

**Jihočeská univerzita v Českých
Budějovicích**

Přírodovědecká fakulta



Navigace systémů v interiéru

Bakalářská práce

Jaroslav Bumba

Vedoucí práce: Ing. Václav Novák CSc.

České Budějovice 2022

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

ZADÁVACÍ PROTOKOL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jaroslav Bumba**

Obor – zaměření studia: Aplikovaná informatika

Katedra/ústav PŘF JU: Ústav aplikované informatiky

Školitel: Ing. Václav Novák CSc., vacnovak@prf.jcu.cz

Garant z PŘF:

(jméno, příjmení, tituly, katedra – jen v případě externího školitele)

Školitel – specialista, konzultant:

(jméno, příjmení, tituly, u externího š. název a adresa pracoviště, telefon, fax, e-mail)

Téma bakalářské práce: **Navigace systémů v interiéru**

Navigace v exteriéru je poměrně dobře popsána a používá se. Na druhé straně navigace v interiéru není zatím úspěšně vyřešena. Je potřeba řešit použitelný prostor pro let a rozpoznávat překážky v prostoru a navrhnou optimální dráhu k cíli.

Cíle práce je možné shrnout takto:

1. Ověřte vámi vybrané existující algoritmy navigace v interiéru, např. v místnosti s vertikálními i horizontálními překážkami.
2. Navrhněte a popište vlastní řešení řídicího algoritmu navigace v interiéru.
3. Navržený algoritmus realizujte, naprogramujte a vložte do mikropočítače
4. Ověřte výsledky na reálném systému.

Základní doporučená literatura:

- [1] WENCZEL, F., HEPERLE, L., VON STÜLPNAGEL, R. (2017): Gaze behavior during incidental and intentional navigation in an outdoor environment, *Spatial Cognition & Computation*, 17, č. 1–2, s. 121–142. doi: 10.1080/13875868.2016.1226838
- [2] OHM, C., MULLER, M., LUDWIG, B., BIENK, S. (2014): Where is the Landmark? Eye Tracking Studies in Large-Scale Indoor Environments. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research, ET4S 2014*, s. 47–51.
- [3] SNOPKOVÁ, D. (2018): Vliv realizmu vizualizace při navigaci uživatelů. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Brno, 119 + 41 s.
- [4] VIAENE, P., OOMS, K., VASTEENKISTE, P., LENOIR, M., E MAEYER, P. (2014): The use of eye tracking in search of indoor landmarks. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research, ET4S 2014*, Vienna, Austria, s. 52–56.

Financování práce podpis *(J. Loraš)*

Školitel práce podpis :

U externích vedoucích fakultní garant práce podpis :

Garant oboru mag. studia podpis :

Vedoucí katedry/ústavu PŘF JU, kde proběhne obhajoba podpis :

Případný souhlas vedoucího ústavu AV podpis :

V Českých Budějovicích dne 22. 9. 2020 podpis studenta: *Burda*

Bibliografické údaje

Bumba, J., 2022: Navigace systémů v interiéru. [Navigation of systems in interiors, Bc. Thesis, in Czech] - 32 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá vytvořením navigačního systému pro létající autonomní vozidla použitelném v interiéru. Teoretická část práce se zabývá přiblížením problematiky navigace ve vnitřních prostorech a seznámením se s vybranými systémy pozicování a algoritmy navigace. V praktické části jsou tyto znalosti uplatněny pro tvorbu vlastního systému navigace a poté je vybrán hardware pro jeho následné testování.

Annotation

This bachelor's thesis aims to develop own navigation system for unmanned aerial vehicles that is usable in interiors. The theoretical part provides a look at problems of navigation in interiors and describes selected methods of positioning and navigational algorithms. In practical part this knowledge is used to design and develop own navigation system and to select a hardware used for system's testing.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne 8. 12. 2022

Bumba

podpis

Poděkování

Velice tímto děkuji vedoucímu této bakalářské práce, panu Ing. Václavu Novákovi, CSc., za neocenitelný přínos a pomoc při jejím vypracování.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Teoretická část | 2 |
| 2.1 Krátce z historie navigace | 2 |
| 2.2 Krátce z historie bezpilotních létajících systémů | 4 |
| 2.3 Určení polohy | 7 |
| 2.3.1 Rozdíl mezi interiérem a exteriérem | 7 |
| 2.3.2 Způsoby určování polohy | 7 |
| 2.3.3 Jednotlivé systémy a jejich použitelnost v interiéru | 8 |
| 2.4 Navigační algoritmy | 13 |
| 2.4.1 Dijkstrův algoritmus | 13 |
| 2.4.2 A* algoritmus | 14 |
| 2.5 Dynamika dronů | 15 |
| 3 Reálné systémy | 17 |
| 3.1 Pro navigaci v exteriéru | 17 |
| 3.2 Pro navigaci v interiéru | 17 |
| 4 Praktická část | 19 |
| 4.1 Ověření vybraných existujících algoritmů navigace v interiéru | 19 |
| 4.1.1 Navigace přes GNSS | 19 |
| 4.1.2 Navigace přes beacon | 19 |
| 4.2 Návrh a popis vlastního řešení řídicího algoritmu navigace v interiéru | 20 |
| 4.2.1 Testovací hardware – Dron | 20 |
| 4.2.2 Testovací hardware – Řídicí jednotka | 22 |
| 4.2.3 Princip pozicování | 22 |
| 4.2.4 Vizuální systém | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.5 Algoritmus navigace | 25 |
| 4.2.6 Mapování a lokalizace..... | 25 |
| 4.3 Realizace navrženého algoritmu, naprogramování a vložení do počítače..... | 26 |
| 4.4 Ověření výsledků na reálném systému – výsledky testů | 26 |
| 5 Závěr | 28 |
| Seznam literatury | 29 |
| Seznam obrázků..... | 31 |
| Seznam příloh | 32 |

1 Úvod

Ve venkovních prostorech je dnes navigace natolik běžná, že ji většina lidí nosí ve své kapse. Kamkoli se potřebuje člověk v dnešní době dostat, stačí mu vytáhnout z kapsy chytrý telefon, zadat do své oblíbené mapové aplikace místo určení a zvolený způsob dopravy (v základu pěšky, na kole, na běžkách, lodí, hromadnou dopravou nebo autem), a během páru vteřin má trasu k danému bodu před sebou. Je také velmi běžné, že je uživateli nabídnuto několik alternativních tras včetně vyhýbání se placeným úsekům nebo s maximálním počtem turistických cílů, a že každá trasa má u sebe časový odhad na základě její délky a často i hustoty dopravy, či jiných dopravních komplikací.

U semiautonomních vozidel provozovaných ve venkovních prostorách je tomu podobně. Tam je přidán navíc například systém vyhýbání se překážkám, a v případě zcela autonomních dopravních vozidel i spousta dalších bezpečnostních prvků.

Pro vnitřní prostory žádný takto univerzální systém neexistuje. Přitom je zjevné, že je v této oblasti obrovský potenciál, jak na zlepšení základní navigace pro osoby (např. v nákupních centrech, kde globální systémy nefungují), tak pro různé průmyslové účely, kde zejména v kombinaci s létajícími systémy jsou možnosti nespočetné.

Cílem této práce je navrhnout systém pro navigaci autonomních létajících systémů v interiéru, otestovat jej a zhodnotit jeho funkčnost a použitelnost. Za tímto účelem bude zvolen hardware, který bude určen k testování funkčnosti vytvořeného systému. Systém bude fungovat na principu předávání jednoduchých příkazů stylu „dopředu / dozadu, doleva / doprava, nahoru / dolů, otočit o x stupňů doleva / doprava“.

Teoretická část práce, po krátkém úvodu s historií navigace a bezpilotních létajících systémů, se zaměřuje na seznámení se s různými principy pozicování a jejich vhodností pro použití v interiéru, s různými navigačními algoritmy a s dynamikou dronů.

V praktické části je nejprve ověřena (ne)vhodnost dvou zvolených algoritmů, poté představen zvolený testovací hardware a software, a následně je prezentováno řešení systému pozicování a navigace. Na základě výsledků testů systému na testovacím hardwaru je pak vyhodnocena úspěšnost a funkčnost vytvořeného systému.

2 Teoretická část

2.1 Krátce z historie navigace

Když se nad tím dopodrobna zamyslíme, s nějakými způsoby určování polohy a navigace se setkáváme dnes a denně, a když si vzpomeneme na své znalosti z přírodopisu a dějepisu, tak musíme dokonce uznat, že zdaleka nejsme první tvorové, kteří nějakého způsobu navigace využívají.

