



ALTERNATÍVNE METÓDY NAVIGÁCIE BEZPILOTNÝCH LIETAJÚCICH ZARIADENÍ

ALTERNATIVE NAVIGATION METHODS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Chiara Močková
Katedra leteckej dopravy
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
mockovach@gmail.com

Robert Dianovský
Katedra leteckej dopravy
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
dianovsky1@stud.uniza.sk

Abstract

This article deals with the analysis and comparison of alternative navigation methods for unmanned aerial vehicles (UAVs). The aim of the article is to evaluate the effectiveness of selected navigation systems in conditions where traditional GPS-based methods may fail. The introduction presents traditional navigation methods and their limitations. The article focuses on alternative solutions such as visual navigation, celestial navigation, radio signal-based positioning, and inertial visual odometry (VIO). In the final part, the practical implementation of a visual navigation system using drone imagery and satellite images is described, along with the evaluation of its reliability at different flight altitudes. The results confirm the high potential of visual navigation as an independent or complementary system for UAV operations.

Keywords

unmanned aerial systems, alternative navigation methods, visual localization, celestial positioning, inertial measurement unit, radio-based navigation, visual-inertial odometry

1. Úvod

Cieľom tohto článku je preskúmať a porovnať rôzne alternatívne metódy navigácie, ktoré by mohli byť využité pri navigácii bezpilotných lietajúcich zariadení (UAV). Tieto metódy sa zameriavajú predovšetkým na náhradu alebo doplnenie tradičných navigačných systémov, ako je GPS, ktorých dostupnosť môže byť v určitých prostrediach obmedzená alebo rušená. Medzi takéto prostredia patria najmä mestské oblasti, interiery alebo miesta s aktívnym rušením signálov.

V oblasti bezpilotného letectva je spoľahlivá navigácia kľúčovým predpokladom pre bezpečnú a efektívnu prevádzku. Preto sa neustále hľadajú riešenia, ktoré by zabezpečili presnú lokalizáciu aj v náročných podmienkach. Alternatívne prístupy, ako vizuálna navigácia, celestiálna navigácia, navigácia pomocou rádiových signálov alebo vizuálno-inerciálna odometria, predstavujú sľubné možnosti.

Článok podrobnejšie opisuje jednotlivé alternatívne navigačné metódy a ich praktické využitie. Súčasťou práce je aj návrh systému vizuálnej navigácie využívajúceho snímky z dronu a ich porovnanie so satelitnými zábermi, s cieľom určiť presnú polohu UAV. Výsledky experimentov sú analyzované s dôrazom na spoľahlivosť navigácie pri rôznych výškach letu a v rôznych prostrediach.

2. Súčasný stav riešenej problematiky

Navigácia bezpilotných lietajúcich zariadení je v súčasnosti založená prevažne na dvoch hlavných technológiách: globálnom navigačnom satelitnom systéme (GNSS), predovšetkým GPS, a

inerciálnom navigačnom systéme (INS). (Krešák & Bérešová, 2014)

GPS (Global Positioning System) umožňuje presné určovanie polohy UAV kdekoľvek na svete, kde je dostupný satelitný signál. Tento systém je široko využívaný pre svoju vysokú presnosť, dostupnosť a bezplatné využívanie. Princíp fungovania GPS je založený na meraní času prenosu signálu medzi družicou a prijímačom, z ktorého sa vypočíta vzdialenosť a následne poloha v trojrozmernom priestore. Systém pozostáva z kozmického segmentu (satelity), riadiaceho segmentu (pozemné stanice) a užívateľského segmentu (prijímače). Napriek svojim výhodám je GPS citlivý na rušenie signálu, čo môže viesť k strate polohy v prostrediach ako sú mestské oblasti, interiery alebo pri aktívnom elektronickom rušení. (Krešák & Bérešová, 2014)

Inerciálny navigačný systém (INS) predstavuje ďalší kľúčový nástroj na určovanie polohy UAV. INS je založený na spracovaní údajov z akcelerometrov a gyroskopov, ktoré merajú zrýchlenie a rotáciu zariadenia. Integráciou týchto údajov je možné odhadnúť aktuálnu polohu a orientáciu dronu bez závislosti na externom signáli. Výhodou INS je jeho odolnosť voči rušeniu a schopnosť autonómne fungovať, avšak v dôsledku integračných chýb sa presnosť časom znižuje. Pre zvýšenie presnosti INS sa bežne využívajú filtre, ako napríklad Kalmanov filter alebo komplementárny filter, ktoré pomáhajú minimalizovať akumuláciu chýb. (Pivarčiová, et al., 2015)

Obe technológie, GPS aj INS, sa v praxi často kombinujú, aby sa dosiahla vyššia presnosť a spoľahlivosť navigácie. Napriek tomu existujú situácie, kde ich využitie nie je dostatočné, čo vedie k potrebe vývoja alternatívnych navigačných metód.

