4. Výsledkem je náklon dronu a zvýšený výkon vzdálenějších motorů od směru pohybu zapříčiní samotný pohyb dronu v požadovaném směru tedy doprava (viz. obrázek 6.2.3).



Obr. 6.2.3: Změna kurzu do leva bez natočení

Pro změnu výšky jednoduše zvýšíme výkon všech motorů a tím i tah vrtulí. Výsledkem je pohyb směrem nahoru. Pokud naopak snížíme výkon motorů, zmenšíme tím tah a dron bude směřovat svůj pohyb směrem dolů k zemi.

V našem případě lze pro výpočet výkonu motorů na základě informací obdržných od pilota použít následující rovnice (viz. 6.2.4):

$$M_1 = P + N + S - K \quad (6.2.4)$$

$$M_2 = P - N + S + K$$

$$M_3 = P - N - S - K$$

$$M_4 = P + N - S + K$$

Kde P je plyn, N je náklon, S je sklon a K je kurz. [25] [26]

7 Praktická část

V této části se budu věnovat stávajícímu řešení, kde popíšu, jak daná problematika funguje v praxi a následně vlastnímu řešení jak hardwarovému tak softwarovému. Popíšu zde jednotlivé etapy stavby samotného dronu, výběr součástek a výběr řídicího softwaru. Poté se budu věnovat samotné implementaci mnou vytvořeného programu v jazyce Python a nakonec popíšu, jak probíhalo testování a jakých výsledků jsem dosáhl.

7.1 Stávající řešení

Stávající bezpečnostní opatření koptér, které spadají do rodiny dronů (dále jen dronů) je díky neustále se vyvíjejícím technologiím na vysoké úrovni. Nejedná se jen o ochranu samotných dronů a jejich součástí, ale i o ochranu okolních objektů jako jsou auta či domy a v nemalé části i lidé. Přece jenom padající několika kilový dron z výšky 30 metrů určitě není nic příjemného navíc pokud padá v zastavěné ploše někde ve městě. Samozřejmě se může stát, že i bezpečnostní opatření selžou a dron se nevyhnutelně zřítí k zemi. V takovém případě pomůže jen štěstí, aby nedošlo k velkým škodám a případně i ublížením na zdraví.

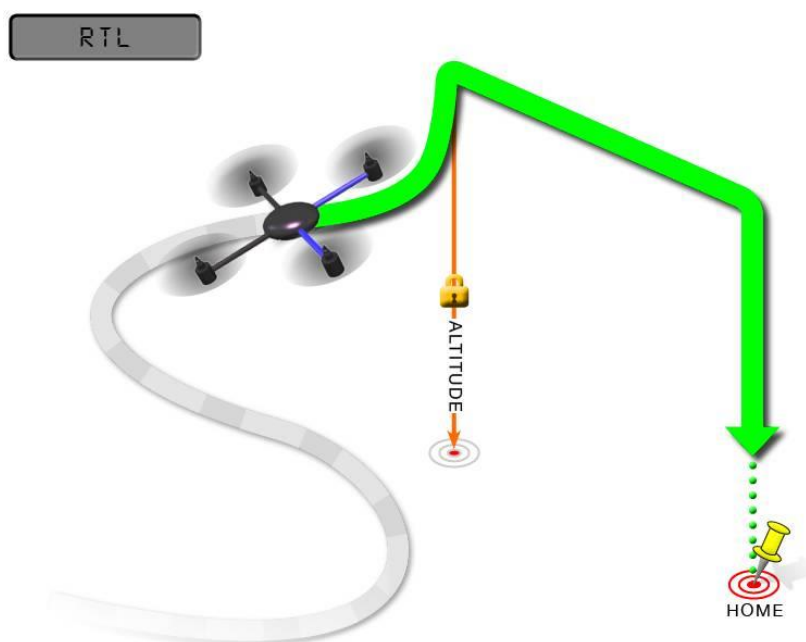
7.1.1 Bezpečnostní opatření při ztrátě signálu

V dnešní době je to jedno z hlavních bezpečnostních opatření, na které je kladen velký důraz. Pokud komunikace mezi dronem a pilotem vypadne, stává se dron takřka neovladatelným, což způsobuje potencionální bezpečnostní riziko. Z toho důvodu je to v dnešní době jakýsi standard mezi výrobci a vývojáři, kteří se zabývají technologií dronů a toto bezpečnostní opatření implementují i do levnějších variant. V dnešní době je na světě spousta výrobců a vývojářů, kteří se zabývají těmito technologiemi, a tak se různá implementační řešení mezi sebou liší, ale princip je u všech stejný.

Při zapojení baterie a tím i zapnutí všech systému dronu vždy dochází k uložení startovacího bodu dále jen home point, ale pouze za podmínky pokud k GPS je připojeno více než šest satelitů. Pokud k GPS není připojeno požadované množství satelitů, tak se home point neuloží a dron vás upozorní na to, že home point není uložen, a tím pádem není možný návrat do výchozí pozice při ztrátě řídicího signálu. Dron se pak chová následovně. Ve chvíli kdy ztratí řídicí signál, vyčká v aktuální pozici a po určitém časovém intervalu začne sám přistávat, ale bohužel v tom místě, kde ztratil signál. Takže pokud se dron zrovna nachází nad nějakým porostem nebo vodou, je to docela velký problém a vám nezbyvá nic jiného než doufat, že signál zase zachytí. V případě, kdy je k dispozici 6 a více satelitů, tak se dron chová následovně. Při zjištění, že došlo k výpadku komunikace mezi ovladačem a dronem, se dron přepne automaticky do režimu RTL (Return To Launch), vystoupá do předem definované

výšky, obvykle je to 15 metrů, a pomalu se začne přesouvat do místa, ze kterého startoval, tedy do home point. Jakmile je na pozici, pomalu začne klesat a těsně před přistáním ještě několik sekund levituje nad zemí a následně přistane a uzamkne motory (viz. obrázek 7.1.1.1). Dron v režimu RTL, používá pro získávání informací o výšce barometr. Jakmile je dron 6 metrů nad zemí tak využívá pro přistání informace ze sonaru, pokud je samozřejmě k dispozici. Pokud ne, využívá stále barometr.

Pokud to dron podporuje, je možné jednotlivé parametry režimu RTL nastavit dle vlastních představ. Je možné změnit výšku, do které vystoupá, rychlost klesání na přistání, rychlost stoupaní a rychlost letu. Dále je také možné nastavit interval levitování nad zemí.



Obr. 7.1.1.1: Diagram režimu RTL¹⁵

7.1.2 Systém stabilizace

Existuje více variant stabilizace dronu. Mám na mysli ty, které umožňují levitaci dronu na jedné pozici bez zásahu pilota. Při zafixování polohy by měl být dron schopen návratu do stejné pozice, pokud ho třeba odtáhnete rukou. Různé varianty využívají různé senzory. Existuje řešení, které využívá GPS modul a další senzory k tomu, aby dron setrval v jedné a té samé pozici bez ohledu na okolní vlivy prostředí. Místo GPS modulu se dá využít také kamera, která je směřována dolů a zaznamenává oblast, nad kterou se dron nachází, ale při neměnném povrchu toto řešení nemusí být optimální, neboť dron není schopen zafixovat řídicí body. To nastává, pokud se nacházíme nad vodou či rovnoměrným travnatým povrchem atd.. Dále zde máme řešení, které dokonce zabraňuje zásahům pilota, pokud je aktivován daný režim stabilizace. Opravdu užitečný je režim stabilizace výšky, kdy dron udržuje vámi zvolenou výšku. To se hodí, pokud se snažíte o rovnoměrný let například při natáčení videa. Pak zde

¹⁵ Dostupné z: http://ardupilot.org/copter/_images/RTL.jpg

máme stabilizační režimy určené pro začátečníky, kde není nutné hlídat výšku nebo směr natočení dronu.

