

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDÍCÍ TECHNIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



PROTIKOLIZNÍ SYSTÉM PRO ROBOTICKOU
HELIKOPTÉRU

Autor práce : Jan Štercl

Vedoucí práce: Ing. Jan Chudoba

květen 2017

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

podpis autora

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval své rodině a svým přátelům za jejich podporu a toleranci vůči mé zaneprázdněnosti při tvorbě této práce. Velké poděkování patří vedoucímu mé závěrečné práce Ing. Janu Chudobovi, za jeho vstřícnost, pomoc poskytnutím potřebných informací a za čas, který mi věnoval.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Štercl Jan**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Protikolizní systém pro robotickou helikoptéru**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši existujících systémů pro detekci překážek a možných kolizí pro malé helikoptéry.
2. Zvolte vhodný systém pro robotickou helikoptéru poskytnutou pracovištěm vedoucího práce a navrhnete počet a rozmístění dostupných senzorů tak, aby vznikla dostatečná informace o blízkých překážkách při letu.
3. Navrhnete modifikaci řídicího systému robotické helikoptéry tak, aby neumožnil pohyb vedoucí ke kolizi helikoptéry s překážkami v jejím okolí.
4. Implementujte kód pro palubní počítač helikoptéry, proveďte demonstraci funkce systému a vyhodnoťte jeho spolehlivost v prostředí s vhodně jednoduchou strukturou překážek.

Seznam odborné literatury:

- [1] Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D., Probabilistic Robotics. Cambridge, Mass: MIT Press. 2005.
- [2] Roland Siegwart, Illah Reza Nourbakhsh and Davide Scaramuzza, Introduction to Autonomous Mobile Robots, MIT Press, 2011.
- [3] Tomáš Báča - Řízení vzájemně lokalizovaných bezpilotních helikoptér, diplomová práce – Praha, 2013
- [4] Elfes A., Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. Computer. 1989

Vedoucí: ing. Jan Chudoba

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

vedoucí katedry

děkan

V Praze dne 9. 2. 2017

Název práce: Protikolizní systém pro robotickou helikoptéru

Autor: Jan Štercl

Katedra: Katedra řídicí techniky

Vedoucí práce: Ing. Jan Chudoba

Anotace: Tato práce se zabývá návrhem protikolizního systému pro robotickou helikoptéru. Cílem je modifikace řídicího systému tak, aby se zabránilo střetu s objekty uvnitř budov. Již existující řídicí systém čtyřrotorového vrtulníku doplňujeme mikropočítačem Arduino Uno a s ohledem na nízkonákladovost řešení desítkou ultrazvukových senzorů. Experimenty, které provádíme na vytvořené nástavbě řídicího systému prokazují jeho funkčnost. Na základě experimentů přinášíme nápady, jak zlepšit vlastnosti protikolizních systémů navrhovaných v budoucnu. Řešení implementuje nultou úroveň Brooksovy subsumpční architektury a je tak základním stavebním kamenem pro to, aby mohl celý stroj v budoucnu být plně autonomní.

Klíčová slova: protikolizní systém, robotická helikoptéra, Arduino Uno, ultrazvukový senzor

Title: Collision avoidance system for a robotic helicopter

Author: Jan Štercl

Department: Department of Control Engineering

Supervisor: Ing. Jan Chudoba

Annotation: The topic of this thesis is a collision avoidance system design for a robotic helicopter. The aim is to modify a control system so as any possible collision in an indoor environment was prevented. We attached the existing control system with an Arduino Uno microcomputer and ten ultrasonic rangefinders, with emphasis on system to stay at low-cost level. The experiments done on our system shows that this solution is functional. Based on that experiments we bring some extra ideas how to make parameters of collision avoidance systems better in any future designs. The solution implements the zeroth level of the Brooks subsumption architecture which makes it the basic building stone for fully autonomous behaviour of the vehicle in the future.

Keywords: collision avoidance system, robotic helicopter, Arduino Uno, ultrasonic sensor

Obsah

Zadání	VII
Anotace	IX
1 Úvod	1
2 Stav problematiky	3
2.1 Historické souvislosti	3
2.2 Aplikace a příklady využití dronů	4
2.3 Moderní protikolizní systém	6
2.4 Aplikace protikolizních systémů	7
3 Hardware protikolizních systémů	11
3.1 Infračervené senzory	11
3.2 Ultrazvukové senzory	12
3.3 Laserové skenery	13
3.4 Kamery	14
4 Algoritmy protikolizních systémů	15
4.1 Základní principy	15
4.1.1 Reaktivita vs. proaktivita	15
4.1.2 PID regulátor	16
4.1.3 Kalmanův filtr	17
4.2 Pokročilé metody měření	17
4.2.1 Párované senzory	17
4.2.2 Vícenásobné odrazy	17
4.3 Modelové situace	18
4.3.1 Stěna	18
4.3.2 Roh	18
4.3.3 Paralelní stěny	18
4.3.4 Atypické překážky	19

4.3.5	Výpadek senzoru	19
5	Implementace	21
5.1	Robotická helikoptéra	21
5.1.1	Řídící struktura dronu	21
5.1.2	Umístění senzorů	22
5.2	SRF08 a SRF10	24
5.3	Získávání dat	26
5.4	Zpracování dat a regulace	28
5.4.1	Řízení blokováním výstupu	29
6	Experimenty	33
6.1	Detekce objektu v závislosti na úhlu měření a materiálu objektu	33
6.2	Detekce objektu v závislosti na rozměrech překážky	34
6.3	Vliv stínění na ultrazvukový senzor	36
6.4	Modelová situace - rovná zeď	37
6.5	Modelová situace - roh místnosti	38
7	Závěr	41
7.1	Návaznost a rozšíření	42
7.2	Poslední vůle autora	42
	Literatura	43
A	Obsah CD	I

Seznam obrázků

2.1	Schémata činnosti mobilních robotů podle R. Brookse. Převzato z [16].	7
2.2	Dron Phantom 4 Pro od firmy DJI. Převzato z [23].	9
3.1	Infračervený proximity sensor Sharp GP2Y0A21YK a jeho převodní charakteristika. Převzato z [25].	12
3.2	Laserový dálkoměr URG-04LX-UG01. Převzato z [32].	14
5.1	Fotografie dronu zapůjčeného pracovištěm vedoucího. Autorská fotografie.	22
5.2	Rozměry dronu. Autorský náčrt.	23
5.3	Schéma řídicí struktury dronu. Převzato z [31].	23
5.4	Návrhy na rozmístění ultrazvukových senzorů na dronu. Výseče znázorňují pozorovací úhel 72 stupňů senzorů SRF10. Autorský náčrt.	24
5.5	Použité ultrazvukové senzory. Převzato z [32].	25
5.6	Vyzařovací charakteristiky ultrazvukových senzorů. Převzato z [30].	25
5.7	Vývojový diagram zachycující hlavní smyčku programu v mikropočítači Arduino Uno. Autorský náčrt.	26
5.8	Datová struktura znázorňující výstup programu v mikropočítači Arduino Uno, odesílaná hlavnímu palubnímu počítači. Autorský náčrt.	27
6.1	Graf závislosti naměřené vzdálenosti na úhlu natočení vzhledem k překážce. Porovnání materiálů.	35
6.2	Nástavec na senzor SRF10 vytištěný 3D tiskárnou. Autorská fotografie.	36
6.3	Graf závislosti naměřené vzdálenosti na úhlu natočení vzhledem k překážce. Vyhodnocení vlastností tunelového stínění.	37
6.4	Modelové situace pro testování protikolizního systému dronu. Autorský náčrt.	38
6.5	Výstupní hodnoty regulátoru vstupující do desky regulátorů rychlostí. Modelová situace - rovná zeď.	39
6.6	Výstupní hodnoty regulátoru vstupující do desky regulátorů rychlostí. Modelová situace - roh místnosti.	40

Kapitola 1

Úvod

„ . . . The helicopter is much easier to design than the airplane but is worthless when done.“

Wilbur Wright, Ohio, 1909

Přestože první letadlo a vrtulník od sebe na počátku dvacátého století dělily jen tři roky, vývoj v oblasti letadel byl výrazně rychlejší. První letadlo bylo sestrojeno bratry Wrightovými v roce 1904 a již deset let poté letadla plnila průzkumné, později i bojové mise v první světové válce. Oproti tomu helikoptéry potřebovaly celých 13 let, než byly schopné uletět pouhý kilometr [1].

V té době to bylo terčem posměchu, což dokládá například článek Wilbura Wrighta v deníku Dayton Herald z 15. ledna roku 1909 (ze kterého pochází i citát z úvodu této kapitoly), ve kterém autor kritizuje neúčinnost a nepraktičnost vrtulníků.

Po více než sto letech vidíme, jak moc se Wilbur Wright spletl. Helikoptéry jsou díky svým vlastnostem, zejména manévrovacím schopnostem, nenahraditelné ve výbavě bezpečnostních i záchranných složek a také mnohých dalších odvětvích.

Dnes jsou klasické helikoptéry dokonce nahrazovány menšími letouny – drony. Kromě toho, tyto bezpilotní helikoptéry otevírají nové možnosti. Podpořit výzkum v oblasti dronů je jedním z cílů této práce.

V naší tezi se věnujeme protikoliznímu systému pro drony s myšlenkou, že umění vyhnout se srážce s prostředím je základní předpoklad pro autonomii dronů ve všech aplikacích, kde se již nyní drony používají, ovšem zatím jen na zodpovědnost člověka s dálkovým ovládáním.

Právě o projektech, které by dobrý protikolizní systém posunul kupředu ve vývoji, hovoříme v kapitole 2. Ve stejné kapitole rozebíráme, kde se protikolizní systém vzal a proč je pro nás tak důležitý. Třetí část této kapitoly se věnuje již existujícím systémům, kde už hraje protikolizní systém nějakou roli. V tomto jsme však omezeni

převážně na pozemní zařízení, protože protikolizní systémy jsou autory opomíjeny. Ve většině případů, pokud protikolizní systém mají, pouze to zmíní a nerozvádí, nebo ho nemají vůbec. Za vrtulníky situaci „zachraňuje“ jedna světlá výjimka, která je již komerčně využívána.

V kapitole 3 se zabýváme zásadní částí protikolizního systému, která je doslova jeho očima, tedy senzory. Pokrýváme všechny typy senzorů, které je možné použít pro naši aplikaci. Tím je myšleno omezení na prostředí v interiéru a pohyb ve vzduchu, čímž jsou vyřazeny některé metody měření, které by buď venku nebo na pozemních zařízeních jinak bylo možné použít.

Kapitola 4 pojednává o klasifikaci algoritmů protikolizních systémů a popisuje nejpoužívanější algoritmy regulace. Dále nabízí návrhy na zlepšení měření, analyzuje možně chování protikolizních systémů v situacích, kterým může v našem prostředí čelit.

O našem vlastním řešení je kapitola 5. Diskujeme v ní stroj, který máme k dispozici a jak budeme zasahovat do již existujícího řídicího systému dronu. Vysvětlujeme, jak jsme dospěli k rozložení senzorů, které jsme použili. Dále popisujeme konkrétněji vlastnosti námi využitých senzorů. V závěru kapitoly o implementaci zahrnujeme funkcionalitu našich programů nasazených do mikropočítače Arduino Uno a hlavního palubního počítače dronu.

Název kapitoly 6 mluví sám za sebe. Kromě vyhodnocení funkce regulátorů řešíme problematiku vlivu povrchů objektů na měření a ovlivňování charakteristiky senzorů stíněním.

Samotný závěr práce, tedy kapitola 7, je věnována zhodnocení celé práce a navržení možností, jak na tuto práci navázat.

Kapitola 2

Stav problematiky

2.1 Historické souvislosti

První říditelná helikoptéra se na světě objevila v roce 1907. Zasloužil se o to francouzský inženýr Paul Cronu svým dvacetisekundovým letem. Mezi další úspěšné letce můžeme zařadit Dána Jacoba Ellehammera, který se dokázal stabilně vznášet, nebo Španěla Raula Paterase de Pescaru, ten uletěl s přestávkami během deseti minut 800 yardů se šestnáctivrtulovým strojem. První kvadroptéra vznikla v roce 1922, sestavil ji George de Bothezad. Tento vrtulník financovaný vládou Spojených států amerických letěl téměř dvě minuty [1].

Výrazný pokrok při létání se čtyřrotrovou helikoptérou zaznamenal Etienne Oehmichen, francouzský konstruktér, který se poprvé vznesl v roce 1923 a v květnu následujícího roku uletěl kilometrový okruh [1, 2].

Letoun, který funguje na stejném principu jako dnešní drony, se objevil v roce 1956. Autorem stroje pojmenovaného „Convertawings Model A“ je již zmíněný George de Bothezad. Poprvé se objevuje charakteristická konstrukce ve tvaru písmene „H“ a ovládání pomocí dvou dvojic vrtulí, z nichž dvě protilehlé rotují opačným směrem než zbylé dvě úhlopříčně umístěné [3]. Tento systém umožňuje dodnes používané řízení pomocí tří úhlových výchylek (vybočení, klonění, klopení¹).

Na přelomu tisíciletí začaly trh zaplňovat cenově dostupné a lehké komponenty, tedy různé senzory, miniaturní kamery, řídicí jednotky, atd. To pochopitelně vyústilo v masové rozšíření UAV² a hledání jejich nových a originálních využití.

¹ anglicky yaw, pitch, roll

² zkratka z anglického Unmanned Aerial Vehicle - bezpilotní vzdušný stroj

2.2 Aplikace a příklady využití dronů

V této části pokryjeme podle našeho názoru nejzajímavější a nejužitečnější aplikace týkající se kvadrokoptér, které se doposud vyskytly. Zmíníme i prozatím experimentální tvorbu s velkým potenciálem do budoucna.

Možný úspěch těchto systémů tkví v jejich automatizaci. Pokud chceme v budoucnosti využívat letouny autonomní (nebo alespoň poloautonomní), neobejdeme se bez implementace protikolizního systému, jak bude podrobněji vysvětleno dále v této kapitole.

Letecká fotografie má za sebou přes 120 let existence. Technologie však od dob připevňování fotoaparátů k papírovým drakům a poštovním holubům pokročila. Používání dronů při pořizování obrazových záznamů nebo dokonce přenos videa k operátorovi v reálném čase již dnes řadíme mezi klasické, zažité aplikace.

S velkým úspěchem toho využívají realitní kanceláře, které pro nabízené nemovitosti pomocí dronu sbírají podklady pro takzvané virtuální prohlídky. Podle [4] jsou pak takové inzeráty až o 400 % navštěvovanější než ty bez videa.

Ve sportovním odvětví se skupiny výzkumníků zabývají SEF problémem³. Příkladem může být práce francouzsko-italsko-amerického kolektivu [5], ve které jsou popisované algoritmy pro filmování sportovní události skupinou helikoptér s kamerami tak, aby se maximalizovala spokojenost diváka a minimalizovala uražená vzdálenost dronů.

Na ČVUT v Praze je výzkumná skupina zabývající se multiagentními robotickými systémy, která spolupracuje s Národním památkovým ústavem [6]. Jejich robotické vrtulníky s kamerami snímají interiéry historických budov. Tato obhlídka by restaurátorům s lešením trvala měsíce, použití záběrů z dronů toto přenáší do řádu týdnů. Skupina pod vedením Dr. Sasky už začala experimentovat také s laserovým skenováním [7].

