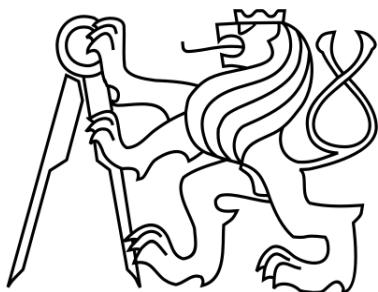


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Lokalizační a řídící systém čtyřtulky

Praha, 2013

Autor: Bc. Michal Vykouk

Vedoucí: Ing. Tomáš Krajník, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Michal Vykouk**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název téma: **Lokalizační a řídicí systém čtyřtulky**

Pokyny pro vypracování:

1. Porovnejte metody lokalizace a řízení čtyřrotorových helikoptér AR Drone [1,2].
2. Diskutujte funkce mobilního heliportu pro čtyřrotorové helikoptéry, používaného na katedře kybernetiky [3].
3. Rozšiřte heliport o lokalizační systém umožňující čtyřtulce rozšiřující její operační prostor. Navrhněte vhodnou konfiguraci kamerového systému, vyberte a upravte vhodnou lokalizační metodu, navrhněte a implementujte algoritmus stabilizující pozici helikoptéry na základě zpětné vazby s lokalizačního systému. Výsledný systém by měl umožňovat čtyřrotorové helikoptéry vzlétnout z pomalu se pohybujícího heliportu, dosáhnout požadované pozice v operačním prostoru poté bezpečně na pohybujícím se heliportu přistát.

Seznam odborné literatury:

- [1] Krajník, T. - Nitsche, M. - Pedre, S. - Přeučil, L. - Mejail, M.: A Simple Visual Navigation System for an UAV. In International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Piscataway: IEEE, 2012, p. 34. ISBN 978-3-9814766-1-3.
- [2] Krajník, T. - Vonásek, V. - Fišer, D. - Faigl, J.: AR Drone as a Platform for Robotic Research and Education. In RESEARCH AND EDUCATION IN ROBOTICS: EUROBOT 2011. Heidelberg: Springer, 2011, p. 172-186. ISBN 978-3-642-21974-0.
- [3] Saska, M. - Krajník, T. - Přeučil, L.: Cooperative Micro UAV-UGV Autonomous Indoor Surveillance. In International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Piscataway: IEEE, 2012, p. 36. ISBN 978-3-9814766-1-3.

Vedoucí: Ing. Tomáš Krajník, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2013/2014

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Tomáši Krajníkovi, Ph.D., za poskytnuté odborné rady a připomínky během zpracování této práce a všem ostatním lidem, kteří mne při tvorbě diplomové práce podporovali.

Prohlášení autora práce

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

Ve Slaném dne 8.5. 2013

Miroslav Výzond

Podpis autora práce

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá řízením a metodami určení polohy čtyřrotorové helikoptéry, v oblastech, které jsou pro pozemního robota nedostupné. Helikoptéra je součástí robotického týmu, který plní úlohu průzkumu neznámého operačního prostoru.

Pro rozšíření operačního prostoru čtyřtulky je možné využít několik metod. První metoda využívá lokalizace pomocí vnitřních senzorů čtyřtulky. Další možnosti jsou metody, které využívají k lokalizaci významné obrazové body (metody SLAM a „Teach and replay“). Poslední diskutovanou metodou je systém založený na lokalizaci předem známého kruhového vzoru ve snímaném obrazu.

Jako nevhodnější byla vybrána metoda externí lokalizace předem známého vzoru ve snímaném obrazu. Tento algoritmus byl implementován na PC a experimentálně ověřen s robotickou platformou P3-AT, mobilním heliportem a čtyřtulkou AR.DRONE.

Klíčová slova:

SLAM, Teach and replay, AR.Drone, heliport, vizuální navigace

Abstract

This thesis deals with control and methods of determining the position of a four-rotor helicopter in areas that are inaccessible for ground robot. The helicopter is a part of a robotic team that plays the role of exploration of unknown space.

To extend the operating space four-rotor helicopter we can use several methods. The first method of localization uses the internal sensors of the helicopter. Another methods, which use significant pixels of a video stream (SLAM method, "Teach and replay"). The last discussed localization system is based on the location of previously known circular pattern in the image.

As the most suitable method was chosen external localization method with known pattern in the image. This algorithm has been implemented on PC and experimentally verified with the robotic platform P3-AT, mobile heliport and four-rotor helicopter AR.Drone.

Key words:

SLAM, Teach and replay, AR.Drone, heliport, visual navigation

Obsah

1	<i>Úvod</i>	1
1.1	Motivace	1
1.2	Zaměření diplomové práce	2
2	<i>Popis průzkumného robotického týmu</i>	3
2.1	Robot	4
2.2	Heliport	5
2.3	Čtyrtulka - AR.Drone	7
2.3.1	Hardware AR.DRONE	9
2.3.2	Software AR.DRONE	10
2.4	Kooperace UGV a UAV	12
2.4.1	Fáze letu AR.Drone během průzkumu prostoru.....	13
3	<i>Metody navigace malých UAV</i>	15
3.1	Vizuální navigace čtyrtulky ve vzdálených oblastech	18
3.1.1	Lokalizace pomocí vnitřních senzorů AR.DRONE	18
3.1.2	SLAM - Simultánní lokalizace a mapování	20
3.1.3	Metoda „Teach and replay“	23
3.1.4	Lokalizace na základě významných bodů v obraze - SURFNav.....	23
3.1.5	Lokalizace na základě rozpoznávání grafického vzoru ve snímaném obraze	26
3.2	Detecte přistávací plochy	33
3.2.1	Označení přistávacího místa aktivními značkami.	33
3.2.2	Označení přistávacího místa pasivními značkami.....	34
3.2.3	Označení přistávacího místa grafickým symbolem.....	34
3.3	Ztráta vizuální navigace	36
4	<i>Popis vlastního programu</i>	38
4.1	Modul obsluhující externí lokalizační systém	39
4.2	Grafické rozhraní	40
4.3	Řídící rozhraní – Heliserver	42
4.4	Ověření matematického modelu čtyrtulky	43
4.5	Kalibrace kamery	45
5	<i>Experimentální výsledky</i>	48
5.1	Ověření vlastností externí webové kamery	48
5.2	Ověření letových vlastností čtyrtulky během prohledávání	51
6	<i>Závěr</i>	54
7	<i>Použitá literatura</i>	57
8	<i>Přílohy</i>	60

Seznam obrázků

Obrázek 1: Robot P3-AT	3
Obrázek 2: Robot P3-AT - rozměry.....	4
Obrázek 3: P3-AT s přimontovaným heliportem.....	6
Obrázek 4: Grafický vzor umístěný na svrchní straně heliportu	6
Obrázek 5: Rozměry grafického vzoru umístěného na svrchní straně heliportu	7
Obrázek 6: AR.Drone	8
Obrázek 7: Rozměry čtyřtulky.....	8
Obrázek 8: AR.DRONE kamery a globální souřadnicový systém	11
Obrázek 9: Fáze letu (menší obrázek v rohu znázorňuje pohled spodní kamery)	14
Obrázek 10: Přehled využívaných technologií pro lokalizační systémy	15
Obrázek 11: Příklady autonomního řízení letu, převzato z [14].....	17
Obrázek 12: SLAM metoda využívající částicových filtrů, převzato z [22]	22
Obrázek 13: Příklad detekování významných bodů v obrazu.....	24
Obrázek 14: Příklad detekovaného grafického vzoru.....	27
Obrázek 15: Zorné pole kamery (operační prostor).....	28
Obrázek 16: Obraz zorného pole kamery	30
Obrázek 17: Příklady detekce vzoru v zorném poli kamery	31
Obrázek 18: Heliport pro AR.DRONE	35
Obrázek 19: Znázornění regulačních smyček.....	36
Obrázek 20: Schematické znázornění funkcí a propojení programových částí.....	38
Obrázek 21: Grafické uživatelské rozhraní.....	41
Obrázek 22: Matematický model řízení polohy čtyřtulky, převzato a upraveno z [7] ...	43
Obrázek 23: Ověření matematického modelu čtyřtulky	44
Obrázek 24: Kamera pro externí lokalizaci	45
Obrázek 25: Kalibrační vzor pro kameru o rozměrech 52x52 mm	46
Obrázek 26: Rozmístění jednotlivých kalibračních snímků vzhledem ke kameře	46
Obrázek 27: Použitý grafický vzor	47
Obrázek 28: Graf měření úhlu natočení grafického vzoru vůči snímací kameře	49
Obrázek 29: Měření referenčních hodnot polohy grafického vzoru	50
Obrázek 30: Rozložení prohledávaného prostoru.....	51
Obrázek 31: Graf polohy čtyřtulky během jednotlivých fází letu	52
Obrázek 32: Graf rychlostí čtyřtulky během jednotlivých fází letu	52
Obrázek 33: Snímek spodní kamery čtyřtulky pořízené nad cílovou oblastí	53

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled možných typů a vlastností předávané zprávy.....	42
Tabulka 2: Zpětnovazební konstanty matematického motelu čtyřtulky	44
Tabulka 3: Parametry externí web kamery	45
Tabulka 4: Intrinlické parametry externí web kamery	47
Tabulka 5: Měření úhlu natočení podle svislé osy (osa z).....	49
Tabulka 6: Měření a odchylka jednotlivých prostorových souřadnic od reference.....	50

Seznam algoritmů

Algoritmus 1: Algoritmus detekce kruhového grafického vzoru	39
Algoritmus 2: Algoritmus určení prostorových souřadnic grafického vzoru ve snímaném obraze.....	40
Algoritmus 3: Výpočet akčního zásahu pro dosažení požadované polohy čtyřtulky	43

Seznam zkratek

API	Appication Programming Interface
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DHCP	Dynamic Host Configuration protokol
EKF	Extended Kalmn Filtr
FPS	Frames Per Second
Full HD	Full High Definition
GPS	Global Positioning System
GRASP Lab	General Robotics Automation Sensing and Perception Laboratory
IP	Internet Protocol
IR	Infra Red
LED	Light Emitting Diode
LQR	Linear Quadratic Regulator
MMP	Mechanical mobile platform
PC	Personal Comuter
PID	Proportinal Integral and Derivative controller
SLAM	Simultaneous Localisation and Mapping
SURF	Speed-Up Robust Features
UDP	User Datagram Protocol
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
USB	Universal Serial Bus
VGA	Video Graphics Array
WiFi	Wireless internet connection

1 Úvod

1.1 Motivace

Prvotní motivací pro tuto diplomovou práci byl můj zájem a nadšení pro letecké modely. K leteckému průmyslu se vždy přímo vztahovali automatičtí letoví piloti (autopiloti), kteří byli schopni na základě měřených dat udržet směr a výšku letu nebo v případě helikoptér i statickou polohu. Postupný vývoj umožnil výrobu malých lehkých akumulátorů, výkonných střídavých modelářských motorů a postupná minimalizace elektromechanických senzorů dovedly výrobce ke vzniku lehkých čtyřrotorových helikoptér, které jsou dostupné všem nadšencům modelového létání.

Hlavním důvodem pro volbu helikoptéry jakožto robotu pro průzkum je rychlosť prohledávání neznámého prostoru, dále je čtyřtulka schopna prozkoumat i velmi členitý povrch, který by pozemní robot nebyl schopen překonat. Ve venkovním prostředí jsou nejčastěji využívány helikoptéry se spalovacími motory. V uzavřených prostorách je nutné nahradit spalovací motory elektrickým pohonem.

Z důvodů jednoduché konstrukce čtyřtulky [2] a její nízké ceny je oblíbenou robotickou platformou pro návrh autonomního řízení a prozkoumávání neznámých uzavřených prostor. Velikost prohledaného prostoru ovšem přímo závisí na velikosti kapacity baterie. Z tohoto důvodu byl pro čtyřtulky vyroben mobilní přistávací modul [7], který může být nesen UGV. Výsledkem je kooperace mezi autonomně létající čtyřtulkou a jejím heliportem. Prvotní prohledávání prostoru je zajištěno pohyblivým heliportem. Dosáhne-li heliport při průzkumu na překážku, kterou nedokáže překonat, je dále pro průzkum dané oblasti použita čtyřtulka. Doposud čtyřtulka zkoumala jen velmi blízké okolí heliportu kvůli chybějící dostatečně přesné informaci o poloze přistávací plochy. Svoji polohu určovala jen na základě vnitřních senzorů. Pro vzdálenější lety je tedy nutné zvětšit operační letový prostor čtyřtulky.

1.2 Zaměření diplomové práce

Při spolupráci čtyřtulky s pozemním mobilním robotem během pohledávání prostoru je potřebné, aby byla čtyřtulka schopna prohledat a následně se i autonomně vrátit ze vzdálenějších oblastí, které jsou s pozemním robotem nedostupné. Cílem práce je rozšíření operačního prostoru robotického týmu.

V následujících kapitolách diplomové práce se zabývám metodami pro lokalizaci a pro přesnější řízení při dlouhodobých letech čtyřrotorové helikoptéry AR.Drone (čtyřtulky). U samotné čtyřtulky je kladen důraz na konstrukční jednoduchost a co nejmenší hmotnost. Umístění dalších senzorů umožňující velmi přesné určení vlastní polohy v prostoru by vedlo ke složitější konstrukci a ke změně ovladatelnosti. Ve své práci jsem se tedy zaměřil na volbu vhodných metod, jež umožňují přesnější lokalizaci s co nejmenšími nároky na přídavný hardware umístěný na samotné čtyřtulce. Příkladem takových metod je lokalizace pomocí detekce vzoru ve snímaném obraze z externí kamery umístěné na přistávací oblasti heliportu [2] nebo pomocí SURF navigace [12], která využívá kamery umístěných přímo na čtyřtulce.

Na základě zvolené metody lokalizace je následně nutno dodatečně modifikovat samotné funkce mobilního heliportu pro čtyřrotorové helikoptéry AR.Drone.

Stávající heliport byl doplněn o kameru lokalizačního systému, který rozšíří operační prostor čtyřtulky mimo dosah heliportu. Bylo tedy třeba navrhnout vhodnou konfiguraci kamerového systému, vybrat a upravit vhodnou lokalizační metodu a implementovat algoritmus, který zpětnovazebně stabilizuje polohu čtyřtulky v jejím operačním prostoru mimo dosah heliportu.

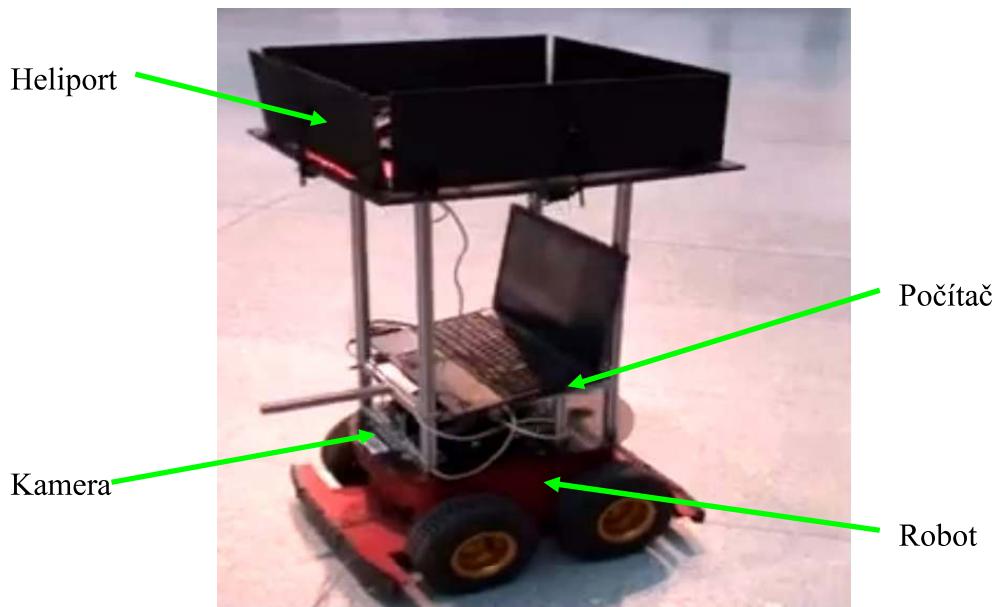
Výsledný programový systém umožňuje čtyřtulce vzlétnout z heliportu, autonomně se vzdálit mino heliport, prohledat prostor pod letící čtyřtulkou, následně se vrátit a přistát zpět na heliport.

Samotná diplomová práce je rozdělena do kapitol zabývající se jednotlivými úskalími vzniklými při návrhu a posléze i implementaci diplomové práce.

2 Popis průzkumného robotického týmu

Úplné prohledávání neznámého prostoru jen pomocí jediného autonomně pohybujícího se robota nemusí být možné. Pro pozemního robota jsou některé terénní nerovnosti nepřekonatelné a pozemní robot tak není schopen prozkoumat oblast za těmito překážkami. Pro robota pohybujícího se vzduchem je výhodná jeho prostupnost terénem. Doba letu čtyřtulky, a tím i velikost prohledaného prostoru, přímo závisí na kapacitě jejího akumulátoru. V nejbližší době bude proto mobilní heliport doplněn o schopnost dobíjet čtyřtulku.

Pro co nejlepší prozkoumání neznámého prostoru je tedy vhodné využít vzájemné kooperace létajícího robota (UAV) (Obrázek 6) a pozemních autonomně pohybujících se robotů (UGV) (Obrázek 1). Robotický tým se skládá z autonomně řízeného pozemního robota (viz. kapitola 2.1), který zároveň nese na pomocné konstrukci přistávací plochu (heliport) (viz kapitola 2.2). Jako létající robot je použita čtyřrotorová helikoptéra AR.DRONE (viz. kapitola 2.3).



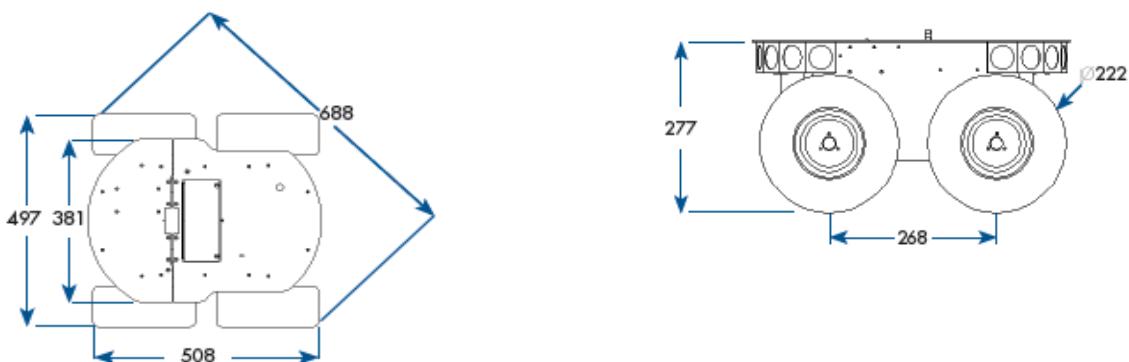
Obrázek 1: Robot P3-AT

2.1 Robot

Pro přepravu heliportu, počítače, kamer a čtyřtulky do operačního prostoru je zapotřebí použít autonomního pozemního robota.

Jako základ pozemní mobilní jednotky je použit robot Pioneer 3-AT (P3-AT) [21] firmy Adept Techology. P3-AT je univerzální jednotka pro použití ve venkovním prostředí. Jeho podvozek je vybaven čtyřmi gumovými koly s čtyřmi motory s enkodéry. Zdrojem energie je jeden akumulátor 12V 25Ah, který postačuje na přibližně 2 hodiny činnosti robota. Podvozek je pevný, robot se otáčí na pravou nebo levou stranu smykem. Pohyb je řízen vestavěnou řídící jednotkou. V přední a zadní části robota jsou nárazníky, které v případě kontaktu s překážkou pohyb robota elektricky nouzově zastaví.

Rozměry robota P3-AT [21] jsou patrné z obrázku (Obrázek 2). Hmotnost robota je 12 kg a podle podkladu unese užitečné zatížení na pevném podkladu 12kg, na trávě 10kg a na asfaltě jen 5kg (kolečka se špatně smýkají). Maximální rychlosť pohybu v před a vzad je 0,7 m/s a rychlosť otáčení 140 °/s.



Obrázek 2: Robot P3-AT - rozměry

Pro orientaci je prostor před robotem snímán kamerou Unibrain Fire-i601c s objektivem 7mm a elektronicky řízenou clonou. Dále je k systému připojen kompas TCM2.

Robot přepravuje také počítač, který je k procesorové desce podvozku připojen rozhraním RS232 a zpracovává nadřazené úlohy řízení pozemního robota i čtyřtulky (AR.Drone). Je vybaven operačním systémem Linux a pro navigaci robota využívá metodu SURFNav (viz. kapitola 3.1.4). Lokalizační algoritmy jsou napsány v jazyce C a C++.

Autonomní pozemní robot dopraví čtyřtulku co nejblíže k zájmovému prostoru. Tím zkrátí čtyřtulce nutnou dráhu letu nad cílovou oblast a zároveň poskytne prostředky pro externí lokalizaci čtyřtulky.