Pro můj účel je nutné získat informace od všech senzorů, kterými řídicí jednotka disponuje. Tato stabilizace nebude určitě tak přesná jako již zaběhlá řešení, ale pro demonstraci funkčnosti určitě postačí. Jakmile přepnu režim letu na režim stabilizace, dron si zapíše aktuální GPS pozici, výšku, náklon a směr natočení a bude se snažit setrvat v této pozici.

7.2 Výběr softwaru

Výběr řídicího softwaru byl poměrně oříšek. Bylo nutné zvolit takovou variantu, která by umožňovala ovládat dron autonomně pomocí předem připraveného programu a také aby bylo možné měnit nastavení samotné řídicí jednotky. Další kritérium, které bylo nutné splnit, aby byl dron ovladatelný zasíláním příkazů do řídicí jednotky v reálném čase. To vyžaduje připojení mikropočítače k řídicí jednotce a provádění veškerých operací na něm. Vzdálený přístup k mikropočítači je možný realizovat například přes Wi-Fi připojení. Díky těmto kritériím se okru výběru zúžil natolik, že připadalo v úvahu jen opravdu pár řešení. Snažil jsem se najít opensource software a k tomu vhodnou řídicí jednotku, která by splňovala mé požadavky.

V první řadě jsem se obrátil na firmu Aerovision se kterou spolupracuji na své bakalářské práci a požádal je o radu, jakým směrem se vydat. Dali mi k dispozici řídicí jednotku Naza v2. Jedná se o set, který obsahuje řídicí jednotku, GPS modul a kompas. Jedná se o výrobek firmy DJI, který dodává také software pro tuto řídicí jednotku, ale bohužel se jedná pouze o nastavení různých letových charakteristik, kalibraci atak dále. Pro mé účely je nepoužitelná neboť se nejedná o open source řídicí jednotku. Jako další se v mém hledáčku objevila řídicí jednotka CC3D, která vychází z projektu Openpilot. Jedná se o open source řídicí jednotku, a jsou k ní k dispozici zdrojové kódy a řídicí pozemní stanice pro jednoduchá nastavení. Řídicí jednotka také podporuje nahrání svého vlastního firmwaru, který se vytváří kompilací zdrojových kódů. Jak se může zdát, pro mě ideální řešení. Implementace zdrojových kódů je v jazyku C, se kterým mám jistou zkušenost. Bohužel podpora tohoto projektu skončila a sním i všechna diskuzní fóra wikipedie, kde je popsána dokumentace jednotlivých funkcí a modulů. Naštěstí samotný projekt převzali a vylepšili vývojáři od LibrePilot, který je dostupný zde: <http://www.librepilot.org/>. V podstatě se jedná o stejný projekt jako Openpilot. Využívají stejnou skupinu řídicích jednotek, software pozemní kontrolní stanice je totožný a zdrojové kódy a knihovny vychází z těch, které vytvořili vývojáři Openpilot. Rozhodl jsem se, že využiji tento software a k němu řídicí jednotku CC3D pro stavbu a realizaci mého vlastního dronu. Problém nastal však v tom, že jsem neměl k dispozici funkční modul GPS, který by byl schopen komunikovat s výše zmíněnou řídicí jednotkou a fakt, že nebylo možné tuto řídicí jednotku ovládat pomocí připojeného mikropočítače. Takže jsem se vrátil na začátek a dále hledal vhodné řešení, které by splňovalo mé požadavky. Narazil jsem na projekt s názvem Dronekit dostupný na: <http://dronekit.io/>. Jedná se o nástavbu, která využívá

firmware projektu Dronecode dostupný na: www.dronecode.org. Dronekit podporuje programovací jazyk Python. Obsahuje již předem vytvořené knihovny a funkce, které se využívají při psaní vlastního programu. Výhodou tohoto řešení je, že výsledný program, lze simulovat v počítači, kde přesně vidíte, jak se dron chová a zda dělá to, pro co byl naprogramován. Další výhodou je, že nevzniknou žádné škody, pokud dron nefunguje podle vašich představ a nehrozí tak riziko zřícení a následné poškození dronu. Bohužel simulátor má omezené funkce a není zde možné simulovat všechno, na co si vzpomenete.

Dronekit využívá pro ovládání dronu open source firmware od dronecode, který je přístupný přes komunikační protokol MAVLink. Dronecode je open source platforma podporující široké spektrum dronů a robotů v rámci neziskové struktury, která je řízena Linux foundation. MAVLink je komunikační protokol, který zprostředkovává komunikaci mezi řídicí stanicí a řídicí jednotkou dronu. Protokol je schopen poskytovat informace o stavu dronu, ale také vysílat příkazy, které mají být provedeny a na tom právě staví mnou vybrané řešení využívající Dronekit, které využívá tento protokol pro vykonání vlastních příkazů. K provedení příkazů, které zasílá řídicí stanice přes MAVLink protokol do řídicí jednotky je potřeba onboard počítač. K tomuto účelu bohatě poslouží Raspberry Pi 2, které naprosto splňuje požadavky softwaru. Raspberry se jednoduše propojí s řídicí jednotkou dronu a následně mezi sebou komunikují přes již zmiňovaný komunikační protokol MAVLink.

Mnou vybraný open source software podporuje hned několik open source řídicích jednotek a několik closed řídicích jednotek.

Open source hardware:

- Pixhawk
- APM 2.x
- PX4
- Arsov AUAV-X2
- FlyMaple
- PixHawk Fire Cape []
- Erle Brain 2 []
- PXF Mini []

Closed hardware:

- NAVIO+
- VR Brain

Výše zmíněná varianta softwaru Dronecode s nástavbou Dronekit je pro mě nejvhodnějším kandidátem, a proto jsem se rozhodl jít touto cestou. A to z toho důvodu, že je velmi rozšířený, podpora

toho produktu je na vysoké úrovni, dokumentace více než srozumitelná a samotná aplikace skriptu středně složitá. Mnou implementovaný skript v jazyce Python se nahraje do paměti počítače Raspberry Pi 2, kde se následně spustí a provádí požadované úkony. Samotné propojení hardwarových součástek popisují v části stavba.

7.3 Výběr komponent

Samotný výběr použitých komponent se odvíjí od specifických vlastností dronu, a to za jakým účelem dron stavíme, neboli co bude dron vykonávat za práci. Pokud chceme výkonný dron, použijeme co nejlehčí rám, nejvýkonnější motory a tomu uzpůsobíme vrtule a regulátory. Samozřejmě taky záleží na použité baterii a důležitou roli také hraje zvolená řídicí jednotka. Takový dron určitě nebude mít velkou výdrž baterie.

V mém případě jsem výběr komponent podřídil řídicí jednotce. Od ní se odvíjel výběr všech komponent. Bylo nutné vybrat takovou řídicí jednotku, která bude obsahovat všechny potřebné senzory k letu a dále, aby ji bylo možné naprogramovat a pomocí připojeného mikropočítače ovládat. Jak jsem již zmiňoval v kapitole 8.1, postupně jsem zvážil a otestoval více variant, než jsem učinil konečný verdikt. Zvolené řešení je o něco dražší než ostatní řídicí jednotky, avšak splňuje všechny nutné parametry.

7.3.1 Řídicí jednotka Pixhawk

Jak jsem již výše zmiňoval, výběr samotné řídicí jednotky se odvíjel od softwaru, který jsem se rozhodl použít. Řídicí jednotka Pixhawk se hodí pro použití nejen v mém případě, a to je využití v dronu, ale i v křídle, vrtulníku, autě a dalších robotických platformách. Výhodou je, že se k ní dá připojit onboard počítač což je v našem případě již zmiňované Raspberry pi 2, které zastává úlohu řídicí stanice.