3. Alternatívne metódy navigácie

Vzhľadom na obmedzenia tradičných navigačných systémov ako GPS a INS je dôležité hľadať efektívne a spoľahlivé alternatívne riešenia. Moderné bezpilotné lietajúce zariadenia často operujú v prostrediach, kde je satelitný signál nedostupný alebo rušený. Alternatívne navigačné metódy preto ponúkajú možnosť zabezpečiť presné určovanie polohy a orientácie aj v takýchto náročných podmienkach. V tejto časti sú podrobne rozpracované hlavné prístupy a technológie, ktoré predstavujú perspektívu v oblasti navigácie UAV.

3.1. Vizuálna navigácia

Vizuálna navigácia patrí medzi najčastejšie využívané alternatívne metódy navigácie dronov. Vďaka dostupnosti kamier a rozvoju spracovania obrazu umožňuje UAV orientáciu v priestore pomocou porovnávania snímok z palubnej kamery s vopred pripravenými mapami alebo prostredníctvom vytvárania vlastných máp počas letu. (Soklasa, 2010)

Metódy vizuálnej navigácie môžeme rozdeliť do niekoľkých skupín:

- **Systémy s existujúcou mapou**, kde dron porovnáva aktuálny vizuálny obraz s databázou snímok. (Soklasa, 2010)
- **Systémy vytvárajúce si mapu (SLAM)**, ktoré dokážu mapovať neznáme prostredie a zároveň určovať vlastnú polohu. (Straka, 2025) (Štec, 2024)
- **Topologické systémy**, ktoré pracujú na báze uzlov a hrán v prostredí. (GEOMAD, dátum neznámy)
- **Neuromorfné kamery**, inšpirované ľudským zrakom, ktoré zaznamenávajú len zmeny v jase a výrazne znižujú dátovú náročnosť. (FlySight, 2024)
- **Vizuálna odometria**, ktorá sleduje zmeny polohy dronu na základe po sebe nasledujúcich snímok. (Sanz, 2023)

Každá z týchto metód má svoje špecifické výhody a je vhodná na odlišné typy misí v rôznych prostrediach.

3.2. Kombinované metódy – Vizuálno-inerciálna odometria (VIO)

Kombinácia vizuálnych údajov a dát z inerciálnej meracej jednotky (IMU) predstavuje efektívny spôsob, ako zvýšiť presnosť navigácie. Vizuálno-inerciálna odometria (VIO) umožňuje určenie polohy a orientácie dronu aj v prostredí bez GPS signálu. V praxi sa využívajú rôzne varianty tejto technológie, ako napríklad RD-VIO, SRVIO alebo PL-VIO, ktoré prinášajú lepšiu robustnosť a presnosť v náročných podmienkach. (ThinkAutonomous, 2024)

3.3. Navigácia na základe rádiových signálov

Táto metóda využíva rôzne druhy rádiových vln na určovanie polohy. predstavuje a umožňuje presné určovanie polohy aj v prostrediach, kde GPS nie je dostatočne silný alebo je úplne nedostupný, napríklad v interiéroch alebo mestských kaňonoch. Zameriava sa na tri hlavné metódy navigácie:

- **Wi-Fi navigácia:** Wi-Fi navigácia funguje vďaka existujúcim Wi-Fi sieťam. K tejto navigačnej metóde priradujeme aj Wi-Fi- RTT (Round Trip Time), ktorá funguje na princípe, že meria čas, ktorý je potrebný na komunikáciu v oboch smeroch medzi prístupovým bodom aj dronom. Vďaka tejto metóde vieme získať presnosť až jeden meter v interiéri, pričom často je kombinovaná spolu práve s výškormi na získanie lepšej presnosti. Výhodou je veľká dostupnosť Wi-Fi sietí, no medzi nevýhodou patrí závislosť od stability signálu a rušenia. (Yuichiro & Kentaro, 2024)
- **Bluetooth navigácia:** v Bluetooth navigácia, najmä pomocou Bluetooth Low Energy (BLE), je vhodná na krátke vzdialenosti (do 10 metrov). BLE majáky môžu byť rozmiestnené v priestore, pričom dron určuje svoju polohu vďaka intenzite prijatého signálu (RSSI) alebo časových meraní. Táto technológia je energeticky efektívna, čo predlžuje dobu letu UAV, ale jej nevýhodou je obmedzený dosah a možnosť náchylnosti na rušenie inými zariadeniami. (Thi, 2023)
- **UWB lokalizácia:** ultra-širokopásmová technológia s centimetrovou presnosťou, vhodná pre interiéry a husté mestské oblasti.
- **Navigácia cez BTS a fingerprinting:** využíva mobilné základňové stanice a porovnáva aktuálne údaje s databázou známych signálových vzorov. (Bhattacharjee, 2024)

Tieto metódy sa často kombinujú pre zvýšenie presnosti a spoľahlivosti v rôznych prostrediach.

3.4. Celestiálna navigácia

Hoci ide o historicky najstaršiu formu navigácie, celestiálna navigácia si nachádza uplatnenie aj v súčasných moderných UAV systémoch. Princíp spočíva v sledovaní hviezd a ich pozícií na nočnej oblohe. Medzi jej kľúčové vlastnosti patrí práve jednoduchosť a nízka hmotnosť, nakoľko tento systém je na rozdiel od tradičných technológií jednoduchší, ľahší nevyžaduje ani komplikovaný hardware. Vďaka zloženiu z dostupných materiálov a komponentov sa tento systém stáva aj cenovo dostupný. Obrovskou výhodou je nezávislosť a nepoužívanie rádiových signálov, takže sa stáva nezávislým a odolným voči rušeniu. (Davis, dátum neznámy)

4. Porovnanie vybraných alternatívnych metód navigácie

Pri veľkom množstve alternatívnych metód navigácie je často problém vedieť sa rozhodnúť pre využitie tej správnej metódy pre konkrétne použitie. Dôležité v porovnaní bolo napríklad vzdialenosť na ktorú dokáže navigačný systém vhodne pracovať, presnosť s ktorou dokáže určiť svoju polohu ale aj jeho limity či použitie. Porovnávané boli metódy, ktoré sú spomenuté už v texte vyššie, ku ktorým patrí napríklad celestiálna navigácia, UWB lokalizácia, Wi-Fi navigácia a Bluetooth navigácia, vizuálna navigácia, odometria a ostatné už z vyššie spomenutých. Poukázané je aj na vhodnosť použitia týchto systémov ako doplnkových navigačných systémov ku GPS alebo INS navigácii.

4.1. Porovnávané parametre

Pre porovnanie rôznych metód alternatívnej navigácie je potrebné si vopred určiť rovnaké parametre, podľa ktorých sa budú porovnávať všetky navigačné systémy aby, aby sa predišlo k skresľovaniu výsledkov. Tieto parametre musia byť objektívne pre každú metódu a musia brať ohľad aj na ich praktickú využiteľnosť pri rôznych podmienkach a v rôznych scenároch. Okrem využitia musia byť spomenuté aj limity, pri ktorých sa navigačný systém stáva menej vhodným na použitie.

4.1.1. Spôľahlivá vzdialenosť

Spôľahlivá vzdialenosť je dôležitou časťou porovnania. Ide o vzdialenosť, na ktorú je vybraná navigačná metóda schopná pracovať presne bez odchýlok. Toto je veľmi dôležité pri plánovaní letov, vďaka čomu môže byť vybraná správna navigačná metóda s vyhovujúcim dosahom pre danú potrebnú operáciu. Jedná sa konkrétne o vzdialenosť, pri ktorej je dostatočujúca intenzita signálu pre správne a presné fungovanie celého systému.

4.1.2. Využitie

Časť využitia je porovnávaná z dôvodu rozličných možností využitia, rôznych navigačných systémov. Je to dôležité pre správny výber použitej navigačnej metódy nakoľko rôzne metódy sú určené pre rôzne aplikácie a použitie či už v exteriéry alebo interiéry.