Již dávno před tím, než naši předci vylezli z jeskyní a začali mezi sebou komunikovat, byly na naší planetě spousty druhů živočichů, kteří dokázali a dodnes dokážou překonávat stovky nebo dokonce tisíce kilometrů při svém přizpůsobení se klimatickým podmínkám a střídání sezón v jednotlivých oblastech.

Z ptáků lze jako příklad uvést čápy, kteří podle některých zdrojů překonávají ročně vzdálenost i přes 10.000 km a přesto se (jak ukázala sledování pomocí moderních technologií v posledních letech) dokážou přesně vrátit na své hnízdo (1). Z vodní říše je možno zmínit lososy táhnoucí se pářit proti proudům řek. Experty na pozemní přesuny byli například bizoni, kteří v obrovských stádech putovali před kolonizací Ameriky mezi jihovýchodem a severozápadem dnešních USA.

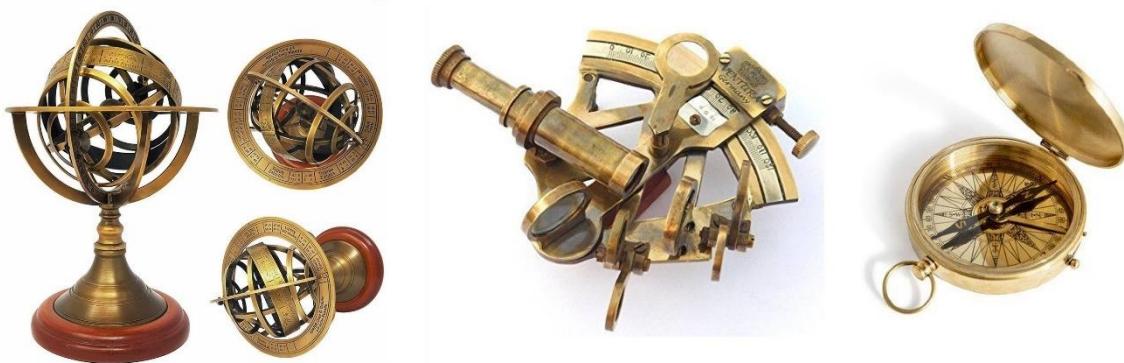
Z logiky věci pak vyplývá, že nějaký druh primitivní navigace museli používat již před desítkami až stovkami tisíc let i naši prapředkové lovci mamutů, kteří se vydávali na několikadenní výpravy za potravou a po jejím ulovení se dokázali s kořistí vrátit do výchozího bodu ke svým družkám a dětem.

Prvotní způsob navigace spočíval zejména v tom, že se umísťovaly značky na statické objekty, kde měly možnost dlouhodobě vydržet, například na stromy nebo skály. Pro udržení směru při první cestě neznámou krajinou se pak používala převážně poloha slunce nebo hvězd, případně pevného bodu na horizontu – tyto záchytné body byly i lidmi záměrně vytvářeny. Postupem času a s rozšířením písma se původní křížky, obrázky či geometrické obrazce vyvinuly až v dopravní či turistické značení.

S rozvojem inteligence se také potom začala zaznamenávat příslušná pozorování a vznikaly první jednoduché a poté stále složitější mapy, jak pozemní, tak pro relativní pohyb

slunce a hvězd po obloze. Zároveň začaly vznikat nástroje a přístroje, které (původně čistě subjektivní) měření zpřesňovaly.

Prvními takovými nástroji se již za našeho letopočtu staly astroláb, přístroj založený na měření úhlů, z kterého se časem vyvinul sextant, a kompas. Tyto přístroje, v kombinaci se záznamy empirických měření polohy slunce a hvězd, umožnily námořníkům vydat se beze strachu mimo dohled pevniny a objevovat nové ostrovy v okolí a později i velice vzdálené pevniny a kontinenty.



Obrázek 1 - Zleva: astroláb, sextant a kompas

Tyto přístroje, ve stále více sofistikovaných verzích, se používaly k navigaci až do 20. století. Pak začaly být nahrazovány přístroji založenými na aplikaci nových objevů a vynálezů, jako byly rádiové vlny a radar. S vynálezem umělých družic se pak přešlo k navigaci pomocí přístrojů umístěných na oběžné dráze Země.

Zřejmě nepřekvapivě, největší vývoj v moderní navigaci a určování pozice byl iniciován, financován a prováděn pro vojenské a špionážní účely, v období studené války, kdy se dva největší rivalové – SSSR a USA – snažili navzájem předběhnout ve vyřešení stávajících problémů a soutěžili mimo jiné v tom, kdo první ovládne vesmír.

První etapu závodu vyhrál SSSR, který vypustil první družici v roce 1957, USA až o cca 4 měsíce později v lednu 1958 (2). První družice pro čistě navigační systém Transit/NAVSAT byla vypuštěna v roce 1959, celý systém byl spuštěn v roce 1964 a v roce 1967 uvolněn i pro civilní využití; přesnost činila tehdy neuvěřitelné desítky metrů. (3)

Na dnes nejpoužívanějším systému GPS začaly práce v roce 1973, do plného provozu byl uveden v roce 1994 (4). Postupem času docházelo k tak zásadním modernizacím, že dnes

lze z vesmíru určit pozici s přesností na milimetry. Pro civilní účely je pak přesnost omezena na metry.

Kromě systému GPS, který je provozován USA, jsou na orbitě Země družice globálních navigačních systémů GLONASS (Rusko), Galileo (Evropská vesmírná agentura) a BeiDou (Čína). Rozšíření svých zatím regionálních verzí na globální verzi plánuje i Japonsko a Indie. (5) (6)

Navigace v interiérech, kromě poměrně zanedbávané oblasti hlubinných dolů, začala být aktuální až v posledních desítkách let, kdy začaly vznikat velké budovy nebo komplexy budov, ať již třeba nákupní centra nebo obrovské skladovací haly, kde je již bez jakékoli mapy obtížné se zorientovat, případně dorazit v optimálním čase k vytýčenému cíli.

S rozvojem autonomních létajících systémů, převážně dronů, a jejich stoupající reálnou dostupností se pak jejich použití pro některé práce jeví jako rozumné a často finančně výhodnější než jiné alternativy, a po vyřešení jejich navigace v uzavřených prostorech bude možné jejich ještě větší využití, hlavně v místech, kam se lidé nedostanou nebo jim hrozí újma na životě či zdraví.

2.2 Krátce z historie bezpilotních létajících systémů

Jak již bylo zmíněno, jako několik dalších vynálezů posledních staletí, které nyní používáme v běžném životě, idea a provedení autonomních létajících systémů má své počátky v armádě. Jejich původním účelem bylo nepozorovaně zjistit pozici nepřítele a způsobit mu ztráty na technice i vojsku bez nutnosti ohrozit životy vlastních vojáků.

Jedním z prvních lidí, kteří měli vizi dálkově ovládaných létajících dopravních prostředků, byl Nikola Tesla, který již v roce 1898 při podání patentu na „dálkové ovládání“ předvídal jejich existenci, kdy původně předjímal zejména praktické využití pro přenášení břemen, a domníval se, že již teoretická odstrašující destruktivní síla při vojenském použití povede k udržení míru. Později již počítal s jejich využitím pro obranu USA. (7)

K velkému rozvoji, zejména pro špionáž, došlo v období 1. světové války, kdy byly podniknuty i pokusy o shoení náloží. S dostupnou technologií ale neměly tyto letouny vysokou přesnost a k jejich většímu rozšíření tak zatím nedošlo. Mezi válkami byly používány převážně jako cvičné cíle.

Další vlna vývoje nastala v období 2. světové války, kdy byly vyvíjeny zejména letouny s možností přenosu a shazování bomb. Pro velkou nespolehlivost, a ne úplně domyšlený způsob navigace nedošlo opět ze strachu o poškození vlastních objektů a zabití civilistů k masové výrobě. (7)

V období války ve Vietnamu (1955-1975) již používala americká armáda bezpilotní letouny pro průzkumné mise. Před koncem tisíciletí byl vyroben první dron s možností jeho ovládání přes satelit. Po roce 2000 začaly být již drony a bezpilotní letouny armádami využívány masově jak pro průzkum, tak pro ničení cílů. (7)



Obrázek 2 - Bepilotní letoun, také nazývaný dron

S vývojem technologií jak pro stabilizaci a spolehlivost letu, tak pro navigaci, došlo v tomto století k rozšíření používání dronů i v průmyslových a vědeckých odvětvích, a drony začaly skutečně sloužit lidem i v souladu s účelem, který si pro ně původně vysnil Nikola Tesla, tedy namísto destrukce mimo jiné zachraňují životy a majetek.