2.2 Heliport

Pod pojmem heliport si každý představí malou letištní plochu, na které přistávají helikoptéry. Dalším pojmem je helipad, což bývá většinou menší vyznačená přistávací plocha, která je nejčastěji umístěna v okolí nemocnic, nebo přímo na střeše budov. Pro přistávací a vzletovou plochu čtyřtulky (AR.Drone) užívám taktéž pojem heliport.

Samotný heliport [7] se skládá z přistávací plochy a řídící a pohonné jednotky se čtyřmi koly. Pohyb heliportu a jeho funkce je možné dálkově ovládat přes řídící jednotku počítačem. Pro propojení počítače s heliportem je použit převodník z USB na sériovou linku s obvodem FT232RL. Přenosová rychlosť byla nastavena na 9600 bps po 8 bitech, 1 stopbit bez parity. Řídící jednotka heliportu je vybavena mikrokontrolerem ATmega8 od výrobce Atmel, který obsluhuje klapky heliportu a je schopen srovnat čtyřtulku na přistávací ploše heliportu.

Přistávací plocha je čtvercová o délce 530 mm. Po obvodu je osazena čtyřmi sklápěcími klapkami. Pomocí klapk je čtyřtulka po přistání mechanicky vycentrována do přesné základní polohy. Jsou-li klapky ve svislé poloze je heliport uzavřen. Naopak s klapkami ve vodorovné poloze je heliport otevřený a čtyřtulka smí vzlétnout či přistát (Obrázek 3).

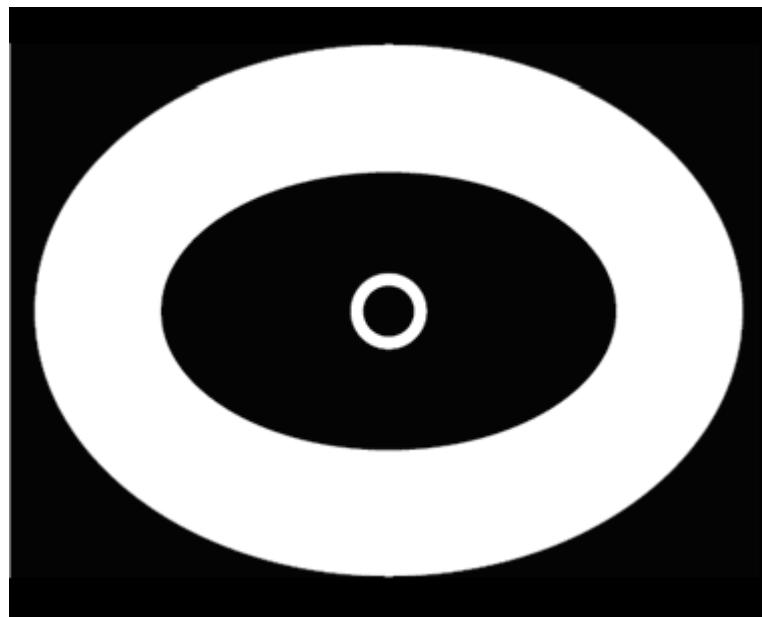
Pro potřebu lokalizace čtyřtulky je základna heliportu opatřena navigačním obrazcem. Tento obrazec je používán ve fázi vzletu a přistávání čtyřtulky. Pro přesné určení polohy čtyřtulky přímo nad heliportem je použita spodní kamera čtyřtulky. Při těchto fázích letu snímá obrazec umístěný na heliportu (Obrázek 4). Dle analýzy obrazu jsou vypočteny akční zásahy pro korekci letu čtyřtulky tak, aby hledaný grafický vzor byl ve středu snímaného obrazu. Grafický vzor pokrývá celou přistávací plochu heliportu. Byl navrhnut a nakreslen podle následujících parametrů pro konstrukci elips a kružnic (Obrázek 5). Barva obrazců (černá a bílá) je volena tak, aby byl co největší kontrast mezi jednotlivými obrazci. Eliptický vzor lze detektovat z výšky 4,5m , kruhový vzor uprostřed je pak používán v rozmezí 0 až 1m nad heliportem.



a) pohled z boku při přistání čtyřtulky a polohování klapiek heliportu

b) pohled shora na otevřený heliport

Obrázek 3: P3-AT s přimontovaným heliportem

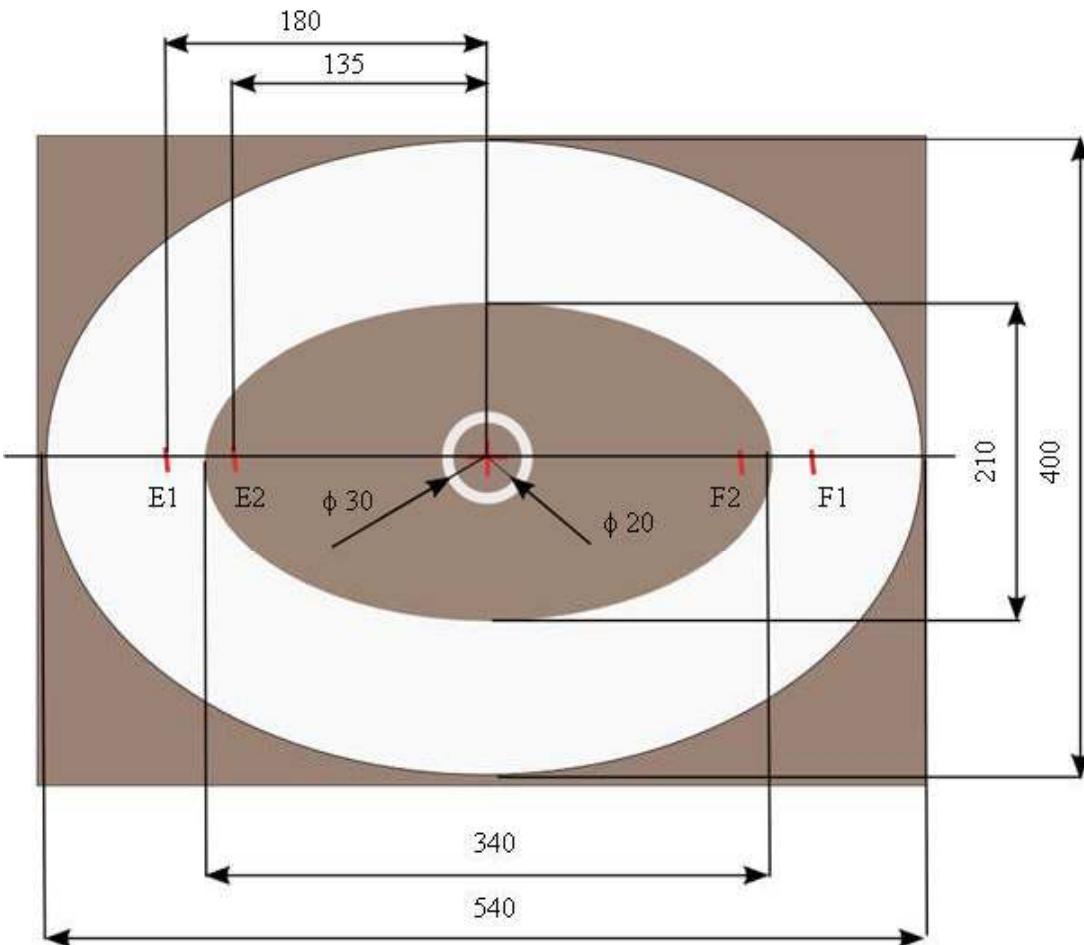


Obrázek 4: Grafický vzor umístěný na svrchní straně heliportu

Dále je na mobilním heliportu upevněna třetí, externí, kamera (Obrázek 24), která je využívána při letu čtyřtulky mimo heliport. Snímá letící čtyřtulku, konkrétně obrazec (Obrázek 14) upevněný na její zadní straně. Externí kamera tím poskytuje data pro korekci parametrů polohy při letu z heliportu na zadanou cílovou polohu a také při návratu zpět nad heliport.

Plánuje se rozšířit heliport o dobíjecí stanici pro čtyřtulku, což by dále rozšířilo její operační dosah.

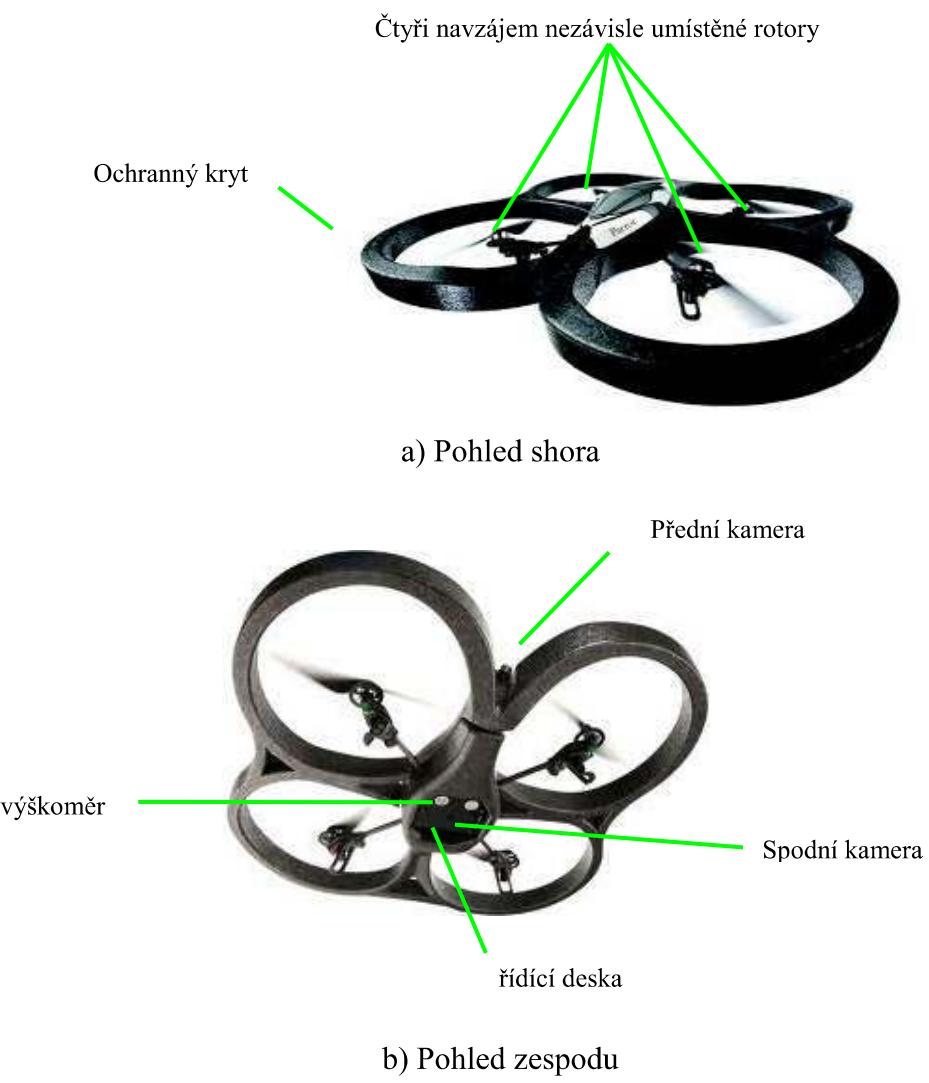
Podrobněji je lokalizace čtyřtulky podle obrazce (Obrázek 4) popsána v kapitole 3.1.5.



Obrázek 5: Rozměry grafického vzoru umístěného na svrchní straně heliportu

2.3 Čtyřtulka - AR.Drone

AR.DRONE firmy Parrot je čtyřrotorová helikoptéra (čtyřtulka). Na rozdíl od klasické helikoptéry, která má jeden hlavní (nosný rotor) a jeden menší rotor pro kompenzaci momentu otáčení podle svislé osy, má čtyřtulka čtyři navzájem nezávisle umístěné hlavní rotory (Obrázek 6). Výsledkem je zjednodušení mechanické konstrukce samotné čtyřtulky a i zvýšení efektivity využití tahu motorů pro let. Toto zjednodušení ale přináší nepříjemnosti v podobě obtížnější ovladatelnosti z důvodu vlastní nestability systému. Základní rozměry čtyřtulky jsou na obrázku (Obrázek 7).



Obrázek 7: Rozměry čtyřtulky

2.3.1 Hardware AR.DRONE

AR.DRONE je elektricky poháněná čtyřmotorová helikoptéra, která obsahuje tyto hlavní části: řídící desku, senzory umístěné na základní desce (tříosý akcelerometr, gyroskopy, výškoměr), rotory a jejich elektrický pohon a také snímací kamery. Podrobněji je hardware popsán v [2], [11].

Řídící deska

Hlavní částí je řídící deska obsahující 32bitový ARM9 procesor Parrot P6 s taktovací frekvencí 468MHz a malou operační paměť s kapacitou 128MB. Řídící deska také obsahuje Wi-Fi čip, spodní kameru a konektor pro přední kameru.

Na tuto základní desku jsou připojeny čtyři vysoce účinné bezkartáčové motorky. Dále jsou na řídící desce umístěny senzory pro měření zrychlení a náklonů v jednotlivých osách čtyřkulky (dvousý gyroskop, tříosý akcelerometr, přesný jednoosý vertikální gyroskop) a dva ultrazvukové senzory, které slouží k měření výšky letu nad terénem.

Jako operační systém je použita modifikace GNU/Linux systému – BusyBox.

Senzory

Čtyřkulka je vybavena jedním ultrazvukovým výškoměrem umístěným na spodní straně čtyřkulky.

Senzorové vybavení samotné čtyřkulky je schopno sledovat šest stupňů volnosti během celého letu čtyřkulky (Obrázek 8).

- posun ve všech prostorových osách (x, y, z)
- jednotlivé úhly náklonu podle prostorových os, dopředný náklon θ , boční náklon η a otočení podle vertikální osy ϕ .

Snímání posuvného pohybu v prostorových souřadnicích je zajištěno pomocí tříosého akcelerometru BMA150. Jednotlivé náklony jsou měřeny pomocí vestavěných gyroskopů. Dopředný a boční náklon je snímán pomocí dvousého gyroskopu IDG-500, který obsahuje i již zmínovaný vnitřní tříosý akcelerometr. Úhel natočení čtyřkulky podle vertikální osy je měřen pomocí samostatného gyroskopu XB-3500CV. Přesnost těchto gyroskopů je deklarována na $0,2^\circ$. Experimentálně však bylo zjištěno, že

gyroskop pro měření otáčení podle vertikální osy má velký drift, 12° za minutu za letu, a zhruba třetinový drift, 4° , byl zjištěn v pohotovostním režimu.

Relativní výška při letu samotné čtyřtulky je měřena pomocí vnitřního ultrazvukového senzoru umístěného na spodní straně těla čtyřtulky. Měření je prováděno ultrazvukovým signálem o frekvenci 40kHz a maximální měřitelná výška je deklarována na 6m.

Rotory

Pevné dvoulisté vrtule rotorů jsou jedinými akčními členy pro ovládání čtyřtulky. Čtyři hlavní rotory ($\phi 200$) jsou poháněny střídavými bezkartáčovými motory. Řídicí systém motorků je upevněn společně s motorky na nosném kříži, který je připevněn k řídící desce. Ve spodní části polypropylenového ochranného krytu je baterie, která zajišťuje napájení. Jedná se o tříčlánkovou lithium-polymerovou baterii o kapacitě 1 000 mAh a napětí 11,1 V.

Kamery

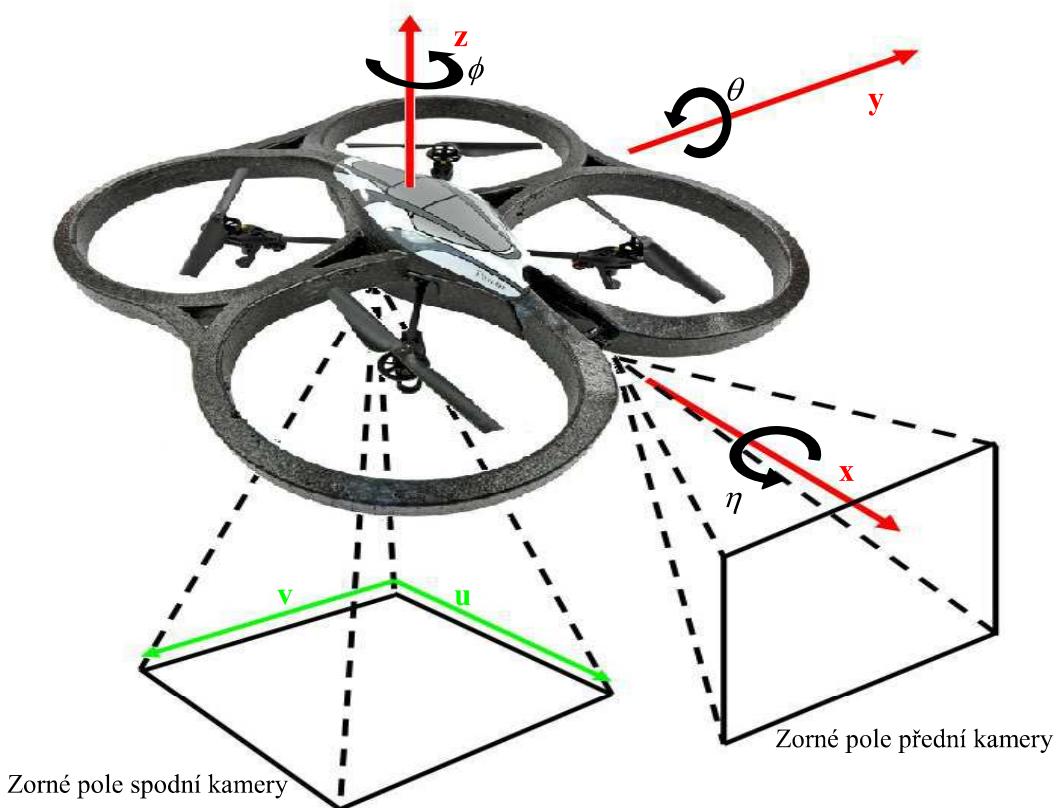
První, (přední) kamera směruje před čtyřtulkou ve směru osy x. Tato kamera v méém případě není pro lokalizaci používána. Druhá (spodní) kamera je namířena do prostoru pod samotnou čtyřtulkou (Obrázek 8).

Obraz ze spodní kamery je používán pro lokalizační systém čtyřtulky v jejím operačním prostoru. Přední kamera se snímacím CMOS čipem poskytuje širokoúhlý barevný obraz o maximálním rozlišení 320×240 obrazových bodů a její zorný úhel je přibližně 93° a frekvence snímání 15 snímků za sekundu. Spodní kamera také se snímacím čipem CMOS poskytuje barevný obraz, ale její rozlišení je mnohem menší 176×144 obrazových bodů a zorný úhel je omezen na 64° . Spodní kamera snímá 60 snímků za sekundu. Ohnisková vzdálenost a ostření obou kamer jsou pevně nastaveny již z výroby.

2.3.2 Software AR.DRONE

Propojení operačního systému GNU/Linux systému – BusyBox čtyřtulky a uživatelského rozhraní v PC je zajištěno pomocí Wi-Fi b/g spojení. AR.DRONE je v tomto případě DHCP server, na který se uživatelské rozhraní připojuje pomocí IP adresy a příslušného UDP portu.

Komunikace mezi uživatelským rozhraním a samotnou čtyřtulkou probíhá na třech kanálech – kanál příkazů, kanál přenášející navigační data a kanál poskytující obraz z jednotlivých kamer.



Obrázek 8: AR.DRONE kamery a globální souřadnicový systém

Komunikací přes příkazový kanál uživatel ovládá samotnou čtyřtulkou během letu. Uživatel má možnost měnit jednotlivé náklony vpřed, do boků, otáčet čtyřtulkou kolem svislé osy a měnit vertikální rychlosť. Vzlet a posléze i dosednutí je prováděno automaticky. Dále lze komunikačním kanálem měnit nastavení vnitřních senzorů a regulátorů. Řídící povely jsou přijímány s frekvencí 30 Hz.

Navigační kanál poskytuje informace o aktuálním stavu v jakém se čtyřtulka nachází – letí (signál motory v činnost), kalibrace (nastavení senzorů) a chybová hlášení (nízká kapacita akumulátoru, překročení maximálního náklonu v jednotlivých osách). Navigační kanál dále přenáší data z jednotlivých pohybových a polohových senzorů – aktuální dopředný a boční náklon, otocení kolem vertikální osy, výšku nad terénem (měřeno ultrazvukovým senzorem), odhady rychlostí pro jednotlivé prostorové osy a nakonec i aktuální stav akumulátoru.

Obrazový kanál přenáší bezeztrátově komprimovaný obraz z přední nebo spodní kamery (Obrázek 8). Pro potřeby této diplomové práce bylo rozlišení přední kamery čtyřtulky zmenšeno na 320×240 pixelů, aby byl urychlen datový přenos přes Wi-Fi spojení.