Jinou příležitost nabízí malým létajícím kamerám filmový průmysl. S drony se velmi jednoduše natáčí pohledy z výšky a velmi zajímavé je jejich použití v akčních scénách. Jako příklad můžeme uvést scénu s motorkami z bondovky Skyfall z roku 2012 [8]. Zcela novou myšlenku představili na serveru Kickstarter režisér Luis Avilez a producent Alberto Pablo Rivera, kteří měli v úmyslu natočit svůj thriller Final Minute jen s použitím dronů [9]. Tento projekt ve veřejné online sbírce neuspěl. Dle našeho skromného názoru je však jen otázka času, než tento nebo nějaký jiný film využívající jen kameramany-drony vznikne.

Kvadrokoptéry nalézají využití jako předvoj při prohledávání člověku nepřístup-

³ z anglického Sport Event Filming - filmování sportovních událostí

ných nebo nebezpečných oblastí. Například práci [10] vulkanologů National Geography padly při prohledávání terénu (průzkum nestálého vzdušného proudění, úniky toxických nebo velmi teplých plynů) za obět dva letouny. Jak říká autor Sam Cossman v rozhovoru [11], drony s různými kamerami a senzory hrály při jejich práci důležitou roli, protože by se výzkumníci jinak nemohli přiblížit tak blízko k tekutému magmatu. Autoři dokázali v kráteru sebrat vzorky pro zkoumání života jednoduchých organismů ve vysokých teplotách. Navíc, kombinací několika tisíců snímků z dronu a speciálního softwaru vznikl první 3D model kráteru sopky.

Drony se prosazují ve výbavě bezpečnostních složek. Vedle nespočetného množství aplikací jako ostraha objektů, monitorování hranic, věznic, stávek i demonstrací a třeba také vyšetřování je možné i použití při záchranných operacích. Například při záplavách ve státě Texas v roce 2015 byla kvadrokoptéra nasazena při hledání přeživších. Použití dronu přináší nesporné výhody, konkrétně to, že jsou oproti klasickým helikoptérám malé a relativně tiché, tedy méně nápadné, mohou se více přiblížit ke sledovanému cíli a výrazně rychleji se mohou nasadit do akce [4]. Dalším faktorem jsou náklady, taktéž ve prospěch čtyřvrtulového robotického stroje. Na ty se však nehledí v případě, že by lidská posádka nemohla vylézt vůbec kvůli nevhodným povětrnostním podmínkám, například při hledání pohřešovaných osob pomocí termokamer v bouřce. V takovém případě se na finanční náročnost nehledí a život dronu se riskuje.

Abychom nezmiňovali jen použití robotického letounu pro pořizování fotografie nebo videa, zaměříme se nyní na jiný náklad než kameru. Většina takových aplikací je ale zatím jen na úrovni experimentu.

Jednou z nich je doručovací služba. Zásilkou může být jídlo, léky, spotřební zboží a další objekty, to je omezeno pouze nosností a doletem dronu. Za příklad vezměme projekt Amazon Prime Air [12]. Ten je od prosince 2016 ve zkušebním provozu ve Spojeném království. Firma Amazon doručuje autonomními letouny až pětilibrové⁴ zásilky do oblastí s doletovou dobou 30 minut od základny. Masovějšímu rozvoji zatím brání současné nastavení zákonů, předpisů a vyhlášek, které jsou navíc v různých zemích odlišné. Koncept projektu je blíže popsán v dokumentu [13]. O podobný pokus o zařazení autonomních zařízení do standardního letového provozu se pokusila také společnost Google [14].

Projekt zaštitěný společností Microsoft se zabývá prevencí infekčních onemocnění přenášených komáry. Drony na sobě nesou malou past na hmyz a jsou vybavené systémem, který rozliší komáry, které je schopné zakonzervovat pro potřeby laboratorního zkoumání, od ostatních druhů hmyzu. Z nasbíraných vzorků lze po

⁴ 5 liber = 2,268 kg

testech v laboratoři určit výskyt některého známého viru (například ptačí chřipky, horečky dengue, atd.) nebo i nového, dosud neznámého. Do budoucna výzkumníci plánují udělat část analýzy přímo na zařízení a zprovoznit cloudovou databázi virů k porovnání s testovanými vzorky. Zatím jsou autoři podle svých slov limitováni výpočetním výkonem, což plánují vyřešit jak předpokládaným pokrokem v oblasti hardwaru, tak i návrhem efektivnějších nástrojů pro analýzu. Vyvíjí také algoritmus vydávající prognózu, která nemoc je potenciálně nebezpečná. To by měla být dostatečná prevence k podchycení viru dřív, než se stačí rozšířit mezi lidmi [15].

Zajímavých aplikací pro kvadrokoptéry, kterým by kvalitní protikolizní systém nabídl velké množství nových možností je nespočetně mnoho, včetně takových, které nemohou z různých důvodů pomýšlet na hromadnější rozšíření. Za všechny nápady bez hlubšího smyslu nechť je pranýřována myšlenka venčení psa dronem. Naštěstí převažují a stále přibývají hlavně kvalitní nápady. Bohužel nemůžeme dát prostor všem, ač nás to velmi mrzí.

2.3 Moderní protikolizní systém

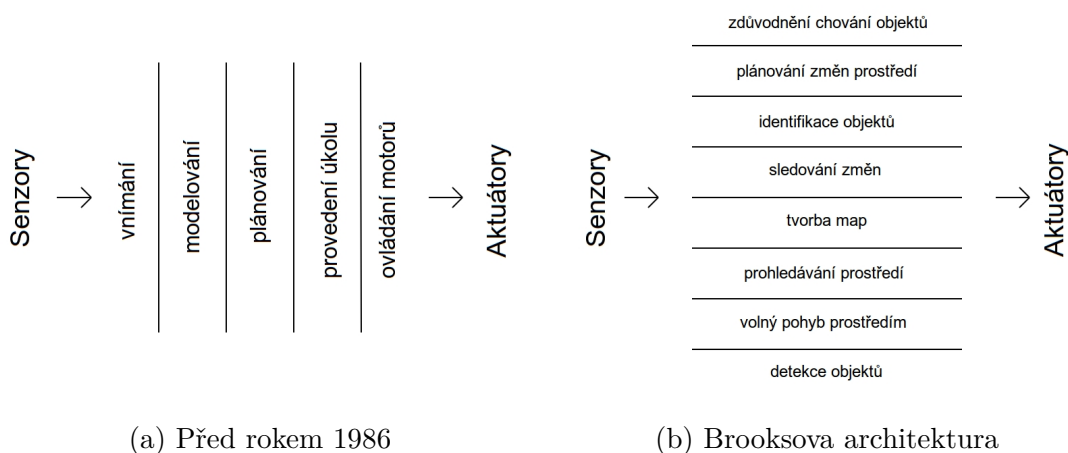
Problém předcházení kolizím je poměrně starý. O protikolizním systému jako takovém však můžeme mluvit až od roku 1986. S velmi důležitou ideou tehdy přišel člověk, který se do té doby věnoval hlavně zobrazovacím metodám (tomografii) a zpracování obrazu.

Revoluční nápad Rodneyho Brookse se poprvé objevil v jeho práci [16]. Australanův myšlenkový pochod je znázorněn na obrázku 2.1. Levá polovina obrázku ukazuje v té době používaný systém řízení, synchronizovaný podle kroků všech obsažených senzorických systémů. Vidíme, že algoritmus běžící ve zpětnovazební smyčce staví všechny dostupné informace na stejnou úroveň a v každém kole programu mozek centralizovaného systému vyhodnotí další kroky zařízení. Velkou nevýhodou tohoto uspořádání je poměrně náročné vkládání nových funkcionalit, protože v takovém případě se musí změnit celá logika vyhodnocování budoucích akcí.

Brooks zavádí distribuovaný systém, který nazval „subsumption architecture“⁵. Pro jednotlivé úkoly autonomního zařízení jsou navrženy samostatné systémy s vlastními mikrokontrolery, fungující nezávisle a asynchronně, bez existence nějakého většího centrálního počítače.

Všechny úkoly jsou rozděleny do úrovní a platí, že funkce vyšších vrstev modelu předpokládají funkce všech nižších úrovní. Čím nižší vrstva je, tím specifitější jsou

⁵ Tento název nemá rozumný český překlad. My o ní budeme hovořit jako o Brooksově architektuře. Někteří autoři ovšem používají počestný termín subsumpční architektura.



Obrázek 2.1: Schémata činnosti mobilních robotů podle R. Brookse. Převzato z [16].

požadavky na ní. Jediná komunikace, která probíhá mezi moduly zajišťuje právě prioritizaci nižších vrstev a případné blokování výstupů vrstev vyšších.

Základ modelu – pomyslná úroveň 0 – je detekce objektů, přesněji zabránění kolize s nimi, ať už jsou statické či nejsou. A právě vytvoření tohoto nultého stupně je jedním z cílů této práce.

Na protikolizní modul navazuje bezcílné putování prostorem. Jak bylo již zmíněno, zahrnuje to všechny úkoly nižších úrovní, v tomto případě zabránění srážky s cizími tělesy. V podobném smyslu model pokračuje přes cílené prohledávání prostředí, tvorbu map, sledování změn ve „statickém“ prostředí, identifikace známých objektů, plánování změn okolí, až k nejobecnějšímu z úkolů, ke změnám plánů na základě vypořádaného chování objektů v prostředí.

Hlavní výhodou tohoto uspořádání je možnost budovat celý řídicí systém postupně, přidáním a následně úplným odladěním jedné funkcionality. Navíc je celá struktura velmi snadno rozšiřitelná, protože každá úroveň má vlastní mikroprocesor. Již zavedené části zůstávají v provozu, jen je třeba nové verzi správně nastavit prioritizaci úrovní.

2.4 Aplikace protikolizních systémů

Prvním příkladem je práce mexických autorů [17]. Jejich cílem bylo vytvořit chytrý invalidní vozík. To se jim povedlo použitím 26 sonarů po obvodu kolečkového křesla. Regulační algoritmus zpomalí pohyb vozíku v případě, že je v určité vzdálenosti překážka, při dalším přiblížení pohyb zastaví zcela. Uživateli je poskytována zpětná vazba zvukovými signály, včetně případu, že i přes regulaci došlo ke kolizi. Do budoucna připravují autoři kompatibilitu i s jiným než pákovým ovládáním (tedy na-

příklad pohybem obličeje, očí, obočí, jazyka nebo hlasem).

Jiným druhem postižení se zabývá skupina Mohameda Rehana. Její produkt také využívá ultrazvuk, ale je mnohem jednodušší. Řídící deska spojuje jen mikroprocesor, jeden ultrazvukový senzor, bzučák a napájecí baterii. Zařízení nosí nevidomý chodec přímo na sobě a jsou detekovány překážky před ním. Na rozdíl od zařízení pro vozíčkáře je zde zvuková odezva nutná [18].

Z jiného soudku je spotřební elektronika, ve které jsou protikolizní systémy už řadu let zavedeným standardem. Jsou to robotické vysavače. Jejich sensorický systém, založený na infračervených senzorech je schopný už od počátku detekovat možné kolize se statickými objekty a prohlubně, například schody. S detekcí osob a jiných pohyblivých objektů se však začalo experimentovat poměrně nedávno. Jedno z prvních experimentálních řešení [19] funguje díky externí kameře. Dokud však systém bude pracovat na tomto principu, zůstane podle našeho názoru experimentem.

Pokud doslovně přeložíme „collision avoidance system“ jako „kolizím předcházející systém“, můžeme se zde zmínit o systému WiSafe asijského dua výzkumníků [20]. Ti řeší problém velmi specificky. Úkolem systému není vyloženě vyhnout se cizímu objektu, ale právě předejít srážce tím, že je na blížícího se chodce upozorněn řidič vozidla, se kterým se chodec míjí. Princip je přímočarý. Poloha jdoucího člověka je určena pomocí systému GPS a je následně oznamována, jak název napovídá, klasickým Wi-Fi signálem do okolí, kde ho mohou přijmout vozidla v dosahu.

Velmi aktuální je článek ze země s největším výskytem dopravních nehod – Indie [21]. Zabývá se srážkou s velkými zvířaty, konkrétně s kravami. Hinduisticky založená Indie považuje krávu za posvátné zvíře. Krávy mají právo volného pohybu a pokud se vyskytne kráva na vozovce, má přednost před vozidly. Zranění nebo zabití krávy je podle místního zákona trestné a obyvatelé se tedy musí vyvarovat srážky s krávou. K tomu jim může pomoci například protikolizní systém. V tomto případě je použita metoda počítačového vidění. Systém má vytvořenou rozhodovací hranici na zálkadě 2200 pozitivních i negativních obrázků z trénovací množiny dat.

Světlá výjimka zmiňovaná v úvodu přichází. Jsou jí známe bílé kvadrokoptéry prodávané firmou DJI. Nejnovější verzi DJI Phantom 4 Pro můžeme vidět na obrázku 2.2. Podle [22] je to první komerčně vyráběný dron, který je schopen se bezpečně vyhnout překážkám bez chyb. Výrobce [23] uvádí, že je toho tento dron schopný v pěti směrech, do čtyř stran a směrem k zemi a v prvních čtyřech je schopný udělat samostatný úhybný manévr. K vidění do stran používá Phantom kombinaci infračervených senzorů a stereokamery, dolů míří ultrazvukový senzor.

Společnost DJI však zašla ještě dál. Monopolní postavení na trhu v oblasti protikolizních systémů si lidé z DJI snaží vytvářet tím, že sensorické systémy zmíněné



Obrázek 2.2: Dron Phantom 4 Pro od firmy DJI. Převzato z [23].

v předchozím odstavci vloží do jedné krabičky, navíc s inerciální měřicí jednotkou, a udělají z toho externí modul⁶ [24]. Vývojářům tak nabízí možnost nezabývat se nejspodnějšími vrstvami Brooksova modelu a pracovat na pokročilejších funkcích. Výrobky této firmy jsou hodnoceny jako velmi kvalitní. Proti nim však stojí jejich vysoká cena (aktuálně 1499 USD, tedy přibližně 35000 Kč za Phantom, o třetinu méně za externí sensorický modul Guidance), kterou se firma s výsadním postavením neštítí nadsadit.

⁶ Což se jim mimochodem povedlo. Samozřejmě i ten externí modul, ale my máme na mysli hlavně prosazení monopolu, o čemž svědčí nedostatek podobných komerčních zařízení jako je Phantom i odborných článků k tématu protikolizních systémů.

Kapitola 3

Hardware protikolizních systémů

Přestože jsou protikolizní systémy navrhovány většinou individuálně na míru jednotlivým projektům, základ, tedy nějaký senzor a různé minipočítače mají všechny. Pro kolizím předcházející systémy se používá několik typů senzorů. Jejich obecné charakteristiky si přiblížíme v této podkapitole a zhodnotíme jejich vhodnost pro naši úlohu.

Tato část rešerše bude základem pro výběr vhodných senzorů v naší vlastní implementaci, o které bude pojednáno v kapitole 5.

Prostředí, kterého se týká naše práce nás připravuje o některé metody sbírání informací z prostředí a tedy je zde můžeme jen zmínit. Příkladem je odometrie, vzhledem k tomu, že se s dronem pohybujeme ve vzduchu nebo GPS a jiné lokalizační systémy, protože naše práce je zaměřená na vnitřní prostředí.