Příkladem mohou být třeba drony s termokamerou vyhledávající ztracené osoby ve složitých terénech, kam se lidé nedostanou, nebo drony pro zkoumání tornád, díky nimž jsou vědci schopni lépe porozumět mechanice těchto přírodních jevů a vydávat přesnější varování pro evakuaci či nutnost úkrytu.

Pomocí dronů je také možno dodávat např. léky a materiál do oblastí postižených přírodní katastrofou, kde jsou ostatní cesty odříznuty, hlídat ohrožené druhy divokých zvířat a ochránit je před pytláky, provádět bezpečnostní prohlídky vysokých staveb, kam se lidé dostanou jen těžko (vysílače, vrtné plošiny apod.)

Nedocenitelnou službu mohou prokázat i bezpečnostním složkám, ať už policii při sledování zločinců, nebo pohraniční strážci či celní správě při ochraně hranic, zejména v zalesněných a nepřístupných oblastech, zemědělci jimi mohou monitorovat výpěstky bez nutnosti poškodit lány fyzickým vstupem či vjezdem techniky.

V komerční sféře se drony velmi používají v realitní činnosti, kdy je možno s minimálními náklady pořídit snímky nabízené nemovitosti ze všech úhlů včetně detailního pohledu shora, pro bulvární novináře a fotografy jsou darem shůry, oživit dokážou také reportáže z kultury a sportu.

V posledních letech bylo také zaznamenáno několik pokusů nahradit prostřednictvím dronů poštovní kurýry, kdy je třeba v oblasti doručování zásilek na vzdálené samoty tento způsob i ekologičtější než poštovní doručovatel s autem, pokusy podnikly také pizzerie a zásilkové velkoobchody namísto klasického rozvozu.

Postupem času začaly sloužit drony i k zábavě a osobnímu využívání. Menší drony, vybavené často kamerami, se dnes prodávají i jako hračky. Z tohoto důvodu, kdy docházelo k jejich zneužívání, bylo používání dronů legislativně omezeno, a to nařízením (EU) 2019/947 a nařízením (EU) 2019/945 včetně povinné registrace jejich provozovatelů.

Až bude spolehlivě vyřešena navigace dronů v interiérech a obecně uzavřených prostorech, lze očekávat využití dronů i v kontrolách různých potrubí či důlních šachet včetně míst zamořených jedovatými plyny, v průzkumu jeskyní a lidem nepřístupných historických a kulturních objektů, inventarizaci zásob ve velkoskladech apod.

Bude také možno jimi nahradit velké množství pracovních míst, na kterých jsou lidé denně ohroženi na životě či zdraví, např. prohledávání nestabilních budov apod.

2.3 Určení polohy

Pro navigaci jakéhokoli systému, ať už autonomního či ne, jsou potřeba vždy 3 zásadní kroky:

1. Určení polohy cíle
2. Určení a aktivní určování polohy navigovaného systému
3. Vytvoření trasy mezi aktuální polohou systému a cílem

U autonomních systémů přibývá navíc 4. bod, a to aktivní vyhýbání se překážkám.

2.3.1 Rozdíl mezi interiérem a exteriérem

V exteriéru dnes běžně využíváme k určování polohy systémů GNSS (Globální Navigační Satelitní Systém), kterými jsou systémy GPS, Glonass, Galileo a BeiDou, které dokáží při přímém, nebo mírně zakrytém výhledu na oblohu určit polohu systému s přesností v rámci 1 metru pro civilní účely.

V interiéru jsou nám tyto systémy většinou téměř k ničemu, jelikož signál mezi satelitem a systémem je ve velké míře ovlivněn průchodem skrz materiály stěn a stropů budovy, takže je buď zkreslen, nebo zcela odstíněn. Musíme tak využívat jiných způsobů pro určení polohy.

2.3.2 Způsoby určování polohy

V základu rozdělujeme polohovací systémy podle toho, zda k určení své polohy vyžadují jiný aktivní prvek, vůči kterému určují svou polohu, či ne. Aktivním prvkem může být například satelit na oběžné dráze, nebo i jen malý vysílač v rohu místnosti.

Systémy využívající externí pomoci fungují převážně na principu výpočtu vzdálenosti či úhlu vůči jinému aktivnímu prvku se známou polohou. V ideálním prostředí nám stačí k určení polohy bodu pouze jeho vzdálenost vůči 3 bodům se známou polohou, nebo jeho úhel od 2 bodů se známou polohou. V reálném prostředí není měření vzdáleností ani úhlů vždy tak přesné, aby nám vznikl pouze jeden bod, a proto musíme často provést korekci, například přidáním dalších referenčních bodů, nebo určit polohu pouze jako oblast, v níž se hledaný systém nachází.

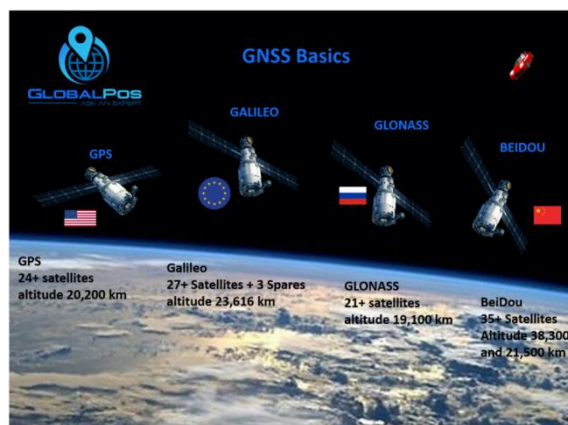
Systémy bez externí pomoci většinou určují svoji polohu pouze v rámci budovy či místnosti, v níž se pohybují. Pro určení své polohy převážně využívají detekovaných vzdáleností od stěn a jiných objektů, pomocí technologií jako je LIDAR, nebo vizuální detekce hloubky obrazu, nebo pomocí známé výchozí pozice a techniky odometrie, a to použitím inerciální jednotky, nebo také vizuální odometrie. U tohoto typu systémů je také běžné, že si i samy namapují místnost či prostor, ve kterém se mají navigovat, v takovém případě se jedná o metodu SLAM (Simultánní Lokalizace A Mapování).

Dalším způsobem, jakým lze pohlížet na rozdělení polohovacích systémů, je to, zda pro svou funkčnost potřebují předpřípravu daného prostředí či nikoli. V podstatě veškeré systémy založené na aktivním prvku patří do kategorie, která je na předpřípravě závislá – je nutné předchozí vypuštění satelitů, výstavba signálních věží nebo umístění beaconů, či jiných vysílačů signálu (wi-fi, bluetooth apod.). Týká se to i části pasivních systémů, kde je nutné nasnímání záchytných bodů a jejich přesná lokalizace, nebo umístění značek.

2.3.3 Jednotlivé systémy a jejich použitelnost v interiéru

- GNSS (často špatně označován také jako GPS – Globální Poziční Systém)

Jedná se o dnes nejrozšířenější systém určování polohy na světě, který je instalován do velké škály různých zařízení, od mobilních telefonů přes chytré hodinky až po automobily, či námi řešené drony. Vznikl původně pro vojenské účely, pro které dnes umožňuje přesnost polohy až na milimetry, a až později byl uvolněn pro civilní trh s určitými opatřeními proti zneužití, jako je omezení primárně v oblasti exaktnosti systému, jmenovitě jde o přesnost přibližně v rámci jednoho metru.



Obrázek 3 - Systémy GNSS

Ve venkovních prostorách, hlavně pokud jde o létající systémy, nám tato přesnost stačí, v případě, že nám tato přesnost nestačí, lze využít různé metody pro zpřesnění polohy. Ve vnitřních prostorách se vlivem průchodu signálů budovou přesnost satelitních systémů zhorší velmi rychle na desítky metrů, a uvnitř vícepatrových budov může dojít i k úplné ztrátě možnosti zaměření. Z tohoto důvodu v naprosté většině případů není tento systém vhodný pro pozicování ve vnitřních prostorách.

- WPS (Wifi Poziční Systém)

Tento systém vznikl jako náhrada systému GNSS pro navigaci osob na veřejných místech, jako jsou obchodní domy, nádraží, letiště nebo i nemocnice. Základním předpokladem je, že taková místa jsou již plně pokryta sítí přístupových bodů Wifi, a že navigovaným systémem je mobilní telefon též vybavený technologií Wifi. Existuje několik různých metod, jak pomocí Wifi určit polohu v rámci daného, velikostně omezeného prostoru. Pravděpodobně nejběžnější z těchto metod je výpočet vzdálenosti k jednotlivým přístupovým bodům na základě síly z nich přijatého signálu a následný výpočet polohy díky známé poloze těchto přístupových bodů.