2.4 Kooperace UGV a UAV

Prohledávání prostoru je složitá operace, co se týče přesné lokalizace polohy robota v prostoru. Čtyřtulka (UAV) nebo samotný pozemní robot (UGV) velmi často nejsou schopni prozkoumat neznámý prostor ve všech jeho částech. Pozemnímu robovi mohou zabráňovat v prozkoumání části oblasti nepřekonatelné terénní překážky, za které nedosahují jeho nainstalované měřící senzory. Pro samotnou čtyřtulku je omezujícím faktorem pro prohledávání oblasti její maximální doba letu určená maximální kapacitou akumulátoru. Řešením, jak eliminovat tyto problémy, je vzájemná kooperace a rozdelení úloh při prohledávání prostoru mezi čtyřtulkou a mobilní heliport.

Doposud je prohledávání prostoru řešeno následujícím způsobem. Heliport (robot) postupně prohledává prostor. Pokud dojede k překážce, za kterou svými senzory není schopen pokračovat v prohledávání prostoru, dojde k vypuštění čtyřtulky (AR.Drone). Čtyřtulka vzlétne a prohledá prostor v nejbližším okolí heliportu a tím i tu část, která se nachází za terénní překážkou omezující heliport v prohledávání prostoru. Letící čtyřtulka pomocí spodní kamery může například pořídit několik snímků, které následně vyhodnotí vzdálený koncový uživatel.

V průběhu letu je čtyřtulka řízena pomocí interních senzorů (viz. kapitola 3.1.1). Samotný let čtyřtulky je rozdělen do několika navzájem navazujících fází letu. Při první a poslední fází letu (start a přistání) je k lokalizaci použita interní kamera umístěná na spodní straně čtyřtulky (Obrázek 8). Tato kamera je použita jen při lokalizaci v nejbližším okolí přistávací plochy (heliportu). Ve vzdálenějších polohách autonomního letového provozu, kdy není možné lokalizovat čtyřtulku spodní kamerou (obrazec heliportu je mimo snímaný prostor spodní kamery čtyřtulky), je čtyřtulka řízena vestavěnými akcelerometry a gyroskopem.

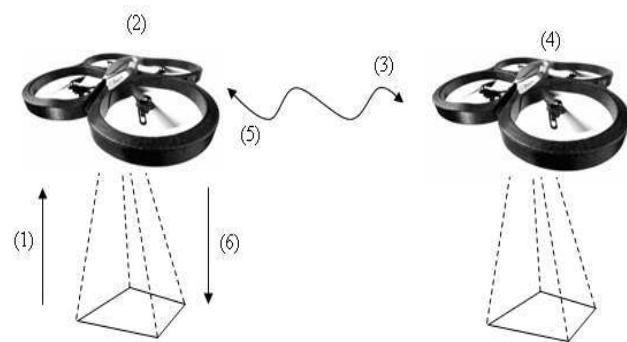
Způsob navigace jen na základě vnitřních senzorů je nepřesný a čtyřtulka má tendenci se během letu ztrácet, tj. nebyvá schopna se vrátit zpět nad přistávací plochu heliportu. Problém s prostorovou lokalizací čtyřtulky ve větších vzdálenostech od přistávací plochy heliportu je nutné řešit pomocí zpřesnění vnitřního navigačního

systému čtyřtulky doplněním o další lokalizační metodu. Metod pro lokalizaci čtyřtulky během letu je mnoho. Základní způsoby vizuální navigace jsou diskutovány v následujících kapitole (viz. kapitola 3). Využití externích lokalizačních metod zároveň umožňuje rozšíření operačního prostoru samotné čtyřtulky.

2.4.1 Fáze letu AR.Drone během průzkumu prostoru

Jak již bylo řečeno, poté co heliport narazí na „nepřekonatelnou“ terénní nerovnost, dojde ke vzletu samotné čtyřtulky. Let čtyřtulky během prohledávání prostoru lze rozdělit do několika samostatných navzájem navazujících stavů (Obrázek 9:):

- (1) start-vzlet
- (2) dosažení požadované výšky letu
- (3) let na určené souřadnice
- (4) prozkoumání cílové oblasti
- (5) návrat na heliport
- (6) přistání na heliport

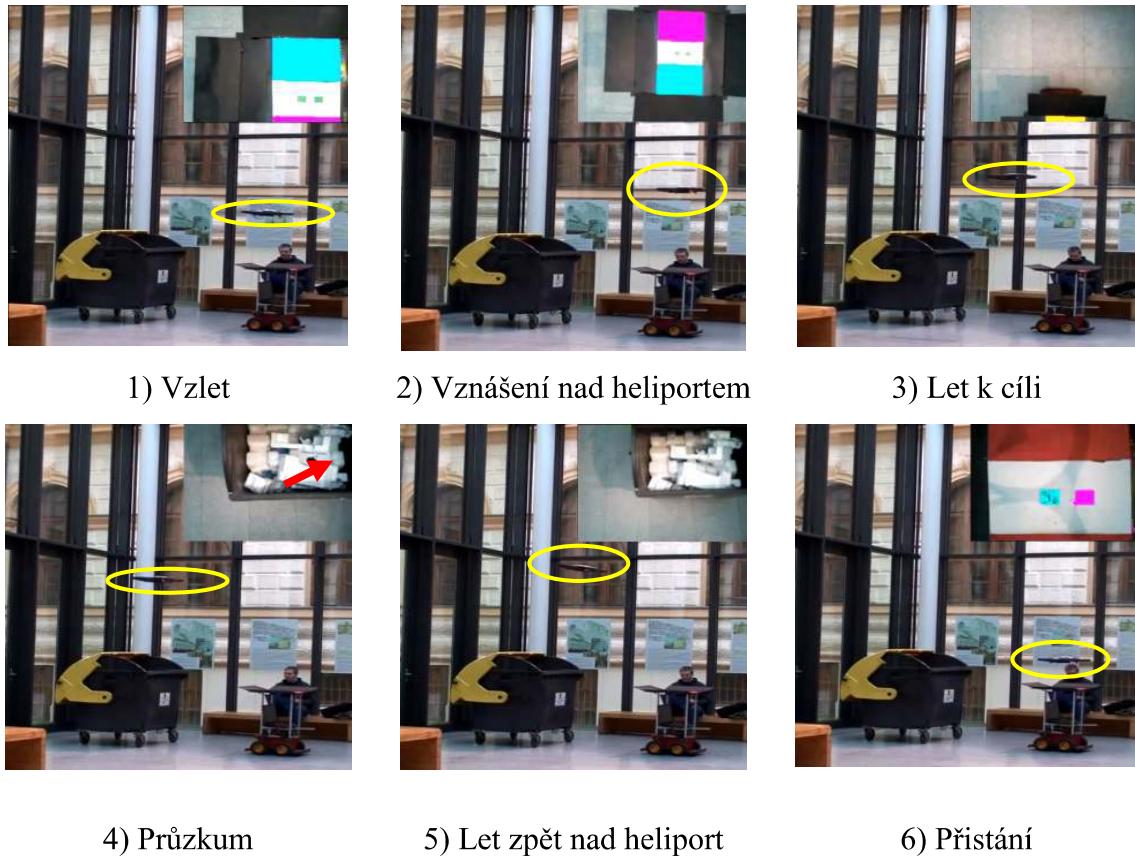


Při startu (první fáze letu) si čtyřtulka pomocí pozičního stavového regulátoru udržuje pozici přímo nad heliportem. Spodní kamera snímá lokalizační obrazec heliportu (Obrázek 4), který se nachází ve středu snímaného obrazu. Čtyřtulka jen zvyšuje svoji výšku (hodnotu pro souřadnice osy z). Směrovou orientaci udržuje shodnou s grafickým vzorem umístěným na svrchní straně heliportu (směr osy x je totožný s vektorem hlavní poloosy velkého grafického vzoru).

Jakmile čtyřtulka dosáhne požadované výšky nad heliportem (cca 0,5m , druhá fáze letu), jsou jednotlivým pozičním regulátorům (x,y,z) zadány nové aktuální požadované hodnoty polohy, kterou musí čtyřtulka dosáhnout.

V třetí fázi, přeletu na nové souřadnice, je lokalizace zajištěna pomocí externí webové kamery (viz. Kapitola 3.1.5). Let čtyřtulky je řízen na požadované globální polohové souřadnice. Počátek tohoto globálního souřadnicového systému je totožný s počáteční polohou čtyřtulky před samotným startem (nulový bod leží na středu heliportu).

Po dosažení požadované polohy (čtvrtá fáze) se čtyřtulka na nezbytně nutnou dobu zastaví a pořídí několik snímků zkoumané oblasti pomocí kamery umístěné na spodní straně čtyřtulky. Po pořízení snímků jsou do pozičních regulátorů zadány hodnoty polohy pro návrat zpět nad heliport.



Obrázek 9: Fáze letu (menší obrázek v rohu znázorňuje pohled spodní kamery)

Návrat zpět (pátá fáze letu), je formálně shodný s třetí fází letu. Liší se jen zadánými souřadnicemi pro koncové polohy letu zpět nad heliport.

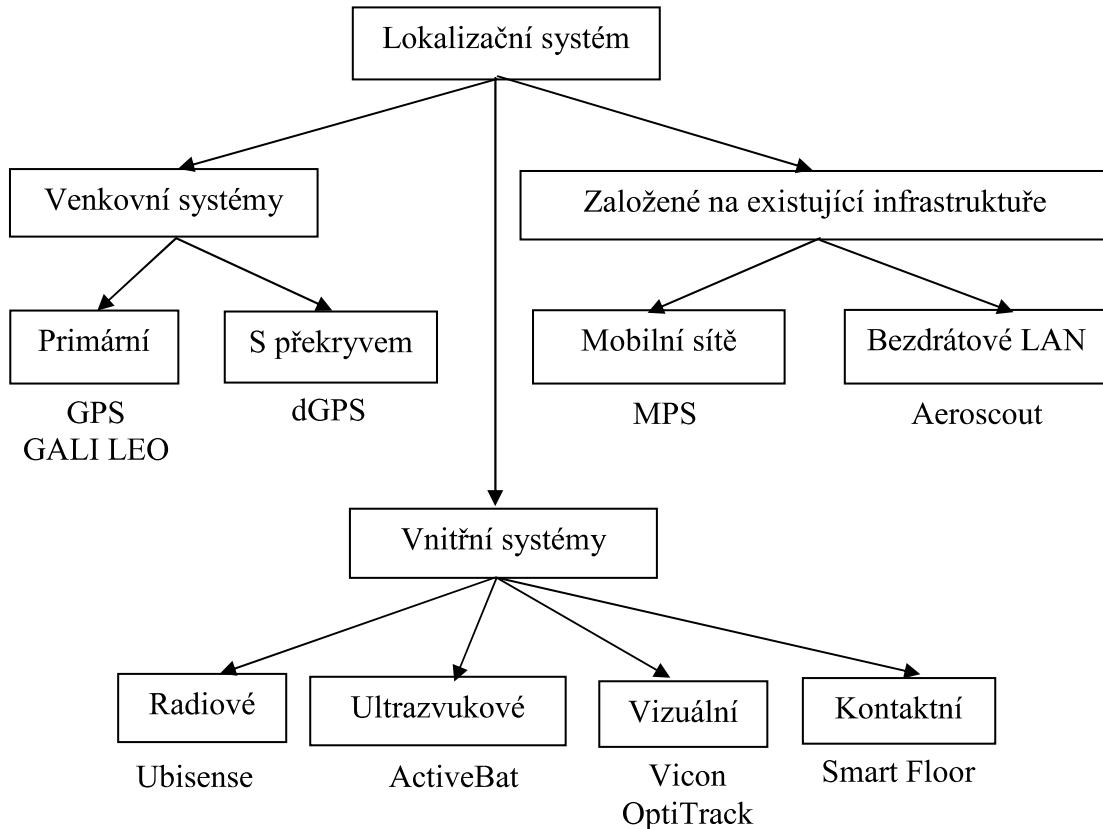
Poté, co je opětovně lokalizován obrazový vzor heliportu, dochází k přepnutí do poslední, šesté fáze letu (přistání). Čtyřtulka udržuje pozici přímo nad heliportem a postupně klesá. Jakmile čtyřtulka klesne pod 0,5 m, dojde z důvodu ztráty velkého grafického vzoru ze zorného pole k přepnutí na lokalizaci menšího grafického vzoru na heliportu (černé mezikruží na bílém pozadí). Čtyřtulka stále klesá a v případě, že dosáhne menší výšky než je bezpečná pádová výška (méně než 0,3m), jsou vypnuty elektrické pohony všech čtyř rotorů helikoptéry a čtyřtulka dosedne na přistávací plochu heliportu.

3 Metody navigace malých UAV

V několika posledních letech letecké bezpilotní prostředky (UAV) přilákaly zájem vědeckých společností. Do značné míry jsou již zapojeny do civilních a hlavně vojenských aplikací. Roboti schopní autonomního letu mohou být klíčovým článkem pro zjištění některých dostupných informací v zájmové oblasti. Mohou být také použity v oblastech, které jsou pro člověka nebezpečné (například chemické znečištění).

Autonomně pohybující se letoun může být nápomocen při prozkoumávání prostoru, vyhledávání zraněných osob, sledování podezřelých předmětů, prohledávání a vytváření mapy okolního prostředí. U všech zmíněných aplikací je zcela nezbytné, aby autonomně se pohybující robot dokázal s dostatečnou přesností určit vlastní polohu v daném prostředí.

Jednotlivé lokalizační systémy [23], [27] lze rozdělit do skupin podle využitých technologií (Obrázek 10).



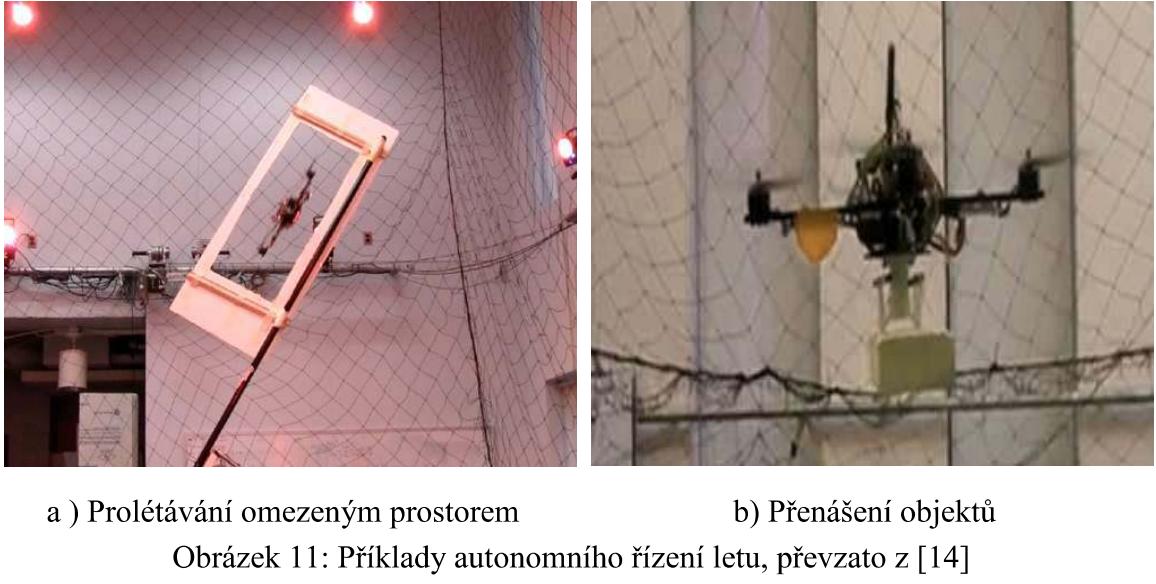
Obrázek 10: Přehled využívaných technologií pro lokalizační systémy

Pro lokalizaci ve venkovním prostředí lze problém lokalizace vyřešit použitím již dlouho známého systému GPS [27]. Systém GPS (GALILEO) je založena na měření vzdálenosti mezi přijímačem signálu (uživatel) a minimálně čtyřmi satelity, jejichž přesnou pozici předem známe. Přesnost systému GPS použitého v civilním prostředí je ± 3 m. Pro zpřesnění systému navigace pomocí GPS je využívána tzv. diferenciální GPS navigace (dGPS). Systém diferenciální GPS [27] se skládá z dvou přijímačů signálu GPS. První přijímač je pevně umístěn a slouží jako referenční bod, podle kterého jsou počítány korekce pro druhý přijímač. Druhý přijímač GPS signálu je umístěn na robottu. Relativní vzdálenost robottu od referenčního bodu je vypočtena jako rozdíl vzdáleností naměřených přijímačem na robottu a pevně umístěným referenčním přijímačem. Využitím systému diferenciální GPS lze pohyb ve venkovním prostředí zpřesnit na několik desítek centimetrů. Největší nevýhodou navigace pomocí GPS je prostupnost signálu a jeho odrazy na pevných překážkách. Systém navigace není vhodný pro autonomní navigaci robotta v budovách.

Tento problém lze eliminovat využitím již existujících vysílačů mobilního signálu [27] nebo bezdrátových sítí. Pro výpočet lokalizace robotta v prostoru pomocí mobilní sítě GSM je třeba přijímat signál z minimálně tří anténních vysílačů. Výpočet pozice je opět založen na měření doby mezi vysláním a přijmutím signálu a síly signálu. Navigace pomocí mobilní sítě dosahuje přesnosti ± 50 m. Při lokalizaci robotta pomocí vysílačů pro WiFi sítě (systém AeroScout [25]) je princip podobný. Měří se vzdálenost od vysílací antény a doba mezi vysláním a přijmutím signálu popřípadě ještě síla samotného WiFi signálu. Lokalizační systém od firmy AeroScout je používán převážně v medicínských zařízeních, kde je využita pro efektivní rozmístění lékařských přístrojů, na přesnost lokalizace zde není kladen důraz.

Pro navigaci v budovách je tedy třeba se spolehnout na externí lokalizační systémy, využívající pro lokalizaci senzorů umístěných přímo na robottu (laserové dálkoměry, odometrie) nebo na podložce, po které se robott pohybuje (Smart Floor [28]). Systém Smart Floor je založen na pravidelném rozmístění tlakových senzorů v podložce, přesnost tohoto systému je určena počtem senzorů na ploše. Další možnosti pro navigaci v uzavřených prostorách je využití ultrazvukového (ActiveBat [24]) nebo radiového signálu, jako je tomu v případě systému od firmy Ubisense [26]. Oba zmíněné systémy pracují na principu triangulace přijímaných signálů. Systém ActiveBat dosahuje přesnosti ± 3 cm. Systém od firmy Ubisense je využíván převážně v průmyslovém

prostředí, kde slouží k lokalizaci jednotlivých částí firemní výroby. Dosahuje přesnosti ± 15 cm. Pro vědecké účely je používána vizuální navigace. Často používaným navaigačním systémem jsou systémy od firmy Vicon nebo OptiTrack.



V laboratoři GRASP Lab na Pensylvánské univerzitě na katedře Mechanického inženýrství se problémem velmi přesného řízeného letu čtyřrotorových helikoptér [14] zabývá výzkumný tým vedený Dr. Vijay Kumarem. Používají zde menší verze čtyřtulek. Každá čtyřtulka je vybavena vnitřními snímači měřícími její aktuální rychlosť a úhly natočení. Pro zpřesnění lokalizace čtyřtulky v prostoru je čtyřtulka opatřena několika pasivními optickými značkami, které jsou sledovány komerčním sledovacím zařízením Vicon MXT40. Aktuální pozice vypočtená pomocí lokalizačního systému Vicon je poté předávána pozičním regulátorům čtyřtulek.

Tento vysoce přesný optický sledovací systém je natolik dokonalý, že je možné čtyřtulkou manévrovat do takové míry, že dokáže proletět skrze otevřené okno (Obrázek 11a) nebo postavit sloupec z kostek poskládaných na sebe (Obrázek 11b).

Navigační systém Vicon je dostatečně přesný lokalizační systém, ale pro účely této práce je cenově nedostupný a tak je třeba využít jiných nekomerčních vizuálních navaigačních systémů.

3.1 Vizuální navigace čtyřtulky ve vzdálených oblastech

V následujících kapitolách bych se rád věnoval nekomerčním metodám pro určení polohy čtyřtulky. Všechny uvažované metody jsou založeny na základě vizuální navigace.

Metod na určení aktuální polohy je několik:

- lokalizace pomocí vnitřních senzorů,
- SLAM - Simultánní lokalizace a mapování,
- metoda „Teach and replay“,
- lokalizace na základě významných bodů v obraze,
- lokalizace na základě rozpoznávání grafického vzoru ve snímaném obraze.

Na základě dat o aktuálním směrovém zrychlení a jednotlivých náklonech (otočení podle vertikální osy ϕ , dopředný náklon θ a boční náklon η), které získáváme přímou komunikací se čtyřtulkou, je možné zjistit její aktuální pozici. Tato pozice je následně použita ve zpětnovazební regulační smyčce.

V následujících kapitolách se jimi budeme zabývat podrobněji.

3.1.1 Lokalizace pomocí vnitřních senzorů AR.DRONE

Jednou z možností, jak určit aktuální polohu čtyřtulky je výpočtem pomocí senzorů pohybu umístěných přímo na řídící desce čtyřtulky.