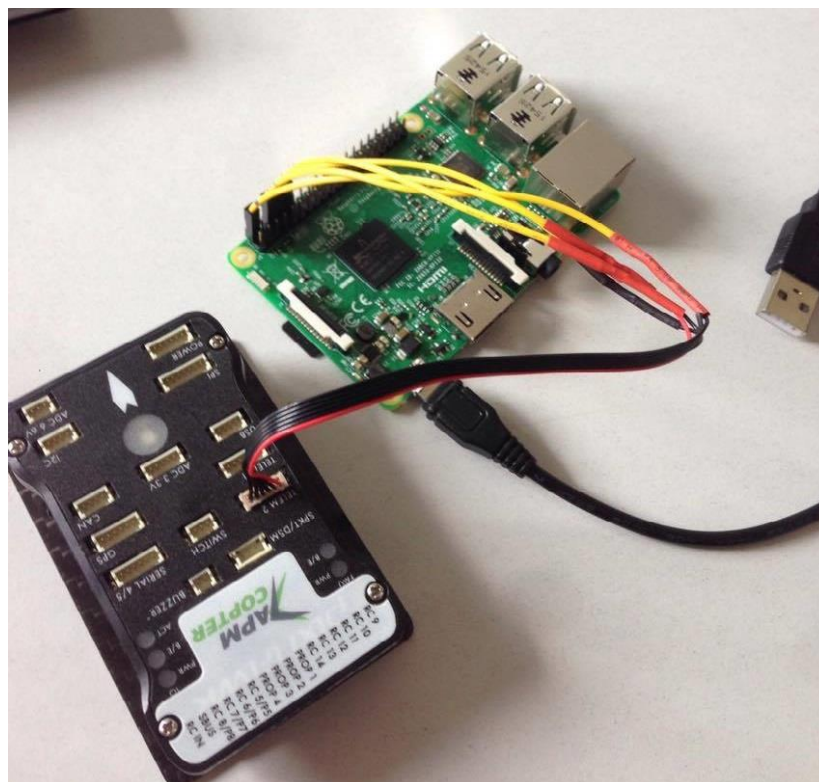
Řídicí jednotka obsahuje 32bit STM32F427 Cortex M4 core with FPU procesor, který je taktován na 168 MHz, disponuje 256 KB RAM pamětí, 2 MB Flash pamětí a 32 bit STM32F103 failsafe co-procesorem. Dále obsahuje tři osí gyroskop, tři osí akcelerometr, magnetometr a barometr. Jako volitelný modul je možné k jednotce připojit GPS s kompasem. Bohužel se v dnešní době už nevyrobí a bylo ji obtížné sehnat. Ale z vlastní zkušenosti můžu říct, že se jedná o velmi povedený kus, který zaujme širokou škálou použití. [27]

7.3.2 Ostatní komponenty

Jako onborad počítat jsem nejprve zvolil Raspberry Pi 3, ale po prvních testech jsem přišel na to, že není schopen komunikovat s řídicí jednotkou skrze sériové piny. Bohužel pro použití Raspberry Pi 3 a řídicí jednotky Pixhawk není popsán postup propojení a následná konfigurace. Proto jsem při výběru Raspberry nemohl tušit, že nejnovější model nezajistí bezproblémový chod. Nakonec se mi povedlo

řídící jednotku s Raspberry spárovat přes USB, ale jedná se o velmi nešikovnou variantu a navíc nestabilní jak testy ukázaly. Proto jsem neměl odvalu pomoci toho propojení testovat dron, neboť se mi několikrát stalo, že během kalibrace vypadla komunikace. Pro stabilní a spolehlivé spojení řídící jednotky a Raspberry je nutné využít sériové piny na straně Raspberry a port TELEM2 na straně řídící jednotky (viz. obrázek 7.3.2.1). Bohužel se komunikaci skrze toto propojení nepovedlo nakonfigurovat a byl jsem nucen zakoupit starší model Raspberry Pi 2 B.

Pro pohon dronu jsem zvolil čtveřici střídavých motorů od firmy DJI s parametry 2212/920KV a k tomu čtveřici 15A regulátorů napětí. Tato kombinace není moc výkonná, ale pro klidné létání bohatě postačí. Motory jsem osadil 12-ti palcovými karbonovými vrtulemi. Zdroj napájení jsem zvolil 11.1V 3S Li-Pol baterii, která dokáže udržet dron ve vzduchu cca 12 minut. Pro příjem signálu je k dispozici osmi kanálový rádiový přijímač Futaba R7008SB.



Obr. 7.3.2.1: Propojená řídící jednotka Pixhawk s Raspberry Pi 2

7.4 Stavba

Celkem jsem postavil dva drony. První dron sloužil jako pokusný exemplář a pokud by se mi povedlo ho zničit nebo poškodit, oprava by nebyla tak nákladná jako u druhého dronu. Na pokusném dronu jsem studoval, jak celý systém a jednotlivé součástky fungují a po sestavení a uvedení dronu do provozu sloužil pro nácvik ovládání. Při stavbě prvního dronu mi asistovala firma Aerovision, která mi poskytla jak materiál, tak zázemí a přispěla velmi cennými radami a zkušenostmi.

Stavbu jsem započal osazením motorů do rámu. K motorům jsem připájel pomocí pájky regulátory. Následovalo usazení řídicí jednotky. Bylo důležité, aby se jednotka nacházela ve vodorovné poloze a předek jednotky byl přesně zarovnáán s předkem rámu. Následovalo propojení jednotlivých součástí k řídicí jednotce. V první řadě jsem připojil regulátory, dále následovaly senzory (kompas, gps) a nakonec rádiový přijímač a napájení z baterie. Než jsem však zapojil napájení, bylo nutné prověřit, jestli napájení z baterie nepřesahuje maximální povolené napětí, které jednotka snese. Pokud by bylo napájení z baterie vyšší, než jednotka podporuje, bylo by nutné použít srážecí napětí, nebo použít samostatnou baterii pro napájení řídicí jednotky. Jakmile se povedlo roztočit motory, bylo napůl hotovo. Po sestavení dronu je nutné připojit řídicí jednotku k počítači a provést kalibraci všech senzorů a naprogramovat jednotku. Jako pozemní řídicí stanice jsem zvolil software Mission planner a QGroundControl. Jedná se o verzi pro vývojáře a je zde možné nastavit různá chování dronu, jednotlivé módy, výchylky, bezpečnostní opatření. Po nastavení a kalibraci jednotky jsem se rozhodl dron osadit vrtulemi a otestovat. Hned napoprvé se mi podařilo vzlétnout, ale bohužel dron díky chybě firmwaru nebyl schopen držet stabilní pozici a letěl neustále směrem doprava. To jsem vyřešil přehráním firmwaru na aktuální verzi.

Stavba druhého dronu probíhala stejným způsobem. Rozdíl byl v tom, že bylo nutné použít kvalitnější součástky a propojit řídicí jednotku s Raspberry. Po sestavení následovala kalibrace řídicí jednotky, senzorů a následná konfigurace a synchronizace řídicí jednotky s Raspberry. Pro komunikaci mezi počítačem a Raspberry je možné používat buď USB kabel, nebo vzdálený přístup přes lokální síť pomocí síťového kabelu nebo Wi-Fi připojení. Já jsem se rozhodl využívat vzdálený přístup skrze Wi-Fi. Pro vzdálený přístup existuje spousta aplikací. Moje volba padla na program Putty. Jedná se o telnet/SSH klienta pro Windows. Samotné Raspberry a řídicí jednotka Pixhawk jsou propojeny skrze port TELEM2 na straně Pixhawk a skrze sériové piny na straně Raspberry. Jak dron vypadá, můžete vidět na obrázku 7.4.1.