Tento způsob není velmi spolehlivý ani přesný, jelikož síla signálu vysílače je proměnlivá, a zároveň je také ovlivněna průchodem stěnami a jinými objekty. Vzhledem k tomu, že přístupové body Wifi, na rozdíl od satelitů GNSS, nejsou navrženy za účelem poskytování polohy, mohou sice sloužit k přibližnému určení polohy v budově, ale žádná z dostupných metod není dostatečně přesná pro účely pozicování ve vnitřních prostorách pro drony.

- BPS (Beacon Poziční Systém)

Pod tímto názvem je shrnuto několik různých systémů, které fungují na společném principu, a to využívání takzvaných „Beacon-ů“ (v češtině je při tomto významu nejlepším překladem „signální věž“ nebo „maják“), které jsou zmenšenou pozemní variantou satelitů GNSS a byly jedním z jejich předchůdců při navigaci lodí a letadel (např. LORAN).



Obrázek 4 - Bluetooth Low Energy Beacon

Nevýhodou těchto systémů je to, že mají omezený dosah, pozicovaný objekt se musí nacházet v kontaktu se třemi Beaconsy a mít zařízení na vyhodnocení daného signálu. Využívají se tedy zpravidla tam, kde je síť GNSS buď nedostupná (např. v podzemních dolech) nebo rušená (např. při válečných konfliktech).

Budoucnost mají také v oblasti výzkumu vesmíru, kdy lze po jejich rozmístění s jejich pomocí určovat polohu vyslaných výzkumných zařízení na jiných planetách nebo měsících., kde se vypuštění družic v prvních fázích jeví jako neproveditelné nebo neekonomické.

Tyto systémy se dělí dle využívané technologie pro komunikaci mezi beaconem a systémem. Může jít o radiové vlny (LORAN využíval frekvence 1,85 a 1,95 MHz), radar (3 až 110 MHz), Wi-Fi (900 MHz až 60 GHz), Bluetooth (2,402 až 2,480 GHz), mikrovlny (1 až 100 GHz) apod.

Pro navigaci dronů v interiérech jsou vhodné při splnění určitých podmínek, zejména je nutné, aby měl dron v každé chvíli výhled alespoň na tři beaconsy. Nevýhodou je zřejmá nutnost osazení prostoru patřičným počtem beaconů, což jejich využití zřetelně limituje.

- Inerciální systém

Jedná se o systém s nejjednodušším principem funkce, vycházející ze známé výchozí polohy a jednoduchého vzorečku $\text{vzdálenost} = \text{rychlost} * \text{čas}$. Využívá takzvané inerciální jednotky, která mimo jiné měří zrychlení a rotaci systému ve všech třech osách, a na základě těchto dat vypočítává rychlost a směr pohybu systému, ze kterých se následně kalkuluje vzdálenost od bodu předchozího měření a tím vzniká relativní poloha od výchozího bodu.

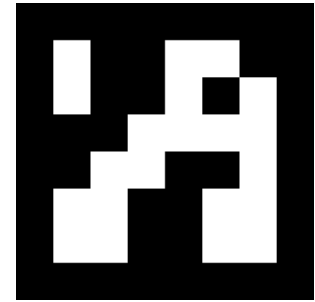
Nevýhodou tohoto systému je nedostatečná přesnost inerciálních jednotek, která způsobí to, že i po zastavení pohybu systému se nevynuluje rychlost, a tak si systém myslí, že se stále pohybuje, čímž se vytvářená poloha vzdaluje od té reálné. Z tohoto důvodu není tento systém používán pro plnohodnotné pozicování, ale spíše jako doplňující systém používaný v kombinaci s jiným polohovacím systémem.

- Vizualní systém

Tento systém je inspirován přírodou, mimo jiné například i lidmi, kteří svou polohu v prostoru též určují primárně na základě zrakových vjemů a jejich zpracování v mozku (samozřejmě v případě nevidomých, či v nízkých světelných podmínkách nastupují alternativní metody, využívající hlavně hmat nebo sluch). Stejně jako v přírodě tento systém začne sběrem vizuálních dat, pomocí jedné nebo více kamer. Poté tato data projdou filtrací a následným zpracováním, jehož cílem je odhadnout vzdálenost klíčových bodů nalezených v obraze a následné zpracování těchto dat. Jak jsou tato data využita závisí na tom, zda chceme vizualní systém využívat pro odometrické účely, nebo pro SLAM.

Nevýhodou těchto systémů je potřeba dostatečného, neblíkajícího a konstantního světla v navigovaném prostoru, jelikož kvalita vizuálních dat získaných z kamery je velmi závislá na kvalitě osvětlení. Je proto potřeba kvalitně nasvítit navigovaný prostor, případně je potřeba vytvořit přidavné svícení na dronu, které zajistí určitou rovnoměrnost nasvícení minimálně v právě sledovaném prostoru.

Jiná možnost vizuálního systému spočívá v tom, že se dopředu nasnímají orientační body, které musí mít odlišné charakteristiky a známou polohu. Kamera na dronu pak sejme obraz a systém nahrubo určí svou polohu porovnáním nasnímaného obrazu s předem pořízenými fotografiemi. Pak již změří jen vzdálenosti nebo úhly mezi rozpoznanými značkami a vypočte svou přesnou polohu s použitím známé polohy orientačních bodů. V interiéru lze tento systém použít v případě, že je zde možno předem rozmístit značky, například jde použít třeba ArUco markery nebo obecně jakékoli tvary či kódy, které se od sebe dostatečně liší tak, aby je kamera dronu byla schopna rozpoznat.



Obrázek 5 - Příklad ArUco markeru

- Echolokace

Jedná se o další způsob určování polohy inspirovaný přírodou, v tomto případě např. netopýry nebo delfíny, kteří pro svou orientaci v prostoru využívají zvukové vlny a jejich odraz od stěn a předmětů. Principem je vyslání akustického signálu a vyhodnocení časového posunu ozvěn vzniklých odrazem od okolního prostředí, navíc zpřesněná umístěním sluchových orgánů v páru, tedy po stranách hlavy, umožňující zpřesněné určení polohy i rozdílem v příjmu signálu jednotlivými receptory.

U lidí je tento princip přirozeně využíván např. slepci, kteří dokážou podobně vyhodnocovat zvuky vydávané ťukáním slepecké hole, v technických oborech na stejném principu pracuje také sonar pro navigaci ponorek a podmořský výzkum.

Pro navigaci v budovách, zejména v těch modernějších, není tento princip úplně ideální, protože se stěny stále více dělají z materiálů pohlcujících zvuk, což by mohlo mást při vyhodnocování signálů.

- LIDARové systémy

Tyto systémy využívají k měření vzdálenosti vyslání světelného paprsku a následné detekce odraženého světla. Detekce může probíhat buď na principu měření intenzity odraženého světla, nebo na principu Dopplerova jevu. LIDARové systémy obecně míří pouze jedním směrem, a tak je běžné, že pro jejich větší užitečnost využíváme různých otočných mechanismů, které jim umožní 360° otočení a tím i možnost detekce. Nutnost jejich otáčení a s tím související odstředivá síla narušující stabilizaci dronu je jednou z jejich nevýhod, a jedním z hlavních důvodů, proč nejsou ideální pro použití na dronech.



Obrázek 6 - Příklad rotačního LIDARu

2.4 Navigační algoritmy

2.4.1 Dijkstrův algoritmus

Dijkstrův algoritmus je jedním z algoritmů určených k řešení „problému hledání nejkratší cesty“. Algoritmus funguje na principu postupného prohledávání grafu tak, že na začátku je zvolen výchozí a cílový bod a všechny body grafu, včetně výchozího a cílového, jsou označeny jako nenavštívené. Vzdálenosti všech bodů grafu jsou nastaveny na nekonečno, které značí, že do daného bodu neznáme trasu, vzdálenost výchozího bodu je nastavena na 0. Algoritmus poté v každém cyklu vybere bod s nejmenší vzdáleností od výchozího bodu (což v prvním cyklu je samotný výchozí bod), a zpracovává jeho sousední body (body, do kterých vede hrana z aktuálně zkoumaného bodu), které zatím nebyly navštíveny (tj. nejsou v seznamu prozkoumaných bodů). Každému ze sousedních bodů je přiřazena hodnota vzdálenosti, která je rovná součtu hodnoty vzdálenosti aktuálně zkoumaného bodu a délce hrany mezi ním a zkoumaným bodem. Po prozkoumání všech sousedních bodů je zkoumaný bod označen za prozkoumaný a přidán do seznamu prozkoumaných bodů. Algoritmus poté pokračuje dalším cyklem, tj. vybere další bod s nejmenší vzdáleností a opakuje celý postup. Ve chvíli, kdy se stane zkoumaným bodem