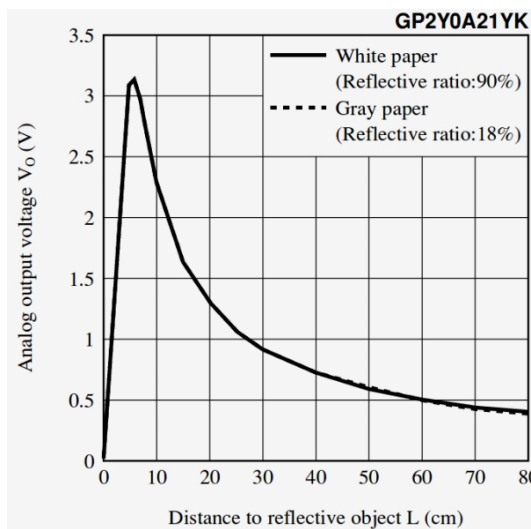
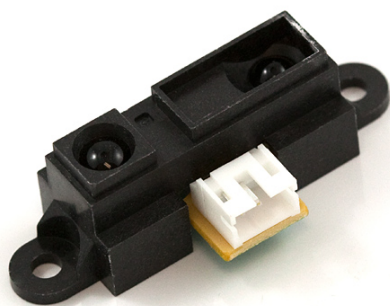
3.1 Infračervené senzory

Proximitní infračervený senzor vysílá infračervené světlo, většinou jako modulovaný signál, kvůli možným externím zdrojům. Příjímač senzoru čeká, zda se k němu světlo dostane od překážky zpět. Pokud ano, pak na základě triangulačního principu určí vzdálenost.

Z používaných senzorů se ty, které využívají infračervené záření, používají hlavně v nízkonákladových aplikacích. Jejich dosah je v řádu desítek centimetrů a jejich pozorovací úhel můžeme určovat v jednotkách stupňů. Cena se pohybuje po převodu na koruny v řádu stovek.

Jako charakteristický příklad za skupinu infračervených senzorů uvádíme senzor GP2Y0A21YK od firmy Sharp (viz obr 3.1) [25].

Výhodou infračervených senzorů je jednoznačně jejich nízká cena a v určitých situacích je výhodou relativně úzká vyzařovací charakteristika. Mezi nevýhody na-



Obrázek 3.1: Infračervený proximní senzor Sharp GP2Y0A21YK a jeho převodní charakteristika. Převzato z [25].

opak patří poměrně nízký dosah a závislost na reflexivitě měřeného povrchu [26], což prakticky znemožňuje použití pouze infračervených senzorů v zařízeních, které se budou pohybovat větší než malou rychlostí. Reflexivita ve většině situací senzor neovlivní, jediný problém může nastat, když bude senzor čelit černé, málo odrazivé ploše. V takové situaci změří, že je překážka daleko, resp. není v dohledu a ta přitom může být jen kousek od něj. V práci [27] tento nedostatek autoři řeší přidáním ultrazvukových senzorů, ve venkovních aplikacích, například [28], autoři používají GPS jednotku.

3.2 Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory, neboli sonary (z angl. SOund Navigation And Rangigng), jsou zařízení, které pro měření fyzikálních veličin používají zvukové vlny.

Senzor funguje na principu „time of flight“ – měří dobu od vyslání zvuku do přijetí signálu odraženého. Z rychlosti šíření vzduchu a změřeného časového intervalu vydá požadovaný výstup, v našem případě vzdálenost.

Typické rozsahy, které je možné ultrazvukovým senzorem měřit¹, se pohybují od minimální vzdálenosti jednotek centimetrů do několika metrů. Typická velikost zorného pole je okolo 60 stupňů. Vyrábí se samozřejmě také kusy s větším rozpětím, ale existují i typy s velmi úzkou vyzařovací charakteristikou, které mají navíc několikanásobně větší dosah než infračervené senzory.

¹ Máme na mysli ultrazvukové senzory pro mobilní robotiku, ať už vzdušnou, či pozemní. Rozhodně ne sonary používané ponorkami s kilometrovými dosahy.

Jako příklad pro sonary mějme senzory SRF08 a SRF10, které jsou podrobněji popsány v části 5.2.

Hlavní nevýhodou sonarů je, že rychlost šíření zvuku je závislá na teplotě, na povětrnostních podmínkách [26] nebo frekvenci, se kterou senzor pracuje. Čím vyšší je frekvence, tím větší je útlum, což značně zkracuje dosah. Použití nižší frekvence je možné, ale v tomto případě bude měření ovlivněné rušením, tedy méně přesné [29]. U ultrazvukových senzorů však žádné rušení nemá takový vliv, aby to redukovalo výstup na dvě hodnoty, jako u infračervených senzorů. Jednou z výhod je stejně jako u infračerveného senzoru poměrně nízká cena, která je v tomto případě přibližně stejná [30]. Neméně důležitý je ale jejich široký pozorovací úhel. Díky tomu je možné pokrytí modelu vozidla či letounu ze všech stran jen přibližně desítkou senzorů.

V drtivé většině aplikací s drony má ultrazvukový senzor své zastoupení, byť by tam byl jen jediný, jako například u autorů [28], kde senzor měří výšku nad povrchem. Využití tohoto senzoru je zde velmi vhodné, protože maximální úhel náklonu kvadrokoptéry z vodorovné roviny se přibližně rovná polovině zorného úhlu ultrazvukového senzoru, tedy naměříme s velkou pravděpodobností právě vzdálenost kolmo k zemi.

3.3 Laserové skenery

Tato zařízení pracuje podobně jako ultrazvukový senzor, jen je místo zvuku využíváno šíření světelného signálu. Dražší senzory tohoto typu používají otočné zrcadlo a jsou tak schopné získat data o vzdálenosti v rovině, většinou té horizontální.

Dosah laserových senzorů se pohybuje řádově v jednotkách až desítkách metrů. Jsou také velmi přesné. Tvar jejich měřicího paprsku je velmi tenký kužel. Přesnost těchto senzorů můžeme udávat v milimetrech. Pak už jen záleží na konstrukci daného senzoru, jakou část 2D prostoru znemožní měřit.

Senzory tohoto typu se spíše než pro protikolizní systémy používají pro mapování a lokalizaci v prostoru, tedy vyšší než nultou úroveň Brooksova modelu (viz 2.3). Předpoklady pro to mají oproti předchozím senzorům hlavně díky přesnosti (infračervený senzor i ultrazvuk měří s přesností na několik centimetrů) a také kvůli dosahu. Když totiž protikolizní systém nevidí při své činnosti na nějaké hranice prostředí, nedělá mu na rozdíl od zařízení zjišťujícího svou polohu výraznější potíže, spíše naopak.

Právě pro funkci mapování používá laserový senzor autor práce [31] a jako příklad si zde uvedeme právě model, který používal. Senzor můžeme vidět na obrázku 3.2. Konkrétně tento typ dokáže zabrat úhel 240 stupňů, ale dosah 20-5600 v milimetrech



Obrázek 3.2: Laserový dálkoměr URG-04LX-UG01. Převzato z [32].

ho odsuzuje téměř výhradně k využití uvnitř budov.

Výhoda tohoto zařízení (nehovoříme o základní verzi, ale o té skenující celou rovinu) je v množství a kvalitě informace, kterou dostaneme, tedy skoro celou měřenou oblast v polárních souřadnicích (vzdálenost a úhel) s přesností na milimetry, resp. desetiny stupně [32].

3.4 Kamery

Další metodou vnímání prostředí vhodnou k využití uvnitř budov může být použití kamer. Využívá se dvou principů – aktivní a pasivní triangulace.

Aktivní princip spočívá v tom, že se snímaným směrem vysílá laserový paprsek. Vzdálenost je pak počítána z polohy obrazu osvětleného bodu na čipu kamery, projekčního úhlu laserového paprsku, ohniskové vzdálenosti objektivu kamery a známé vzdálenosti zdroje laserového paprsku a středu optiky kamery [26].

Pasivní triangulace je založena na použití stereokamery, tedy dvojice kamer umístěných ve známé vzdálenosti od sebe. Výstup potom vzejde z triangulace se souhlasnými významnými body z obou kamer [26, 31].

Kapitola 4

Algoritmy protikolizních systémů

V této kapitole se budeme zabývat řešením algoritmických otázek, se kterými se můžeme setkat při řešení tematiky protikolizních systémů. Právě algoritmy jsou možná ještě důležitější než hardware těchto systémů a proto jim také věnujeme samostatnou kapitulu. Budeme probírat možnosti chování protikolizních systémů, prezentovat vlastní nápady, porovnávat je s existujícími a navrhovat vylepšení existujících algoritmů.

4.1 Základní principy

To, jak algoritmy fungují můžeme podle rozdělovat podle několika kritérií. Principy fungování protikolizních systémů můžeme rozdělit na ty, které používají pro zabránění kolize pouze aktuální data a ty, které v sobě mají zahrnutý prvek předvídání. Přestože jde systém vystavět pouze na proporcionálním řízení, ve velké většině algoritmů se vyskytuje nějaká složitější forma regulace, ať už je to PID řízení, Kalmanův filtr nebo nějaké další metody.

4.1.1 Reaktivita vs. proaktivita

Jak se uvádí v práci [33], čistě reaktivní systémy, tedy ty nejzákladnější, pracují se stavy. Mají definované situace a algoritmus je krok po kroku vede, jak se v takových situacích chovat. Například autoři [34] sice nemají pouze reaktivní systém, ale práce se stavy je u nich konkrétně zmíněna a realizována a jejich práce je proto příhodným příkladem. Rozdělují si naměřené výsledky do různých zón nebezpečí. 40 cm považují za bezpečnou vzdálenost. Mezi 25-40 centimetry už řídicí počítač přebírá kontrolu nad řízením a snižuje rychlost dronu až do úplného zastavení. Pokud by se přesto v průběhu tohoto zpomalovacího manévru dron dostal do vzdálenosti menší než 25 cm, řídicí systém vydá povel k pohybu druhým směrem, aby kolizi určitě zabránil.

Jako alternativu ke stavovému algoritmu staví Karthick [33] jím navržený bezstavový algoritmus, který pracuje na principu navržení vhodné „neomezené“ trajektorie. Systém předpokládá vždy existenci trajektorie vedoucí k cíli. V každé smyčce algoritmu vyhodnotí aktuální hrozby, pro které případně provede úhybný manévr. Na základě těchto dat neustále aktualizuje trajektorii vedoucí k cíli, s ohledem na manévrovací možnosti a aktuální rychlost. Autor však uznává, že v prostředí s větším množstvím překážek nebo dynamickém prostředí systém kvůli výpočetní náročnosti není příliš efektivní a reaktivní algoritmy zde mají výhodu. Svůj algoritmus ale hájí faktem, že pokud žádná „neomezená“ trajektorie neexistuje, použití reaktivního systému vede ke ztrátě letounu, kdežto jeho algoritmus předvídá a do takové bezvýhodné situace by se neměl dostat.

Další možnost jak bránit kolizím je například pomocí kamerového 3D vidění, tedy dvou kamer umístěných blízko sebe. Hrabarovo zařízení [35] generuje přibližně 3000 bodů, takzvaných voxelů (3D alternativa pixelů). Všechny body mohou mít buď stav „obsazený“ nebo „volný“. V modelu začínají obě možnosti s pravděpodobností 0,5. S každým dalším párem obrázků z kamer se upraví množina voxelů a pravděpodobnost u aktuálních bodů. Systém je potom řízen pomocí takto vzniklé 3D mapy.

4.1.2 PID regulátor

Proporcionálně-integračně-derivační regulátor může být užitečný při stabilizaci chování dronu. Při správném nastavení tří konstant reguluje velmi přesně. Na své kvadrokoptěře ho používají například Nishay Gupta se svými společníky [34].

Jak napovídá název, regulátor je složen ze tří složek. Zjednodušeně se dá popsat tak, že proporcionální složka se stará o přítomnost, integrační o minulost a derivační o budoucnost.

Proporcionální složka reguluje výstup na základě aktuálně změřené a požadované hodnoty, podle znaménka rozdílu těchto hodnot zasáhne do výstupu jedním nebo druhým směrem. Integrační složka sčítá celkovou hodnotu chyby, která se projeví v příslušném směru ve výsledku. Derivační, předvídá budoucí vývoj odečtením chyby v předchozím kole algoritmu a té aktuální.

Jednoduchou strukturu PID regulační smyčky můžeme vidět níže, v části Algoritmus 4.1. Základem jsou předem definované konstanty – proporcionální, integrační a derivační, které umožňují měnit vliv jednotlivých složek regulátoru na celkový výstup. Vstupem algoritmu je takzvaný setpoint, neboli offset, žádaná hodnota výstupu. Regulace poté probíhá v cyklu, ve kterém se nejprve měří aktuální hodnota regulované veličiny, poté se počítají chyby. Dále se počítá derivační a integrační složka již zmíněným způsobem. Poslední řádek značí sečtení všech tří složek dohromady.

 Algoritmus 4.1: PID regulace.

```

1  define: CP, CI, CD
2  input: setpoint
3  repeat
4    currentValue = measure()
5    previousError = error
6    error = setpoint - currentValue
7    derivative = error - previousError
8    integral = integral + error
9    output = CP * error + CI * integral + CD * derivative

```

4.1.3 Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je filtrační algoritmus poměrně hojně využívaný v mobilní robotice. Nám za příklad poslouží práce [27], ve které autoři používají Kalmanův algoritmus k fúzi dat z ultrazvukových a infračervených senzorů.

Podstata Kalmanova filtru je průměrování odchylek naměřených hodnot od odhadovaných hodnot a jejich nejistot [36]. Zajímavé na něm je, že nepočítá s chybami měřících přístrojů a nepoužívá žádné informace o šumu.

Algoritmus střídá dokola dvě fáze. Nejprve probíhá odhad vzdálenosti z několika matic, druhý krok je aktualizace na základě sensorického měření.

4.2 Pokročilé metody měření

V této sekci zmíníme dvě myšlenky, které sice nepoužijeme v naší implementaci, ale jsou natolik zajímavé, než abysme je prostě přešli. Mohou posloužit jako podklad pro budoucí vylepšení našeho systému.

4.2.1 Párované senzory

Zajímavý nápad se objevil v práci ze singapurské univerzity [28]. Kromě několika filtrů a PI regulátoru se v programu těchto výzkumníků objevuje myšlenka zpřesnění měření na základě porovnání s protilehlým senzorem, tedy pokud se výstupní vzdálenost u jednoho senzoru zvýší, u protilehlého senzoru, který je s ním v páru by se teoreticky měla o stejný kus snížit, a naopak.

4.2.2 Vícenásobné odrazy

Z německého pracoviště Ulmu vzešel systém, který využívá ultrazvukové senzory, jejichž zorné pole mají velký překryv. Toto má následně sloužit k velmi přesné lokalizaci překážek i s použitím ultrazvukových senzorů se širokým záběrem.

Dirk Bank [37] osadil své zařízení dokola v kruhu 24 ultrazvukovými senzory s 60 stupňovým rozhledem, přičemž najednou vyšlou signál odpovídající 3 senzory, které se navzájem neruší. Různé echo pak přijmou i všechny pasivní senzory. Poté následuje signál od další trojice sensorů a po zaznamenání dat ze všech osmi trojic algoritmus vydává poměrně přesný model.

Taková funkcionality je dnes ušetřena tak velkého množství sensorů. Například inteligentní ultrazvukový senzor SRF08, který používáme v našem řešení zaznamenává kromě první ozvěny ještě 16 dalších [38].

4.3 Modelové situace

V této části prodiskutujeme více i méně typické problémy, se kterými se může protikolizní systém setkat a jak by je měl ideálně řešit.

4.3.1 Stěna

Základní překážkou je klasická svislá stěna. Pokud na ní dron míří přímo, není o čem debatovat a letoun by se měl zastavit. Otázkou je co dělat, pokud na stěnu míří šikmo. Jedna možnost je, že by měl také zastavit, druhá a logičtější varianta je, že by vrtulník měl v bezpečné vzdálenosti kopírovat profil stěny.