Obr. 7.4.1: Dron s řídicí jednotkou Pixhawk

7.5 Konfigurace řídicí jednotky

Konfigurace řídicí jednotky je jedna z nejdůležitějších částí při stavbě a testování dronu. Bez správné konfigurace by dron nemusel být schopen ani vzlétnout. V rámci konfigurace je nejdůležitější kalibrace senzorů. V první řadě je nutné zkalibrovat akcelerometry, poté se přistoupí ke kalibraci kompasu. Samozřejmě nesmíme zapomenout na kalibraci RC vysílače. Po kalibraci senzorů můžeme přistoupit k testování motorů. Motory musí být správně usazeny a každý se musí točit na správnou stranu. Pokud dojde k tomu, že dva motory, které se nachází vedle sebe, se točí na stejnou stranu, dron nepoletí. Totéž platí i pro případ, že každý z motorů bude mít jiné otáčky. Je nutné otestovat, zda při změně polohy páky na ovladači dron adekvátně uzpůsobí otáčky motorů. Například pokud chceme, aby ve výsledku dron letěl doleva, otáčky levých motorů musí klesnout a zvýší se otáčky pravých motorů. Z vlastní zkušenosti můžu říct, že pokud tento test neproběhne bez chyby, je potom velký problém přijít na to, co je vlastně špatně. V mém případě při konfiguraci řídicí jednotky tato situace bohužel nastala a trvalo poměrně dlouho, než jsem přišel na to, kde je chyba. Nakonec byla chyba v zapojení motorů. Konfigurace byla prováděna v softwaru QGroundControl, který je kompatibilní s řídicí jednotkou Pixhawk. Jedná se o poměrně intuitivní program a jeho grafické rozhraní je velmi příjemné. Pokud to řídicí jednotka umožňuje, lze zde nastavit opravdu mnoho parametrů. Jako například maximální vzdálenost, které může dron dosáhnout nebo maximální výška. Dále citlivost ovládání atd..

7.6 Implementace

Popis samotné implementace je rozdělen do dvou částí. První část se bude zabývat implementací bezpečnostního opatření neboli návratu do výchozí pozice při ztrátě řídicího signálu. Druhá část bude obsahovat popis implementace stabilizace dronu v prostoru pomocí senzorů. Jak jsem již zmiňoval, implementace probíhá v programovacím jazyce Python. Je nutné nejprve stáhnout a nainstalovat Dronekit a MAVlink do Raspberry, aby bylo možné program spustit a navázat tak komunikaci mezi řídicí jednotkou a Raspberry. Výsledný program se poté nahraje do Raspberry a následně spustí.

7.6.1 Návrat do výchozí pozice při ztrátě řídicího signálu

Aby byl dron schopen orientovat se v prostoru je zapotřebí získávat informace z více senzorů najednou. Pro zjištění pozice bylo nutné získat data z GPS modulu. Získaná GPS data jsou ve formě souřadnic (zeměpisná šířka, zeměpisná výška). Bez informací poskytnuté GPS modulem by nebylo možné dron lokalizovat a následně ho autonomně navést do určité pozice. Bez GPS modulu není možné vykonat většinu bezpečnostních opatření.

Mé první kroky v implementaci zdrojového kódu směřovali k ovládní dronu pomocí GPS souřadnic. Bylo třeba docílit toho, aby se dron autonomně přesunul z bodu A do bodu B, čehož také využívám ve výsledném zdrojovém kódu. Knihovna Dronekit umožňuje využití již stávající funkce, která po zadání vstupních parametrů a nastavení podmínek odešle a interpretuje příkaz řídicí jednotce skrze komunikační protokol MAVlink. Je také možné využít alternativy a vytvořit vlastní funkci, která přímo posílá příkazy skrze komunikační protokol MAVlink. Tato varianta je o něco složitější a méně přehlednější. Ve svém řešení využívám jak existující funkce, tak funkce a příkazy, které bylo nutné vytvořit, jelikož protokol MAVlink obsahuje více příkazů a stavů než samotná knihovna pokrývá.

Jakmile byl dron schopen přesunu z bodu A do bodu B bez zásahu pilota, bylo nutné vytvořit vstupní podmínky, které jsou ověřovány ve funkci *STATUS_CHECK()*, před samotným provedením návratu při výpadku řídicího signálu. Nejprve je však nutné ověřovat v nekonečném cyklu, který získává data z řídicí jednotky každých 0.02 s, což odpovídá 50 Hz obnovovací frekvenci řídicí jednotky, zda nastal výpadek řídicího signálu či nikoliv. Výpadek řídicího signálu se projeví buď změnou PWM hodnoty u kanálu pro ovládní plynu a to na hodnotu 900, nebo nastavením příslušného příznaku v řídicí jednotce. Minimální hodnota plynové páky v klidovém režimu je 1000. Při výpadku řídicího signálu program zareaguje přerušením nekonečného cyklu, následuje provedení kontroly stavu dronu a podle toho vyvolá příslušnou akci.

Pokud nastane situace, že řídicí signál vypadne, je v první řadě nutné ověřit, zda se dron nachází ve vzduchu či nikoliv. Pokud se dron nenachází ve vzduchu je velká pravděpodobnost, že se dron nachází na zemi. V tomto případě, je nutné ověřit, zda má odjištěné motory nebo ne. Pokud ne, nic se neděje a dron setrvává v aktuální pozici čili na zemi a není možné s ním vzlétnout. Pokud má dron

odemknuté motory program je ihned automaticky uzamkne pomocí funkce *Arming()*, aby nedošlo k nechtěnému vzletu či jiné nechtěné akci.

Pokud se dron nachází ve vzduchu, je nutné ověřit, zda je k dispozici výchozí pozice, ze které odstartoval. Výchozí pozice se zapisuje do globální proměnné *Home* při inicializaci dronu a po připojení GPS modulu k satelitům. V mém případě jsem nastavil 6 připojených satelitů jako minimum k tomu, aby byl dron schopen letu podle GPS souřadnic. Čím více připojených satelitů je, tím je pohyb a lokalizace dronu přesnější. Tímto opatřením jsem se snažil eliminovat nepřesnost dronu při přistání a samotném letu podle GPS souřadnic. Může nastat situace, že se výchozí pozice při inicializaci dronu zapsala do paměti, ale počet aktuálně připojených satelitů je menší než 6 nebo žádný. V takové situaci dron okamžitě vyvolá funkci *Landing()* a začne přistávat bez ohledu na to, kde se nachází. Bylo nutné vytvořit univerzální funkci, která umožní jednak okamžité přistání a jednak přistání po návratu do výchozí pozice. Pro úspěšné přistání je nutné získávat aktuální informace o výšce, ve které se dron nachází. Informace o výšce získávám z barometru, který je dostatečně přesný na to, aby umožnil hladké přistání. Tyto informace jsou uloženy v proměnné *vehicle.location.global_relative_frame.alt*. Odchyłka při měření činí 10 až 30 cm při ideálních podmínkách. Používám zde relativní výšku nad povrchem, nikoliv nadmořskou výšku. Kalibrace výškoměru se provádí při každé inicializaci dronu, kdy jeho výchozí pozice značí výšku 0 metrů. Dron také okamžitě začne přistávat v případě, že se nachází v okruhu 2 metrů od výchozí pozice. Vzdálenost od výchozí pozice se dá přenastavit i na 10 metrů. Většina stávajících řešení, ale využívá rádius okolo 2 metrů, proto jsem ho zvolil i já. Pro výpočet vzdálenosti od výchozí pozice bylo nutné implementovat funkci *Distance()*, která je schopna z aktuálně získaných souřadnic vypočítat vzdálenost od výchozí pozice. Algoritmus spočítá rozdíl mezi výchozím bodem a aktuální pozicí a následně umocní zeměpisnou šířku a výšku. Tyto dvě hodnoty sečte a vynásobí konstantou. Výsledkem je vzdálenost v metrech. Tuto funkci využívám dále i při kontrole, zda dron doletěl do požadované pozice. Bylo nutné zde počítat s menší odchylkou, neboť se mi při testování stalo, že dron nebyl schopen zaměřit přesnou pozici a následující úkony nebyly provedeny.