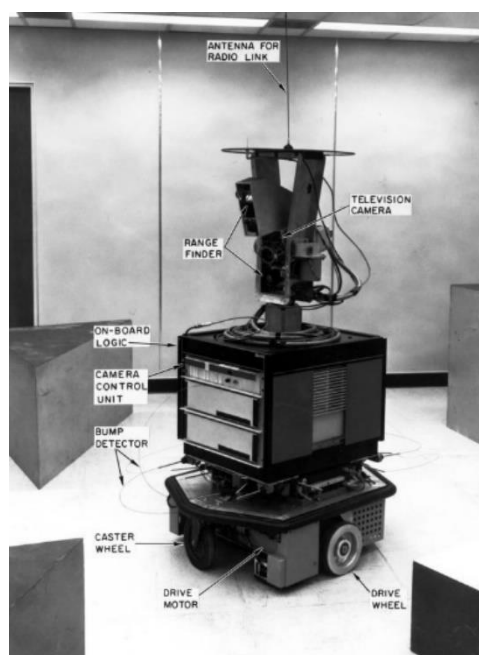
cíl, algoritmus končí. V případě, že nelze vybrat další bod ke zkoumání, tj. když byl prozkoumán celý dostupný graf, a zároveň nedošlo k ukončení nalezením cíle, pak cesta mezi výchozím bodem a cílem neexistuje. V tomto znění je výstupem algoritmu pouze délka nejkratší cesty mezi výchozím bodem a cílem. Pokud nám jde o získání nejkratší trasy jako takové, je potřeba algoritmus rozšířit tak, aby ve chvíli, kdy přiřazujeme sousedním bodům jejich vzdálenost, jsme jim přiřadili i referenci na předchozí bod, ze kterého jsme na něj přicházeli (reference na aktuálně zkoumaný bod). Poté lze z algoritmu vytvořit nejkratší cestu tak, že vezmeme cílový bod a půjdeme po referencích na předchozí bod, dokud nedojdeme k výchozímu bodu.

Nevýhodou Dijkstrova algoritmu, pokud jej používáme pro nalezení nejkratší cesty pouze mezi dvěma body je, že zkoumáme všechny body daného grafu, a to i body, které do cíle nevedou (naopak mohou být úplně opačným směrem, než je cíl). Pokud jej používáme pro nalezení cesty z jednoho bodu do libovolného bodu na grafu, tak tato nevýhoda neplatí.

2.4.2 A* algoritmus

A* algoritmus vznikl jako součást projektu „robot Shakey“, který se mimo jiné měl být schopen sám navigovat v prostoru. Přidáním heuristiky do prohledávacího algoritmu se snažíme o zredukování počtu bodů, které je potřeba prozkoumat, pro nalezení minimální trasy.

A* algoritmus využívá stejných principů jako Dijkstrův algoritmus, ale přidává navíc heuristiku. Na rozdíl od Dijkstrova algoritmu mají v sobě jednotlivé zkoumané body kromě vzdálenosti od výchozího bodu i odhadovanou vzdálenost od cíle, vytvořenou ze zvolené heuristické funkce. Algoritmus přiřazuje každému bodu takzvané fSkóre, které je součtem vzdálenosti od výchozího bodu (gSkóre) a odhadované vzdálenosti od cíle (hSkóre). Podobně jako Dijkstrův algoritmus začne A* tak, že pro všechny body grafu nastaví vzdálenost od výchozího bodu (v případě A* se jedná o gSkóre) a fSkóre na



Obrázek 7 - Robot Shakey

nekonečno. Poté nastaví gSkóre výchozího bodu na 0, hSkóre podle heuristické funkce a fSkóre na hodnotu hSkóre. Poté algoritmus v každém cyklu vybere zkoumaný bod, který má nejmenší fSkóre (v prvním cyklu se jedná o výchozí bod), v případě shody fSkóre lze vybrat bod s menším hSkóre (tj. podle heuristiky je tento bod blíže k cíli). Následně zpracovává sousedy zkoumaného bodu, kterým, pokud ještě nebyly navštíveny, nastaví gSkóre na hodnotu svého gSkóre plus délka spojující hrany, hodnotu hSkóre podle heuristické funkce a hodnotu fSkóre jako součet gSkóre a hSkóre. Pro sousedy, kteří již byli navštíveni (tj. jejich gSkóre není nekonečno) porovná, zda cesta z aktuálně zkoumaného bodu není výhodnější (tj. zda výsledné gSkóre, které by vzniklo z aktuálně zkoumaného bodu a délky spojující hrany, není nižší než gSkóre tohoto souseda), a v případě, že je, pozmění hodnotu gSkóre (a tím i fSkóre) na příslušnou hodnotu (taktéž se nastaví jako nový „předchozí bod“ pro tohoto souseda, aby bylo opět možné vytvořit trasu zpětnou propagací po předchozích bodech). Po prozkoumání všech sousedních bodů pokračuje algoritmus dalším cyklem, tj. opět vybere zkoumaný bod a provede všechny popsané kroky. Ve chvíli, kdy se zkoumaným bodem stane cílový bod, algoritmus končí. V případě, že se nepovedlo nalézt cílový bod a již neexistují další body k prozkoumání, tak neexistuje cesta mezi zvolenými body. Pro nalezení trasy po úspěšném dokončení algoritmu postupujeme stejně, jako u Dijkstrova algoritmu, a to tak, že vezmeme cílový bod a jdeme po referencích na předchozí bod, dokud nedojdeme k výchozímu bodu.

2.5 Dynamika dronů

Jako velká výhoda dronů, zejména kvadruptér, se jeví možnost jejich pohybu ve všech třech směrech, tedy dopředu/dozadu, doleva/doprava a nahoru/dolů. Bohužel z toho vyplývá i celá řada problémů a komplikací, které je potřeba řešit.

Pozemní vozidla se většinou mohou pohybovat pouze po jedné ose, kdy zatáčení funguje ohybem této osy - tj. auto stále jenom jede dopředu nebo dozadu, ale má možnost měnit směr, kam jeho přední nebo při couvání zadní část míří, neumí najednou skočit doleva nebo doprava. Oproti tomu se drony mohou pohybovat všesměrově, což jim přidává určitou komplexnost a volnost, navíc nevyžadují zajištění předpřipraveného nebo alespoň sjízdného terénu.

Přináší to samozřejmě i obrovskou výhodu při navigaci, kdy je možno počítat s téměř neomezenou volností, přičemž algoritmy pro navigaci mohou hledat i nepřímé cesty s okamžitými změnami směru ve všech třech osách, jelikož se dron snadno přizpůsobí, na rozdíl třeba od auta, u kterého by výpočet trasy musel zohledňovat i rádius otočení.

Zjevnou nevýhodou je oproti tomu nutnost řešit ovlivnění polohy i stability dronů fluktuacemi ve vzduchu, kdy na dron mohou významně působit jak různé druhy horizontálního i vertikálního proudění, tak změny hustoty vzduchu. Částečně je mohou vyvolávat i svými rotory. Způsobené turbulence samozřejmě zapříčiňují zhoršení jejich letových vlastností a schopnost stabilizace nutné pro let, v mnohých případech i pouhý silnější vítr zavinil jejich pád.

Drony dále při svém pohybu driftují, tj. nevydrží vždy úplně na jednom místě, v každém okamžiku se alespoň trochu pohybují, kvůli mechanismu, jakým jak se udržují v letu. V hypotetickém ideálním světě, kde jsou motory jeden jako druhý a vrtule jedna jako druhá, by dron byl schopen stát na místě bez jakéhokoli pohybu, ale v realitě způsobují i mikroskopické nepřesnosti rozdíl ve zdvihu mezi motory, a v závislosti na kvalitě kompenzace těchto rozdílů je dána schopnost dronu zůstat alespoň přibližně na jednom místě.

Uvedeným vlastnostem dronů je pak nutno přizpůsobit jejich navigaci a pozicování, například aplikováním pravidelné korekce polohy.

V interních prostorech se výše uvedené atmosférické jevy vyskytují v menší míře, nicméně úplně zanedbat je také nelze – běžně se může objevit třeba průvan nebo pohyb vzduchu způsobený sáláním topení apod.

3 Reálné systémy

3.1 Pro navigaci v exteriéru

Řada systémů používaných pro zjišťování polohy a následnou navigaci v exteriéru byla uvedena již v bodě 2.3.3 u popisu jejich principu; tyto systémy jsou veřejně známé včetně jejich fungování a omezení je dáno v podstatě jen nutností pořízení zařízení (přístroje), který je potřeba pro jejich používání.

Nejpoužívanější z nich se navzájem od sebe liší většinou pouze frekvencí vysílaného signálu, umístěním vysílačů (pozemní versus oběžná dráha), a dostupností. Řada z nich je přístupná veřejnosti prostřednictvím aplikací pro běžná elektronická zařízení, dnes převážně mobilní telefony.