4.3.2 Roh

Roh by měl být pro protikolizní systém paradoxně lehčí překážkou než stěna. Pokud narazí na roh v konvexním smyslu, měl by dron jednoduše zastavit, pokud narazí na konkávní roh, jedná se vlastně o obyčejnou stěnu z předchozí sekce. V takovém případě by bylo vhodné použít variantu pohybu kolem zdi a po dosažení hrany pokračování ve směru požadovaném řidičem.

4.3.3 Paralelní stěny

Ač může nadpis evokovat něco jiného, s řešením tohoto problému se nejčastěji setkáme ve vertikálním směru, tedy při měření vzdáleností od stropu a od podlahy. Stabilizace výšky (vzdálenosti k povrchu) je pro všechny kvadroptéry, které mají plnit průzkumné účely téměř samozřejmostí.

Pokud si například chce dron držet aspoň metr od podlahy i od stropu, v situaci, kdy výška místnosti má pod dva metry musí situaci řešit. Jsou dva rozumné způsoby. Protože se většinou reguluje vzdálenost od země, může si dron opatrně držet metrový

odstup a začít klesat až když to bude nezbytně nutné. Druhý způsob (a také námi preferovaný) je ten, že se helikoptéra drží v polovině vzdálenosti mezi oběma povrchy.

4.3.4 Atypické překážky

Kromě základní překážky, obyčejné zdi, se mohou vyskytnout i některé jiné, specifické, se kterými si systém při špatně navrženém rozložení senzorů neporadí. Infračervené senzory mají problémy s černými plochami a nemusí zaznamenat tenké překážky. Ultrazvukové senzory mívají potíže, pokud míří na plochu pod velkým úhlem. Kamera by nemusela fungovat dobře mezi skleněnými stěnami. Problémy by mohly nastat při výskytu husté mlhy nebo dýmu. Jak bylo ale již naznačeno, toto není primárně záležitost algoritmizace. Nicméně je třeba na to při návrhu systému myslet a zakomponovat více druhů senzorů, které se budou svými vlastnostmi schopné zastoupit.

4.3.5 Výpadek senzoru

I přesto, že zařízení je před každým letem pečlivě kontrolováno, není vyloučeno, že může dojít k přerušení toku dat od některého ze senzorů.

Krátkodobý výpadek by mohl být způsobený nějakou nečistotou, která se na senzoru uchytlí a později odpadne. Spíše však může nastat výpadek dlouhodobý, stálý, zapříčiněný přerušením kabeláže.

V obou případech bychom doporučovali řídicím systémem zakázat jakýkoliv pohyb ve směru nefunkčního senzoru a v případě potřeby pro orientaci zvolit nějaký otočný manévr. Jistější řešení by však bylo na místě přistát.

Kapitola 5

Implementace

5.1 Robotická helikoptéra

Pracoviště vedoucího nám poskytlo pro tuto úlohu čtyřrotorovou robotickou helikoptéru, kterou můžeme vidět na obrázku 5.1. Rozměry dronu jsou vyznačeny v obrázku 5.2.

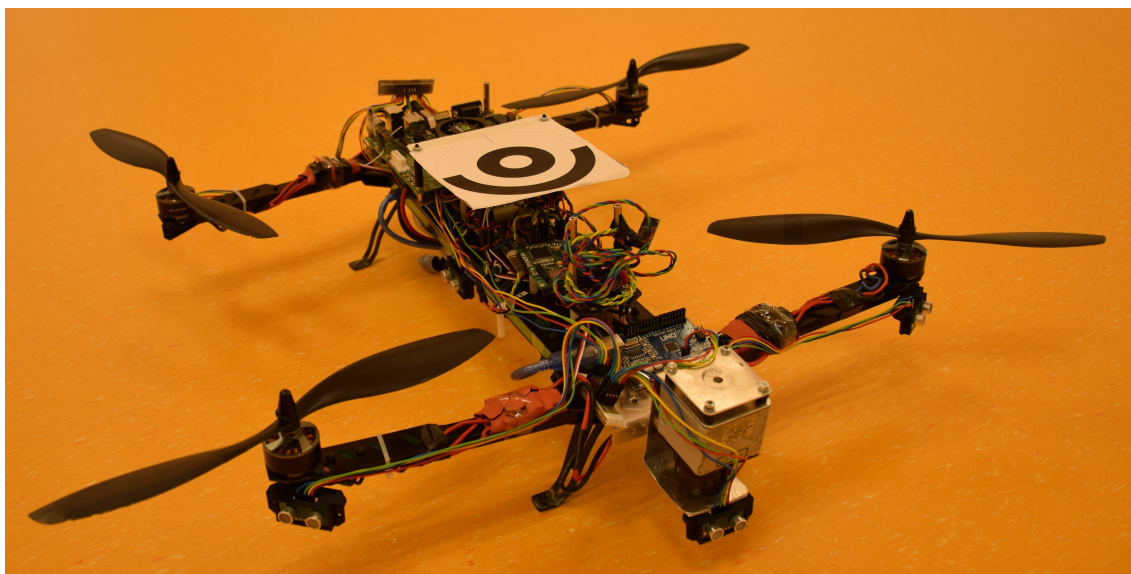
Geometrie dronu je pro nás zásadní, protože na základě toho budeme diskutovat rozmístění senzorů. Detailní popis parametrů veškerého hardwaru helikoptéry, od nosné konstrukce až po hlavní palubní počítač, je v páté kapitole práce Davida Česeneka [31]. Co zde ovšem nemůžeme nezmínit je struktura řízení dronu.

5.1.1 Řídící struktura dronu

Na tomto místě vysvětlíme, jak nám je umožněno zasáhnout protikolizním systémem do řízení dronu. Schéma datové komunikace mezi podsystémy kvadroptéry můžeme vidět na obrázku 5.3. Zdrojem informací k této části je již zmíněná práce [31], která již dříve toto téma zcela vyčerpala.

První blok, RC přijímač HiTEC Optima 9 přijímá signály z dálkového ovládání, který je přes P/S převodník (převádí devět paralelních signálů z RC vysílačky do sériové podoby) přiveden do zařízení navrženého Tomášem Báčou [39]. Ten se ve své práci zabývá sledováním definované trajektorie. Pro nás je podstatné, že tato jednotka sice umožňuje autonomní let kvadroptéry, ovšem zároveň s tím, že do řízení může stále zasáhnout člověk s vysílačkou.

S příspěvkem autora práce [39] komunikuje hlavní palubní počítač dronu Nvidia Jetson TK1, který, ač zvažt navrhovaný pro aplikace mobilní robotiky, je svými parametry srovnatelný s klasickými počítači. Tyto zařízení komunikují pomocí technologie UART. Bohužel na jiných úrovních než by bylo potřeba a proto je mezi ně vložen UART převodník logických úrovní, který tento problém řeší.



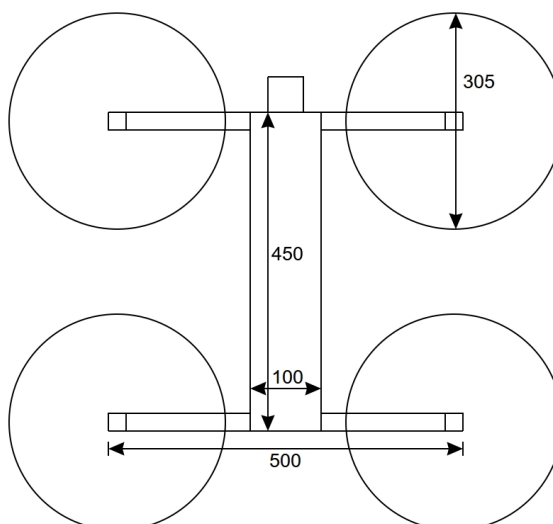
Obrázek 5.1: Fotografie dronu zapůjčeného pracovištěm vedoucího. Autorská fotografie.

Na hlavní počítač navazuje hardwarový příspěvek naší práce a to mikropočítač Arduino Uno a 10 ultrazvukových senzorů SRF. Sensory jsou popsány v pasáži 5.2, činnost Arduina je shrnuta v 5.3. Pro hlavní palubní počítač byl implementovaný program, popisovaný v 5.4.

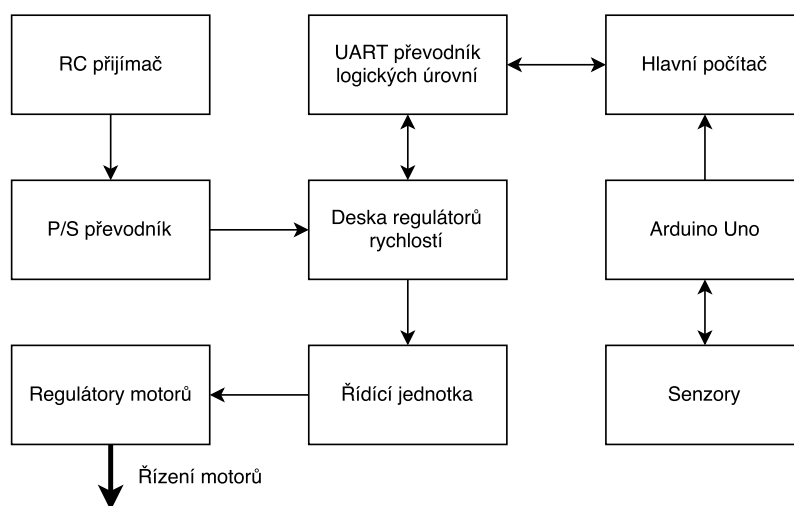
5.1.2 Umístění senzorů

Algoritmus našeho protikolizního systému závisí na rozložení senzorů. Je několik kritérií, podle kterých lze kvadrokoptéru senzory osadit. Navrhli jsme několik možných řešení (viz obr. 5.4), které se liší počtem a nasměrováním senzorů, což s sebou nese různé výhody a nevýhody. Pro náš protikolizní systém jsme zvolili ultrazvukové senzory řady SRF, o kterých detailněji pojednáno v sekci 5.2.

Nezávisle na návrhu řešení měření ve vodorovné rovině jsme v každém případě počítali s tím, že kolmo k zemi míří jeden senzor SRF08 s pozorovacím úhlem 55 stupňů a podobně jeden směrem nahoru. Pro měření do stran používáme senzory SRF10 s rozsahem 72 stupňů. Výhodou SRF08 je oproti SRF10 větší přesnost měření, což je v našem prostředí, tedy uvnitř budov důležité právě ve svislém směru, protože výška místností je často jejím nejmenším rozměrem a tedy je v tomto směru třeba měřit s větší přesností. Pozorovací úhel 55 stupňů je zde víc než postačující, protože dron při letu nedosahuje výraznějších náklonů a tak senzor vždy měří vzdálenost kolmo k zemi. Šířka rozhledu je ale důležitější pro měření do stran, protože s větším rozsahem dokážeme pokrýt celých 360 stupňů horizontální roviny menším počtem senzorů, což se projeví v celkové ceně systému.



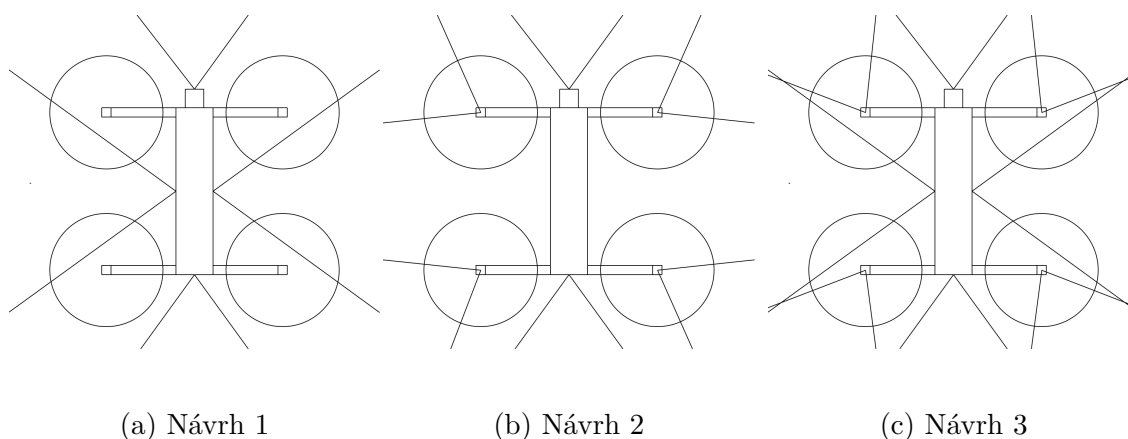
Obrázek 5.2: Rozměry dronu. Autorský náčrtek.



Obrázek 5.3: Schéma řídicí struktury dronu. Převzato z [31].

Jak bylo již zmíněno, návrhy umístění senzorů se drobně liší. Na obrázku 5.4a je jedno z nejjednodušších řešení, které používá čtveřici postranních senzorů. Je zřejmé, že takové rozestavení neumožňuje získat data z celých 360 stupňů roviny, což je jeho největší slabina. Pozitivně se to však odrazí v nákladech na systém, ale také v provozní době letounu. Přestože SRF váží okolo pěti gramů, počet senzorů se v maximu letového času odrazí. Ještě musíme podotknout, že například skupina výzkumníka Soberse [40] použila 4 sonary které měřily v poměrně úzkém přibližně desetistupňovém rozsahu. Dál zašli autoři práce [28], kteří dokonce použili infračervené senzory s rozptylem ještě menším. Na druhou stranu, předcházení kolizím není jediným úkolem jejich systémů a nedrží se Brooksova modelu, což jejich volbu ospravedlňuje.

My se však soustředíme čistě na zabránění kolizím a proto pro náš případ bude



Obrázek 5.4: Návrhy na rozmístění ultrazvukových senzorů na dron. Výseče znázorňují pozorovací úhel 72 stupňů senzorů SRF10. Autorský náčrt.

lepší přidat několik senzorů navíc a získat informaci o celé rovině. Pokud bychom to realizovali pomocí senzorů SRF10, stačilo by na to už 5, ale takové řešení spadá do úrovně teorie, protože by senzory musely být umístěny nad sebou, což by bylo velmi nepraktické. Navíc, přestože to není nutné, je přirozené mít k dispozici sudý počet senzorů.

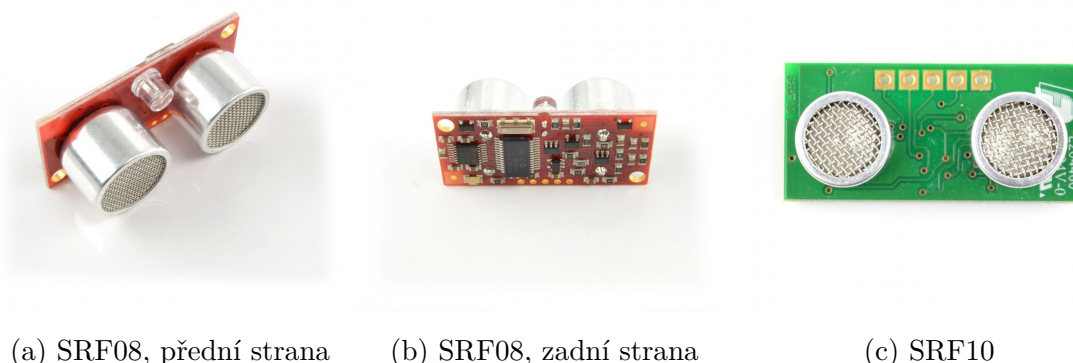
Dále bychom mohli použít 6 senzorů způsobem, který je naznačen v obrázku 5.4b. Pokrytí horizontální roviny je kompletní, ovšem až ve vzdálenosti několika metrů od helikoptéry, což pro naše prostředí stále není ideální. Pokud ovšem použijeme o dva senzory navíc (viz obr. 5.4c), získáme rozumný kompromis mezi počtem senzorů a plného 360 stupňového záběru nejvýše 20 cm od dronu, což je vhodná rezerva pro vzdálenost, na kterou se kvadrokoptéra může maximálně přiblížit ke stěnám.