Při zjištění, že se dron nachází dále jak 2 metry od výchozí pozice a je k dispozici údaj o startovní pozici a GPS signál je postup následující. Dron vystoupá do bezpečné výšky vyvoláním funkce *Fly_to_alt()* a zahájí návrat do výchozí pozice. Jakmile se nachází nad bodem přistání, začne pozvolna klesat a nakonec přistane. Jako bezpečnou výšku pro návrat jsem zvolil 20 metrů. Kvůli odchylce při měření výšky pomocí barometru bylo nutné zde stanovit odchylku cca 0.3 metru. V této výšce odchylka nehraje žádnou roli. Aby dron nestoupal výše než má a následně zahájil další úkony, je nutné kontrolovat, zda se nachází v dané výšce či ne. Toho jsem docílil zavedením jednoduchého cyklu, který porovnává aktuální výšku získanou z barometru a výchozí výšku. Výše zmíněná odchylka je zde z toho důvodu, aby dron zbytečně nečekal na to, až se bude nacházet přesně ve 20 metrech, protože díky chybám při měření a okolním vlivům může dron překročit požadovanou výšku nebo se nacházet několik centimetrů pod požadovanou hodnotou a tím zpomalit či pozastavit provádění dalších úkonů neboť

podmínka, kterou jsem zvolil, nepovolí provádění dalších akcí pokud dron nedosáhne požadované výšky.

Po dosažení požadované výšky se dron vydá na cestu do výchozí pozice. Vytvořil jsem proto funkci *Fly_to_home()*, která pomocí GPS souřadnic porovnává aktuální a výchozí pozici. Jak jsem již zmiňoval, i zde bylo nutné zavést menší odchylku kvůli okolním vlivům a nepřesnosti v měření. Jakmile se dron nachází nad bodem, ze kterého startoval, zahájí klesání a následně dron přistane. Po přistání se vyvolá funkce, které uzamkne motory a dron se stane neaktivním.

Jako bonus jsem zde implementoval i kontrolu stavu baterie. V případě, že baterie klesne pod danou mez, dron okamžitě přistane. Je to z důvodu ochrany jak baterie tak samotného dronu. Pro zjišťování stavu jsem vytvořil listener, který vyhodnocuje stav baterie, pokud narazí na minimální povolenou hodnotu, nastaví proměnou *battery* na hodnotu *true* a program přeruší veškeré prováděné úkony a okamžitě přistane.

7.6.2 Stabilizace dronu v prostoru

Implementace této části zdrojového kódu byla podstatně náročnější než implementace předešlé části. Nejprve bylo nutné vymyslet, jak celý systém stabilizace vlastně bude fungovat a jak postupovat při implementaci. V první řadě jsem musel nastudovat stávající řešení a zvolit optimální variantu, která by fungovala, neboť Dronekit neumožňuje přímé ovládání motorů pomocí signálů. Volba padla na přepisování kanálu RC ovladače. V podstatě se jedná o simulaci RC ovladače pomocí softwarového řešení. Pro orientaci dronu v prostoru jsem se rozhodl použít GPS, kompas, barometr a gyroskop. Barometr poskytuje informace o aktuální výšce, kompas o aktuálním natočení, GPS o aktuální pozici a gyroskop o náklonu dronu. Všechny tyto informace bylo nutné zpracovat a převést na hodnoty, které zasílám do řídicí jednotky jako simulovaný signál z RC vysílače pro jednotlivé kanály (plyn, natočení, klonení a klopení). Nabízela se varianta, kdy bych dron pouze zafixoval do jedné pozice, ale tím by vzniklo riziko pohybu dronu například při silném větru. Moje myšlenka směřovala k vytvoření takové stabilizace, kdyby se dron autonomně snažil vyrovnávat rozdíl mezi aktuální pozicí a pozicí, kterou jsem uložil při přepnutí přepínače. Pokud by se dron vyskytl mimo pozici, byl by se sám schopen přemístit zpět do původní pozice.

Z toho důvodu bylo nutné využít PID regulátor. Regulátor se skládá ze tří složek: proporciální, integrační a derivační. Vstupem regulátoru je regulační odchylka a vystupuje akční veličina. V našem případě je vstupem aktuální požadovaná hodnota a výstupem hodnota, která se dále převede na hodnotu signálu.

Vytvořil jsem několik variant PID regulátoru, ale uspokojivé hodnoty poskytoval pouze již vytvořený regulátor a bohužel ne mnou. Proto jsem byl nucen tento regulátor využít i v mém řešení. Naštěstí se jedná o volně šířitelný kód, jehož licenci jsem uvedl ve svém zdrojovém kódu. I tak neposkytoval naprosto přesné hodnoty, neboť je zde mnoho proměnných, které mohou obsahovat

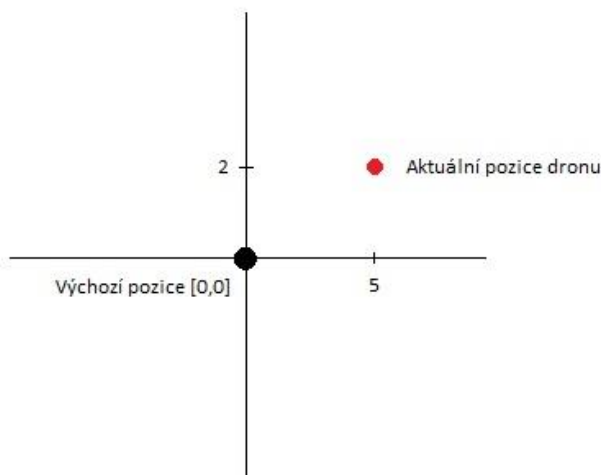
například chybu při měření, avšak pro mé potřeby stačil. Do budoucna by bylo možné tyto nepřesnosti eliminovat použitím více senzorů. Dále bylo nutné zjistit jak daleko se dron od výchozí pozice nachází. K tomu jsem použil převod GPS souřadnic do kartézské soustavy. Tento převod obstarává funkce $xy()$, která obsahuje 5 vstupních parametrů. Původní zeměpisnou šířku a výšku, aktuální zeměpisnou šířku a výšku a natočení dronu vůči severu čili údaj z kompasu. Algoritmus pracuje se dvěma body, a na základě jejich pozice a vzdálenosti od sebe je schopen určit o kolik je aktuální bod posunut oproti výchozímu. Výsledkem jsou dvě hodnoty, které udávají vzdálenost bodu v ose x a y. Pokud například získáme hodnotu [5,2] znamená to, že dron se nachází od výchozí pozice 5 metrů v pravo a 2 metry ve předu (viz. obrázek 7.5.2.1). Z toho je možné určit, jakým směrem musí dron letět a jakou vzdálenost musí urazit, aby doletěl do výchozí pozice. Pracuji zde v radiánech, a proto je nutné využívat pro převod funkci $to_rad()$, která převádí stupně na radiány.