Z akcelerometru je pomocí integrace určena aktuální hodnota rychlosti, kterou čtyřtulka posílá přes navigační komunikační kanál.

$$v_x = \int_t^{t+T_s} a_x dt + v_{offset}, \quad (1)$$

kde T_s je délka časového úseku, mezi dvěma měřeními a_x je aktuální hodnota zrychlení ve směru osy x . Pro osy y a z platí obdobný výpočetní vzorec, jen je třeba brát v úvahu zrychlení pro zvolenou osu. Jelikož čtyřtulka je systém s šesti stupni volnosti, je při výpočtu směru zrychlení brát v úvahu i jednotlivé úhly náklonu čtyřtulky (Obrázek 8).

Samotná lokalizace čtyřtulky jen na základě interních akcelerometrů není dostačující, neboť integrací dochází zanesení šumových hodnot do výsledné hodnoty polohy čtyřtulky v prohledávaném prostoru. Výsledkem tohoto výpočetního procesu je nepřesnost, která navíc vzniká s dobou letu.

Zpřesnění odhadů rychlosti letu čtyřtulky a tím i výsledné polohy čtyřtulky je řešeno na základě výpočtu rychlosti z optického toku vertikální kamery. Rozdíl mezi rychlostí určenou z optického toku a rychlostí určenou na základě interních akcelerometrů je použit ke kompenzaci offsetu akcelerometrů. Pro výpočet rychlosti na základě optického toku z vertikální (spodní) kamery [11] jsou přímo v čtyřtulce naimplementovány dva algoritmy.

Jako výchozí metoda pro výpočet rychlosti pohybu je pro čtyřtulky zvolen algoritmus „**multi-resolution scheme**“. Tento algoritmus vypočítává rychlosť na základě velikosti posunu dvou po době jdoucích obrazových snímků. Nevýhodou metody je její menší robustnost, ale na druhou stranu je vyhodnocování obrazu spolehlivé i pro méně kontrastní snímky. Navíc výpočetní časová náročnost je konstantní jak pro velké tak i pro malé rychlosti pohybu čtyřtulky.

Další metodou pro výpočet rychlosti na základě optického toku je metoda „**corner tracking**“. Tato metoda vyhodnocuje obrazový posun pro předem nastavený počet významných obrazových bodů.

Algoritmy jsou navzájem nezávislé a je možné mezi nimi nezávisle přepínat. Pokud například klesne počet významných bodů pod minimální mez, je automaticky přepnuto na první algoritmus.

Výšku letu lze určit pomocí již zmiňovaného integrovaného ultrazvukového výškoměru. Ten ale také není vhodný pro dlouhodobé automatické určení výšky letu. Ultrazvukový výškoměr neudává hodnotu absolutní výšky letu (vůči místu startu), ale relativní (aktuální) výšku letu nad terénem v daném místě. Jeho nepřesnost je zhruba 10%. Z toho vyplývá, že pokud čtyřtulka AR.DRONE při svém autonomním letu přiletí nad jakoukoliv terénní nerovnost, začne podle charakteru překážky stoupat nebo klesat. Řídící regulátory mají snahu udržovat požadovanou výšku nad terénem.

Jelikož ultrazvukový senzor udává jen relativní výšku letu, je výškoměr použit jen při automatickém vzletu a přistání, kdy je potřeba kontrolovat aktuální výšku nad přistávací plochou heliportu.

Využití interních pohybových senzorů je ale vhodné jen pro malé časové úseky. Při delším letu pomocí integrovaných akcelerometrů dochází k velkým nepřesnostem v určení aktuální polohy čtyřtulky. Nepřesnosti jsou způsobené vlivem dvojitého integrování šumů na senzorech měřící aktuální hodnoty zrychlení v jednotlivých osách.

3.1.2 SLAM - Simultánní lokalizace a mapování

Metoda SLAM [18] je lokalizační proces při kterém mobilní robot současně vytváří mapu prostředí, ve kterém se pohybuje, a zároveň využívá tuto mapu ke své vlastní lokalizaci. Pro samotný proces lokalizace není nutné předem znát informace o nalezených významných bodech.

Robot během pohybu zadáným prostorem zaznamenává svou aktuální pozici $X_{0:k} = \{x_0, \dots, x_k\}$, regulační zásahy $U_{0:k} = \{u_1, \dots, u_k\}$ potřebné k přechodu z minulé na aktuální pozici a vektory charakterizující nalezené významné body – vektor pozice bodu $m = \{m_1, \dots, m_n\}$ a vektor $Z_{0:k} = \{z_1, \dots, z_k\}$, pod kterým byl referenční bod detekován z pohledu robota.

Základem metody SLAM je popis dynamiky pohybu robota

$$P(x_k | x_{k-1}, u_k) \Leftrightarrow x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k, \quad (2)$$

kde $f(x_{k-1}, u_k)$ popisuje kinematiku modelu a w_k je aditivní bílý Gausovský šum. Model prohledávající okolí lze popsát pomocí následujícího vztahu

$$P(z_k | x_k, m) \Leftrightarrow z_k = h(x_k, m) + v_k, \quad (3)$$

kde $h(x_k, m)$ popisuje geometrii pozorování okolí a v_k je aditivní bílý Gausovský šum.

Na základě těchto vztahů je možné vypočítat střední hodnotu

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{k|k} \\ \hat{m}_k \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} x_k \\ m \end{bmatrix} \Bigg| Z_{0:k}, \quad (4)$$

a kovarianční matici

$$P_{k|k} = E \left[\begin{pmatrix} x_k - \hat{x}_k \\ m - \hat{m}_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k - \hat{x}_k \\ m - \hat{m}_k \end{pmatrix}^T \middle| Z_{0:k} \right], \quad (5)$$

Pomocí rozšířeného Kalmanova filtru (**EKF-SLAM**) je následně vypočítána odhadovaná hodnota polohy robota v prostoru a poloha významných orientačních bodů na mapě. Pokud při letu robota dojde ke znovunalezení orientačního bodu v obrazu, je aktualizována poloha robota a kovarianční matice orientačních bodů obsažených v naučeném prostoru. V opačném případě je orientační bod uložen do paměti pro další vyhodnocení.

Přesnost uložené mapy lze zvýšit několikerým opakováním letu po zadané trase, neboť opětovným nalezením téhož orientačního bodu lze částečně eliminovat neurčitosti vzniklé nepřesným měřením polohy při předešlém detekování orientačního bodu.

Vizuální lokalizace pomocí metody SLAM nemusí být založena jen na využití rozšířeného Kalmanova filtru. Alternativou k EKF je využití metod rekurzivního vzorkování Monte Carlo konkrétně pak Rao-Blackwellisova filtru. Výsledná metoda je nazývána **FastSLAM** [18].

Pro FastSLAM platí stejný popis dynamiky pohybujícího se robota (2), zatímco pro popis modelu pozorování prostředí platí

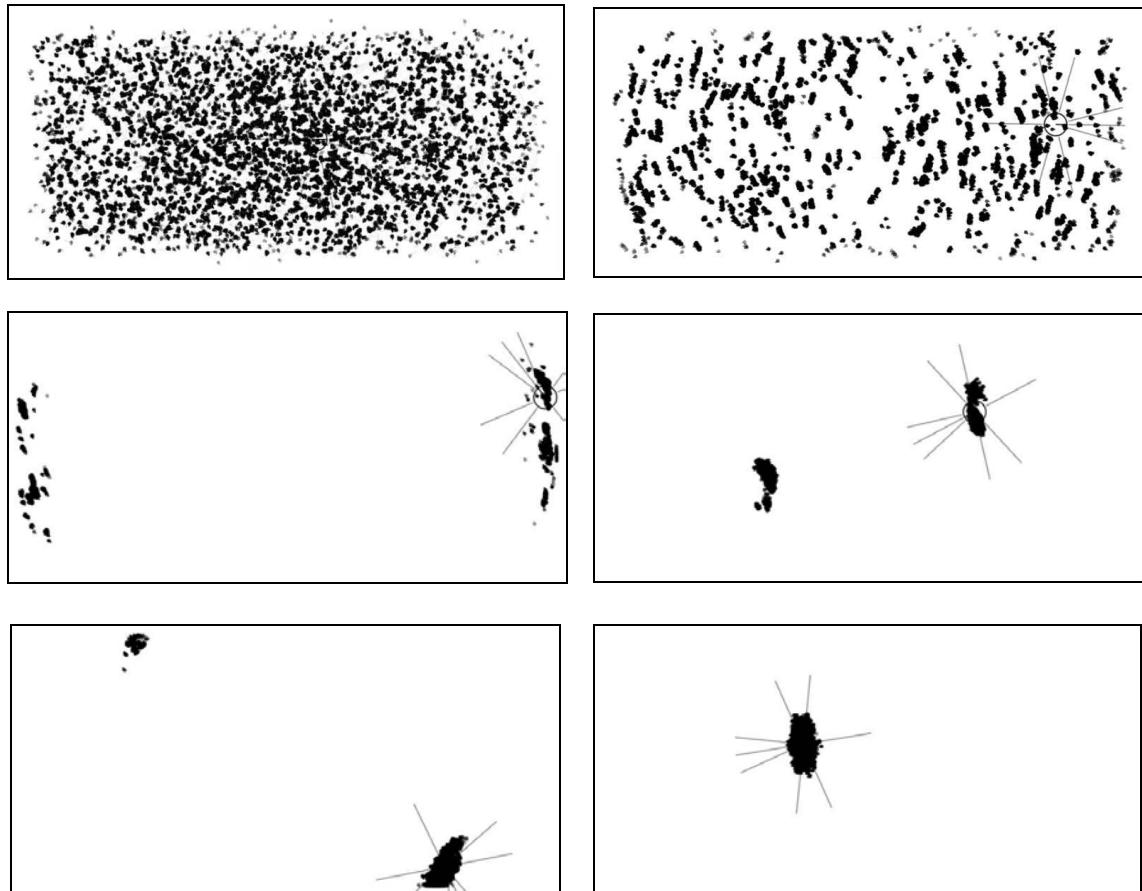
$$P(z_k | X_{0:k}, Z_{0:k-1}), \quad (6)$$

Popis mapy při sledování trajektorie lze využitím částicového Rao-Blackwellisova filtru reprezentovat sadou nezávislých referenčních bodů s Gausovským rozložením. Jednotlivé referenční body jsou na rozdíl od EKF-SLAM ještě váhovány na základě významnosti během sledování. Z důvodů nezávislosti referenčních bodů není nutné přepočítávat polohu všech referenčních bodů v mapě, ale jen polohu aktuálně používaných významných bodů. Aktualizace právě sledovaných bodů je prováděna pomocí měření polohy robota a následného použití rozšířených Kalmanových filtrů pro každý sledovaný referenční bod samostatně. Nezpozorované významné body nejsou nikterak aktualizovány.

Při autonomním letu je robot orientován dle nejvýznamnějších orientačních bodů a nepoužívané orientační body jsou postupem času „zapomínány“.

Celý proces zapomínání je znázorněn na následujících snímcích (Obrázek 12). Na snímcích je znázorněno, jak robot postupně zpřesňuje odhad aktuální polohy v

symetrické obdélníkové místonosti. Referenční body jsou označeny černými tečkami, robot je znázorněn kružnicí s rozmístěnými senzory.



Obrázek 12: SLAM metoda využívající částicových filtrů, převzato z [22]

Největší nevýhodou lokalizace pomocí metody EKF-SLAM jsou její vysoké nároky na výkon a paměť během samotné lokalizace. Při každé detekci orientačního bodu je nutné přepočítat relativní pozice všech předem nalezených orientačních bodů, ze kterých je následně počítána aktuální poloha robota. Pro určení lokalizace čtyřtulky během letu je také nutné mít velký počet správně identifikovaných předmětů. Problém nastává u objektů, které z různých úhlů pohledu vypadají rozdílně.

Složitost samotné mapy roste s druhou mocninou počtu nalezených orientačních bodů ve snímaném obrazu, lepších výsledků proto dosahuje metoda FastSLAM, kde mapa má lineární složitost. Limitujícím faktorem pro algoritmus je náročnost inverse kovarianční matice popisující referenční body.

3.1.3 Metoda „Teach and replay“

Další metodou pro navigaci čtyřtulky během průzkumného letu můžeme použít tzv. metodu „Teach and Replay“ [19].

Tato metoda je založena na podobném principu jako předchozí metoda. Během učící fáze je prohledáván okolní prostor a vytvářena mapa neznámého prostředí. V prohledávaném prostředí jsou taktéž vyhledávány charakteristické orientační body, které jsou posléze opětovně vyhledávány při autonomním letu.

Během autonomního letu jsou na aktuálních snímcích letu vyhledávány předem známé orientační body. Poloha orientačního bodu na aktuálním snímku je porovnávána s polohou referenčního bodu na snímku z požadované cílové pozice čtyřtulky. Čtyřtulka během průzkumu letí stále v před a je kontrolován jen směr letu na předem známou pozici. Výšku letu nad terénem můžeme měřit integrovaným ultrazvukovým výškoměrem nebo taktéž ze změny polohy pozice referenčního bodu v aktuálním snímku prohledávaného prostoru.

Na rozdíl od metody SLAM během letu již nedochází k opětovnému přepočítávání souřadnic všech referenčních bodů trajektorie, ale pouze k jejich sledování. Nevýhodou metody „Teach and Replay“ je mapa, tvořená relativními vzdálenostmi jednotlivých referenčních bodů trajektorie. Vzdálenosti na referenční mapě čtyřtulky nemusejí odpovídat skutečným hodnotám vzdáleností referenčních orientačních bodů.

3.1.4 Lokalizace na základě významných bodů v obraze - SURFNav

Další metodou pro lokalizaci čtyřtulky pomocí jedné kamery je měření posunu ve dvou po sobě jdoucích snímcích (multi-resolution scheme) nebo charakteristických bodů nalezených v obraze pomocí algoritmu SURF (Speed-Up Robust Features) [12].

Pro navigaci čtyřtulky je z těchto dvou metod nejčastěji používána metoda využívající detekce významných bodů v obraze („corner tracking“). Pro lokalizaci čtyřtulky v prostoru pomocí této metody jsou kromě dat získaných z přední snímací kamery použity i integrované senzory na řídící desce čtyřtulky. Samotnou metodu lokalizace pomocí významných obrazových bodů lze rozdělit do několika navzájem navazujících částí:



Obrázek 13: Příklad detekování významných bodů v obraze

Nalezení významných bodů v kamerových snímcích

V první fázi detekce je barevný obraz převeden na šedotónový. Dále dochází k nalezení významných bodů (například jasné světlé body) ve zpracovaném obraze. V druhé fázi je pro takto nalezené body vypočten charakteristický vektor jakožto invariant homografického zobrazení. Výsledkem tohoto výpočetního procesu je soubor dat obsahující obrazové souřadnice významného obrazového bodu a k němu náležející oblast detekce (poloha čtyřtulky při první a poslední detekci bodu). Algoritmus je robustní vzhledem k náklonu a rotaci během pozdějšího autonomního letu čtyřtulky, neboť množství detekovaných obrazových bodů obvykle přesahuje řády stovek.

Fáze naučení požadované trajektorie letu

V této fázi navigačního algoritmu je nutné řídit čtyřtulku ručně, nebo nezávislými navigačními algoritmy. Při startu řízeného letu si čtyřtulka automaticky pořizuje sekvenci několika po sobě jdoucích snímků. Ve snímcích vyhledá stabilní významné obrazové body. Stabilní body jsou body, které lze detektovat na větším počtu po sobě jdoucích kamerových snímcích. Při první detekci je bodu přiřazena jeho obrazová souřadnice, aktuální (počáteční) vzdálenost, při které byl detekován. Během

pozdějšího letu je opět snímán prostor před letící čtyřtulkou, přičemž dochází k vyhledávání již nalezených významných bodů v obraze a zaznamenání jednotlivých údajů o poloze zhledem k místu startu a náklonu samotné čtyřtulky. Je-li nalezen stabilní obrazový bod, je tomuto bodu přiřazena aktuální obrazová souřadnice a vzdálenost vzhledem k místu startu. Pokud není významný bod detekován na více jak třech po sobě jdoucích snímcích ze zkoumaného prostoru před čtyřtulkou, dojde k ukončení dalšího vyhledávání tohoto obrazového bodu. Po ukončení detekce stabilního obrazového bodu je popis bodu obsahující obrazové souřadnice významného obrazového bodu a k němu náležící oblast detekce (poloha čtyřtulky při první a poslední detekci) uložen mezi data popisující danou část trajektorie.

Tímto způsobem se čtyřtulka „naučí“ část trajektorie letu. Delší trajektorie letu se skládají z menších, navzájem navazujících částí. Fázi naučení trajektorie letu ukončuje sám uživatel.

Navigace

V navigační fázi, kdy je požadován autonomní let čtyřtulky, se nejprve načtou data popisující aktuální část trajektorie letu. Během letu je snímán prostor před čtyřtulkou a v získaných snímcích jsou vyhledávány v předchozí fázi naučené významné obrazové body charakteristické pro aktuální část trajektorie. Přičemž dochází k vyhledávání pouze obrazových bodů, které mají svou první detekční vzdálenost v obraze menší případně větší než je aktuální vzdálenost čtyřtulky vzhledem k místu startu. Pro takto zvolené obrazové body z dat udávající jejich obrazové a polohové souřadnice při první a poslední detekci, je na základě lineární interpolace vypočtena předpokládaná poloha významného stabilního bodu v aktuálně pořízeném snímku. Interpolovaným obrazovým bodům je na základě Euklidovské vzdálenosti jejich deskriptorů přiřazen nejpodobnější stabilní bod z předem naučeného souboru dat. Pro interpolovaný a přiřazený stabilní obrazový bod je vypočten posun v horizontální a vertikální ose obrazu. Obrazový posun v jednotlivých souřadnicích je v regulátoru přepočten na akční zásah korigující směr a výšku letu čtyřtulky. Pro složitější trajektorie je algoritmus opakován s aktuálními daty obsahujícími významné obrazové body dané části trajektorie letu.

Autonomní let

Při startu čtyřtulky dojde k nastavení počáteční (startovní) pozice a zahájení snímání prostoru kamerou. Ve snímcích jsou vyhledávány již naučené významné body obrazu. Významné body jsou spárovány a je vypočten horizontální a vertikální posun každé dvojice. Výsledný horizontální a vertikální posun ve snímaném obraze je brán jako modus (nejčastější hodnota) posunu jednotlivých dvojic charakteristických bodů v obraze. Horizontální posun v obraze znamená otáčení čtyřtulky podle svislé osy a vertikální posun udává a charakterizuje po přepočtení rychlosti stoupání čtyřtulky.

Hlavní výhodou tohoto algoritmu je jeho programová jednoduchost. Umožňuje využít integrovaných kamer čtyřtulky bez potřeby lokalizovat čtyřtulku pomocí externích lokalizačních prostředků. Nedostatkem tohoto způsobu lokalizace je celkem velká nepřesnost integrovaných senzorů při dlouhých trajektoriích letu.

Další nevýhodou pro použití této lokalizace je požadovaný vysoký kontrast obrazu a nutná vysoká členitost obrazu, aby bylo možné identifikovat a sledovat významné body.

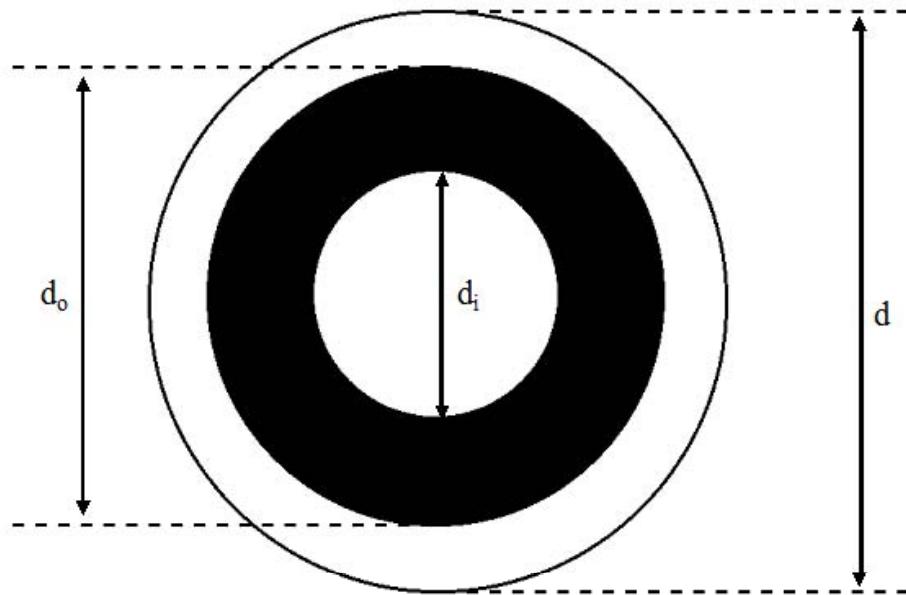
Jelikož kvalita navigace během autonomního letu čtyřtulky závisí na přesnosti vnitřních senzorů, je tato metoda navigace použita u pozemní robotické jednotky P3-AT (heliport). Systém určující polohy pozemního robota založený na měření ujeté vzdálenosti je přesnější než u letící čtyřtulky.