5.2 SRF08 a SRF10

Pro naši práci jsme použili inteligentní ultrazvukové senzory od anglické firmy Devantech Ltd., konkrétně typy SRF08 a SRF10 (viz obr. 5.5). V této sekci se zaměříme na technické parametry a možnosti senzorů, na základě dokumentace sepsané výrobcem pro oba typy senzorů [38, 41] a rozšířené verze dokumentace pro SRF08 z University of Illinois [42]. Typy senzorů se od sebe liší ve třech ohledech:

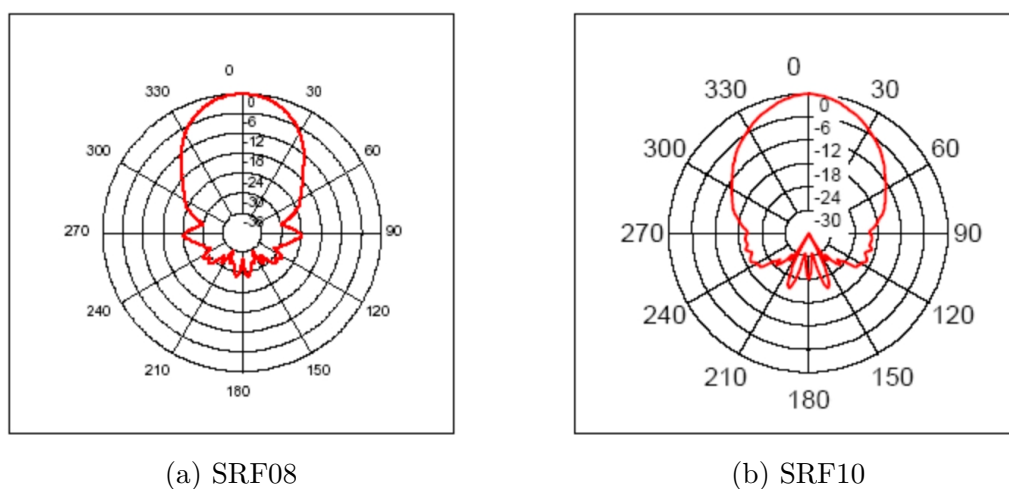
- šířkou oblastí, ve které jsou schopné detekovat nějaký objekt (viz obr. 5.6),
- SRF10 operuje se čtyřmi osmibitovými registry, SRF08 jich má 36¹,

¹ První čtyři registry jsou základ pro oba typy senzorů. Přidané registry senzoru SRF08 slouží k zachycení dalších až 16 signálů odražených od vzdálenějších objektů, než je ten nejbližší.



(a) SRF08, přední strana (b) SRF08, zadní strana (c) SRF10

Obrázek 5.5: Použité ultrazvukové senzory. Převzato z [32].



(a) SRF08

(b) SRF10

Obrázek 5.6: Vyzařovací charakteristiky ultrazvukových senzorů. Převzato z [30].

- SRF08 má oproti typu SRF10 světelný senzor².

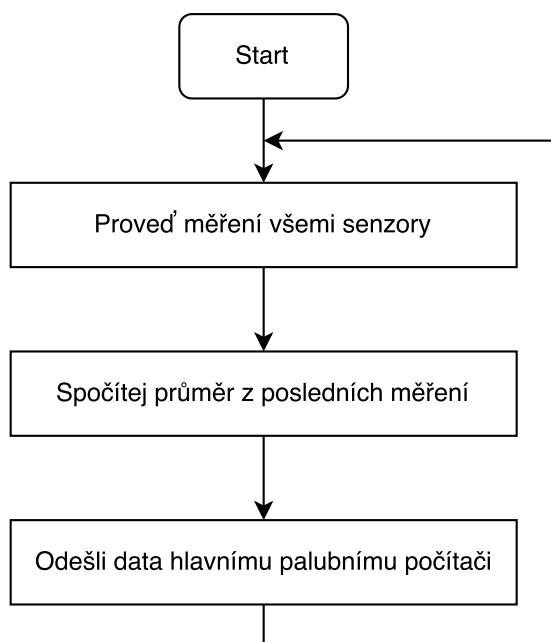
Ve všech ostatních aspektech, například v komunikaci se senzorem, jsou senzory totožné.

SRF08 a SRF10 se podobně jako většina výrobků od firmy Devantech určená k tomuto účelu chová jako inteligentní senzor, tj. které mimo jiné umožňuje digitální komunikaci s ostatními zařízeními. Oba senzory pracují na frekvenci 40 kHz a mají dosah až 11 metrů.

Komunikace probíhá přes I²C sběrnici. K senzoru se přistupuje metodou master-slave, přičemž senzor je výhradně v roli slave. Se senzory je možné komunikovat na adresách 0xE0, 0xE2, ..., 0xFE, z čehož plyne omezení 16 senzorů na jedné sběrnici.

Jak již bylo řečeno, nejdůležitější část komunikace se senzorem probíhá v jeho prvních čtyřech registrech. Při čtení se z registru 0 dočteme informace o softwaru

² Výstup světelného senzoru je v rozsahu 0 až 255. 0 pro absolutní tmu, 255 pro absolutní světlo. Reálně však dosahuje krajních hodnot 2 až 248 [42].



Obrázek 5.7: Vývojový diagram zachycující hlavní smyčku programu v mikropočítači Arduino Uno. Autorský nákres.

zařízení, z registru 1 hodnotu světelného senzoru (jen ze SRF08), z registru 2 a 3 vyčteme šestnáctibitovou hodnotu měření. Při zapisování do registru slouží registr 0 jako příkazový registr, 1 je určený pro nastavení síly vyslaného signálu, v registru 2 se nastavuje maximální vzdálenost, kterou senzor změří (doba po kterou senzor čeká na odraženou zvukovou vlnu).

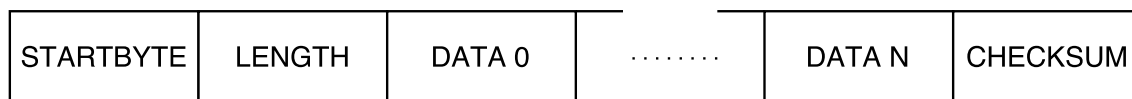
Příkazů, které můžeme senzoru poslat je celkem 9. Pro nás je důležitý jeden příkaz pro zadání měření hodnoty v centimetrech a tři povely pro změny I²C adresy senzoru (tu si senzor drží v paměti i po odpojení napájení).

5.3 Získávání dat

O vyčítání dat z okolí se stará master-slave síť ultrazvukových senzorů s mikropočítačem Arduino Uno v hlavní roli. Ze všech senzorů osazených v již zmíněné struktuře z obrázku 5.4c se přes I²C sběrnici postupně vyčte informace o vzdálenostech k nejbližší překážce v daném směru.

Algoritmus programu v Arduino (viz obr. 5.7) má v sobě nekonečnou smyčku, ve které volá, až do odpojení napájení, metody pro provedení měření všemi senzory, provedení průměrování z posledních několika hodnot a odesílání dat hlavnímu počítači přes sériovou linku.

Čtení dat ze senzorů probíhá postupným zadáváním již zmíněného příkazu k měření a poté vyčtení potřebných hodnot z příslušných registrů inteligentního senzoru.



Obrázek 5.8: Datová struktura znázorňující výstup programu v mikropočítači Arduino Uno, odesílaná hlavnímu palubnímu počítači. Autorský náčrt.

Data se v mikropočítači ukládají do pole hodnot k dalšímu zpracování.

Průměrování posledních hodnot je určeno konstantou, která se musí definovat v programu před spuštěním zařízení. Pokud se rovná 1, žádné průměrování se nekoná. Pokud je větší než 1, program vypočítá průměr z tolika posledních měření.

Po průměrovací fázi následuje odesílání dat hlavnímu počítači dronu. Než k tomu však dojde, je třeba ještě jedna úprava dat. Senzory měří vzdálenost v centimetrech. Již v 5.2 bylo řečeno, že senzor ukládá výsledky měření do dvou bytů. V našem případě výsledek zabere 9 bitů. Protože zbylých 7 bitů z dvoubytového slova považujeme za zbytečně vyplývané, před odesláním dat po sériové lince aplikujeme na údaje o vzdálenosti bitový posun o jedno místo doprava. Ztratíme tím tedy liché hodnoty vzdáleností, ovšem jednocentimetrová ztráta koresponduje s již vzniklou odchylkou z měření. Druhý argument pro nezávadnost tohoto řešení je, že takováto informace nám v nejhorším případě řekne, že jsme o centimetr blíž překážce, než jsme ve skutečnosti, což je zaprvé lepší než druhým směrem a zadruhé, i tak by byl 1 centimetr spíše zanedbatelný. Důsledkem tohoto je, že hlavnímu palubnímu počítači se posílá o každém senzoru pouze jeden byte informace.

Celý výstup z velké smyčky programu můžeme vidět v grafice 5.8. První se posílá startovací byte s hodnotou 0xFB. Tato hodnota je dána tak, že 0xFA (dekadicky 250, význam této hodnoty je vzdálenost 500 cm) je největší hodnota vzdálenosti, se kterou můžeme pracovat. Hodnoty od 0xFB do 0xFF jsou vyhrazeny speciálním zprávám s tím, že 0xFB už používáme právě pro startovní byte. Startbyte je následován údajem o počtu senzorů. Přestože se to také může zdát jako plýtvání, je tento údaj nezbytné posílat v každém kole měření, jednoduše proto, že nemůžeme detekovat, zda je hlavní počítač v provozu a nemuselo by dojít ke správnému příjmu synchronizační zprávy. Následuje množina bytů informací o měření právě deklarované velikosti. Celou zprávu zakončuje kontrolní součet. V našem případě se jedná o celkovou bitovou non-ekvivalenci (XOR) všech dat o vzdálenostech po posunu.

5.4 Zpracování dat a regulace

Náš program pro hlavní počítač je rozdělený do dvou vláken. První z nich se stará o vyčítání dat ze sériové linky, na kterou je vysílá Arduino. Druhé vlákno zahrnuje práci s daty a regulaci pohybu dronu.

Příjem dat je pečlivě testován, zda po sériové lince dorazil v pořádku. Vlákno čte byty po jednom a očekává podobu dat z obrázku 5.8. Pokud se v cyklu až do přijetí všech dat včetně potvrzení správnosti kontrolním součtem vyskytne chyba, smyčka se přeruší a znovu se čeká, než se na lince objeví startbyte 0xFB. Po přijetí startbytu systém čeká délku dat maximálně 16, jinak by mělo dojít k chybě. Poté se přijímají data a nakonec byte checksum. Poté proběhne vlastní výpočet kontrolního součtu a porovnání s tím, který přišel z Arduina. Pokud je vše v pořádku, data se posunou o jeden bit, tentokrát doleva, aby hodnoty vzdáleností odpovídaly realitě, v jednotkách centimetrů. Pokud se vyskytla chyba, data se nepoužijí pro regulaci a jsou zahozena, respektive přepsána.

V řídicím vlákně programu se zabýváme nastavením regulátoru podle naměřených hodnot. Jak probíhá výpočet regulačního zásahu můžeme vidět v následujícím popisu algoritmu 5.1.

Algoritmus 5.1: Výpočet regulačního zásahu.

```

1  define: PI, VC, HC, angle [], offset [],
2  input: range []
3  velX = velY = velZ = 0
4  for i in sideSensor
5      danger = countDanger(range[i] - offset[i])
6      velX -= danger * sin(angle[i] * PI / 180)
7      velY -= danger * cos(angle[i] * PI / 180)
8  limitVelocities()
9  velX *= VC
10 velY *= VC
11 if (range[bot] > 100 and range[top] > 100) do nothing()
12 else if (range[bot] <= 100 and range[top] > 100) velZ = HC
13 else if (range[top] <= 100 and range[bot] > 100) velZ = -HC
14 else velZ = (range[top] - range[bot]) / 2
15 updateRegulator(velX, velY, velZ)

```

V programu máme definované konstanty, PI není třeba vysvětlovat, VC a HC jsou proporcionální konstanty, kterými můžeme rychle upravit míru vlivu na řízení.

Algoritmus počítá se třemi poli a to úhlovým, vzdálenostním a polem korigujícím údaje ze senzorů. Jednotlivé postranní vzdálenosti (tedy prvních 8 z celkově 10 údajů) projdou před samotným výpočtem nejprve normalizací, protože všechny senzory nejsou stejně vzdálené od středu dronu, jak je patrné z obrázku 5.4. Dron lze velmi přesně opsat pomyslnou kružnicí o průměru 80 centimetrů, od vzdáleností určených senzory se prvně odečtou ručně změřené a v poli offset zavedené konstanty,

nastavené tak, aby vzdálenost „0“ vycházela na tuto kružnici.

Do výsledných hodnot se započítává výsledek každého senzoru. Pro každý z nich regulace začíná sítím důležitosti, kde se diskrétně jednotlivým vzdálenostem přidá hodnota danger, říkající jak velký důraz máme klást na onen konkrétní senzor. Rozhodovací hranice jsou 10, 20, 40 a 80 centimetrů (nyní už pracujeme s normalizovanými hodnotami), vyšší hodnoty systém nebere na vědomí. Samozřejmě čím je senzor blíže k překážce, tím vyšší hodnotu (z těch kvadraticky zvolených ve funkci `countDanger()`) dostane.

Následuje vyhodnocení složek rychlosti ve směrech os x a y^3 , a to tak, že se vzdálenost do x -ové a y -ové složky se záporným znaménkem přičte přepočtem přes goniometrické funkce sinus a kosinus. Takto se na řízení hodnot rychlostí $velX$ a $velY$ postupně podílí všechny postranní senzory.

Poté přichází na řadu saturace výstupu, čímž se zabrání tomu, aby výstup nenarostl do nesmyslných hodnot v případě, že stejnou blízkou překážku vidí dva senzory najednou. Poslední co se stane s hodnotami pro regulaci x -ové a y -ové složky je, že se přenásobí konstantou VC , aby jsme na výstup převedli do jednotek metrů za sekundu.

Naše regulace, tak jak jsme jí nyní popsali funguje na principu aktivního řízení rychlosti. V každém kole přidáváme svůj příspěvek do regulace, což je součet hodnot z vysílačky, z desky regulátorů rychlostí, která umožňuje sledování předem vytyčené trajektorie [39] a výstupu našeho regulátoru, jak to plyne z obrázkem 5.3.

Regulace rychlosti ve vertikálním směru probíhá zvlášť. Dron má volnost, pokud je aspoň 1 metr vzdálený od podlahy i stropu. Pokud nesplňuje jednu z těchto podmínek, reguluje se příslušným způsobem. Pokud jsou obě vzdálenosti v nebezpečném pásmu, algoritmus se snaží držet dron uprostřed vzdálenosti mezi stropem a podlahou.

a posílá data z dálkového ovládání řidiče přímo do řídicí jednotky kvadrokoptéry

5.4.1 Řízení blokováním výstupu

Jiné možné řešení je regulace omezováním výstupu desky regulátorů rychlostí. To však firmware na desce regulátorů rychlostí momentálně neumožňuje. Výstup algoritmu je realizován funkcí `sendMessage()`, která odešle vektor regulací `message` (jehož stavy jsou pojmenovány konstantami `TOP`, `BOT`, `FWD`, `RIGHT`, `BCK`, `LEFT`) limitující maximální rychlosti v definovaných směrech do desky regulátorů rychlostí. Jak by to fungovalo je naznačeno v pseudokódu 5.2.