4.1.3. Možnosti

Časť s názvom možnosti je dôležitá pre informácie, ktoré nám určujú, ako dokáže systém pracovať a čo ponúka odlišné od ostatných navigačných systémov. Rôzne možnosti využitia nám určujú rôzne navigačné metódy.

4.1.4. Limitácie

Časť s názvom limitácie navigačných systémov je veľmi dôležitou časťou celého porovnania. Táto časť sa zaoberá rôznymi vecami, ktoré dokážu obmedziť výkon konkrétneho navigačného systému. Sú to rôzne obmedzenia, ktoré znižujú použiteľnosť a presnosť vybranej navigačnej metódy.

4.1.5. Presnosť

Kritérium presnosti určuje schopnosť systému lokalizovať objekt s minimálnou odchýlkou. Centimetrová presnosť, ktorá je ľahko dosiahnuteľná s napríklad UWB lokalizáciou je ideálna pre aplikácie, ktoré si vyžadujú vysokú precíznosť, zatiaľ čo systémy s metrovou presnosťou ako je napríklad Bluetooth navigácia sú zasa vhodnejšie pre operácie, ktoré sú menej náročné na presnosť.

4.2. Výsledky porovnania

Na základe predchádzajúcich kritérií bolo vykonané porovnanie alternatívnych metód navigácie bezpilotných lietajúcich zariadení. Porovnávaná bola presnosť, dosah, limitácie a možnosti využitia. Z tohoto porovnania vyplynuli výsledky, ktoré sú popísané nižšie. Na základe výsledkov bola za najvhodnejšiu

alternatívnu metódu navigácie identifikovaná práve vizuálna navigácia.

4.2.1. Celestiálna navigácia

Na prvý pohľad najlepšia možnosť alternatívnej navigačnej metódy aj vďaka svojmu obrovskému dosahu a nezávislosti na GPS signály. Obrovskou nevýhodou, je možnosť využitia len v noci počas jasnej oblohy, však túto metódu úplne vylučuje z možnosti využitia ako alternatívnej navigačnej metódy počas dňa. Možnosť využitia zostáva ako doplnkový navigačný systém v noci.

4.2.2. UWB navigácia

UWB lokalizácia vyniká výbornou presnosťou na krátke vzdialenosti, avšak pri použití na väčšie vzdialenosti je jej dosah obmedzený na približne 100 metrov, čo robí túto navigáciu nevhodnú pre použitie v exteriéroch. Rovnako potrebuje táto technológia aj špecifickú infraštruktúru, čo ju robí menej univerzálnou pri použití v rôznych prostrediach.

4.2.3. Wi-Fi navigácia

Wi-Fi navigácia je vhodnou možnosťou vďaka cenovej dostupnosti, nakoľko táto navigačná metóda využíva existujúce Wi-Fi siete a nie je potrebné vytváranie novej infraštruktúry. Jej presnosť je však nižšia ako pri ostatných navigačných systémoch a závislosť na pokrytí konkrétnej oblasti Wi-Fi signálom ju robí nevhodnou pre použitie v odľahlých oblastiach.

4.2.4. Bluetooth navigácia

Bluetooth navigácia vyniká hlavne svojou nízkou energetickou náročnosťou a jednoduchosťou celého systému. Jej obrovskou nevýhodou je však krátky dosah a nízka presnosť. Tento typ navigácie je tak vhodný iba pri malých zariadeniach v konkrétnych priestoroch.

4.2.5. VIO (Vizuálno- inerciálna odometria)

Vizuálno- inerciálna odometria je navigačná metóda, ktorá dokáže presne určiť polohu aj bez GPS práve vďaka fungovaniu inerciálnych senzorov a kamier pre vizuálny obraz. Má vysokú presnosť avšak tá je limitovaná od kvality snímok a prostredia, čo vie byť nepresné v zhoršených svetelných podmienkach alebo pri homogénnom prostredí.

4.2.6. Odometria

Odometria je vhodná len ako doplnkový navigačný systém pre kratšie vzdialenosti, nakoľko pri dlhších trasách sa zväčšuje chyba a navigácia sa tak stáva nepresnou.