Z historických systémů pro zjišťování polohy je možno jmenovat např. systémy Decca Navigator Systém, LORAN a OMEGA (8), z novějších hlavně GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou.

Nejpoužívanějšími navigačními systémy rozšířenými mezi populací v České republice jsou dnes aplikace Google maps a Seznam mapy, které pracují i se započtením překážek v provozu nahlášených uživateli pro silnice. Na úroveň chodců a jim hrozících překážek tyto systémy propracované nejsou.

3.2 Pro navigaci v interiéru

Zatímco systémy pro navigaci v exteriéru jsou provozovány, udržovány a zlepšovány globálně, pokud odhlédneme od faktu, že se modernizací technologií exteriérových systémů zlepšuje i jejich přesnost v interiéru, i když zatím ne dostatečně, systémy pro navigaci v interiéru jsou řešeny spíše lokálně.

Z provedené rešerše se zdá, že navigacemi v interiérech se zabývají specializované programátorské firmy, které navrhnou samostatná řešení „na klíč“ pro konkrétní budovy nebo přírodní útvary po průzkumu dostupných technických i finančních možností vybavení pro jednotlivé objekty.

Volba systému je pak dána účelem, kterého se má navigací v interiéru dosáhnout. Pokud se jedná např. o podrobnou navigaci v obchodním centru, bude v tomto případě stačit pouze obdoba Google maps a jen zpřesněné polohování pro interiér s užitím podrobných map objektu. Příkladem může být společnost Belitsoft, která pro svou aplikaci využila podle svých slov Google Maps, Bluetooth Low Energy and Blue Dot technologie. (9)

Zcela jiný systém by musel být zvolen např. pro prohlídku tubusu podzemního potrubí pro odhalení místa závalu. Zde by byla vhodnější varianta kombinace inerciálních a vizuálních systémů na dronu, popsána např. v článku Visual-Inertial Indoor Navigation Systems and Algorithms for UAV Inspection Vehicles. (10)

Pro inventarizaci a kontrolu zásob ve skladovacích halách s regály do výšek až několika metrů, s pravidelně geometrickými uličkami, lze pak použít například systémy založené na technologii beaconů a opět s využitím klidně i autonomních dronů. Musí však být zajištěno, aby do dráhy dronu a jeho výhledu na beacon nebyly umístovány překážky. (11)

4 Praktická část

4.1 Ověření vybraných existujících algoritmů navigace v interiéru

4.1.1 Navigace přes GNSS

Jako první systém pro ověření byl zvolen systém navigace přes GNSS, kdy existoval určitý předpoklad, že v posledním patře panelového domu (tedy pod střechou) by nemuselo být rušení příliš silné.

Již při zadání dráhy letu místností bez přidání překážek, tedy jen s nábytkem okolo stěn, se ukázalo, že v kombinaci metrové tolerance samotného systému a přeci jen částečného rušení panelové střechy nebyl dron schopen letět v naprogramované dráze letu a narazil do stěny.

K zamezení rizika zničení hardwaru, potřebného pro splnění zadání práce, byl pokus přerušen již před přidáním překážek a závěrem bylo potvrzení, že systém GNSS je i v interiéru těsně pod střechou nepoužitelný.

4.1.2 Navigace přes beacon

Před nákupem a instalací systému pracujícího na kombinaci čtyř beaconů byla provedena příprava k vytýčení přesných míst umístění beaconů v rámci místnosti, a to hledáním míst optimálních pro maximální pokrytí místnosti, tedy tak, aby v jakémkoli místě byl poté dron v dosahu alespoň tří beaconů.

Praktickým pokusem se čtyřmi LED svítilnami při jinak absolutní tmě, i při původním rozložení nábytku v místnosti kolem stěn, tj. bez přidání horizontálních a vertikálních překážek do prostoru, se nepodařilo žádným způsobem zajistit, aby byla každá část místnosti pokryta svitem alespoň tří svítidel.

Závěrem tohoto ověření bylo, že čtyřbeaconový systém je vhodný maximálně pro prázdné hranolové nebo krychlové prostory bez překážek, tedy pro místnosti s nábytkem

nebo jinými horizontálními nebo vertikálními překážkami je zcela nevhodný, obzvláště je-li potřeba pracovat ještě s minimálním rozestupem jednotlivých beaconů.

4.2 Návrh a popis vlastního řešení řídicího algoritmu navigace v interiéru

Pro účely testování této práce byl zvolen dron Ryze Tello, z důvodu jeho jednoduchého ovládání a možnosti jeho programování pomocí příkazů. Řídící jednotkou bylo zvoleno Raspberry Pi 4 model B.

4.2.1 Testovací hardware – Dron

Dron Ryze Tello je malý lehký dron vyvinutý společností Ryze Technology ve spolupráci se společností DJI, která je jedním z předních výrobců civilních dronů. Hlavními jeho přednostmi jsou malé rozměry (9,6 cm x 9,2 cm x 4 cm), nízká váha (80 gramů), přední HD kamera (5 megapixelů dostupných ve foto režimu přibližně jednou za 2 sekundy, nebo nepřetržitých 1280x720 v 16:9 video režimu, případně 960x720 v 4:3 video režimu), výškové senzory a funkce, jako je automatický start a přistání a funkce „hover“. O napájení se stará baterie o kapacitě 1100mAh, která dronu poskytuje přibližně 13 minut letu. Tento



Obrázek 8 - Dron Ryze Tello včetně chráničů vrtulí

dron byl zvolen, jak již bylo řečeno, pro jeho programovatelnost, a to v téměř jakémkoli programovacím jazyce, který umožňuje komunikaci pomocí UDP.



Obrázek 9 - Spodní část dronu, na které lze vidět spodní kameru, a výškový ToF senzor

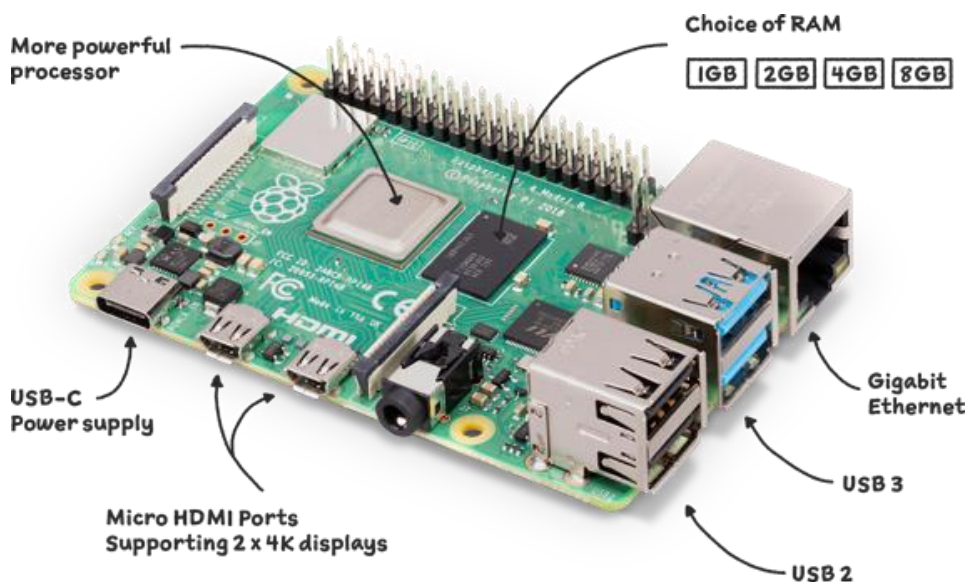
Programování dronu může probíhat pomocí oficiálního API, které je k dronu dodáváno (12), nebo lze využít neoficiální API, které vytvořili uživatelé pomocí studování komunikace mezi dronem a jeho oficiální aplikací.

Pro účely testování práce bylo zvoleno neoficiální API, které poskytuje spoustu funkcí, jež nejsou součástí oficiálního API dodávaného výrobcem. Za účelem používání neoficiálního API byla využita upravená verze veřejně dostupné knihovny TelloPy (13), která z důvodu neoficiálnosti tohoto API nebude zveřejněna spolu s prací. Úpravy se týkaly primárně způsobu přístupu k jednotlivým datům získávaným z dronu, nepřidávaly tedy žádnou funkcionalitu navíc oproti TelloPy knihovně, ale jen zpříjemňovaly práci s touto knihovnou.