³ Kladný směr osy z je směrem nahoru, osa y má kladné hodnoty směrem od čela dronu, kladné hodnoty složky x jsou na pravoboku kvadrokoptéry.

Tento algoritmus nejprve zkontroluje, jestli nějaký senzor není moc blízko překážce (porovnáním s konstantou CRITRANGE) a v příslušném případě by přešel do aktivního řízení pomocí funkce `activeModeHorizontal()`. Jinak využije funkci `danger()` nám známou z předchozího algoritmu a pro každý senzor zavolá funkci `banDirection()` (viz algoritmus 5.3), která goniometrickými funkcemi přepočítá úhel a vzdálenost do x-ové a y-ové složky. Potom, pokud nějaká z těchto hodnot není zanedbatelně malá (porovnání s konstantou NEGLIGIBLE) zavede rychlostní limit v konkrétních složkách do pole `message`, pokud tam již není větší omezení. Z logiky funkce vyplývá, že může přidat limit maximálně do dvou směrů.

Pokračujme v algoritmu 5.2. Podobně jako je to s regulací v horizontálním směru funguje i regulace směru svislého, jen je to řešeno přímo bez volání `banDirection()`. Vzdálenosti se opět porovnávají CRITRANGE konstantou (s případným přechodem na `activeModeVertical()`), jinak se blokují rychlosti v určitých směrech v závislosti na hrozcím nebezpečí. V situaci s nízkým stropem algoritmus zakazuje směr s menší vzdáleností a tak se dron časem dostane do poloviny výšky místnosti.

Počítáme s tím, že se horizontální a vertikální směry jsou na sobě nezávislé. I proto má program oddělené pro oba směry aktivní módy. Horizontální nebo vertikální mód obnáší procházet příslušnou část předchozího algoritmu než se dostanou z kritické vzdálenosti dané konstantou CRITRANGE.

Algoritmus končí odesláním zprávy `message` pomocí funkce `sendMessage()`.

Algoritmus 5.2: Regulace blokováním.

```

1  define: angle [], offset [], VC, CRITRANGE, BOT, TOP, FWD, RIGHT, BCK, LEFT
2  input: range [], message [] = [max, max, max, max, max, max]
3  for i in sideSensor
4      if (range[i] < CRITRANGE) do
5          activeModeHorizontal()
6          exit
7      else
8          danger = countDanger(range[i] - offset[i])
9          banDirection(message, angle[i], VC/danger)
10 if (range[bot] < CRITRANGE or range[top] < CRITRANGE) do
11     activeModeVertical()
12     exit
13 else if (range[bot] > 100 and range[top] > 100) do nothing()
14 else if (range[bot] <= 100 and range[top] > 100) do
15     message[BOT] = HC / countDanger(range[BOT])
16 else if (range[top] <= 100 and range[bot] > 100) do
17     message[TOP] = HC / countDanger(range[TOP])
18 else if (range[top] > range[bot]) do
19     message[BOT] = HC / countDanger(range[BOT])
20 else do
21     message[TOP] = HC / countDanger(range[TOP])
22     sendMessage(message)

```

Algoritmus 5.3: Funkce banDirection().

```
1 define: NEGLIGIBLE, FWD, RIGHT, BCK, LEFT, PI
2 input: message, angle, velocity
3 xDir = velocity * sin (angle * PI / 180)
4 yDir = velocity * cos (angle * PI / 180)
5 if (yDir > NEGLIGIBLE) do
6     message[FWD] = min(yDir, message[FWD])
7 if (xDir > NEGLIGIBLE) do
8     message[RIGHT] = min(xDir, message[RIGHT])
9 if (yDir < -NEGLIGIBLE) do
10    message[BACK] = min(-yDir, message[BACK])
11 if (xDir < -NEGLIGIBLE) do
12    message[LEFT] = min(-xDir, message[LEFT])
13 return message
```

Kapitola 6

Experimenty

6.1 Detekce objektu v závislosti na úhlu měření a materiálu objektu

V tomto pokusu měříme, pod jakým úhlem je ultrazvukový senzor schopný detekovat objekt ve svém dohledu. Překážku v tomto pokusu tvoří rovné plochy. Měřené materiály jsou povrchy typické pro interiéry budov. Námi měřené objekty jsou klasická sádrokartonová stěna, sklo, korková nástěnka, kartonová krabice a sololitová deska. K pokusu využíváme senzor SRF10, jehož efektivní oblast má 72 stupňů. Metrem jsme odměřili vzdálenost 50 centimetrů kolmo od zdi a v tomto bodě jsme otáčeli senzorem. Výška senzoru měla bezpečnou rezervu proti tomu, aby senzor omylem nezabral podlahu a tak nezkreslil měření.

Jak tento pokus dopadl můžeme vidět na obrázku 6.1. Na radiální ose je vyznačena naměřená vzdálenost v centimetrech, na tangenciální ose je úhel natočení senzoru. Poloha 0 stupňů znamená, že senzor míří kolmo na povrch, 90 stupňů znamená, že senzor míří rovnoběžně se stěnou. Všechny materiály také můžeme porovnat s očekávanou teoretickou hodnotou.

Očekávali jsme že čím hrubší bude povrch, tím menší úhel stačí k tomu, abychom ho zaznamenali. Čistě teoreticky by od úhlu 0 až 36 stupňů (polovina ze 72) senzor měl ukazovat vzdálenost 50 centimetrů.

Toto očekávání nejlépe naplnil sololit, který ukazoval 50 cm ještě při 37 stupních, na druhém místě se umístilo sklo s úhlem 34 stupňů, dále sádrokartonová zeď (30 stupňů), karton (28 stupňů). Výrazným propadákem v této charakteristice byla korková nástěnka, u které senzor naměřil 50 centimetrů při úhlu pouhých 10 stupňů.

Z hlediska přesnosti měření byl sice sololit nejlepší, ale naopak měl nejhorší výsledek ze všech při testování toho, kdy ještě nějakou překážku vůbec detekuje. 43 stupňů byl poslední úhel, který jsme proti sololitu změřili. Vzestupně následují korek

s 55 stupni, sklo s 58 stupni a dělené první místo patří zdi a kartonu s 60 stupni náklonu. Za těmito úhly už senzor nedetekoval žádnou překážku.

Pokud bychom měli z tohoto testu vyzdvihnout nejzajímavější poznatky, je to vlastnost korku, u kterého jsme předpokládali dobrou detekci i pro úhly blížíící se podle výrobce možným 36 stupňům a místo toho jsme dostali stupňů 10. Potenciální nebezpečí této vlastnosti pro protikolizní systém je, že systém na korku ukazuje nějakou vzdálenost, ale ve skutečnosti jsme blíž. Vhodné opatření proti tomuto je mít větší rezervu v rozhodovacích hranicích a začít dělat úhybné manévry při vyšších údajích ze senzoru.

Druhé výraznější nebezpečí může být sololit, který očividně tlumí zvuk daleko lépe než ostatní materiály a už na úhlu 44 stupňů přestává překážku detekovat. Obranou proti této pasti je větší množství senzorů po obvodu dronu, což naše řešení splňuje.

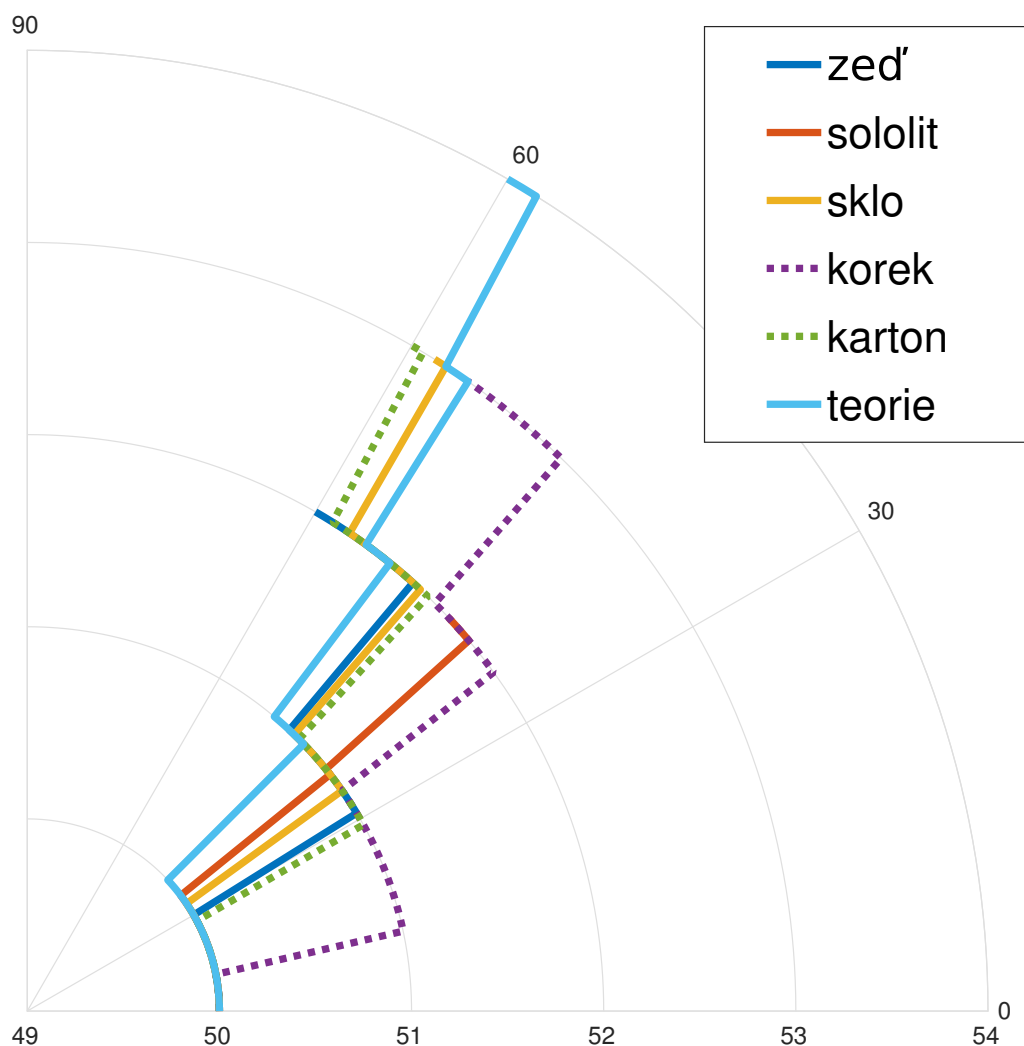
Naopak příjemným překvapením tohoto pokusu bylo zcela určitě sklo, které nejvíce odpovídalo teoretické hodnotě. Očekávaný výsledek se dostavil u přesnosti, kde sklo skončilo těsně za sololitem a teoreticky očekávaným výsledkem. Překvapilo však u měření detekce, kde jsme čekali, že dopadne hůře, protože se od jeho hladkého povrchu zvuk snáze odrazí pryč od senzoru. Nestalo se tak a sklo bylo až na 2 stupně srovnatelné se zdí a kartonem. Vyslaný signál se oproti očekávání velmi dobře odrazil zpátky k senzoru i pod poměrně velkým úhlem.

6.2 Detekce objektu v závislosti na rozměrech překážky

Pro tuto práci mohly být použity infračervené senzory, ale tak tomu nakonec není, kvůli obavám z pravděpodobného přehlédnutí tenkých objektů. V tomto experimentu se zabýváme právě tím, jak tenkou překážku je schopen detekovat ultrazvukový senzor, u kterého v případě těchto překážek předpokládáme daleko lepší detekci, což je jeden z důvodů, proč jsme ho pro naší práci použili.

Měříme tři objekty senzorem SRF10. Prvním z nich je kovová trubka od skládacího zahradního přístřešku s průměrem 25 milimetrů. Druhý tenký objekt je závitová tyč, která má průměr 6 milimetrů včetně závitu. Třetí je hladká tyčka s průměrem 5 milimetrů.

První měření proběhlo ze vzdálenosti 50 centimetrů. Byly detekovány všechny tyče v celém rozsahu deklarovaným výrobcem senzoru, tedy až pod 36 stupňovým náklonem. Závitová tyč tuto hodnotu překonala o jeden stupeň, což může být chyba měření, ale protože nejširší tyč byla detekována dokonce i pod nečekaně velkým



Obrázek 6.1: Graf závislosti naměřené vzdálenosti na úhlu natočení vzhledem k překážce. Porovnání materiálů.

úhlem 46 stupňů, dalo by se tomu věřit.

Poté jsme zkoumali, zda senzor bude stále detekovat tyče i z větších vzdáleností. Všechny tyče byly detekovány do vzdálenosti 120 centimetrů. Do větší vzdálenosti jsme se ani dostat nepotřebovali, protože když vezmeme v úvahu 80 centimetrovou hranici kdy se náš protikolizní systém ještě snaží něco regulovat sečtenou s až 40 centimetry offsetové vzdálenosti (viz 5.1.2), jsme na oněch 120 centimetrech. Všechny tyče byly v této vzdálenosti detekovány.

O něco slabší výsledek vykazoval senzor při detekci pod úhlem. Tlustá tyč byla detekována až do úhlu 36 stupňů. Závitová tyč byla zaznamenána do úhlu 26 stupňů, hladká tyčka měla o stupeň navíc.