4.2.7. Neuromorfné kamery

Navigácia fungujúca na základe neuromorfných kamier, vďaka ktorým vieme využiť presnejšie spracovanie obrazu. Tento navigačný systém je však pomerne nový a málo preskúmaný preto aktuálne nemáme dostatočné množstvo informácií. Keďže ide o novinku, ďalšou nevýhodou týchto kamier je vyššia cena.

4.2.8. Vizuálna navigácia

Vizuálna navigácia sa ukázala ako najperspektívnejšia alternatívna metóda navigácie pre bezpilotné lietajúce zariadenia. Vďaka schopnosti detegovať prekážky či mapovať prostredie. Dosahovať dokáže centimetrovú až metrovú presnosť čo predstavuje univerzálne riešenie pre autonómne drony. Jej nezávislosť od externých signálov jej umožňuje nezávislé fungovanie aj v odľahlých oblastiach alebo prostrediach bez vystavanej infraštruktúry. Hoci kvalita obrazu a osvetlenie môžu ovplyvniť jej funkčnosť, tieto nedostatky sa dajú optimalizovať správnym návrhom systému. Z výsledkov môjho porovnania, v ktorom bola určená práve vizuálna navigácia za najperspektívnejšiu metódu navigácie, bolo rozhodnuté praktickú časť zamerať práve na túto metódu. Praktická časť pozostáva z nasnímania vybraných lokalít z rôznych výšok dronom a následné porovnanie týchto snímok s vopred stiahnutou satelitnou snímkou. Systém sa bude pokúšať detegovať podobné body a vyráta súradnice polohy dronu. Cieľom tohoto experimentu je potvrdiť, že je vizuálna navigácia vhodnou alternatívnou metódou navigácie pre bezpilotné lietajúce zariadenia. Zameranie bude na spoľahlivosť tohoto systému v rôznych výškach a v rôznych prostrediach.

5. **Praktická implementácia vybranej metódy alternatívnej navigácie**

Na základe výsledkov predošlého porovnania bola za najperspektívnejšiu metódu navigácie určená vizuálna navigácia. V nasledujúcej časti bol vytvorený experiment pre potvrdenie predošlého výsledku. Dôležitou časťou bolo vytvorenie si postupu práce a návrh algoritmu pre konkrétne praktické riešenie.

5.1. **Postup práce**

V praktickej časti tejto práce bolo zamerané už na spomínanú vizuálnu navigáciu. Bolo veľmi dôležité vytvoriť presný postup práce, ktorý zahŕňal množstvo potrebných krokov. Každý krok musel byť premyslený a neskôr aj poctivo realizovaný. Na začiatok bolo potrebné vytvorenie návrhu a neskôr jeho premena do reálnych podmienok. Nakoniec bol vytvorený systém, ktorý porovnáva real-time fotografie z dronu s vopred stiahnutými satelitnými snímkami.

5.1.1. Výber lokality na zhotovenie dronových snímok

Ako prvý krok bolo vybratie správnej lokality pre snímanie dronových záberov. Pri tomto kroku bolo kladené dôležité kritérium na overenie funkčnosti systému a to rôznorodosť snímaného prostredia. Nakoniec bolo rozhodnuté pre nasledovné:

- **Homogénne prostredie poľa**- Toto prostredie bolo vybraté práve z hľadiska nízkeho počtu možných zachytných bodov na snímkach, čo vedie k predpokladu nižšej presnosti funkčnosti navigačného systému. Toto prostredie umožnilo testovať limity vizuálnej navigácie z hľadiska počtu zachytných bodov.
- **Mestské prostredie**- Práve prostredie mesta, v ktorom sa nachádza väčšie množstvo zachytných bodov je vhodná testovacia plocha aj na testovanie z rôznych výšok. Vďaka tomuto prostrediu vieme otestovať funkčnosť v rámci veľkosti

podobných bodov. V mestskom prostredí sa nachádza dostatočné množstvo zachytných bodov, ako sú napríklad stromy alebo cesty či chodníky. Výber týchto dvoch lokalít bol dôležitý pre testovanie systému v rôznych podmienkach na získanie veľkého množstva výsledkov.