3.1.5 Lokalizace na základě rozpoznávání grafického vzoru ve snímaném obraze

Dalším způsobem lokalizace čtyřtulky v prostoru mimo heliport je použití metody lokalizace čtyřtulky pomocí externí kamery [6], která detekuje předem zvolený grafický vzor v zorném poli kamery. Podle tvaru a rozměrů obrazu grafického vzoru ve snímaném obraze zpětně určí jeho polohu vůči snímací kameře. V našem případě je detekce založena na nalezení soustředného černo-bílého kruhu (Obrázek 14) o předem známých parametrech - d_i průměr vnitřního světlého, d_0 průměr tmavého vnějšího kruhu a nakonec průměr d celého grafického vzoru.

Nejdůležitějším senzorem lokalizace na základě rozpoznávání grafického vzoru ve snímaném obraze je kamera samotná. Pro tuto lokalizaci je nejdůležitější správné určení vnitřních parametrů kamery (viz. Kapitola 4.5), její obrazové rozlišení a počet snímků za sekundu (FPS) a v poslední řadě velikost samotného vzoru pro detekci.

Ostatní parametry jsou dané technologií výroby jednotlivých částí kamery a koncový uživatel je již nemůže ovlivnit.



Obrázek 14: Příklad detekovaného grafického vzoru

Volbou velikosti detekčního vzoru (Obrázek 14) a rozlišení kamery je určena velikost operačního prostoru (Obrázek 15), tj. prostoru, kde je spolehlivě detekován požadovaný vzor.

Operační prostor (Obrázek 15) je omezen zorným úhlem kamery (ohniskové vzdálenosti), rozlišením, velikostí a orientací detekčního vzoru vůči kameře.

Pokud si kameru idealizujeme do případu dírkové kamery, pak snímaný prostor kamery má jehlanovitý tvar s vrcholem v ohnisku a podstavou určenou vlastním rozlišením kamery.

Rozměry snímaného detekčního vzoru w_i a h_i (v pixelech) lze vypočítat pomocí vztahů

$$w_i = \frac{f_x d_0 \cos(\phi)}{x}, \quad (7)$$

$$h_i = \frac{f_y d_0 \cos(\psi)}{x}, \quad (8)$$

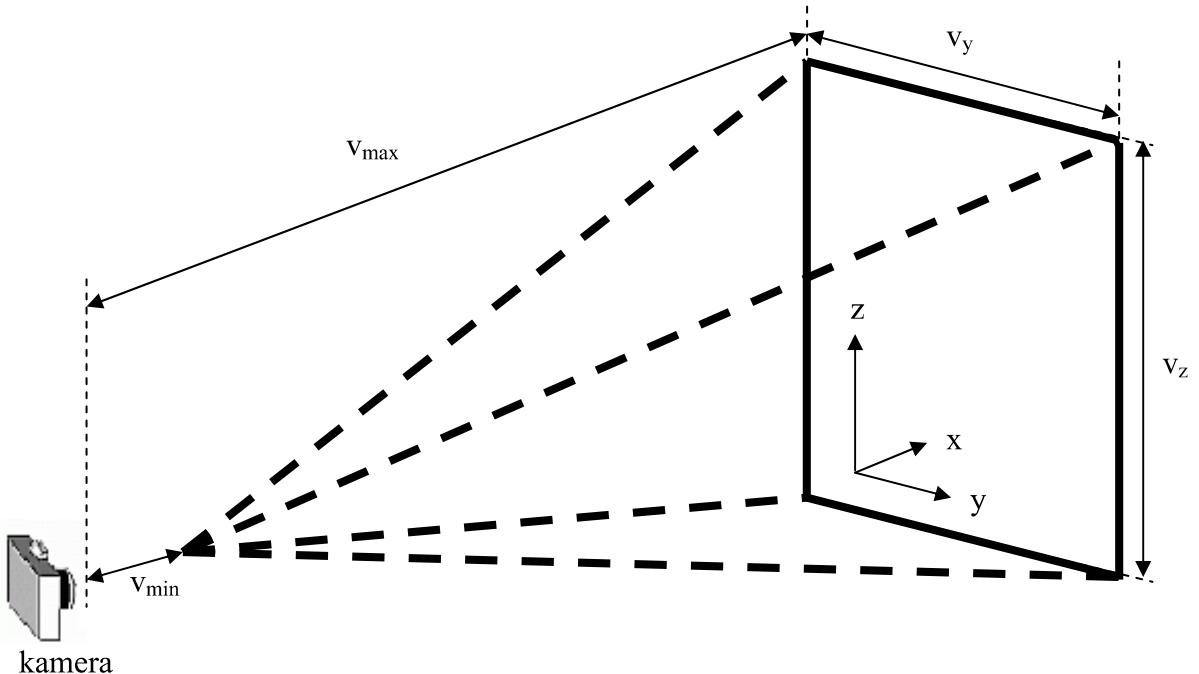
kde x je vzdálenost detekovaného vzoru v optické ose kamery (osa x), d_0 je předpokládaný průměr vzoru, φ a ψ představují horizontální/vertikální náklon detekovaného vzoru vůči kameře a f_x , f_y jsou ohniskové vzdálenosti kamery v jednotlivých osách.

Pro správnou detekci hledaného vzoru musí být vzor celou plochou v zorném poli kamery a navíc musí mít pro správnou detekci minimálně D obrazových bodů ($D = 11$). Pak můžeme vypočítat minimální v_{\min} (9) a maximální v_{\max} (10) vzdálenost vzoru vůči kameře, kde lze grafický vzor bezpečně rozpoznat.

$$v_{\min} = d_0 \max\left(\frac{f_x}{w}, \frac{f_y}{h}\right), \quad (9)$$

$$v_{\max} = \frac{d_0}{D} \min(f_x \cos(\varphi), f_y \cos(\psi)), \quad (10)$$

kde w a h je horizontální a vertikální rozlišení v pixelech.



Obrázek 15: Zorné pole kamery (operační prostor)

S využitím hodnoty maximální detekovatelné vzdálenosti v_{\max} , můžeme vypočítat i rozměry kamerou snímaného operačního prostoru ve zbylých dvou souřadných osách v_y (11) a v_z (12)

$$v_y = \frac{v_{\max} f_x}{w} - 2d_0, \quad (11)$$

$$v_z = \frac{v_{\max} f_y}{h} - 2d_0. \quad (12)$$

Princip lokalizace grafického vzoru

Data získaná v detekčním kroku algoritmu [6] se používají k samotné lokalizaci čtyrtkulky v prostorových souřadnicích, kde kamera je umístěna v počátku těchto souřadnic a optická osa kamery je shodná s osou x (Obrázek 15).

Za předpokladu, že radiální zkreslení není veliké (lze ho zanedbat), se soustředné kruhy lokalizačního vzoru promítou do roviny kamery v podobě světlé a tmavé elipsy (Obrázek 16), které opět mají společný střed.

Pro určení vzdálenosti vzoru od snímací kamery (souřadnice na ose x), využijeme vlastnosti zobrazené elipsy. Za předpokladu, že délka hlavní poloosy elipsy je neměnná vůči prostorové orientaci vzoru proti kameře. Chceme-li získat délku a orientaci hlavní poloosy elipsy ve snímaném obrazu, je nutné vypočítat vlastní čísla a vektor charakterizující elipsu.

Dále vypočteme koncové body osy λ_{sa} a λ_{sb} neznámého faktoru λ . Vzhledem k tomu, že $|\lambda_{sa}, \lambda_{sb}| = d_0$ pak můžeme neznámý parametr λ vypočítat dle následujícího vztahu

$$\lambda = \frac{d_0}{|\lambda_{sa}, \lambda_{sb}|}. \quad (13)$$

Vzdálenost vzoru od kamery lze vypočítat dle vztahu

$$x = \frac{\lambda(s_a + s_b)}{2}. \quad (14)$$



Obrázek 16: Obraz zorného pole kamery

Pořízený snímek zorného pole kamery je pomocí prahové hodnoty θ převeden na binární obraz (obraz je složen jen z bílých nebo černých obrazových bodů). Hodnoty prahování θ jsou proměnné a určují se podle aktuálních jasových hodnot světlých a tmavých segmentů a to podle vzorce

$$\theta = \frac{j_s + j_t}{2}, \quad (15)$$

kde j_s a j_t jsou střední hodnoty jasu ve světlém a tmavém kruhu (segmentu).

V dalším kroku jsou v obraze detekovány souvislé plochy (segmenty) složené z černých pixelů. Správně detekované kruhové vzory jsou posléze pro názornost přebarveny na kontrastnější a pro koncového uživatele lépe rozeznatelné ve snímaném obraze (Obrázek 17).

Následujícím krokem je výpočet vlastností tohoto segmentu (střed, velikost). Pokud jednotlivé vlastnosti tolerančně odpovídají předpokládaným hodnotám, je detekce tmavých segmentů ukončena a proces se opakuje pro světlé segmenty. Jakmile i světlý segment tolerančně odpovídá, přistupujeme k porovnávání soustřednosti tmavého

a světlého segmentu a jejich vzájemného poměru s předpokládanými hodnotami. Pokud jsou změřené hodnoty v tolerančních mezích, je detekce ukončena. V opačném případě nebyl lokalizační vzor nalezen. Pokud není vzor nalezen, pak se dle potřeby prahová hodnota θ sníží nebo zvýší. Pokud ani v dalším detekčním cyklu nedojde k nalezení požadovaného grafického vzoru, je nutné načíst nový obraz z kamery.



Obrázek 17: Příklady detekce vzoru v zorném poli kamery

Nalezení a určení vlastností elipsy

Kruhový vzor se paralelním promítáním ze 3D prostoru do prostoru 2D proměňuje v převážné většině na elipsovity tvar [10]. Kruhového tvaru obrazu docílíme jen pohledem ve směru normály kruhové plochy.

Hlavními vlastnostmi elipsy jsou její střed μ a kovarianční matice C , která udává její orientaci v 2D prostoru. Nechť $W \subset \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ je oblast pixelů $p \in \mathbb{R}^2$ a $|W| \in \mathbb{N}$, pak střed elipsy je $\mu \in \mathbb{R}^2$ a kovarianční matice $C \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ nalezené oblasti lze vypočítat podle následujícího vztahu

$$C = \frac{1}{|W|} \sum_{p \in W} (p - \mu)(p - \mu)^T, \quad (16)$$

kde $|W| = \sum_{p \in W} 1$ a střed nalezené oblasti je vypočten jako těžiště v obraze nalezené oblasti pixelů

$$\mu = \frac{1}{|W|} \sum_{p \in W} p. \quad (17)$$

Nalezenou elipsu lze poté popsat pomocí následující rovnice

$$E(\mu, C) := \left\{ p \in R^2; (p - \mu)^T C^{-1} (p - \mu) \leq 4 \right\}. \quad (18)$$

Velikosti jednotlivých os elipsy (21) vypočítáme pomocí vlastních čísel λ_1 a λ_2 (19) kovarianční matice C podle následujícího vztahu

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \text{tr}C \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} \text{tr}C \right)^2 - \det C}, \quad (19)$$

kde

$$\begin{aligned} \text{tr}C &= \lambda_1 + \lambda_2 \\ \det C &= \lambda_1 \lambda_2. \end{aligned} \quad (20)$$

Velikost jednotlivých poloos detekované elipsy vypočítáme dle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned} a &= 2\sqrt{\lambda_1} \\ b &= 2\sqrt{\lambda_2} \end{aligned} \quad (21)$$

Pokud tedy promítneme známý kruhový vzor do obrazové roviny kamery, můžeme pomocí rovnic (19) a (21) vypočítat směr jednotkové normály φ snímaného vzoru v 3D prostoru.

$$\varphi = \begin{pmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{pmatrix} = \frac{1}{a} \begin{pmatrix} \pm \sqrt{a^2 - 4C_{xx}} \\ \pm \sqrt{a^2 - 4C_{yy}} \\ \pm b \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Z výše uvedené rovnice je ale na první pohled patrné, že výsledný směr normály má dvě možná řešení, ačkoli ve skutečnosti je vzor pozorován jen z jedné strany.

Problém s nejednoznačností výsledné normály vyjádřené v globálních souřadnicích operačního prostoru čtyrtulky je vyřešen záměnou jednoho kruhového vzoru za dvojici stejných kruhových vzorů (Obrázek 16). Potřebné otočení kolem svislé osy je počítáno podle prostorových souřadnic středů jednotlivých kruhových vzorů.

3.2 Detekce přistávací plochy

Přesná lokalizace čtyrtulky během prohledávání neznámého prostoru je nedílnou součástí letu. Ale jak již bylo řečeno, z důvodů nízké kapacity akumulátoru není schopna prohledat celý prostor sama. Pro dobíjení je potřebné, aby se čtyrtulka vždy vrátila zpět ke své dobíjecí stanici. Dobíjecí stanice musí být jednoznačně identifikovatelná v prohledávaném prostoru. Tímto problém (lokalizací přistávací plochy) se zabývalo již několik vědeckých článků [16], [20].

Detekci správného místa přistání a přesnost přistání na heliportu je brána jako nejsložitější fáze lezu. Přistávací plochy [16] mohou být rozděleny do třech metod určení polohy přistávacího vzoru vzhledem ke čtyrtunce.

3.2.1 Označení přistávacího místa aktivními značkami.

Přistávací obrazec [16] byl tvořen třemi IR LED diodami uspořádanými do tvaru rovnoramenného trojúhelníka a jednou redundantní IR diodou umístěnou v jedné ze stran trojúhelníka, aby byla zaručena jednoznačnost orientace přistávacího vozoru. Výsledný obrazec byl snímán IR kamerou umístěnou na čtyrtulce.

Výhodou této konfigurace byla její jednoduchost a tím i rychlosť vyhodnocovacího algoritmu. Z tohoto důvodu je možné algoritmus vložit přímo do řídicího systému čtyrtulky.

Nevýhodou tohoto řešení je závislost na aktivních zářičích, které vyžadují svůj napájecí zdroj a citlivost kamery na rušení slunečním zářením. Tato metoda byla vyhodnocena jako nejhorší při zkouškách přesnosti přistání.

3.2.2 Označení přistávacího místa pasivními značkami

Přistávací místo bylo vyznačeno barevnými míčky pro stolní tenis [16]. Uspořádání do obrazce bylo podobné jako v minulém případě. Vyhodnocovací algoritmus bylo nutno rozšířit o detekci míčků, a proto ho již není možné implementovat do řídicího systému menších čtyřtulek. Pro detekci bylo navíc nutné využít kamery schopné snímat barevný obraz.

Výhodou této metody lokalizace přistávacího vzoru je, že ji lze použít i ve vnějším prostředí za slunečného svitu, kdy metoda aktivních značek selhávala.

Tato metoda byla přesnější při zkouškách přesnosti přistání. Nastavení PID parametrů malých smyček bylo kritické pro udržení přistávacího obrazce v zorném poli. Regulátory stranových odchylek byly proto nastaveny s vyšší prioritou než regulátor výšky. Tím tato metoda vykázala největší odchylky při regulaci výšky letu.

3.2.3 Označení přistávacího místa grafickým symbolem

Pro grafický vzor heliportu je využito písmeno H umístěné ve středu kruhu. Příčemž ze samotné polohy a tvaru elipsy (kruh se v obrazové rovině kamery promítne do elipsy) je možné vypočítat pět stupňů volnosti, poslední stupeň volnosti otočení kolem svislé osy je získán výpočtem natočení centrálně umístěného písmena H v grafickém vzoru přistávací plochy.

Tato metoda je nejnáročnější na výpočetní výkon a proto nevhodná pro menší stroje. Naopak je nejpřesnější podél normály nad grafickým vzorem. Proto byl regulátor výšky stabilní. Přesnost přistání je srovnatelná s předešlou metodou. Pasivní grafická značka je vhodná i pro použití ve vnějším prostředí. Není nutná barevná kamera.

Ačkoliv je metoda lokalizace přistávací plochy a její orientace pomocí černobílého pasivního symbolu heliportu (kruh s H uprostřed) výpočetně náročná, je zvolena jako nejhodnější. Navíc není náchylná na rušení proměnlivým osvětlením a nevyžaduje barevnou snímací kameru.

Lokalizace pomocí kamery AR.DRONE nad helioptem

V případě [2] je k lokalizaci čtyřtulky nad helioptem využita spodní kamera pro lokalizaci pouze v blízkém okolí přistávací plochy (heliopetu). Pro určení polohy čtyřtulky přímo nad helioptem je opět využita metoda lokalizace pomocí kamery – lokalizace obrazového vzoru ve snímaném obraze (Obrázek 18). Pro potřeby vzletu a přistání je lokalizační vzor umístěn přímo na svrchní straně heliopetu.



Obrázek 18: Heliport pro AR.DRONE

Tento vzor je poté detekován ve snímaném obraze a pomocí známých vlastností kamery a aktuálních hodnot z akcelerometrů a gyroskopů je přepočtena poloha vzoru z obrazových souřadnic do globálních souřadnic x a y .

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} 0 & k_u \\ k_v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_u - u \\ c_v - v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\eta \end{bmatrix} \right] z_d + \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix}, \quad (23)$$

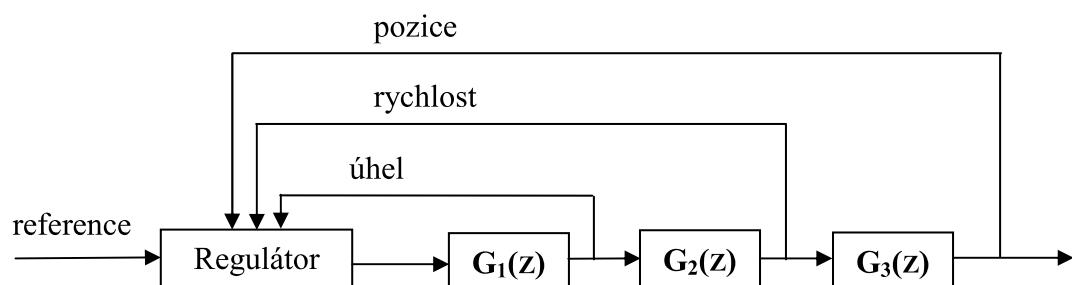
kde x_d , y_d a z_d jsou aktuální pozice čtyřtulky a výška letu (dle výškoměru). Úhly ϕ , θ a η jsou hodnoty udávající aktuální náklon v jednotlivých osách – otočení podle vertikální osy, dopředný náklon a boční náklon. Konstanty k_u a k_v jsou parametry kamery, c_u a c_v udávají střed nalezeného grafického vzoru v obraze. Takto získaná referenční hodnota polohy je posléze poslána zpět do polohového regulátoru čtyřtulky.

Z důvodu malého zorného pole spodní kamery je tato metoda „externí“ lokalizace spolehlivá až od výšek větších než půl metru. V menších výškách se vzor ve snímaném obrazu nemusí objevit celý, nebo se i vlivem malého regulačního zásahu polohového regulátoru posune mimo zorné pole kamery. Pro tento způsob lokalizace je potřeba létat ve větších výškách, kdy se snímaná plocha s rostoucí výškou úměrně zvětšuje.

3.3 Ztráta vizuální navigace

Další problém, který může nastat při lokalizaci pomocí kamerového systému, je pomalé vyhodnocení kamerových snímků nebo úplná ztráta dat o poloze získaných po zpracování kamerových snímků (např. grafický vzor je mimo zorné pole kamery, nebo byl při pohybu rozmažán do takové míry, že nebylo možné vzor rozeznat).

V současnosti lze tento problém řešit využitím rozšířeného Kalmanova filtru [20], kdy je systém lokalizace rozdělen na dvě regulační smyčky.



Obrázek 19: Znázornění regulačních smyček.

Rychlé regulační smyčky, které jsou implementované na řídící desce čtyřtulky, přímo ovládají nosné motorky na základě aktuální rychlosti a úhlu natáčení. Velká regulační smyčka tvořená počítačovým viděním (výpočet aktuální polohy) je zpracovávána na extrením PC, do kterého je přenášen videosignál z kamery. Dopravní zpoždění během přenosu snímaného obrazu ovšem způsobuje náchylnost rychlé regulační smyčky k časovému posunu (driftu).