Výsledky tohoto měření jsou pro nás velmi pozitivní. Vezmeme-li v potaz nejslabší měření, dvakrát 26 stupňů (za druhou polovinu měřící charakteristiky senzoru), vynásobeno osmi (za osm senzorů instalovaných po obvodu dronu) dává 416 stupňů,



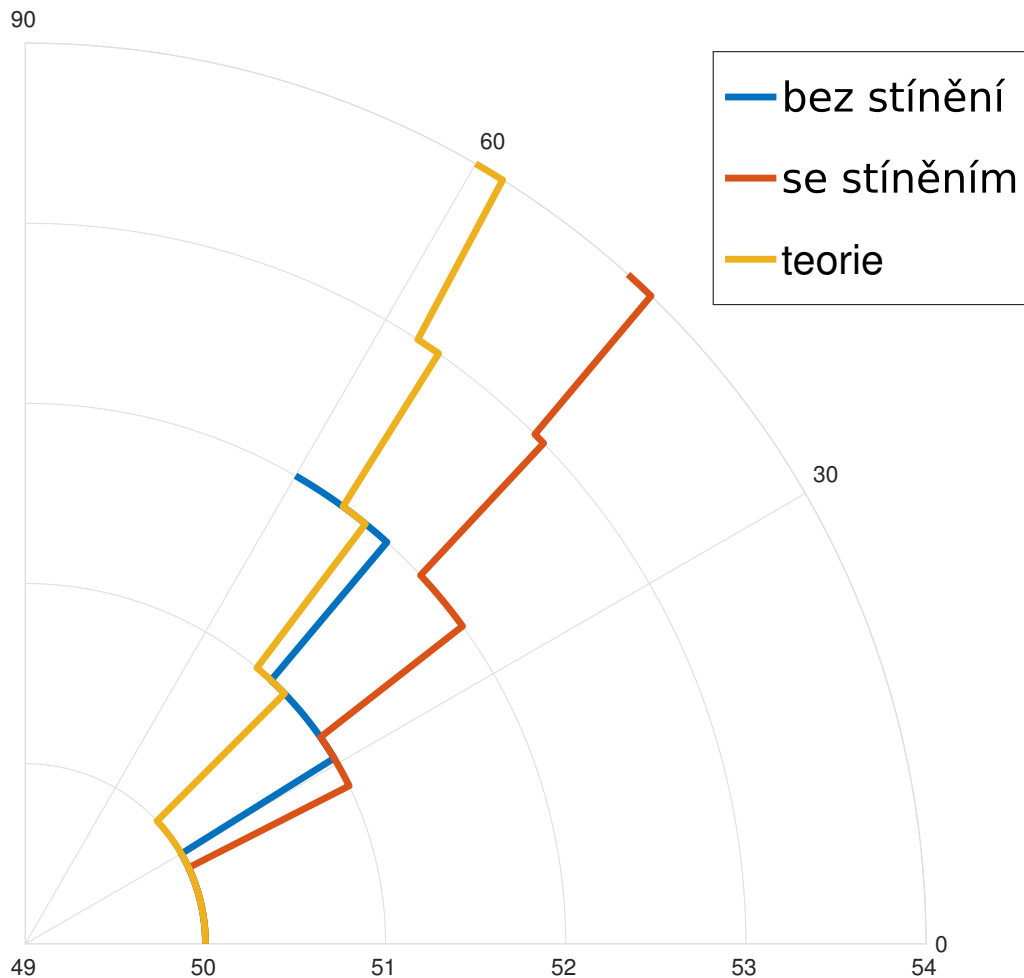
Obrázek 6.2: Nástavec na senzor SRF10 vytištěný 3D tiskárnou. Autorská fotografie.

což znamená, že v celé 360 stupňové oblasti ve které nás to zajímá, tedy do 80 centimetrů od pomyslné hranice dronu jsme schopni detekovat objekty až 5 milimetrů tenké a to ještě s poměrně velkou rezervou.

6.3 Vliv stínění na ultrazvukový senzor

Zde testujeme zda je možné zmenšit pozorovací úhel senzoru nasazením aparátu vyrobeného 3D tiskem, viz obrázek 6.2. Opět měříme ze vzdálenosti 50 centimetrů, povrch v pozadí je sádrokartonová zeď.

V grafice na obrázku 6.3 na první pohled vidíme, že tunelové stínění splnilo oba své účely. Vyzařovací úhel je menší než u nestíněného senzoru, i když ne o moc. Jednoznačně lepší je ovšem přesnost měření, což je patrné z nápadné podobnosti schodovité charakteristiky stíněného senzoru a teoretických hodnot.



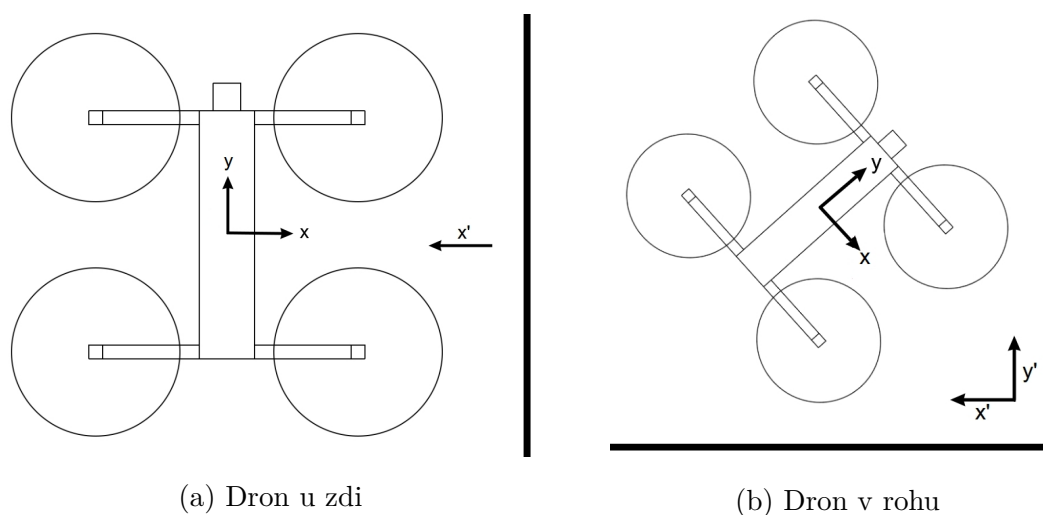
Obrázek 6.3: Graf závislosti naměřené vzdálenosti na úhlu natočení vzhledem k překážce. Vyhodnocení vlastností tunelového stínění.

6.4 Modelová situace - rovná zeď

Předchozí experimenty se týkaly vlastností senzoru, teď už pracujeme s celým protikolizním systémem. V okolí dronu jsou klasické sádkartonové zdi. Dron má stabilní výšku, přibližně uprostřed mezi stropem a podlahou a je postupně vzdálený 40, 50, 100 a 150 centimetrů od stěny, viz obrázek 6.4 nalevo.

Výstup znázorňuje hodnotu, kterou propaguje náš protikolizní systém do hlavního kontroleru dronu. Ve výsledku se ukazuje stavovost našeho algoritmu typická pro čistě reaktivní algoritmy, které jsme probírali v části 4.1.1.

V první poloze se pomyslná kružnice, kterou opíše kvadrokoptéru při pohledu shora dotýká zdi, tedy vrtule mají ještě přibližně třicentimetrovou rezervu. Z grafu v obrázku 6.5 vidíme, jak výstup regulátoru říká, že se máme pohnout doleva. Druhá vzdálenost, 50 centimetrů od zdi sice neznamena tak velké nebezpečí jako předešlý případ, ale i tak spolu body pro tyto dvě měření splývají. Ve třetím případě je sice střed dronu metr od zdi, ale kraj dronu ještě je v kritické oblasti a systém na to



(a) Dron u zdi

(b) Dron v rohu

Obrázek 6.4: Modelové situace pro testování protikolizního systému dronu. Autorský náčrt.

reaguje jen drobným zásahem. Konečně, poslední případ demonstruje situaci, kdy se kvadrokoptéra dostane mimo nebezpečí a systém nezasahuje do řízení.

6.5 Modelová situace - roh místnosti

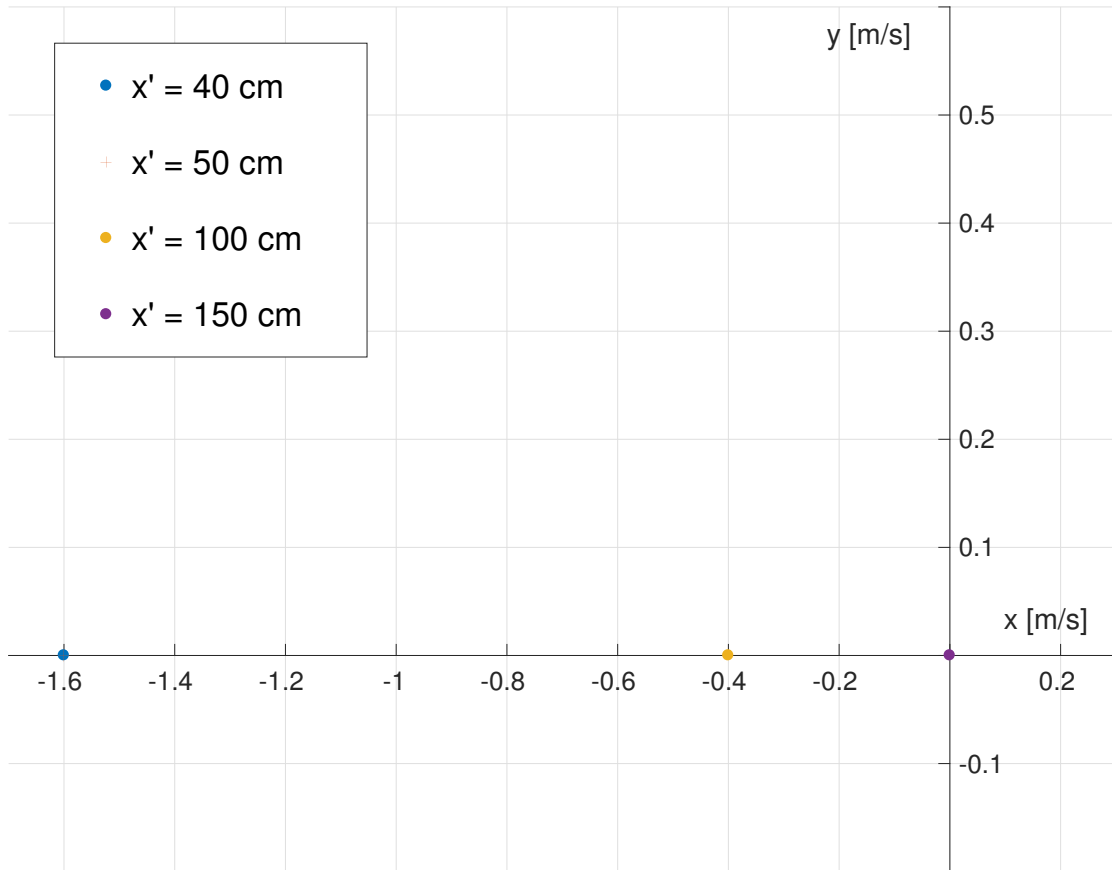
Tento pokus je podobný předchozímu. Teď máme kvadrokoptéru zahnanou do kouta místnosti, v poloze zachycené na obrázku 6.4 napravo. Dron má opět stabilní výšku a tentokrát měříme jeho vzdálenost k oběma na sebe kolmým stěnám.

Výsledky můžeme vidět na obrázku 6.6. První poloha opět znamenala velmi těsnou situaci jen s malou rezervou. Stejně jako v případě u rovné zdi vidíme, že tendence regulátoru donutit dron pohybovat se doleva je velká.

Význam ostatních hodnot ležících na ose x nám je již známý z předchozího experimentu. Ostatní 3 hodnoty vznikly tak, že se dron posune z osy úhlu, který svírají zdi. Logicky, čím blíže je dron ke zdem, tím více se hodnota regulace vzdaluje od počátku.

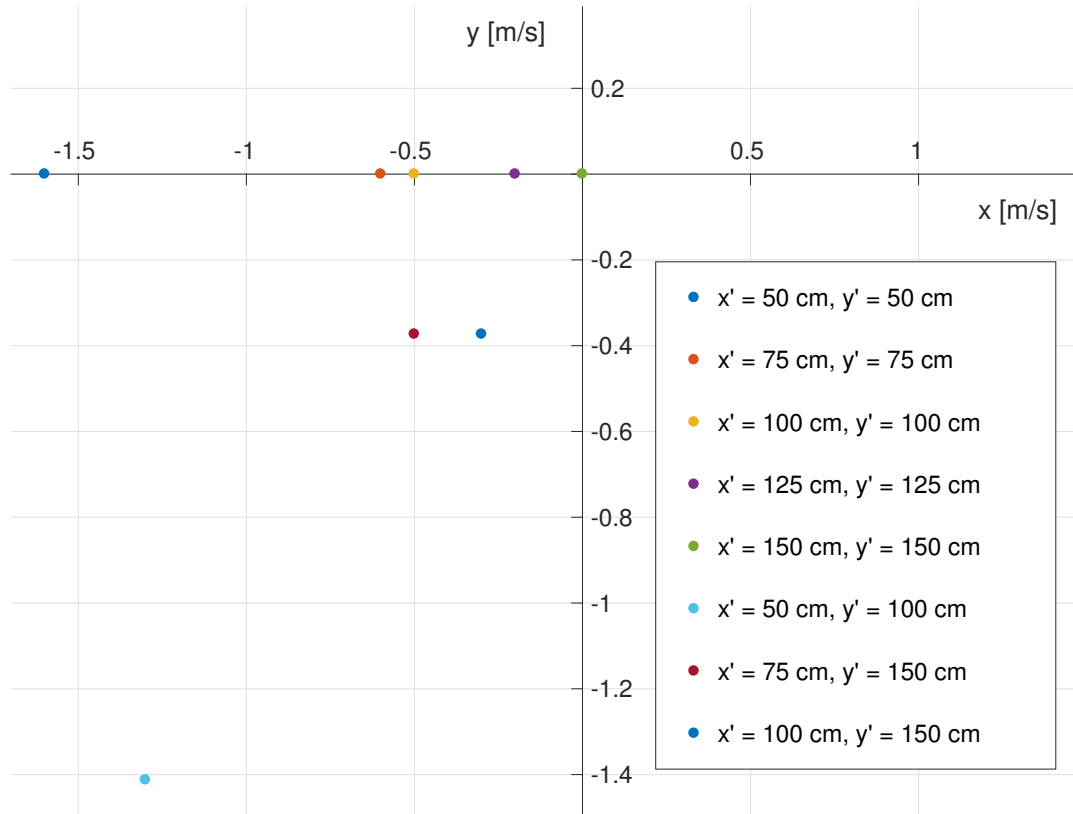
Až při experimentech jsme zjistili, že senzory po stranách kvadrokoptéry při měření občas zabírají konce držáků vrtulí. Jak jsme vyzkoušeli dříve, s rotující vrtulí senzory nemají problém a proto jsme si dovolili umístění tohoto senzoru na tělo dronu, viz obrázek 5.4c. Jak se ale při experimentování ukázalo, problém zde je a tak jsme potřebovali jeho detekční úhel zmenšit.

Přestože tunelový stínič z experimentu 6.3 vykazoval velmi dobré vlastnosti, k redukci tohoto případu to nestačilo. Museli jsme tedy sáhnout k improvizovanému řešení, které můžeme vidět na obrázku 6.7. Jedná se o dvě karonové destičky svíra-

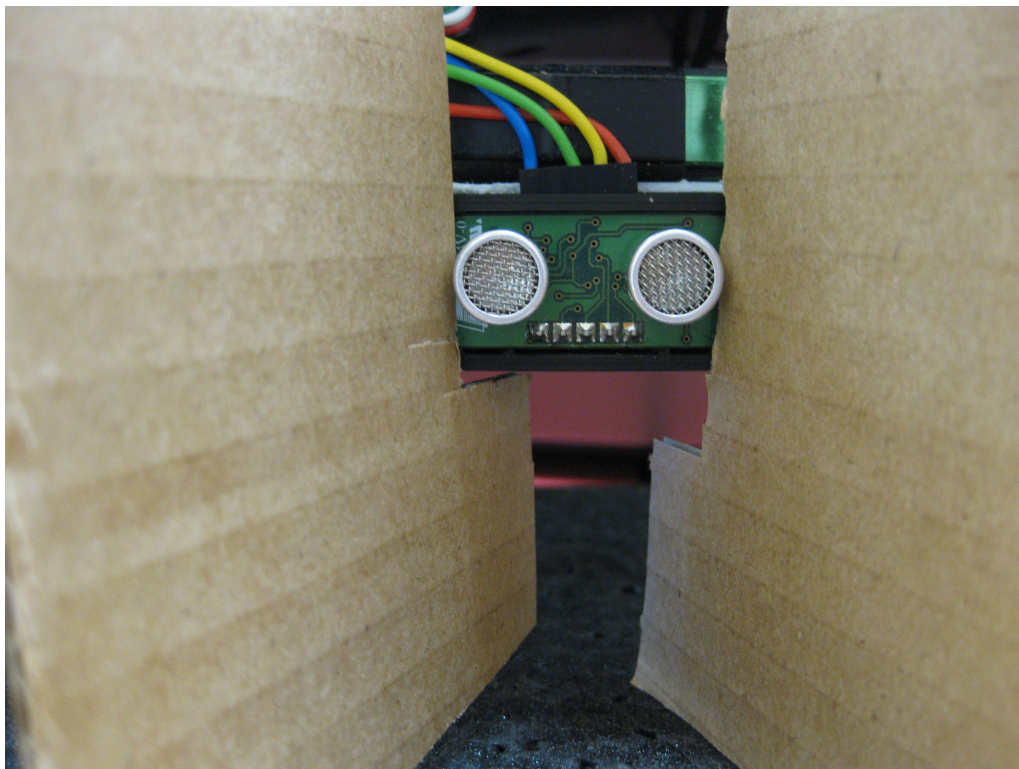


Obrázek 6.5: Výstupní hodnoty regulátoru vstupující do desky regulátorů rychlostí. Modelová situace - rovná zeď.

jící úhel přibližně 40 stupňů. Takto upravený senzor stačil na naměření modelových situací. Experimentování za letu nám stejně bohužel nebylo umožněno kvůli rozbitému regulátoru motoru helikoptéry. To vznáší otázku, zda by aparát s tvarem zploštělého kuželu neudělal při zužování charakteristiky senzoru ještě lepší službu než tunelové stínění.