Jakmile jsou GPS souřadnice převedeny, je možné výsledek poslat do PID regulátoru, který vypočte PID hodnotu, která se následně převede na výstupní signál. Pro správnou funkčnost PID regulátoru bylo nutné definovat správně jednotlivé složky. Definici těchto složek nastavuji podle řídicí jednotky, která je má již přednastavené. Je nutné je definovat pro každý kanál, který chceme ovládat. V mém případě to je výška, natočení a klonění a klopení. Dále je nutné definovat tzv. set point neboli bod, kterého chceme dosáhnout. U výšky je to výchozí uložená výška při zafixování pozice, u natočení je výchozí natočení a u náklonu v ose x a y je to 0, protože jsem zvolil absolutní střed jako pozici [0,0].

Při výpočtu hodnoty plynu, jsem zvolil PID rozsah +25 a -25. Na rozdíl od ostatních hodnot zde využívám pouze proporciální a integrační složku. Při přesažení těchto hodnot jednoduše nastavím hodnotu signálu na maximum nebo minimum. Tyto mezní hodnoty následně převádím na signál. Rozsah signálu je od 1000 do 2000 a neutrální hodnota je 1500. Dle toho jsem byl schopen převést PID hodnotu na hodnotu signálu pomocí funkce $throt_toPWM()$. Z důvodu, aby dron při nízké hodnotě PID neklesal příliš rychle je nastavena minimální hodnota signálu na hodnotu 1200. Při této hodnotě by měl pomalu a stabilně klesat. Pro převod náklonu používám funkci $to_PWM()$, která počítá i s maximální možnou hodnotou náklonu. Pro řídicí jednotku Pixhawk je maximální naklonění 50 stupňů. Všechny hodnoty, které vrací funkce pro výpočet signálu, je nutné zaokrouhlit na celé číslo. RC vysílač vysílá signál pouze v celočíselných hodnotách, proto je nutné simulovat stejné podmínky. Nakonec je nutné počítat i s gravitační konstantou a dalšími hodnotami pro převod z pohybu a akcelerace na hodnoty signálu, aby bylo možné tento pohyb eliminovat případně upravit. Všechny výpočty probíhají po přepnutí přepínače na ovladači, kdy se změní hodnota vysílaného signálu. Pro přepínač jsem zvolil kanál 5 a hodnotu 1505. Jakmile přepneme přepínač, signál nabyde hodnoty 1505, díky tomu program rozezná, že je aktivován režim stabilizace. Je nutné také změnit mód z *Manual* na *Guided*, aby bylo možné předat řízení počítači. Pro uložení informací přesně při přepnutí přepínače bylo nutné implementovat listener, který při zachycení změny signálu uloží aktuální hodnoty. Kontrola změny hodnoty pro výpočet a provedení pohybových úkonů probíhá v nekonečném cyklu. Obnovovací frekvence je nastavena na 50 Hz což odpovídá 0.02s. To znamená, že každý 0.02 s se obnoví získaná

data a provedou nové výpočty. Čím rychlejší obnovovací frekvence bude, tím dosáhneme lepších výsledků. Pro moje řešení bohatě vystačí obnovovací frekvence 50 Hz. Při vyšších frekvencích byl problém při synchronizaci řídicí jednotky a Raspberry.

Pokud dron a RC vysílač používá jiné maxima a minima PWM signálu, je nutné tyto hodnoty nakonfigurovat ve výsledném programu, jinak by mohlo dojít k nepřesnostem při ovládní, případně k havárii.



Obr. 7.5.2.1: Znázornění pozice dronu

7.7 Testování

Testování probíhalo ve více fázích. V první řadě bylo nutné otestovat funkčnost a letové vlastnosti dronu, dále zda výsledný program opravdu dělá to co má. Proto bylo nejprve nutné otestovat, jak se program chová v simulátoru, abych mohl odhalit případné nedostatky a zabránit tak nechtěnému poškození dronu. Simulátor jsem využíval ve vysoké míře. Jednak abych si ověřil funkčnost programu a jednak abych viděl jak se dron chová při různých situacích. Testování neproověřeného programu na exempláři dronu nepřipadalo v úvahu, neboť hrozilo nebezpečí zničení. Jelikož jsem měl k dispozici pouze jednu řídicí jednotku, musel jsem postupovat velmi opatrně. Navíc se moje řešení firmě Aerovision zalíbilo, a rozhodli se ho použít ve svém dronu, který právě dokončují. Jedná se o velmi nákladný projekt, který vyvíjí už delší dobu a jednotka, kterou mi poskytli, mají v úmyslu také použít.

7.7.1 Testování funkčnosti a letových vlastností dronu

Po sestavení a zapojení všech součástí bylo nutné ověřit jejich funkčnost a zkalibrovat senzory. Kalibrace a testování funkčnosti bylo prováděno při připojení řídicí jednotky k počítači, kde se připojila ke kontrolní stanici, která je schopna interpretovat data získaná ze senzorů a provádět různá nastavení a kalibrace. Po ověření funkčnosti jednotlivých modulů bylo nutné otestovat, zda do motorů teče proud,

a je možné je roztočit. Z důvodu bezpečnosti se tyto testy provádí s demontovanými vrtulemi. Následně bylo nutné zkalibrovat RC vysílač, aby nedocházelo k omezení rozsahu hodnot jednotlivých kanálů a tím generování nepřesného PWM signálu, což by mohlo zapříčinit nestabilitu dronu ve vzduchu. Nezbytnou součástí je kalibrace regulátorů. Špatně kalibrovaný nebo vadný regulátor dokáže nadělat velké škody. Proto je nutné nejprve otestovat, zda všechny motory mají stejné otáčky. Tato kontrola se provádí tak, že se pouze zvýší hodnota plynu a zbylé hodnoty, například náklon či natočení zůstávají v neutrální poloze. Pokud by se stalo, že jeden z motorů vynechává nebo má špatné otáčky, může dojít k tomu, že dron bude velmi nestabilní a v nejhorším případě se zřítí k zemi. Nedávno jsem byl svědkem havárie, kdy se dron za několik desítek tisíc korun zřítí k zemi a napáchal škody v řádů tisíců. Pád dronu zapříčinil špatný regulátor, který měly odhalit předletové testy. Testy se však zanedbali a výsledkem byl zničený dron.

Jakmile jsem se ujistil, že dron je schopen bezpečného a stabilního letu ovládaného pomocí RC ovladače, bylo možné přistoupit k testování autonomního ovládání pomocí Raspberry Pi 2. Před samotným letem řízeným přes Raspberry bylo nutné zjistit, zda je správně synchronizován s řídicí jednotkou a zda je možné pomocí něj ovládat dron. Tyto testy probíhali na zemi. Řídicí jednotka byla připojena k počítači a kontroloval jsem hodnoty získané z řídicí jednotky, které se interpretovali v kontrolní stanici a porovnával je s hodnotami, které mi poskytlo Raspberry.

7.7.2 Testování v simulačním programu

Jednou z hlavních výhod při implementaci tohoto řešení byla možnost využití simulačního programu, který je schopen výsledný program v omezené míře odsimulovat (viz. obrázek 7.6.2.1). Bylo zde možné odsimulovat chování mnou vytvořených funkcí a následně ověřit zda výstupní stavy nabývají správných hodnot. Většinu vytvořených a použitých funkcí jsem důkladně testoval v simulačním programu, abych si ověřil, že fungují správně. U programu, který se stará o bezpečnostní opatření při výpadku nebo ztrátě řídicího signálu bylo stěžejní testovat, přemístění dronu z bodu A do bodu B a také přistání. Bez správného provedení těchto úkonů by nebylo možné zajistit bezpečný návrat dronu, proto jsem kladl velký důraz na testování této části. Další důležitou součástí bylo, ověření aktuálního stavu dronu a podle toho nastavit další parametry a vyhodnotit jednotlivé podmínky jako je například zda má dron okamžitě přistát nebo jestli se nachází ve vzduchu. Pokud by některá z podmínek byla špatně nastavena a při určité akci nevyvolala správnou reakci, mohlo by dojít ke špatnému nebo nesprávnému provedení operací, které jsou nutné pro bezpečný návrat a přistání dronu.