Pro překlenutí výpadků obrazových informací bylo v [20] použito extrapolování minulých stavových informací do současnosti Kalmanovým filtrem. Jednotlivé stavy (polohy a rychlosti) jsou porovnávány přímo s měřením. Spolu s minulými stavy jsou pak tato data použita pro extrapolaci stavů pomocí Kalmanova filtru. Korekce stavů

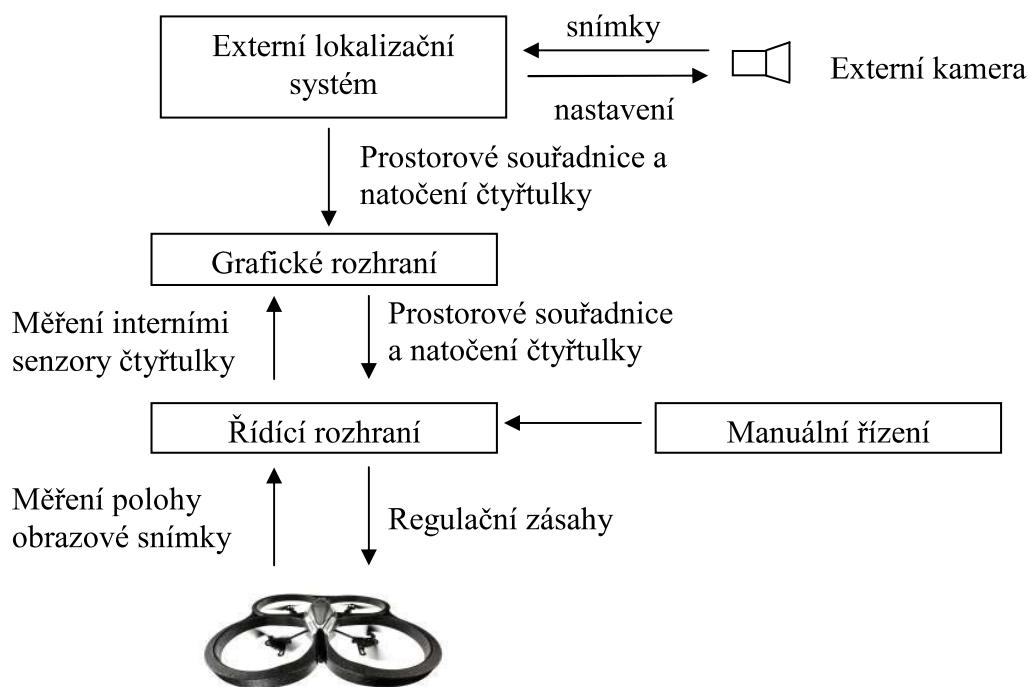
filtrů je prováděna pomocí lineární approximace v palubním systému v každé výpočetní smyčce řídícího programu. Pokud jsou přijata obrazová data, jsou na jejich základě ve velké smyčce obnoveny stavy pomocí Kalmanova filtru. Obnovená data o poloze helikoptéry jsou následně předána do rychlých regulačních smyček, které přímo ovládají elektromotory. Tímto způsobem je dosaženo potřebné dynamiky systému a odolnosti proti výpadku vstupních dat získaných z kamerových snímků.

Na základě výše uvedených výzkumných aplikací je zřejmé, že nejpoužívanějšími metodami lokalizace autonomně létajících robotů je využíváno integrovaných senzorů umístěných na řídící desce robotů, přičemž aktuální polohy robotů jsou ještě dodatečně korigovány externím lokalizačním systémem. Použití externího lokalizačního systému znamená, že robot má na svém skeletu umístěný pasivní odrazový bod, který je lokalizován pomocí stabilně umístěných kamer sledujících prostor, ve kterém se autonomně čtyřtulka pohybuje.

4 Popis vlastního programu

Pro zpřesnění lokalizace čtyřtulky během třetí až páté fáze letu (let na požadované souřadnice, prozkoumání prostoru pod čtyřtulkou a následného letu zpět nad heliport) a čtvrté fáze letu (průzkum terénu pod čtyřtulkou) jsem zvolil také metodu externího lokalizačního systému.

Z důvodu vysoké ceny přesného lokalizačního systému Vicon jsem v našem případě využil alternativní metodu využívající lokalizaci grafického vzoru ve snímaném obrazu externí kamerou umístěnou na přistávací ploše heliportu. Při prohledávání neznámého prostoru spolupracuje čtyřtulka se samohybným robotem (helioptem), který čtyřtulku doveze na místo určení – operační prostor čtyřtulky se překrývá se zkoumaným prohledávaným prostorem.



Obrázek 20: Schematické znázornění funkcí a propojení programových částí

Systém přesné lokalizace a řízení čtyřtulky během letu je implementován v programovacím jazyce C++.

Implementace je pro větší přehlednost rozdělena do tří částí (Obrázek 20), které vzájemně komunikují. Důvodem pro rozdělení programu nezávislých programových

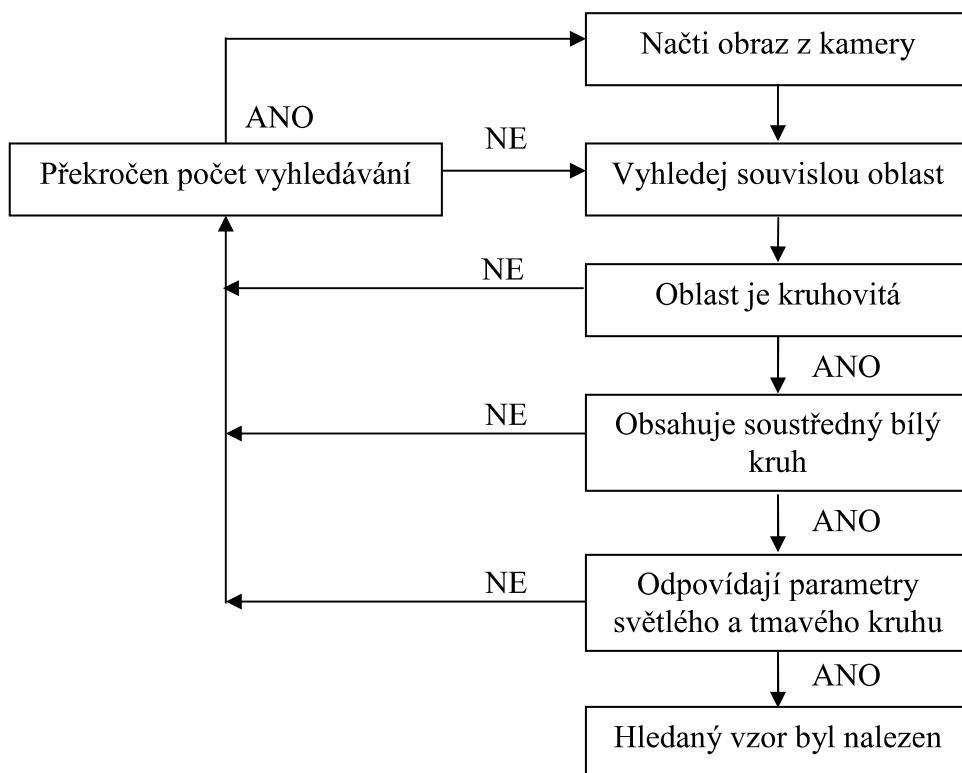
celků je eliminace případných výpadků lokalizačního nebo grafického rozhraní. Případné výpadky nikterak neovlivní běh programu obsluhující řízení letu čtyřtulky.

Pro svou práci jsem využil zdrojové kódy pro ovládání helikoptéry, řízení letu helikoptéry a lokalizačního systému poskytnutých vedoucím diplomové práce. Zdrojové kódy jsem doplnil o funkce potřebné k přesné lokalizaci během vzdálenějších letů, dále jsem upravil vzájemné komunikační spojení a algoritmy pro výpočet polohy čtyřtulky v globálních souřadnicích a regulátory polohy.

Vzájemná komunikace mezi jednotlivými programovými moduly probíhá na základě výměny datových paketů.

4.1 Modul obsluhující externí lokalizační systém

První částí implementace je detekce samotného kruhu ve snímaném obraze ať už z externí kamery nebo ze spodní kamery, která je použita v průběhu vzletového (přistávacího) manévrů. Tato funkce je v programu implementována následujícím detekčním algoritmem.



Algoritmus 1: Algoritmus detekce kruhového grafického vzoru

Pokud dojde ke správnému vyhodnocení předešlého algoritmu, lze polohu grafického vzoru v globálních souřadnicích s počátkem v centru kamery určit následujícím postupem.

Vstup: Detekovaný kruhový vzor

Výstup: Aktuální pozice kruhového vzoru v obrazu a jeho vlastnosti

transform (SSegment segment){

vypočti krajin body nalezeného obrazového segmentu

proved' korekci soudkovitosti pro polohy krajních bodù segmentu

vypočti průměr segmentu v obrazu

souřadnice x je pomér mezi skutečnou a předpokládanou velikostí obrazce

souřadnice z a y jsou přímo úměrné vychýlení středu nalezeného obrazce od středu snímaného obrazu a vzdálenosti obrazce (osa x) od kamery.

}

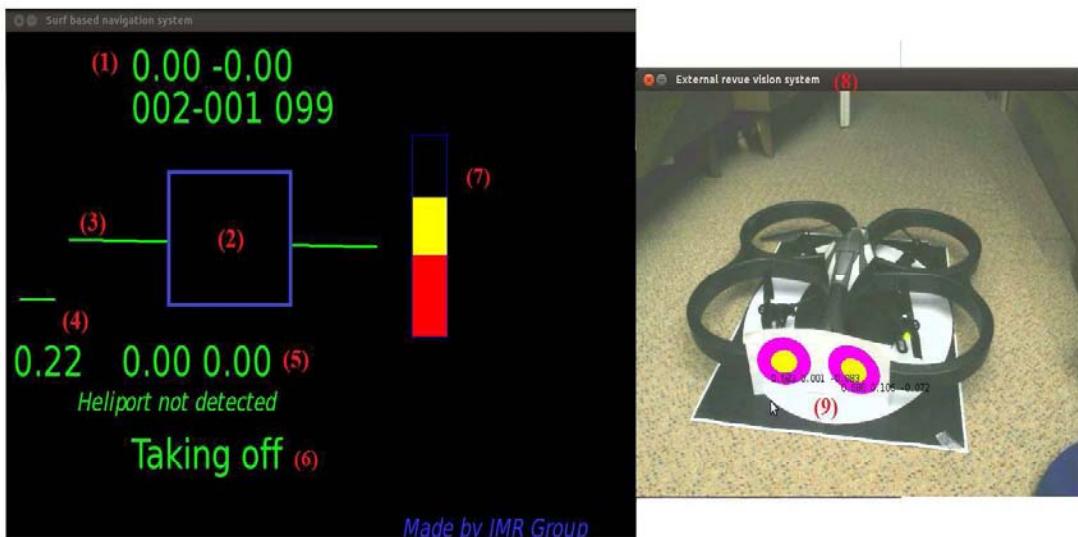
Algoritmus 2: Algoritmus určení prostorových souřadnic grafického vzoru ve snímaném obrazu.

Získané hodnoty určující polohu a úhel natočení grafického vzoru v globálních prostorových souřadnicích externí lokalizace jsou posléze pomocí paketové komunikační linky (UDP) předány k dalšímu vyhodnocení do programu obsluhující uživatelské rozhraní. Zde jsou data o poloze a natočení čtyřtulky kombinována s daty získanými jednotlivými integrovanými senzory na řídící desce čtyřtulky. Data jsou následně zobrazena na přehledném grafickém rozhraní.

4.2 Grafické rozhraní

Grafické uživatelské rozhraní zobrazuje potřebná data (Obrázek 21). V horní části hlavní obrazovky (1) jsou znázorněny údaje o rychlostech v globálních souřadnicích bočním a dopředném náklonu. Hodnoty bočního a dopředného náklonu jsou pro přehlednost znázorněny pomocí umělého horizontu (3). Aby uživatel viděl, co

snímá helikoptéra během svého letu ať již přední nebo spodní kamerou helikoptéry, je uprostřed umělého horizontu umístěna oblast (2), kde jsou zobrazovány kamerové snímky pořízené čtyřtulkou.



Obrázek 21:Grafické uživatelské rozhraní

Dále jsou v grafickém rozhranní zobrazovány údaje o aktuální pozici v globálních souřadnicích. Tyto údaje jsou zobrazeny v oblasti (5). Hodnota relativní výšky letu čtyřtulky nad terénem, která je měřena ultrazvukovým senzorem je znázorněna v levé části grafického rozhraní (4).

Ve spodní části uživatelského rozhraní (6) je pro uživatele slovně vypsán aktuální stav (fáze letu) čtyřtulky.

V pravé části (7) uživatelského rozhraní je znázorněn ukazatel s aktuální kapacitou baterie.

V druhém okně (8), které slouží k zobrazení prostoru snímaného externí kamerou externím lokalizačním systémem, je na základě detekčního algoritmu vyhledán požadovaný grafický vzor (9). Nalezenému grafickému vzoru jsou připojeny „popisky“ obsahující údaje o pozici jednotlivých částí požadovaného grafického vzoru.

4.3 Řídící rozhraní – Heliserver

Program obsluhující vlastní ovládání čtyřtulky slouží jako rozhraní mezi čtyřtulkou a koncovým uživatelem (dále Heliserver). Na základě vzájemné komunikace mezi Heliserverem, uživatelským rozhraním v PC a samotnou čtyřtulkou obdrží řídící rozhraní aktuální a cílové hodnoty polohy a úhlu natočení čtyřtulky v globálních souřadnicích a typ zprávy.

Dle typu zprávy je proveden příslušný výpočetní algoritmus pro výpočet regulačního zásahu.

Tabulka 1: Přehled možných typů a vlastností předávané zprávy.

Typ	Popis zprávy
MSG_START	robot vzlétne
MSG_STOP	robot kontrolovaně přistane na aktuální pozici
MSG_LAERNING	zadání referenčních souřadnic pro regulátory
MSG_RESET	resetování prostorových souřadnic čtyřtulky
MSG_POSITION	řízení letu čtyřtulky během vzletu a přistání
MSG_ABS_POS	řízení letu mimo dosah heliportu
MSG_HEIGHT	robot udržuje pozici a pouze stoupá
MSG_TURNING	robot udržuje pozici a otáčí se podle svislé osy
MSG_SELECT_CAMERA	změna snímací kamery čtyřtulky
MSG_NONE	při externí lokalizaci nebyl detekován grafický vzor

Jelikož čtyřtulka při prohledávání neznámé oblasti spolupracuje se samotným heliportem je pro let čtyřtulky využíváno následujícího pozičního regulátoru.

Hodnoty vypočtených regulačních zásahů při řízení letu čtyřtulky na požadovanou pozici jsou poté pomocí WiFi signálu poslány do řídícího systému samotné čtyřtulky, který dle instrukcí provede požadovanou korekci polohy.

Pokud chce uživatel přímo kontrolovat let ručně, je možné převzít řízení pomocí joistiku. Při ručním řízení je nutné trvale držet akční tlačítko ručního ovládání. Regulační zásahy řízení letu jsou poté definovány mírou náklonu joistiků nezávisle ovládající boční, dopředný náklon a otáčení kolem svislé osy. Dále má uživatel možnost měnit rychlosť otáčení jednotlivých elektrických motorků a tím vertikální rychlosť čtyřtulky během letu.

Vstup: Aktuální pozice v globálních souřadnicích, referenční hodnoty polohy

Výstup: Regulační zásah

Regulátor polohy () {

$$\eta = \frac{\eta}{180000} \pi$$

$$\begin{aligned}x_{akt} &= x_{\min} + (\cos(\eta) \cdot v_x - \sin(\eta) \cdot v_y) \cdot T_s \\y_{akt} &= y_{\min} + (\sin(\eta) \cdot v_x + \cos(\eta) \cdot v_y) \cdot T_s\end{aligned}$$

$$regX = K_1 (\cos(\eta) (x_{akt} - x_{ref}) + \sin(\eta) (y_{akt} - y_{ref})) + K_2 v_x - K_3 \theta$$

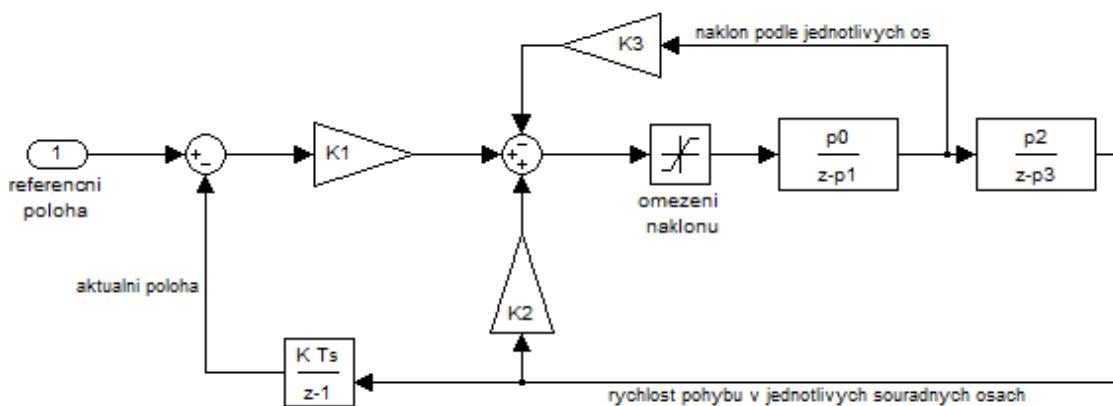
$$regY = K_1 (-\sin(\eta) (x_{akt} - x_{ref}) + \cos(\eta) (y_{akt} - y_{ref})) + K_2 v_y - K_3 \theta$$

}

Algoritmus 3: Výpočet akčního zásahu pro dosažení požadované polohy čtyřtulky

4.4 Ověření matematického modelu čtyřtulky

Jako nevhodnější způsob polohového řízení je na základě [2], [7] zvolena stavová zpětná vazba, kde ve zpětné vazbě figuruje aktuální poloha, úhel dopředného a bočního náklonu a odhadovaná rychlosť letu čtyřtulky.



Obrázek 22: Matematický model řízení polohy čtyřtulky, převzato a upraveno z [7]

Jednotlivé konstanty K_1 , K_2 a K_3 vypočítáme metodou umístění pólů [2].

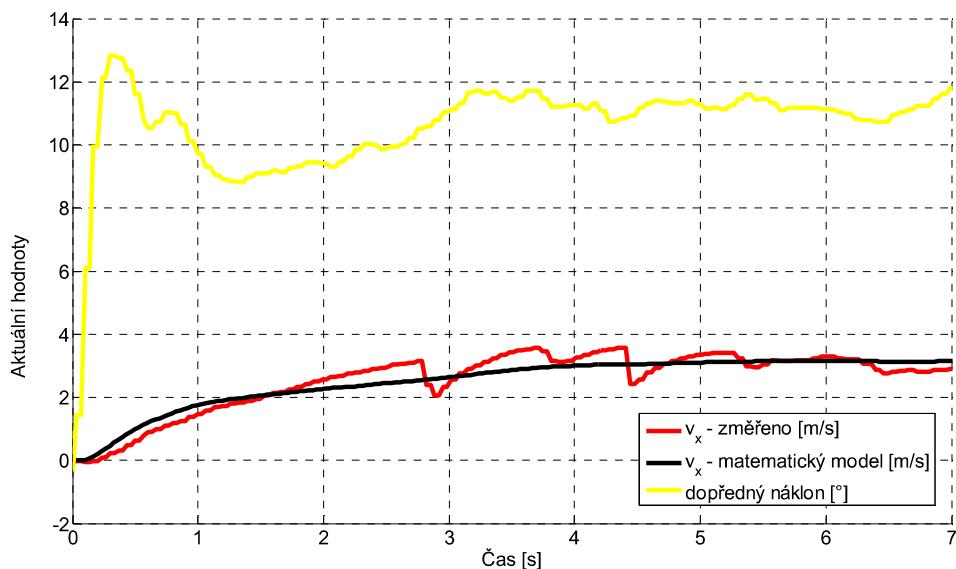
V našem případě byly tyto konstanty experimentálně zjištěny následovně:

Tabulka 2: Zpětnovazební konstanty matematického motelu čtyřtulky

Regulátor v ose x	Regulátor v ose y
$K_1 = 15$	$K_1 = 15$
$K_2 = 5$	$K_2 = 3$
$K_3 = 1$	$K_3 = 1$

Hodnoty přenosových funkcí pro výpočet úhlu náklonu $p_0 = 0.003$ $p_1 = 0.97$ a pro výpočet rychlosti pohybu $p_2 = -0.0085$ $p_1 = 0.97$ jsme určili na základě metody nejmenších čtverců [2] za použití dat naměřených pro odezvu systému na skokovou změnu dopředného náklonu čtyřtulky.

Na následujícím grafu jsou znázorněny naměřené hodnoty dopředné rychlosti matematického modelu a skutečného modelu čtyřtulky, dále je na grafu znázorněna i aktuální hodnota dopředného náklonu čtyřtulky během letu.



Obrázek 23: Ověření matematického modelu čtyřtulky

4.5 Kalibrace kamery

Pro lokalizaci čtyřtulky mimo oblast heliportu (grafický vzor na vrchní straně heliportu je mimo zorné pole spodní kamery čtyřtulky) je použita širokoúhlá webová kamera (Obrázek 24). Tato kamera je připojena k obslužnému PC pomocí USB kabelu, pomocí kterého je zprostředkovávána „obrazová“ komunikace.