Obrázek 6.6: Výstupní hodnoty regulátoru vstupující do desky regulátorů rychlostí. Modelová situace - roh místnosti.



Obrázek 6.7: Improvizované řešení problému s bočními senzory. Autorská fotografie.

Kapitola 7

Závěr

Při práci na této tezi jsme úspěšně navázali na předchozí práci Davida Česeneka [31], který na stejné kvadroptéře jako my řešil prohledávání prostředí a tvorbu map. My jsme pod tyto úrovně Brooksova modelu položili základy pro možnost autonomních aplikací tohoto stroje.

Vedení pokyny pro vypracování jsme při naší činnosti dokázali následující:

- Provedli jsme rešerši existujících systémů pro detekci překážek a možných kolizí pro malé helikoptéry.
- Na základě předchozího bodu jsme vybrali ze čtyř typů senzorů ten nejvhodnější pro robotickou helikoptéru poskytnutou pracovištěm vedoucího práce a navrhli jsme počet a rozmístění dostupných senzorů tak, aby vznikla dostatečná informace o blízkých překážkách při letu, což jsme potvrdili experimentálně.
- Navrhli jsme modifikaci řídicího systému robotické helikoptéry tak, aby nebyl umožněn pohyb vedoucí ke kolizi helikoptéry s překážkami v jejím okolí a teoreticky připravili nový možný způsob řešení.
- Implementovali jsme kód pro palubní počítač helikoptéry a pro předsazený mikropočítač, provedli jsme demonstraci funkce systému a na základě experimentů jsme ho shledali spolehlivým v prostředí s vhodně jednoduchou strukturou překážek.

Rozbor sensorických systémů, které bylo možné pro naši práci použít je v kapitole 3. Na základě toho jsme zvolili řešení problému pomocí ultrazvukových senzorů, které porazily proximitní senzory zejména díky šířce své detekční oblasti, nad ostatními typy senzorů zvítězily díky nízkým pořizovacím nákladům.

K zásahu do řídicího systému nám posloužil mikropočítač Arduino Uno, který shromáždil data ze senzorů a poté celý balíček informací odesílal do palubního počítače. Kód pro Arduino byl implementován v jazyce Wiring, v hlavním počítači se nacházel program v jazyce C++, což nám umožnilo modifikaci řídicí struktury dronu.

7.1 Návaznost a rozšíření

Jak bylo vyřčeno, spolu s dílem [31], které ve stejné závěrečné pasáži jako je tato navrhuje zprovoznění protikolizního systému, je tímto nyní vytvořena spodní část architektury vedoucí ke schopnosti autonomie.

Možným rozšířením této práce může být další patro Brooksovy architektury, sledování změn prostředí, což může být prakticky využitelné při pokročilém prohledávání terénu.

Co se týká pokračování této práce, bylo by vhodné dále rozpracovat řešení protikolizního systému metodou blokování výstupu, což momentálně není možné kvůli nedostatečnosti firmwaru na jednom ze zařízení řídicí struktury.

7.2 Poslední vůle autora

Autor si přeje, aby se všem projektům, nejen těm zmíněným na začátku práce, dostalo kvalitního protikolizního systému a umožnilo jim to rychlejší cestu směrem k autonomii.

Autor si přeje, aby výzkum v oblasti protikolizních systémů vzkvétal, dostal se do komerční sféry a nenechal se utlačit velkými zvířaty typu DJI.

Autor si přeje, aby tato práce alespoň jednomu člověku pomohla svými poznatky k vytvoření jeho vlastního protikolizního systému nebo nějaké návazné aplikace. To by mu udělalo opravdu velkou radost.

Literatura

- [1] HUSTON, Robert J. History, a projection of the future: A rotary wing perspective. In: *Transportation Beyond 2000: Technologies Needed for Engineering Design* [online]. 1995, s. 297-330 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960023621.pdf>
- [2] JADHAV, Hemant L. Application of Mechatronics in Design and Control of A Quad-Copter Flying Robot for Aerial Surveillance. In: *Excel Journal of Engineering Technology and Management Science: (An International Multi-disciplinary Journal)* [online]. Excel Publishing House, 2013, 1(4), 1-6 [cit. 2017-03-25]. ISSN 2277 - 3339. Dostupné z: <http://excelpublication.com/wp-content/uploads/2013/07/4.Hemant-L.-Jadhav.pdf>
- [3] LAMBERMONT, Paul Marcel. *Helicopters and autogyros of the world*. London: Cassell, 1958.
- [4] 10 Incredibly interesting uses for Drones. *Drone Buff* [online]. 2015 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <https://dronebuff.com/uses-for-drones/>
- [5] NATALIZIO, Enrico, Rosario SURACE, Valeria LOSCRI, Francesca GUERRIERO a Tommaso MELODIA. Filming Sport Events with Mobile Camera Drones: Mathematical Modeling and Algorithms. *HAL - Inria* [online]. 2012, 1-9 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <https://hal.inria.fr/hal-00801126>
- [6] A system for recording historic buildings using multiple unmanned aerial vehicles. In: *Multi-robot Systems* [online]. 2016 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://mrs.felk.cvut.cz/projects/cesnet>
- [7] Bezpilotní drony z FEL ČVUT v Praze mapují historické objekty, využití je ale mnohem širší. In: *Fakulta elektrotechnická - blog* [online]. 2016 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://blog.fel.cvut.cz/clanek/51-bezpilotni-drony-z-fel-cvut-v-praze-mapuji-historicke-objekty-vyuziti-je-ale-mnohem-sirsi>

- [8] HENNESSY, Una. Drones In Movies: 7 Hollywood Movies Filmed With Drones. In: *Skytango* [online]. 2016 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://skytango.com/drones-in-movies-7-hollywood-movies-filmed-with-drones/>
- [9] BERNSTEIN, Paula. The First Feature Film Shot Entirely with Drones. In: *Indie Wire* [online]. 2015 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.indiewire.com/2015/09/check-it-out-the-first-feature-film-shot-entirely-with-drones-58673/>
- [10] COSSMAN, Sam, Simon JARDINE a Conor TOUKMARKINE, MURPHY, Jennifer, ed. Drones Sacrificed for Spectacular Volcano Video: National Geographic. In: *Youtube* [online]. 2015 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=zFIWWM0Iv-U>
- [11] Video: Adventurers and Drones Go Into the Volcano for Science. *National Geographic* [online]. 2015 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://adventureblog.nationalgeographic.com/2015/02/20/video-adventurer-and-drones-go-into-the-volcano-for-science/>
- [12] Amazon Prime Air. In: *Amazon* [online]. 2016 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?node=8037720011>
- [13] Determining Safe Access with a Best-Equipped, Best-Served Model for Small Unmanned Aircraft Systems. *NASA UTM* [online]. 2015 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: [https://utm.arc.nasa.gov/docs/Amazon_Determining_Safe_Access_with_a_Best-Equipped,_Best-Served_Model_for_sUAS\[2\].pdf](https://utm.arc.nasa.gov/docs/Amazon_Determining_Safe_Access_with_a_Best-Equipped,_Best-Served_Model_for_sUAS[2].pdf)
- [14] Google UAS Airspace System Overview. *NASA UTM* [online]. 2015 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: [https://utm.arc.nasa.gov/docs/GoogleUASAirspace_SystemOverview5pager\[1\].pdf](https://utm.arc.nasa.gov/docs/GoogleUASAirspace_SystemOverview5pager[1].pdf)
- [15] Drones to catch mosquitoes and help stop epidemics. In: *Eenadu India* [online]. 2015 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.eenaduindia.com/News/International/2015/06/16132927/Microsofts-drones-to-catch-mosquitoes-and-help-stop.vpf>
- [16] BROOKS, Rodney. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation* [online]. 1986, 2(1), 14-23 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.1109/JRA.1986.1087032. ISSN 08824967. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1087032/>

- [17] RUIZ-SERRANO, Amberlay, Miriam C. REYES-FERNANDEZ, Ruben POSADA-GOMEZ, Albino MARTINEZ-SIBAJA a Alberto A. AGUILAR-LASSERRE. Obstacle avoidance embedded system for a smart wheelchair with a multimodal navigation interface. In: *2014 11th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)* [online]. Orizaba: IEEE, 2014, s. 1-6 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.1109/ICEEE.2014.6978290. ISBN 9781479962303. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6978290/>
- [18] REHAN, Mohamed, Adil KUMAR, Sharan P. SREE SAI a Rajeshwari HEGDE. Design and analysis of a collision avoidance system for the visually impaired. In: *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)* [online]. India: IEEE, 2015, s. 0340-0343 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1109/ICCSP.2015.7322902. ISBN 9781479980819. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7322902/>
- [19] HISAHARA, Hiroshi, Yuki ISHII, Masahito OTA, Takeki OGITSU, Hiroshi TAKEMURA a Hiroshi MIZOGUCHI. Human Avoidance Function for Robotic Vacuum Cleaner through Use of Environmental Sensors: Roomba® Making Way for Humans. In: *2014 5th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation* [online]. Langkawi, Malaysia: IEEE, 2014, s. 64-67 [cit. 2017-05-06]. DOI: 10.1109/ISMS.2014.19. ISBN 9781479938582. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7280880/>
- [20] HO, Ping-Fan a Jyh-Cheng CHEN. WiSafe: Wi-Fi Pedestrian Collision Avoidance System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. 2016, PP(99), 1-1 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1109/TVT.2016.2598786. ISSN 00189545. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7539332/>
- [21] SHARMA, Sachin Umesh a Dharmesh J. SHAH. A Practical Animal Detection and Collision Avoidance System Using Computer Vision Technique. *IEEE Access* [online]. 2017, 5, 347-358 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2642981. ISSN 21693536. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7792584/>
- [22] SENESE, Mike. DJI Phantom 4: Finally an Obstacle-Avoiding, Object-Tracking Quadcopter. In: *Make* [online]. 2016 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://makezine.com/2016/03/01/dji-phantom-4-finally-an-obstacle-avoiding-object-tracking-quadcopter/>

- [23] Phantom 4 Pro. In: *DJI* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://www.dji.com/phantom-4-pro>
- [24] DJI: Guidance. In: *DJI* [online]. 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.dji.com/guidance/features>
- [25] Infrared Proximity Sensor - Sharp GP2Y0A21YK. In: *Sparkfun: Start something* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/242>
- [26] MÁZL, Roman. *Lokalizace pro autonomní systémy*. Praha, 2007. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Libor Přeučil.
- [27] RAMBABU, Rethnaraj, Muhammad Rijaluddin BAHIKI a Syaril AZRAD. Multi-sensor Fusion Based UAV Collision Avoidance System. *Jurnal Teknologi* [online]. 2015, 76(8), 89-93 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.11113/jt.v76.5630. ISSN 21803722. Dostupné z: <http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/5630>
- [28] CHEE, K.Y. a Z.W. ZHONG. Control, navigation and collision avoidance for an unmanned aerial vehicle. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2013, 190, 66-76 [cit. 2017-03-15]. DOI: 10.1016/j.sna.2012.11.017. ISSN 09244247. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092442471200698X>
- [29] MAGORI, V. Ultrasonic sensors in air. In: *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium ULTSYM-94* [online]. IEEE, 1994, 471-481 vol.1 [cit. 2017-03-23]. DOI: 10.1109/ULTSYM.1994.401632. ISBN 0780320123. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/401632/>
- [30] Robot Electronics [online]. [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <https://www.robot-electronics.co.uk/>
- [31] ČESENEK, David. *Mapování vnitřního prostředí autonomní helikoptérou*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Jan Chudoba.
- [32] *RobotShop: Putting robotics at your service* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.robotshop.com>
- [33] KARTHICK, T. a S. ARAVIND. Unmanned Air Vehicle Collision Avoidance System and Method for Safety Flying in Civilian Airspace.

- 2010 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology [online]. IEEE, 2010, , 116-119 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.1109/ICETET.2010.162. ISBN 9781424484812. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5698303/>
- [34] GUPTA, Nischay, Jaspreet Singh MAKKAR a Piyush PANDEY. Obstacle detection and collision avoidance using ultrasonic sensors for RC multirotors. In: *2015 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)* [online]. Noida: IEEE, 2015, s. 419-423 [cit. 2017-03-16]. DOI: 10.1109/ICSPCom.2015.7150689. ISBN 9781479967612. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7150689/>
- [35] HRABAR, S. 3D path planning and stereo-based obstacle avoidance for rotorcraft UAVs. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. IEEE, 2008, s. 807-814 [cit. 2017-03-22]. DOI: 10.1109/IROS.2008.4650775. ISBN 9781424420575. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4650775/>
- [36] VOJÁČEK, Antonín. Co je to Kalmanova filtrace ? In: *Automatizace.hw.cz* [online]. 2007 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007042901>
- [37] BANK, Dirk. A novel ultrasonic sensing system for autonomous mobile systems. In: *Proceedings of IEEE Sensors* [online]. IEEE, 2002, s. 1671-1676 [cit. 2017-03-17]. DOI: 10.1109/ICSENS.2002.1037375. ISBN 0780374541. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1037375/>
- [38] SRF08 Ultra sonic range finder: Technical Specification. *Robot Electronics* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf08tech.html>
- [39] BÁČA, Tomáš. *Model predictive control of micro aerial vehicle using onboard microcontroller*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Martin Saska.
- [40] SOBERS, David, Girish CHOWDHARY a Eric JOHNSON. Indoor Navigation for Unmanned Aerial Vehicles. In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009, s. - [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.2514/6.2009-5658. ISBN 9781600869785. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2009-5658>

- [41] SRF10 Ultra sonic range finder: Technical Specification. *Robot Electronics* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf10tech.html>
- [42] *Devantech SRF08 UltraSonic Ranger* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://coecsl.ece.illinois.edu/ge423/DevantechSRF08UltraSonicRanger.pdf>

Příloha A

Obsah CD

- **JS_BP.pdf** - tento dokument
- **program_hlavni** - složka s programem pro hlavní palubní počítač
 - **actuator.h**
 - **control_module.h**
 - **main_comp.cc** - hlavní program
 - **Makefile**
 - **mavcomm.cc**
 - **mavcomm.h**
 - **serial_port.cc**
 - **serial_port.h**
 - **thread_util.cc**
 - **thread_util.h**
- **srf_170420** - složka s poslední verzí programu pro Arduino Uno
 - **srf_170420.ino** - program musí být ve stejnojmenné složce