Při implementaci stabilizace bylo nutné vytvořit PID regulátor, jehož výstup byl následně převeden na hodnotu, která nahradila PWM signál generovaný z RC vysílače. Pomocí tohoto adekvátního řešení, jsem byl schopen ovládat pohyb dronu pomocí Raspberry. Abych zjistil, zda PID regulátor generuje správné hodnoty, bylo nutné opět využít simulátor a simulovat zde jednotlivé pohyby

ve všech osách. Bohužel stabilizace jako celek nebylo možné v simulátoru otestovat a proto jsem se musel spolehnout na reálný exemplář dronu a veškeré zbylé testy provádět na něm. Samotná implementace stabilizace nezahrnuje pouze PID regulátor, ale nedílnou součástí zde byl také převod GPS souřadnic do os x a y. Pro testování tohoto algoritmu jsem nemusel využít simulátor, ale stačila pouze příkazová řádka, pásmo a trocha šikovnosti.

Většinu simulovaných stavů, jsem musel nejprve naprogramovat. Jedná se třeba o pohyb dronu. Vytvořil jsem nejprve simulaci letu, jakmile se dron nacházel před cílovým bodem, nasimuloval jsem výpadek řídicího signálu a ověřoval, zda můj program provede všechny úkony bez problému. Simulaci a testováním jsem strávil zhruba polovinu celkového času, který jsem věnoval bakalářské práci. Program pro simulování stavu není součástí zadání, a proto jsem ho neodevzdal spolu se zdrojovými kódy.



Obr. 7.6.2.1: Prostředí simulátoru

7.7.3 Testování v dronu

Po důkladných testech v simulačním programu jsem mohl přistoupit na otestování programu v reálném exempláři dronu. Nejprve však bylo nutné ověřit, zda softwarové ovládání skrze Raspberry funguje. Proto jsem první udělal několik krátkých cvičných letů, na kterých jsem vyzkoušel, zda je bezpečné ovládat dron skrze vytvořený program. Po té jsem přistoupil k testování stabilizace a bezpečnostnímu režimu. Jako první jsem se rozhodl testovat stabilizaci. Nejprve jsem demontoval vrtule z dronu, následně simuloval let a zároveň kontroloval údaje, které mi poskytuje program. Jelikož řešení je možné aplikovat i ve výšce 1 až 2 metry bylo možné uchopit dron do rukou a přemísťovat se s ním dle hodnot, které ukazuje program. Po ověření, že opravdu poskytuje správné údaje proto, aby byl program schopen dron stabilizovat v jedné pozici, jsem přistoupil na testování programu za letu.

Stejný postup jsem použil i při testování bezpečnostního opatření při výpadku řídicího signálu, avšak s tím rozdílem, že jsem zde nemohl použít funkci pro vystoupení do určité výšky. Proto jsem u všech funkcí nastavil výšku na 1 až 2 metry a řídil se pouze údaji, které mi poskytoval GPS modul. Po ověření, že údaje souhlasí, a že při dosažení potřebné polohy se začnou vykonávat potřebné a adekvátní úkony, jsem mohl přistoupit na testování za letu.

8 Závěr

V současné době se odvětví zabývající se technologií dronů neustále rozrůstá. Troufnu si hádat, že se jedná o technologii budoucnosti. S přibývajícím počtem dronů stoupá ale také důraz na bezpečnost. Jelikož se jedná o velmi komplexní systém, selhání jakékoliv součástky může znamenat katastrofu. Pak už záleží jen na tom, jak velká je porucha a zda je dron schopen bezpečného návratu na zem. V takovém případě může pomoci bezpečnostní opatření při poruše neboli failsafe. Existují různé typy těchto systémů a u dražších dronů jsou samozřejmostí. Bohužel v případě těch levnějších to není vždy samozřejmost. A proto jsem se rozhodl vytvořit si vlastní bezpečnostní opatření.

K tomu jsem potřeboval postavit dron, který by bylo možné ovládat skrze připojený mikropočítač k řídicí jednotce. U většiny komerčních dronů by nebylo možné mikropočítač připojit, protože se jedná o uzavřené systémy. Z toho důvodu bylo nutné zvolit takový hardware, který dovolí větší zásahy do systému a ovládání skrze řídicí kontrolní stanici nebo připojený mikropočítač.

Cenné rady a technologické zázemí mi poskytla firma Aerovision, která mi poskytla nezbytné součástky pro stavbu a realizace řešení. Výsledné řešení se bohužel nechová tak jako komerčně prodávané systémy, ale pro studijní a vývojové účely bohatě postačí. Zejména co se týče stabilizace, nebyly dosažené výsledky stoprocentní. I přesto se dron snaží udržet pozici a tolerance v řádů desítek centimetrů je při takovém řešení přípustná. Přesnějších výsledků by mohlo být v budoucnu dosaženo použitím více senzorů najednou a lepší filtrací dat. Nasazení sonaru by určitě pomohlo při určení přesnější výšky při startu a přistání. Dále tak by se daly využít i kamery při stabilizaci, kdy by program měl k dispozici více informací z více zdrojů. Dále by také určitě pomohlo více testovacích letů. Z důvodu použití řídicí jednotky, která se už nevyrobí a nasazení této řídicí jednotky v chystaném prototypu dronu, který připravuje firma Aerovision, bylo žádoucí, aby se nepoškodila.

I přesto byly všechny vytyčené cíle dosaženy. Pevně věřím v to, že odevzdaný program není ve fázi ukončení, ale budu na něm dále pracovat a vyvíjet. Mám vymyšlená další rozšíření, která zaujaly i firmu Aerovision a díky tomu jsme se dohodli na další spolupráci.

9 Literatura

- [1] "Co je dron, historie dronů", *Elektrina*, 2015. [Online]. Available: <http://www.elektrina.cz/co-je-dron-historie-dronu>. [Accessed: 2016-05-19].
- [2] "Unmanned aerial vehicle", in *Wikipedia: the free encyclopedia*, 2001-2016.
- [3] M. Vanžura, "Drony aneb co je na nich tak magického?", *airspotter*, no. 46, pp. 1-10.
- [4] T. Haman, "Přehled bezpilotních letounů", Bakalářská práce, Brno, 2010.
- [5] "Potenciál využití dronů v Armádě České republiky", *ozbrojeneslozky.cz*, 2015. [Online]. Available: <http://www.ozbrojeneslozky.cz/clanek/potencial-vyuziti-dronu-v-armade-ceske-republiky>. [Accessed: 2016-05-19].
- [6] "Komerční využívání dronů zažívá boom. Zároveň ale roste počet přestupků", *rozhlas.cz*, 2015. [Online]. Available: http://www.rozhlas.cz/zpravy/technika/_zprava/komercni-vyuzivani-dronu-zaziva-boom-zaroven-ale-roste-pocet-prestupku--1485575. [Accessed: 2016-05-19].
- [7] "Stejnoseměrné stroje", *vsb.cz*. [Online]. Available: <http://feil.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap22.pdf>. [Accessed: 2016-05-19].
- [8] "Working or Operating Principle of DC Motor", *Electrical4u*, 2011-2016. [Online]. Available: <http://www.electrical4u.com/working-or-operating-principle-of-dc-motor/>. [Accessed: 2016-05-19].
- [9] "Střídavý elektromotor", *Elektrina a magnetismus*. [Online]. Available: http://elektross.gjn.cz/elmotor_magnet/stridavy_mot/str_mot.html. [Accessed: 2016-05-19].
- [10] T. Zdařil, "Regulátor otáček pro střídavé motory", Bakalářská práce, Brno, 2012.
- [11] "Electronic Speed Controllers", *rcmodels.wiz.co.uk*, 2014. [Online]. Available: <http://www.rcmodels.wiz.co.uk/rc-guides/electric-rc-models-guide/electronic-speed-controllers-esc/>. [Accessed: 2016-05-19].
- [12] "Helicopters", *Explainthatstuff*, 2016. [Online]. Available: <http://www.explainthatstuff.com/helicopter.html>. [Accessed: 2016-05-19].
- [13] "Vrtule", in *Wikipedia: the free encyclopedia*, 2001-2016.
- [14] "Li-Pol akumulátory - proč se nejpokročilejší technologie neprosazuje?", *notebook.cz*, 2011. [Online]. Available: <http://notebook.cz/clanky/technologie/2011/Li-Pol-akumulatory>. [Accessed: 2016-05-19].