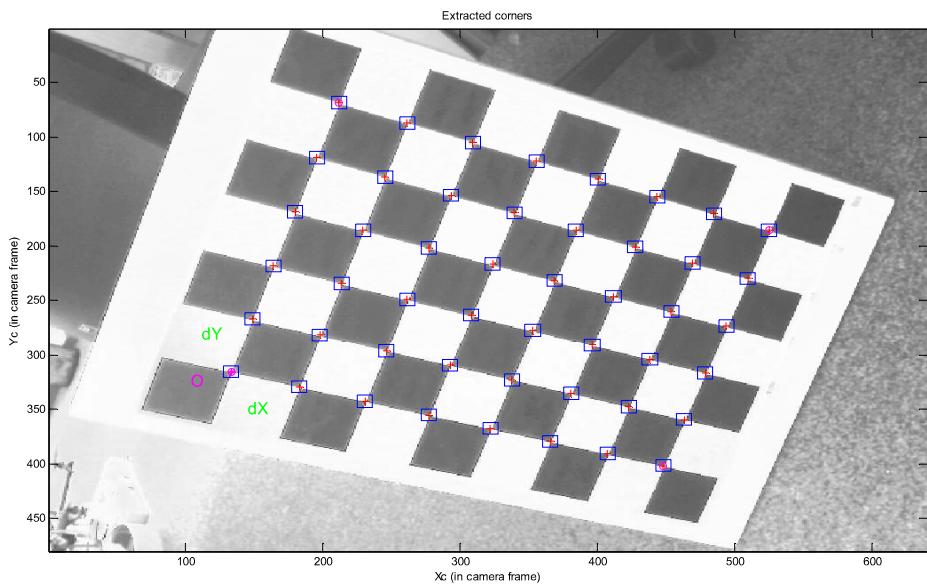
Obrázek 24: Kamera pro externí lokalizaci

Nejdůležitějšími vlastnostmi kamery jsou obrazové parametry (druh senzoru, rozlišení snímaného obrazu a rychlosť pořizování jednotlivých snímků FPS). Pro výpočet intrinických vlastností kamery bylo nutné zafixovat automatické ostření na nekonečno a nastavit pevnou ohniskovou vzdálenost.

Tabulka 3: Parametry externí web kamery

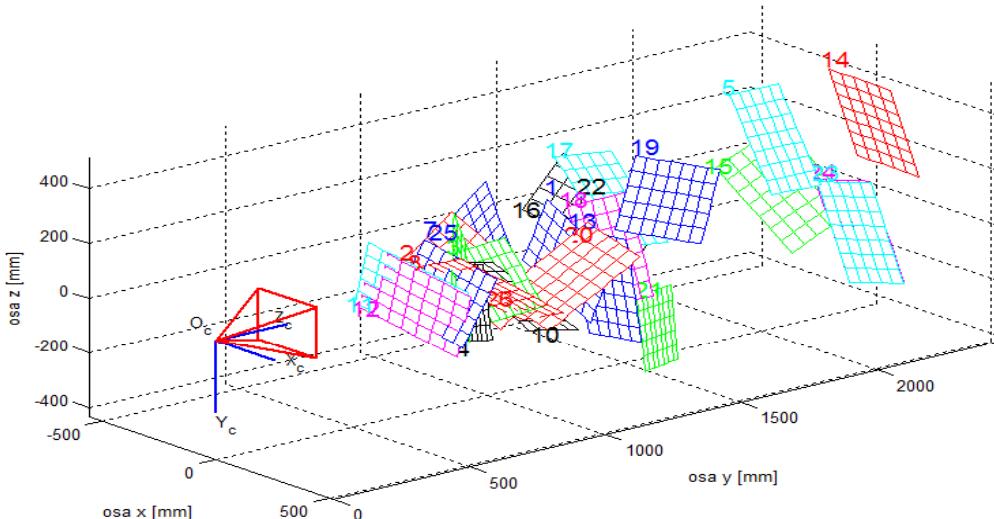
Senzor	Full HD 1080p (1920 x 1080)
Rozlišení obrazu	Max 1920 x 1080 (12MP)
Rychlosť snímání	až 30 FPS
Připojení k PC	přes USB 2.0 Hi-Speed

Pro potřeby samotné lokalizace je nutné nejdříve nakalibrovat obrazový snímač kamery. Kalibraci provedeme pomocí volně dostupného matlabovského nástroje (funkce calib [1]). Po spuštění kalibrace kamery je potřeba načíst všechny snímky kamery obsahující předem známý kalibrovací grafický vzor (Obrázek 25).



Obrázek 25: Kalibrační vzor pro kameru o rozměrech 52x52 mm

Ve snímcích posléze ručně zadáme skutečné rozměry tohoto kalibračního vzoru a v jednotlivých snímcích určíme krajní rohové hodnoty oblasti kalibračního vzoru a počet čtverců přiléhajících k souřadnici x a y. Nalezení vnitřních „průsečíků“ mezi jednotlivými rohy čtverců v takto ohraničené ploše je posléze provedeno automatickým maticovým vyhledáváním. V případě, že snímaný obraz má charakteristiky soudkovitosti (polštářovitosti), je možné zadat konstantu pro minimalizaci tohoto zkreslení. Pro použitou kameru tato korekce není nutná, neboť přímky jsou ve snímaném obrazu opět přímkami – nedochází k žádnému obrazovému zkreslení.



Obrázek 26: Rozmístění jednotlivých kalibračních snímků vzhledem ke kameře

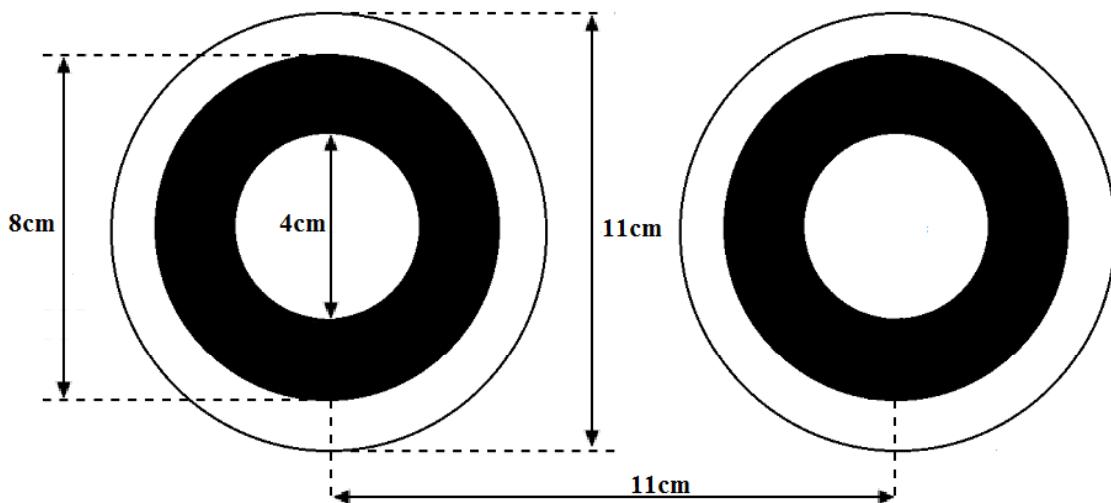
Poté, co jsou zpracovány jednotlivé kalibrační snímky, dojde k výpočtu vnitřních vlastností kamery (ohniskové vzdálenosti f pro svislé/vodorovné souřadnice a jejich vzájemné zkosení α_c , radiální a tangenciální zkreslení obrazu k_c a středový bod snímaného obrazu c_c) jsou vypočítány automaticky.

Pro použitou externí kameru byly na základě měření experimentálně zjištěny následující hodnoty intrinických vlastností kamery:

Tabulka 4: Intrinlické parametry externí web kamery

Ohnisková vzdálenost	$f = [652.7 \quad 653.3]$
Zkosení	$\alpha_c = 0$
Zkreslení	$k_c = [-0.025 \quad 0.018 \quad -0.0008 \quad -0.0001]$
Obrazový střed	$c_c = [311.5 \quad 250.1]$

Kalibrovanou kameru lze následně použít pro lokalizaci vzoru (Obrázek 27) v zorném poli externí kamery (Obrázek 15). Barva obrazců (černá a bílá) je volena tak, aby byl co největší kontrast mezi jednotlivými obrazci.



Obrázek 27: Použitý grafický vzor

5 Experimentální výsledky

5.1 Ověření vlastností externí webové kamery

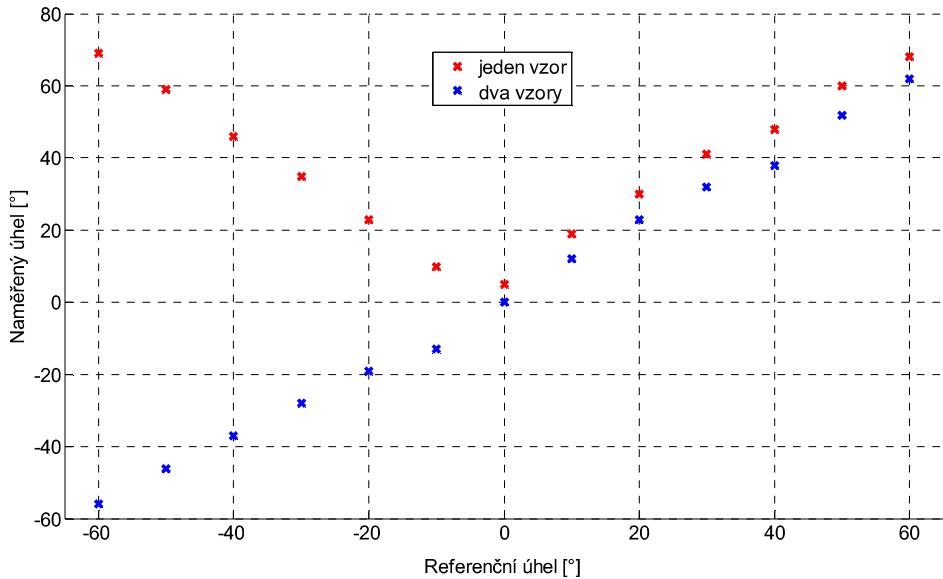
Gyroskop určující vlastní natočení čtyřtulky podle svislé osy neposkytuje dostatečně přesné hodnoty, jaké bychom pro lokalizaci AR.DRONE požadovali. Měření úhlu natočení pouze z jednoho vzoru není v tomto případě použitelné (Obrázek 28), neboť nelze přesně určit, z jakého směru je na daný hledaný obrazec nahlíženo. Existují dvě možná řešení výsledné prostorové normály pro nalezenou elipsu).

Tento problém jsme ale vyřešili pomocí dvou (totožných) vedle sebe umístěných grafických vzorů (Obrázek 27). Mylné detekci dvou náhodných kruhových vzorů v obraze je zabráněno porovnáním aktuální vzdálenosti středů s předem definovanou vzdáleností středů lokalizačního vzoru. Jestliže je hodnota vzdálenosti v tolerančních mezích, je vyhledávací algoritmus ukončen. Aktuální pozice čtyřtulky v prostoru je vypočtena zprůměrováním hodnot souřadnic středů detekovaných kruhových vzorů.

Úhel natočení ϕ podle svislé osy je vypočten dle následujícího vztahu (24) pro výpočet úhlu v trojúhelníku

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right), \quad (24)$$

kde Δx a Δy jsou rozdíly prostorových souřadnic jednotlivých obrazců a úhel natočení ϕ je omezen na $\phi = \pm 90^\circ$, přičemž znaménko úhlu natočení je dáno vzájemnou polohou obrazců. Pro takto zvolený způsob měření úhlu natočení podle svislé osy jsem experimentálně ověřil správnost svých výpočtů.

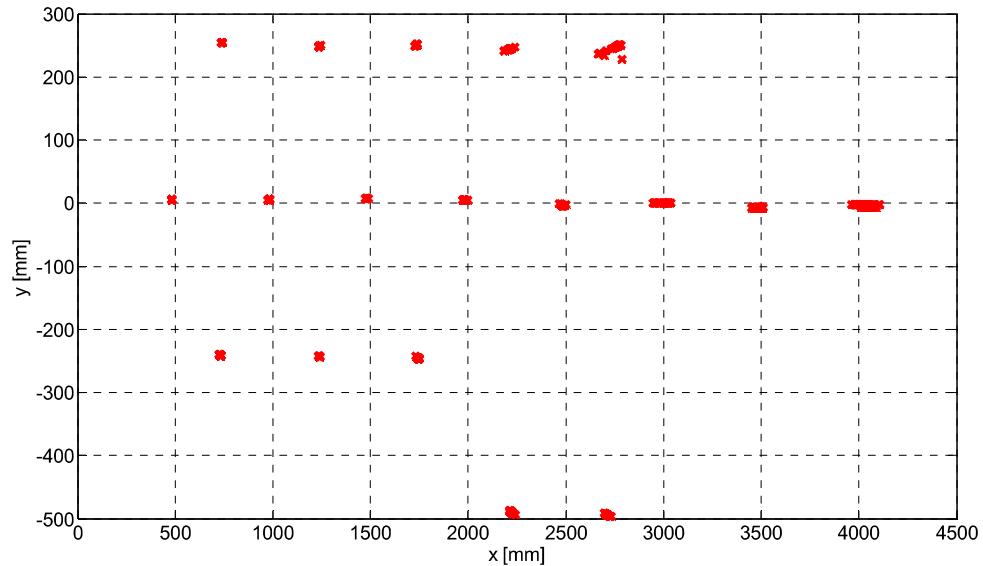


Obrázek 28: Graf měření úhlu natočení grafického vzoru vůči snímací kameře

Tabulka 5: Měření úhlu natočení podle svislé osy (osa z)

Referenční hodnota [°]	Dva lokalizační obrazce			Jeden lokalizační obrazec		
	Změřená hodnota [°]	Odhylka [°]	Odhylka [%]	Změřená hodnota [°]	Odhylka [°]	Odhylka [%]
0	0	0	0.0	5	5	NA
10	12	2	22.4	19	9	89.0
20	23	3	13.8	30	10	51.0
30	32	2	6.8	41	11	36.7
40	38	2	6.0	48	8	20.5
50	52	2	4.0	60	10	19.0
60	62	2	3.2	68	8	12.8
70	72	2	2.6	84	14	19.9
-10	-13	3	29.3	10	20	198.1
-20	-19	1	5.0	23	43	214.4
-30	-28	2	7.8	35	65	216.7
-40	-37	3	7.4	46	86	215.0
-50	-46	4	7.9	59	109	217.6
-60	-56	4	6.3	69	129	215.8

Pro potřeby určení polohy čtyřkulky mimo operační prostor nad heliportem je použita metoda lokalizace pomocí externí kamery a lokalizačního grafického vzoru (Obrázek 17). Ověření správnosti měření jsem provedl pro následující referenční polohy (Tabulka 6). Pro referenční hodnoty měřených souřadnic (Obrázek 29) bylo vždy provedeno 20 nezávislých měření pro aktuální referenční polohu grafického vzoru v globálních souřadnicích. Na základně naměřených hodnot jsem vypočetl maximální hodnoty odchylek od referenčních hodnot daného měření (Tabulka 6).



Obrázek 29: Měření referenčních hodnot polohy grafického vzoru

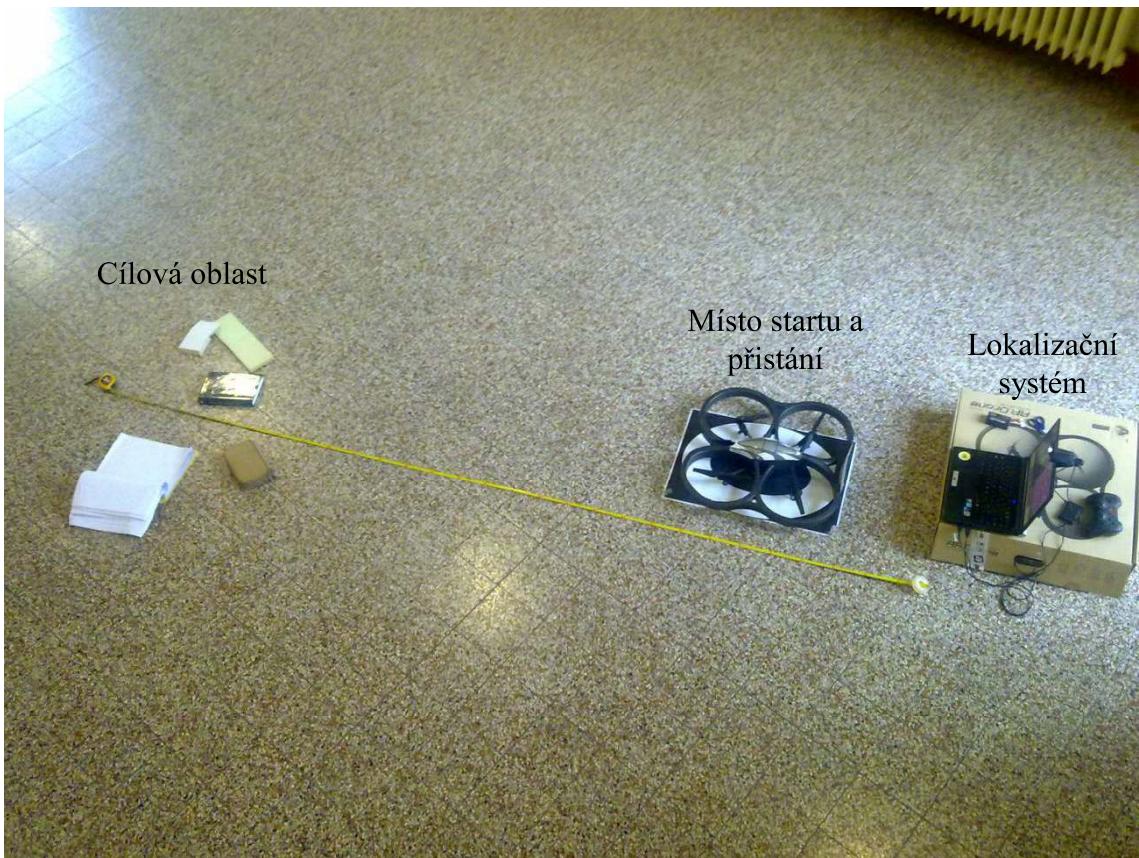
Tabulka 6: Měření a odchylka jednotlivých prostorových souřadnic od reference

Referenční poloha			Změřená poloha			Odchylka			Odchylka		
x [mm]	y [mm]	z [mm]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	x [%]	y [%]	z [%]
4000	0	0	4056	-6	0	56	6	0	1.4	NA	0.0
3500	0	0	3486	-8	-2	14	8	2	0.4	NA	NA
3000	0	0	3016	0	-4	16	0	4	0.5	0.0	NA
2500	0	0	2486	-4	-3	14	4	3	0.6	NA	NA
2000	0	0	1981	4	-1	19	4	1	1.0	NA	NA
1500	0	0	1480	7	0	20	7	0	1.3	NA	0.0
1000	0	0	981	6	0	19	6	0	1.9	NA	0.0
500	0	0	483	5	0	17	5	0	3.4	NA	0.0
750	-250	0	730	-241	0	20	9	0	2.7	3.6	0.0
1250	-250	0	1237	-243	-1	13	7	1	1.0	2.8	NA
1750	-250	0	1746	-246	0	4	5	0	0.2	2.0	0.0
2250	-500	0	2221	-490	-3	29	10	3	1.3	2.0	NA
2750	-500	0	2714	-494	-1	36	6	1	1.3	1.2	NA
2250	250	0	2214	244	-1	36	6	1	1.6	2.4	NA
1750	250	0	1735	250	-1	15	0	1	0.9	0.0	NA
1250	250	0	1237	248	0	13	2	0	1.0	0.8	0.0
750	250	0	740	255	0	10	5	0	1.3	2.0	0.0

5.2 Ověření letových vlastností čtyřtulky během prohledávání

Ověření správnosti navrženého lokalizačního systému jsem provedl následujícím způsobem (Obrázek 30). Čtyřtulka startovala z na zemi umístěného grafického vzoru, který je totožný s grafickým vzorem na samotném heliportu [7].

Úkolem čtyřtulky bylo doletět 2m před heliport ve směru osy x, zde pořídit několik po sobě jdoucích snímků zájmové oblasti ze spodní kamery a následně se vrátit zpět nad heliport a přistát.