4.2.2 Testovací hardware – Řídicí jednotka

Řídicí jednotkou bylo původně zvoleno Raspberry Pi Zero W, které pro nedostatek výkonu, který by způsobil až několika sekundové čekání na rozhodnutí systému a mohl by i poškodit dron během testování nedostatečně rychlou reakcí na překážku, bylo nahrazeno za výkonnější Raspberry Pi 4 model B.

Raspberry Pi 4 model B je malý lehký mikropočítač od společnosti Raspberry Pi Foundation. Jedná se o jednodeskový mikropočítač středních rozměrů (8,5 cm x 5,6 cm x 1,7 cm) a nízké váhy (45 gramů).



Obrázek 10 - Raspberry Pi 4 model B

Původní plán s RPi Zero byl, že bude jakožto řídicí jednotka přidělováno na dron, čímž by se minimalizovala možnost interference řídicích signálů přenášených pomocí Wifi. Vzhledem k jeho náhradě za RPi 4 model B, který je mnohem těžší (RPi Zero má pouhých 9 g), a zároveň i větší, došlo k odstoupení od tohoto plánu. I kdyby dron tuto přídatnou váhu unesl (podle některých zdrojů unese Tello až 70 g (14)), potřeby pro napájení RPi 4B by již neunesl (opět oproti původně zamýšlenému RPi Zero, které by mohlo být mimo jiné napájeno i přímo ze samotného dronu).

4.2.3 Princip pozicování

Za účelem pozicování dronu byla zvolena metoda VIO (Vizuální Inerciální Odometrie) a předem vytvořená mapa navigované oblasti. Využíváno je spodní kamery

testovacího dronu a jeho vnitřní inerciální jednotky. Dron tato data zpracovává a používá je mimo jiné ke své vlastní stabilizaci ve vzduchu. Dále tato zpracovaná data poskytuje jako relativní souřadnice vůči bodu, ve kterém byl dron zapnut, v rámci záznamových dat (Logů), ke kterým máme přístup díky neoficiálnímu API. Dále v těchto záznamových datech máme přístup i k samotným surovým datům, jako je rychlost zaznamenaná vizuální jednotkou, rychlost, akcelerace a natočení gyroskopu zaznamenaných inerciální jednotkou a výška z ToF senzoru (Time of Flight – doba letu, v tomto případě doba letu infračerveného světla na spodku dronu).

4.2.4 Vizuální systém

Vizuální systém je ve zvoleném řešení zodpovědný za sběr obrazových dat navigovaného prostoru a následnou detekci nezmapovaných překážek, určení jejich vzdálenosti od navigovaného systému a určení jejich hrozby pro navigovaný systém.

Sběr vizuálních dat probíhá na testovacím hardwaru pomocí přední kamery příjmem vizuálních dat ve formátu h264, ve kterém je dron vysílá na UDP port řídicí jednotky specifikovaný v inicializačním paketu komunikace s dronem. Rozlišení obrazových dat je nastaveno na 960x720, jelikož poměr stran 4:3 dává větší zorný úhel, a to jak horizontální, tak vertikální. Frekvence příjmu těchto dat je v základu je nastavena na 15 snímků za sekundu, což je pro dostatečně rychlou detekci překážek dostatečné. Vzhledem ke způsobu přenosu dat se může stát, že dojde k porušení snímku či k úplnému výpadku příjmu snímků z dronu. V případě úplného výpadku příjmu obrazu z dronu na déle než 5 sekund dojde k ukončení programu.

Vizuální data jsou před jejich zpracováním zmenšena na čtvrtinové rozměry (tj, poloviční výška a šířka) pomocí metody `resize` z knihovny OpenCV, za pomoci bilineární interpolace a následně převedeny na odstíny šedi pomocí metody `cvtColor`, opět z knihovny OpenCV. Dále je vytvořena maska, která má za úkol ohraničit oblast, ve které se musí nacházet objekty, aby byly hrozbou pro dráhu letu. Vzhledem k úhlu záběru přední kamery a k jejímu zornému poli, byla za pomoci experimentů zjištěna tato zájmová oblast v obrazu, a to sice mezi $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ šířky obrazu a od vrchní hrany až po necelou polovinu ($\frac{5}{12}$) obrazu.

Za účelem detekce překážek ve zvolené části obrazu dojde k detekci klíčových bodů v oříznuté oblasti za pomoci detektoru a deskriptoru AKAZE (Akcelerované KAZE) (15), dostupnému v knihovně OpenCV pomocí `AKAZE_create` s jedinou úpravou oproti výchozím parametrům, a to sice změna difuzivity na `DIFF_CHARBONNIER`, která se v testování ukázala jako neúspěšnější. (16)

Takto detekované klíčové body jsou následně hledány na jednom z předchozích snímků (počet, o kolik snímků zpět se má hledat lze nastavit v rámci programu) pomocí BruteForce matcheru `BFMatcher_create`, z knihovny OpenCV, který, jak z názvu vyplývá, hledá shody mezi deskriptory hrubou silou (tj. zkusí každý s každým). Je využita metoda `knnMatch`, která najde „k“ nejlepších shod deskriptorů z druhého obrázku s každým deskriptorem z prvního obrázku. Pro účely naší detekce bylo zvoleno $k = 2$, které je vhodné pro následnou filtraci pomocí poměru popsanou D. Lowem (17), která tvrdí, že dobrá shoda je taková, jejíž vzdálenost (vzdálenost shod určuje, jak moc jsou deskriptory shodné, vzdálenost 0 značí stejný deskriptor) je menší než 0,75krát vzdálenost druhé nejlepší shody pro daný deskriptor.

Pokud je těchto shodných klíčových bodů více než 1, vytvoříme v obou snímcích (současném a zvoleném předchozím) úsečky vždy mezi dvěma klíčovými body, vypočítáme délku takové úsečky na obou snímcích a porovnáme, jak moc se změnila. V případě, že se objekt, na němž se dané 2 klíčové body nacházejí přibližuje, bude vzdálenost těchto klíčových bodů na současném snímku větší, než na snímku předchozím (objekty blíže kamery zabírají větší prostor v záběru kamery a tím i více pixelů), zároveň s tím, tento poměr zvětšení je vyšší pro bližší předměty a nižší pro vzdálenější předměty (bližší předměty, které již zabírají např. stovky pixelů se při přiblížení ke kameře mohou zvětšit o desítky až stovky pixelů, na rozdíl od toho předměty, které jsou v pozadí a zabírají např. jen 10 pixelů se při přiblížení o stejnou vzdálenost zvětší například jen o 2 pixely). Na základě experimentů byla stanovena hraniční hodnota zvětšení, která odpovídá poměru zvětšení pro předmět ve vzdálenosti cca 30 cm před dronem, která byla použita jako spouštěč úhybných manévrů dronu.

4.2.5 Algoritmus navigace

Navigace systému probíhá pomocí A* algoritmu vytvořeného pro 3D prostor a upraveného tak, aby zvýhodňoval trasy, které nevyžadují mnoho změn směru.

Na základě známých dat o velikosti místnosti a známém rozestavení jednotlivých překážek v prostoru je vytvořena mapa, která reprezentuje navigovaný prostor. Mapa je realizována jako mřížka s rozlišením 10 cm, s ochranným pásmem okolo překážek 5 cm, což znamená že pro zakreslení překážky do mřížky jsou použity rozměry překážky navýšené o 5 cm, a to celé zaokrouhlené nahoru na nejbližší násobek 10 (pokud tedy překážka zabírá například 74 cm od země či zdi, pak je v mřížce zakreslena jako vysoká 80 cm, pokud ale zabírá 76 cm, je zakreslena jako vysoká 90 cm). Toto ochranné pásmo má za úkol chránit dron pro případ, že nepoletí přesně uprostřed buňky v navigační mřížce, ale kdekoli v rámci buňky (jelikož máme rozlišení mřížky 10 cm, od prostředku buňky k jejímu okraji je půlka její velikosti neboli 5 cm).

4.2.6 Mapování a lokalizace

V původním návrhu řešení této práce bylo i využití metody SLAM pro namapování navigovaného prostoru a následné určení pozice v něm. Bohužel monokulární vizuální SLAM, bez použití kamery, která umí zaznamenávat hloubku je velmi výpočetně náročné a zvolený testovací hardware pro tyto účely není nejlepší. Neideální osvětlení testovacího prostoru, kvalita obrazu z dronu, přesnost jeho pozičního systému a jeho relativně krátká výdrž baterie zapříčinily odchod od této části řešení, kdy obrazová data, která měla sloužit k tvorbě mapy na základě detekované hloubky, nedosahovala dostatečné kvality, a tak se objevovaly chyby, jako například rovná stěna, jejíž prostředek byl najednou o metry jinde. Zmíněná krátká výdrž baterie zapříčinila to, že když se v průběhu mapování dron vybil, tak po výměně baterie, při které vzhledem k potřebě jej zvednout došlo ke změně jeho pozice, i kdyby jen o milimetry, došlo v kombinaci s nedokončenou mapou k tomu, že dron nebyl schopen určit to, že je na kraji namapovaného prostoru a že by měl mapovat dál, ale místo toho začal vytvářet mapu od znova. Vzhledem k velikosti testovacího prostoru došlo k vybití vždy, a tak se dronu nikdy nepovedlo dokončit jeho mapu, což v kombinaci s nedokonalostmi měření způsobilo změnu návrhu řešení této práce.