- [15] "Lithium-polymer: Substance or Hype?", *Batteryuniversity*, 2016. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype. [Accessed: 2016-05-19].
- [16] "Is Lithium-ion the Ideal Battery?", *Battery university*, 2010. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/is_lithium_ion_the_ideal_battery. [Accessed: 2016-05-19].
- [17] "Elektronika v modelu: Gyro", *RC noviny*, 2010. [Online]. Available: <http://www.rcnoviny.cz/2010/10/elektronika-v-modelu-gyro/>. [Accessed: 2016-05-19].
- [18] "Prostředky automatického řízení", *vsb.cz*. [Online]. Available: http://homel.vsb.cz/~jur286/prostredky_aut_rizeni/preklad.htm. [Accessed: 2016-05-19].
- [19] "Co je a k čemu slouží magnetometr?", *enviweb.cz*, 2008. [Online]. Available: <http://www.enviweb.cz/clanek/geologie/71131/co-je-a-k-cemu-slouzi-magnetometr>. [Accessed: 2016-05-19].
- [20] "Princip a fungování GPS", *radval.cz*, 2015. [Online]. Available: <http://www.rydval.cz/phprs/view.php?cislocianku=2005110301>. [Accessed: 2016-05-19].
- [21] "Global Positioning System History", *Nasa*, 2012. [Online]. Available: http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html. [Accessed: 2016-05-19].
- [22] "Vše o sonarech", *mrk.cz*, 2006. [Online]. Available: <http://www.mrk.cz/clanek.php?id=718>. [Accessed: 2016-05-19].
- [23] J. Juriga, "Mapování prostředí", Bakalářská práce, Brno, 2014.
- [24] "RC soupravy – něco o frekvencích, modulacích a podobných záhadách", *tomasrc.cz*, 2008. [Online]. Available: <http://www.tomasrc.cz/2008/10/rc-soupravy-neco-o-frekvencich.html>. [Accessed: 2016-05-19].
- [25] A. Uhlíř, "Konstrukce a řízení kvadrokoptéry", Bakalářské práce, Pardubice, 2013.
- [26] A. Ligocki, "Výšková stabilizace quadrotoru", Bakalářská práce, Brno, 2015.
- [27] "Pixhawk", *Pixhawk.org*. [Online]. Available: <https://pixhawk.org/modules/pixhawk>. [Accessed: 2016-05-19].

Přílohy

Seznam příloh

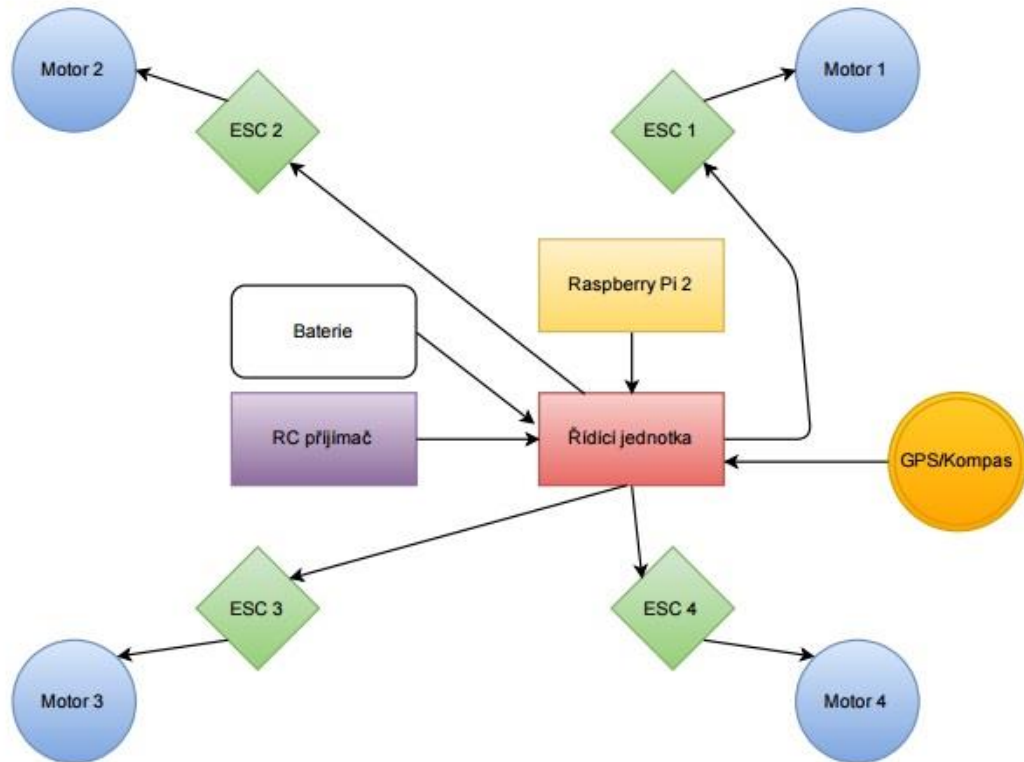
A	Obsah CD.....	46
B	XML diagram zapojení dronu.....	47
C	Stavba dronu	48
D	Technické parametry dronu	51

A Obsah CD

Na přiloženém CD se nacházejí následující soubory:

- *README* – Informace k přiloženému CD.
- *System_rizeni.pdf* – Bakalářská práce *Systém řízení letových charakteristik autonomního dronu* ve formátu PDF.
- *System_rizeni.docx* Bakalářská práce *Systém řízení letových charakteristik autonomního dronu* ve formátu docx.
- */Zdrojove_kody*
 - *failsafe.py* – Program v jazyce Python, implementace bezpečnostního opatření při ztrátě řídicí signálu s použitím knihovny Dronekit
 - *stabilisation.py* – Program v jazyce Python, implementace stabilizace v prostoru s použitím knihovny Dronekit
- *install_guide.txt* - Návod pro instalaci simulátoru a knihovny Dronekit

B XML diagram zapojení dronu



Obr. B.1: XML diagram zapojení dronu

C Stavba dronu



Obr. C.1: Rám dronu



Obr. C.2: Raspberry Pi 2 B



Obr. C.3: Propojení motorů a připravená kabeláž pro řídicí jednotku



Obr. C.4: Kompletní zapojení dronu



Obr. C.5: Testování letuschopnosti dronu

D Technické parametry dronu

Velikost ramene	25 cm
Výkon motoru	2212/920 KV
Velikost vrtule	12 palců
Použitá baterie	Li-Pol 5500 mAh, 11.1 V
Výdrž baterie	Cca 10 minut
Řídící jednotka	Pixhawk
Připojený počítač	Raspberry Pi 2 B
Výsledná cena celé sestavy	Cca. 15 000,- Kč
Hmotnost	1497 gramů

Tabulka D.1: Parametry dronu