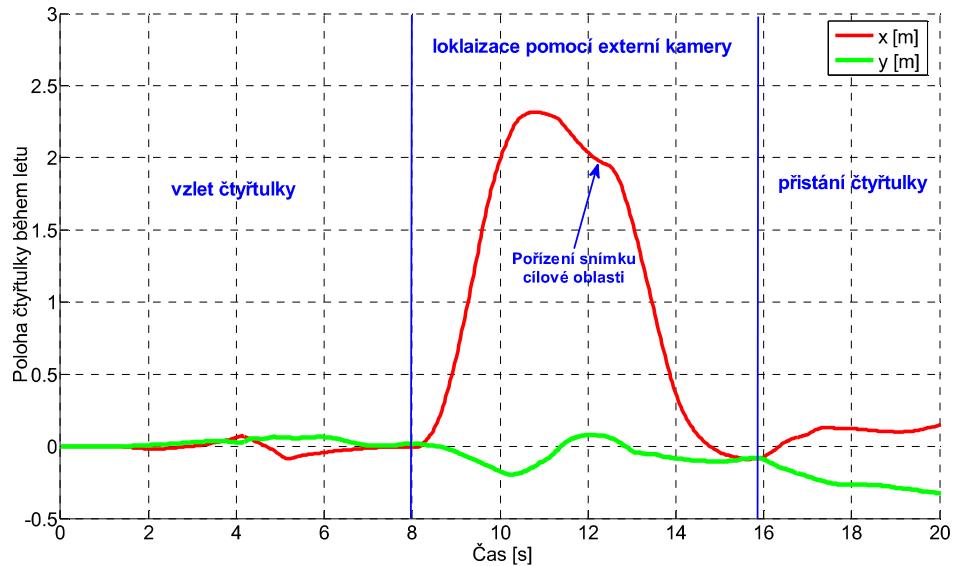


Obrázek 30: Rozložení prohledávaného prostoru

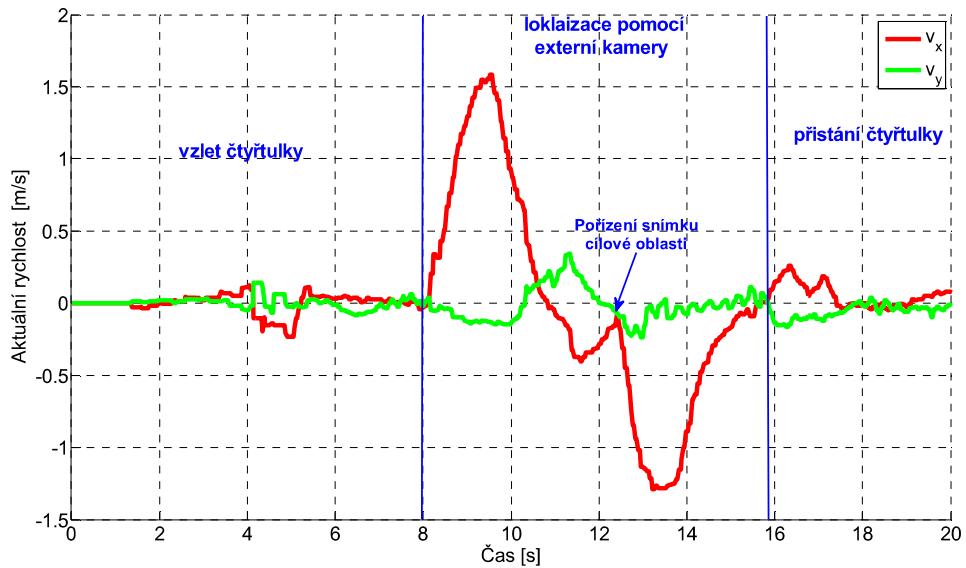
Samotný průběh letu (viz. kapitola 2.4.1) jsem ověřoval zaznamenáváním aktuální polohy a rychlostí letu čtyřtulky v prostoru.

Jednotlivé fáze letu jsou na grafech (Obrázek 31, Obrázek 32) rozpoznatelné. Vzlet z heliportu je v grafech znázorněn v časovém úseku 0-8s. V časovém úseku mezi 8. až 12. vteřinou letu je čtyřtulka řízena externím lokalizačním systémem do cílové oblasti. Ve 12. vteřině je názorně vidět, že dojde k pozastavení pohybu a jsou pořízeny

snímky cílové oblasti. Dále následuje návrat nad heliport. Heliport je dosažen přibližně v 16. sekundě letu. Poté, co je heliport detekován, dochází k přistání na heliportu.



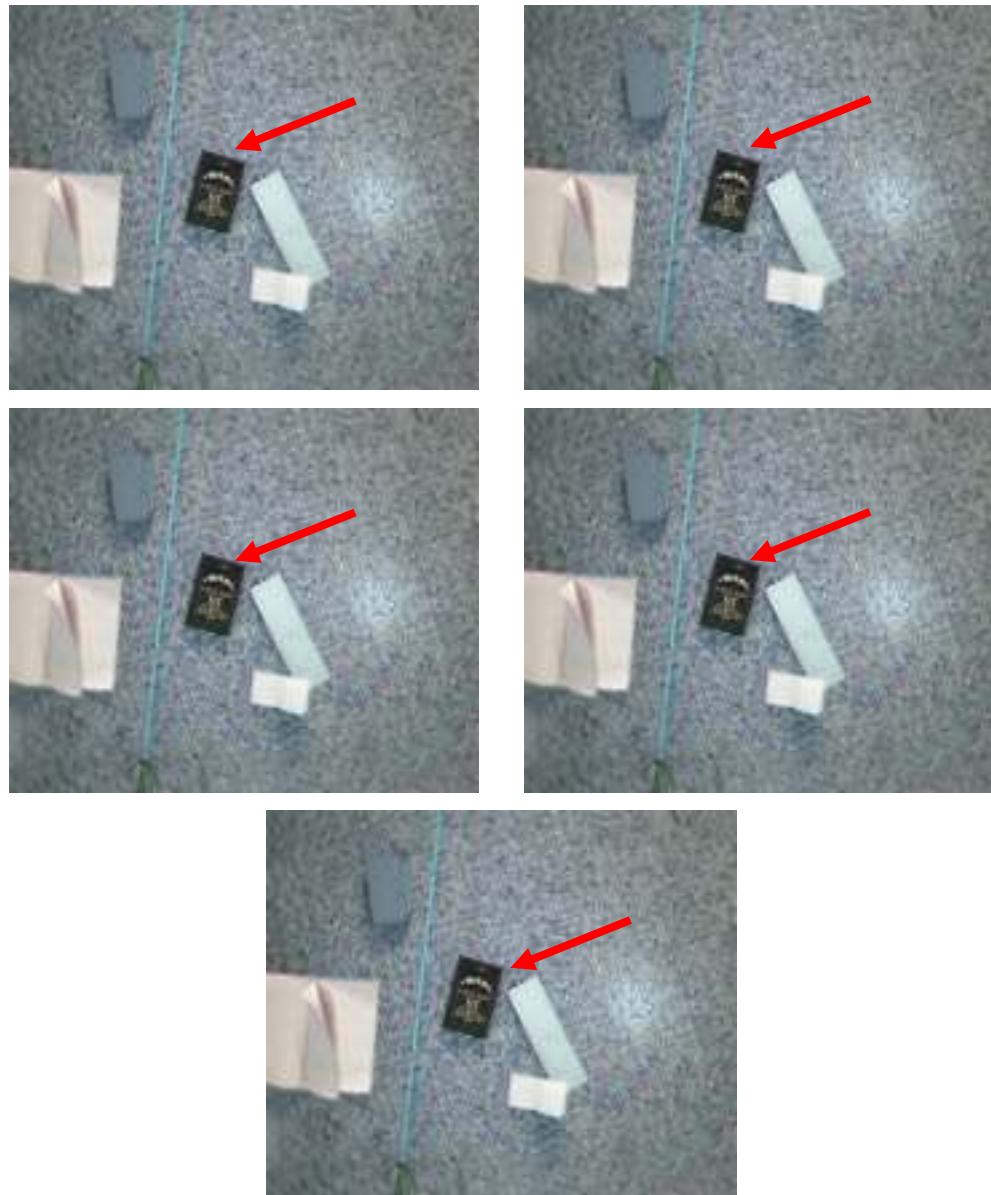
Obrázek 31: Graf polohy čtyřkulky během jednotlivých fází letu



Obrázek 32: Graf rychlostí čtyřkulky během jednotlivých fází letu

Prohledávání neznámého prostoru je vyhodnoceno jako úspěšné, pokud je ve snímcích pořízených (Obrázek 33) nad cílovou oblastí detekována kniha od J. R. R. Tolkiena (v obrázku označena šipkou). Pořízené snímky jsou uloženy do paměti

počítače, kde dojde k pozdějšímu vyhodnocení. Vyhodnocení snímků ze spodní kamery (Obrázek 33) je poté prováděno koncovým uživatelem.



Obrázek 33: Snímek spodní kamery čtyřtulky pořízené nad cílovou oblastí

Let čtyřtulky je vyhodnocen jako úspěšný, pokud čtyřtulka vyplní všechny podúkoly: během autonomního letu dosáhne cílové pozice, pořídí snímky nad cílovou oblastí a přistane zpět na heliport.

6 Závěr

Pro rozšíření operačního prostoru čtyřtulky, které je součástí průzkumného robotického týmu jsem využil několik lokalizačních metod. Metody lze rozdělit do několika skupin. Metody využívající vnitřních senzorů čtyřtulky (pohybové senzory, senzory náklonu) popřípadě vizuální navigace pomocí kamer umístěných v přední (spodní) části čtyřtulky. Další vhodné lokalizační metody rozšiřující operační prostor čtyřtulky jsou založeny na externím lokalizačním systému, kdy let čtyřtulky je sledován externím kamerovým systémem a údaje získané z vizuální lokalizace jsou předávány jednotlivým regulačním smyčkám. Popsané metody lokalizace čtyřtulky během letu na vzdálené pozice (viz. kapitola 3.1) a v blízkém okolí heliportu (viz. kapitola 3.2) jsem vybíral s ohledem na maximální rychlosť výpočtu aktuální pozice čtyřtulky v prostoru a na minimální nároky na přídavný hardware, který by zvětšoval hmotnost čtyřtulky. Všechny popsané metody mají své výhody a nevýhody.

Metoda určení polohy jen na základě vnitřních senzorů je konstrukčně nejjednodušší. Senzory jsou již umístěny na řídící desce a časová prodleva potřebná k výpočtu polohy je tedy jen minimální. Nevhodou orientace čtyřtulky v neznámém prostoru je časový posun změrených hodnot rychlostí (kumulace chyby), který je částečně eliminován pomocí výpočtu rychlosti pohybu čtyřtulky a dle vzájemného posunu snímků ze spodní kamery. Ovšem úplně vynechat tuto metodu nelze, neboť při ztrátě vizuální navigace se čtyřtulka po nezbytně krátkou dobu lokalizuje jen interními senzory.

Nevýhodou pro využití lokalizační metody typu SLAM jsou její vysoké nároky na paměť během samotné lokalizace. Při každé detekci orientačního bodu je nutné přepočítat relativní pozice všech předem nalezených orientačních bodů, ze kterých je následně počítána aktuální poloha robota. Navíc složitost samotné mapy roste s druhou mocninou počtu nalezených orientačních bodů ve snímaném obrazu.

Problém s opakovaným přepočítáváním souřadnic všech referenčních bodů trajektorie je řešen metodami „Teach and Replay“. Mezi které patří například diskutovaná metoda SURFNav. Metoda SURFNav využívá pro navigaci čtyřtulky v prostoru interní senzory (akcelerometry, gyroskopy a snímací kamery). Hlavní výhodou tohoto algoritmu je jeho programová jednoduchost. Naopak nedostatkem tohoto způsobu lokalizace je požadovaný vysoký kontrast obrazu a vysoká členitost

obrazu, aby bylo možné identifikovat a sledovat významné body. Obecnou nevýhodou metod na principu „Teach and Replay“ je mapa, tvořená relativními vzdálenostmi jednotlivých referenčních bodů trajektorie. Vzdálenosti na referenční mapě čtyřkulky nemusejí odpovídat skutečným hodnotám vzdáleností v prohledávaném prostoru.

Pro přesnější lokalizaci a prohledávání prostoru jsem se rozhodl využít metody externí lokalizace. Na čtyřkulce jsou umístěny pasivní obrazové vzory, které jsou poté snímány pomocí externích kamer. Systém externí lokalizace pro výzkumné nebo průmyslové oblasti poskytuje i firma Vicon nebo Ubisense. Tyto komerční externí lokalizační systémy dosahují vysokých výpočetní rychlosti a v případě systému od firmy Vicon i vysoké přesnosti při výpočtu aktuální pozice čtyřkulky. Systém od firmy Ubisense je určen převážně pro lokalizace velkých výrobních procesů. Udávaná přesnost systému je ± 15 cm. Systém je ovšem pro potřeby této práce cenově nevýhodný.

Z důvodu cenové nedostupnosti jsme pro lokalizaci čtyřkulky využili podobné metody externí lokalizace pomocí kamer. Lokalizace ve vzdálených oblastech (mimo heliport) je založena na principu lokalizace grafického vzoru ve snímaném obrazu externí kamery umístěné na svrchní straně heliportu. Obrazová osa externí snímací kamery míří do prostoru před heliportem. Při samotné lokalizaci čtyřkulky jsem narazil na problém s výpočtem všech stupňů volnosti při použití jen jednoho grafického vzoru. Problém jsem nakonec vyřešil použitím dvojice totožných grafických vzorů umístěných v zadní části ochranného krytu čtyřkulky.

Oblast blízkého okolí heliportu, kterou byla čtyřulka schopna prohledat jen za použití interních senzorů, je při použití externího lokalizačního systému rozšířena o možnost prohledání vzdálenějších nedostupných oblastí. Velikost prostoru snímaného externí kamerou je závislá na velikosti detekčního grafického vzoru. Čím větší je vzor, tím větší je i detekovatelná vzdálenost. Velikost detekčního vzoru ovšem ovlivňuje i aerodynamické vlastnosti čtyřkulky během letu.

Úspěšnost správného prohledání (pořízení snímků) požadované oblasti je vyhodnocováno měřením vlastností autonomního letu z heliportu na požadované prostorové souřadnice a zpět k heliportu. Snímky pořízené na prohledávaných prostorových souřadnicích byly posléze vyhodnoceny koncovým uživatelem. Pokud snímek obsahoval předem zvolený objekt, bylo prohledávání prostoru vyhodnoceno jako úspěšné. Celková úspěšnost prohledávání cílového prostoru byla přibližně 80%. Případy, kdy nebylo možné let čtyřkulky označit za úspěšný, byly způsobeny ztrátou

lokalizačního grafického vzoru při letu do/z cílové oblasti a čtyřtulka se tak pohybovala jen na základě méně přesných integrovaných senzorů pohybu.

V případě, kdy byla čtyřtulka navigována jen na základě interních pohybových senzorů, bylo pro čtyřtulku obtížné dosáhnout cílové oblasti a pořídit požadované snímky, natož pak doletět zpět nad heliport. Úspěšnost letů bez externího lokalizačního systému se pohybuje v rádech několika procent. Problémy s letem do/z cílového prostoru jsou způsobeny již zmiňovanou kumulativní chybou při měření rychlosti pohybu čtyřtulky. Systém externí lokalizace je prokazatelně vhodnější, než lokalizace pomocí senzorů rychlosti a náklonu čtyřtulky.

Systém by bylo možné ještě dále zpřesnit využitím externí lokalizace čtyřtulky během všech fází letu tak, aby se snímaný obraz operačního prostoru nad heliportem částí překrýval s obrazem operačního prostoru snímaným externí kamerou, nikoli jak je tomu v našem případě, kdy jsou obrazy systému vizuální navigace oddělené.

7 Použitá literatura

- [1] BOUGUET, Jean-Yves. Camera Calibration Toolbox for Matlab. [online]. [cit. 2013-05-01].
Dostupné z: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html.
- [2] KRAJNÍK, Tomáš, et al. AR-drone as a platform for robotic research and education. In: Research and Education in Robotics-EUROBOT 2011. Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 172-186.
- [3] KRAJNÍK, Tomáš; PŘEUČIL, Libor. A simple visual navigation system with convergence property. In: European Robotics Symposium 2008. Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 283-292.
- [4] KRAJNÍK, Tomáš, et al. Simple yet stable bering-only navigation. Journal of Field Robotics, 2010, 27.5: 511-533.
- [5] SASKA, Martin; KRAJNÍK, T.; PŘEUČIL, L. Cooperative μ UAV-UGV autonomous indoor surveillance. In: Systems, Signals and Devices (SSD), 2012 9th International Multi-Conference on. IEEE, 2012. p. 1-6.
- [6] KRAJNÍK, Tomáš, Jan FAIGL, Martin SASKA a Jan CHUDOBA. Low-cost embedded system for relative localization in robotic swarms. Praha, 2012.
- [7] BLAHA, Martin. Mobilní Heliport pro kvadroptéru AR.DRONE. Praha, 2012., Bakalářská práce. ČVUT-FEL.
Dostupné z: <https://cyber.felk.cvut.cz/research/theses/papers/282.pdf>.
- [8] ZEDNÍK, Pavel. Relative visual localization in swarms of unmanned aerial vehicles. Praha, 2012, Bakalářská práce. ČVUT-FEL.
Dostupné z: <https://cyber.felk.cvut.cz/research/theses/papers/282.pdf>.
- [9] KRAJNIK, T., et al. A simple visual navigation system for an UAV. In: Systems, Signals and Devices (SSD), 2012 9th International Multi-Conference on. IEEE, 2012. p. 1-6.
- [10] HUTTER, Marcus; BREWER, Nathan. Matching 2-d ellipses to 3-d circles with application to vehicle pose identification. In: Image and Vision Computing New Zealand, 2009. IVCNZ'09. 24th International Conference. IEEE, 2009. p. 153-158.
- [11] BRISTEAU, Pierre-Jean, et al. The Navigation and Control technology inside the AR. Drone micro UAV. In: World Congress. 2011. p. 1477-1484.

- [12] BAY, Herbert; TUYTELAARS, Tinne; VAN GOOL, Luc. Surf: Speeded up robust features. In: Computer Vision–ECCV 2006. Springer Berlin Heidelberg, 2006. p. 404-417.
- [13] KRAJNÍK, Tomáš, Jan FAIGL, Ondřej FIŠER a Karel KOŠNAR. RoboTour 2007 - Inteligentní navaigacní systém týmu FoG [online]. 2007 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://robotika.cz/competitions/robtour/2007/proceedings/fog-b/cs>.
- [14] VICON. Achieving remarkable maneuvers for autonomous quadrotor helicopter flight. 2013.
Dostupné z: <http://vicon.com/company/documents/UPENNJan13.pdf>
- [15] SVAB, J., et al. FPGA based speeded up robust features. In: Technologies for Practical Robot Applications, 2009. TePRA 2009. IEEE International Conference on. IEEE, 2009. p. 35-41.
- [16] MASSELLI, A., et al. A Cross-Platform Comparison of Visual Marker Based Approaches for Autonomous Flight of Quadrocopters., Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Atlanta, Georgia, USA, 2013, pp. 1-9.
- [17] DURRANT-WHYTE, Hugh; BAILEY, Tim. Simultaneous localization and mapping: part I. Robotics & Automation Magazine, IEEE, 2006, 13.2: 99-110.
- [18] BAILEY, Tim; DURRANT-WHYTE, Hugh. Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. Robotics & Automation Magazine, IEEE, 2006, 13.3: 108-117. Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM):Part I and II, H. Durrant-Whyte, T. Bailey Robotics & Automation Magazine, IEEE, 13(3), 108-117, (2006).
- [19] CHEN, Zhichao; BIRCHFIELD, Stanley T. Qualitative vision-based path following. Robotics, IEEE Transactions on, 2009, 25.3: 749-754.
- [20] BOŠNAK, Matevž; MATKO, Drago; BLAŽIČ, Sašo. Quadrocopter control using an on-board video system with off-board processing. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60.4: 657-667.
- [21] ADEPT MOBILEROBOTS. Pioneer 3-AT [online]. [cit. 2013-05-01].
Dostupné z: <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/P3AT.aspx>.
- [22] KIRIK, Konstantin. Particle Filter Localization [online]. 2012 [cit. 2013-05-06].
Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=poKOMhA7Os>
- [23] HIGHTOWER, Jeffrey; BORRIELLO, Gaetano. Location systems for ubiquitous computing. Computer, 2001, 34.8: 57-66.

- [24] WARD, Andy, Pete STEGGLES, Rupert CURWEN, Paul WEBSTER, Mike ADDLESEE, Joe NEWMAN, Paul OSBORN a Steve HODGES. The Bat Ultrasonic Location System. [online]. 2005 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>
- [25] AEROSCOUT. Technology Overview [online]. 2012 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.aeroscout.com/about>
- [26] UBISENSE. Ubisense Tag Module Research Package [online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.ubisense.net/en/resources/factsheets/ubisense-tag-module-research-package.html>
- [27] BILL, Ralf, et al. Indoor and outdoor positioning in mobile environments - a review and some investigations on wlan-positioning. *Geographic Information Sciences*, 2004, 10.2.
- [28] ORR, Robert J.; ABOWD, Gregory D. The smart floor: a mechanism for natural user identification and tracking. In: CHI'00 extended abstracts on Human factors in computing systems. ACM, 2000. p. 275-276.

8 Přílohy

Obsah přiloženého CD

1. Text diplomové práce ve formátu PDF

2. Zdrojové kódy pro řízení letu čtyřtulky jsou rozděleny do těchto složek:

- | | |
|-------------|--|
| \heliserver | - výpočet regulačních zásahů pro řízení letu čtyřtulky na základě aktuální pozice v prostoru |
| | - komunikační rozhraní s čtyřtulkou |
| | - spuštění pomocí příkazu: ..\bin\server |
| \formace | - grafické rozhraní pro uživatele |
| | - spuštění pomocí příkazu: ..\bin\formation |
| \localizer | - systém umožňující vizuální lokalizaci pomocí grafického vzoru. |
| | - spuštění pomocí příkazu: ..\bin\revue /dev/video0 |

Pro správné navázání komunikačních kanálů je nutné, aby byly programy spouštěny dle výše uvedeného pořadí (heliserver, formation, localizer).

3. Naměřená data a matlabovské skripty:

- | | |
|--------------|----------------------------|
| \matlab | - zdrojové kódy pro matlab |
| \matlab\data | - naměřená data |