4.3 Realizace navrženého algoritmu, naprogramování a vložení do počítače

Při realizaci byl sestaven hardware a naprogramován software dle kapitoly 4.2. Program je přílohou této práce.

4.4 Ověření výsledků na reálném systému – výsledky testů

Pro testy byla zvolena místnost 3,45 metru x 6 metrů, s nábytkem okolo stěn, ve které byly přidány horizontální a vertikální překážky.

Do testovací místnosti byly na podlahu umístěny 2 křížky, označující výchozí pozici a cíl. Dron byl umístěn na výchozí pozici, a měl za úkol vzlétnout, dostat se nad vyznačený cíl a přistát.

V prvním testu nebyly dronu do cesty přidány žádné překážky, které by nebyly součástí připravené mapy, kterou měl systém k dispozici. Videozáznam tohoto testu je v příloze číslo 2. Ze záznamu je patrné podle stínu, že dron se opravdu zastavil nad cílovým místem, ale jeho vnitřní algoritmus pro přistání (jakmile je iniciováno přistání, tak nad dronem ztrácíte kontrolu do doby, než přistane) způsobil následnou nepřesnost 21 cm od cílového místa.

Ve druhém testu byl do cesty dronu přidán stolek, reprezentující překážku, která nebyla součástí připravené mapy, kterou měl systém k dispozici. Videozáznam tohoto testu je v příloze číslo 3. Ze záznamu je patrné, že se dron k překážce přiblíží cca na 30 cm (aby nedošlo k zbytečnému rušení v průběhu testu, nebyla tato vzdálenost změřena během letu, ale byla odhadnuta na základě pozorování průběhu testu), zastaví se, pokusí se uhnout o 30 cm doprava a pokračovat v letu původním směrem – pokud by došlo k opětovné detekci překážky, systém by se ji pokusil obletět zleva o 30 cm (tj. 60 cm doleva z jeho pozice), pokud by ani tak neuspěl, pokusil by se překážku nadletět opět o 30 cm nad (tj. o 30 cm doprava a 30 cm nahoru z jeho pozice), pokud by opět neuspěl, pokoušel by se o stejný postup, jen s přičtením násobků 10 k 30 cm. Systém se nikdy nepokusí podléhat překážky, a zároveň pokud by ho mělo vyhýbání se překážkám dostat do kolize překážkou, která je

zaznamenaná v mapě, nedojde k pokusu o oblet touto stranou. Vzhledem k tomu, že systém uspěl při úhybu vpravo, letí dál v původním směru tak, aby uletěl alespoň 50 cm (cca 30 cm bylo k překážce a 20 cm je průlet za ní), poté vypočítá novou trasu k cíli ze své pozice. Ze záznamu lze vidět, že se dron úspěšně dostal na cílovou pozici, avšak při přistání došlo opět k nepřesnosti (zde je vidět, jak se dron po zahájení přistávacího příkazu ještě „posune“ dopředu – jedná se o bezpečnostní prvek Tella, kdy vyhodnotí, zda je povrch pod ním vhodný na přistání, jde mimo jiné o systém, který mu brání přistát například do vody).

5 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout systém pro navigaci autonomních létajících systémů v interiéru, otestovat jej a zhodnotit jeho funkčnost a použitelnost. V teoretické části práce byly představeny různé způsoby pozicování systémů a byla zhodnocena jejich použitelnost v interiéru, dále byly představeny vybrané navigační algoritmy a popsána dynamika dronů.

V praktické části byl zvolen testovací hardware, popsány zvolené metody pozicování, navigace a způsob detekce a vyhýbání se překážkám. Dále byl vytvořený systém otestován v místnosti bez i s překážkami a byla vyhodnocena jeho úspěšnost.

Vzhledem k faktu, že se momentálně problematikou intenzivně zabývají rozsáhlé týmy teoretických vědců i praktiků na celém světě, štědře financované s dostupností nejnovějšího a nejpřesnějšího vybavení, a komplexní řešení zatím nalezeno nebylo, dá se předpokládat, že skutečné řešení se podaří nalézt až s příštím objevem či aplikací vědy.

Nicméně tato práce prokázala, že i se základním jednoduchým vybavením lze docílit dílčích úspěchů pro konkrétní úkoly.

Na základě těchto závěrů lze říci, že všechny cíle práce byly splněny.

Seznam literatury

1. Na Domažlicko se vrátil čáp sledovaný satelitem, z Afriky uletěl 5600 kilometrů. [Online] 2021. <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/na-domazlicko-se-vratil-cap-sledovany-satelitem-z-afriky-uletel-5600-kilometru>.
2. NASA. 60 Years Ago: Explorer 1 Becomes America's First Satellite. [Online] 2018. <https://www.nasa.gov/feature/60-years-ago-explorer-1-becomes-america-s-first-satellite>.
3. An Overview of the Navy Navigation Satellite System. [Online] <http://sd-www.jhuapl.edu/Transit/>.
4. NASA. NASA History. [Online] <https://www.nasa.gov/topics/history/index.html>.
5. Japan Prepares for GPS Failure with Quasi-Zenith Satellites. [Online] 2019. <https://spacewatch.global/2019/01/japan-prepares-for-gps-failure-with-quasi-zenith-satellites/>.
6. Global Indian Navigation system on cards . [Online] 2011. <https://www.thehindubusinessline.com/todays-paper/tp-economy/Global-Indian-Navigation-system-on-cards/article20040673.ece>.
7. U.S. Army Roadmap for UAS 2010-2035. [Online] 2010. <https://web.archive.org/web/20180922052536/http://www.rucker.army.mil/usaace/uas/US%20Army%20UAS%20RoadMap%202010%202035.pdf>.
8. Proc, Jerry. HYPERBOLIC RADIONAVIGATION SYSTEMS. [Online] 2022. <http://www.jproc.ca/hyperbolic/>.
9. Indoor Positioning System Using Bluetooth And Beacon Devices. [Online] <https://belitsoft.com/iot-development-services/indoor-positioning-system-using-bluetooth-and-beacon-devices>.
10. Galtarossa, Lorenzo. Visual-Inertial Indoor Navigation Systems and Algorithms for UAV Inspection Vehicles. [Online] 2019. <https://www.intechopen.com/chapters/70361>.
11. robotics, Marvelminds. How to build autonomous indoor drones . [Online] <https://marvelmind.com/solution/drones/>.

12. Tello SDK Documentation. [Online] 2018. https://dl-cdn.ryzorobotics.com/downloads/tello/20180910/Tello%20SDK%20Documentation%20EN_1.3.pdf.
13. DJI Tello drone controller python package . [Online] [Citace:] <https://github.com/hanyazou/TelloPy>.
14. How Much Weight Can a Drone Carry? (lb & kg). [Online] <https://www.droneblog.com/drone-payload/>.
15. Alcantarilla, Pablo Fernández. Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces. [Online] 2013. https://www.researchgate.net/publication/257142102_Fast_Explicit_Diffusion_for_Accelerated_Features_in_Nonlinear_Scale_Spaces.
16. Charbonnier, P. Two deterministic half-quadratic regularization algorithms for computed imaging. [Online] 1994. <https://ieeexplore.ieee.org/document/413553>.
17. Lowe, David. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. [Online] 2004. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 - Zleva: astroláb, sextant a kompas | 3 |
| Obrázek 2 - Bezpilotní letoun, také nazývaný dron | 5 |
| Obrázek 3 - Systémy GNSS | 8 |
| Obrázek 4 - Bluetooth Low Energy Beacon | 10 |
| Obrázek 5 - Příklad ArUco markeru..... | 12 |
| Obrázek 6 - Příklad rotačního LIDARu | 13 |
| Obrázek 7 - Robot Shakey | 14 |
| Obrázek 8 - Dron Ryze Tello včetně chráničů vrtulí | 20 |
| Obrázek 9 - Spodní část dronu, na které lze vidět spodní kameru, a výškový ToF senzor..... | 21 |
| Obrázek 10 - Raspberry Pi 4 model B..... | 22 |

Seznam příloh

Příloha 1 – Soubory programu

Příloha 2 – Video z prvního testu

Příloha 3 – Video z druhého testu