5.1.2. Výber zdroja satelitných snímok

Po výbere lokalít pre snímky z dronu, nasledovala nutnosť výberu zdroja satelitnej snímky. Zvážené boli viaceré možnosti avšak ako najvhodnejšiu možnosť boli vybrané satelitné údaje od spoločnosti Airbus, presnejšie snímky z roku 2025, ktoré vznikli v spolupráci s CNES, ktoré boli dostupné na stránke Google Earth. Práve Airbus poskytuje snímky v dobrom rozlíšení vhodné na presné porovnanie so snímkami z dronu. Platforma Google Earth zasa zabezpečuje jednoduchú manipuláciu a dobrý prístup k potrebným údajom.

5.1.3. Určovanie výšky zhotovovania dronových snímok

Ďalším krokom v postupe je určenie si vhodnej výšky na snímanie fotografií z dronu. Rozhodnuté bolo pre nasledujúce tri výšky:

- 30 metrov- Malá výška poskytuje viac zachytených detailov, avšak jej počet vizuálnych referenčných bodov je nižší.
- 60 metrov- Stredná výška prináša kompromis medzi detailmi a počtom vizuálnych referenčných bodov.
- 120 metrov- Vyššia výška dáva možnosť zachytiť väčšiu plochu, avšak kvalita snímky sa znižuje, čo môže viesť k zníženému počtu detailov. Testovanie na rôznych výškach bolo dôležité na overenie vplyvu výšky na kvalitu výsledkov a spoľahlivosť systému.

5.1.4. Výber programovacieho prostredia

Pri výbere programovacieho systému bola vzatá do úvahy hlavne jeho jednoduchosť a množstvo materiálov na ovládanie, nakoľko v programovaní som nemala žiadne predošlé skúsenosti. Vybratá bola aplikácia PyCharm, ktorá pracuje v programovacom jazyku Python. Tento systém ponúkol dostatočné možnosti na vytvorenie praktickej časti a otestovaní funkčnosti celého systému.

5.1.5. Návrh algoritmu na porovnanie snímok

Samotný návrh algoritmu zahŕňal niekoľko krokov:

- **Prekonvertovanie snímok do grayscale formátu**- Tento krok je dôležitý kvôli zjednodušeniu procesu porovnania tým, že sa odstránia farebné informácie a zachovávajú sa len základné vizuálne prvky snímok.
- **Vyhľadávanie podobných bodov medzi snímkami**- Algoritmus analyzuje dronové fotografie a satelitné snímky s cieľom identifikovať spoločné body (napr. budovy alebo cesty).
- **Vyznačenie oblasti na satelitnej snímke, kde bola pravdepodobne zhotovená dronová fotografia**. Počas testovania bol zistený problém s rozdielnou veľkosťou snímok a orientáciou objektov na satelitných snímkach čo spôsobovalo

chyby pri výsledkoch mojej práce. Problém s veľkosťou snímok bol vyriešený pridaním časti do kódu, ktorá si na základe výšky snímky satelitu a výšky snímky dronu upraví cez jednoduchý prepočet na pomer jednotlivé veľkosti. Hoci tento proces bol časovo náročnejší, umožnil dosiahnuť funkčný systém. Ďalším problémom bola orientácia snímok a tento problém bol vyriešený manuálnou úpravou otočenia satelitnej snímky. Do budúcnosti je plánované efektívne vylepšenie procesu pomocou kódu.

5.1.6. Vylepšenie systému o spoľahlivosť výsledkov

Aby mohlo byť overené ako si je systém percentuálne istý svojím výsledkom, vytvorený bol kód pre výpočet percentuálnej istoty vyznačenej oblasti. Tento výpočet umožňuje posúdiť či je skúmaná navigačná metóda dostatočne spoľahlivá.

5.1.7. Určenie súradníc polohy dronu

Poslednou časťou bolo naprogramovanie systému na výpočet presných súradníc polohy dronu v rámci vyznačenej oblasti. Na základe známych súradníc z ľavého horného rohu satelitnej snímky a pravého dolného rohu satelitnej snímky systém vypočítal polohu dronu podľa jeho pozície vo vyznačenej oblasti.

5.2. Výsledky experimentálnej časti

Po vykonaní experimentu nasleduje časť, v ktorej budú odprezentované konkrétne výsledky, ktoré boli získané počas praktickej časti. Táto časť práce postupuje presne podľa predošlých popísaných krokov. Výsledné dáta som spracovala a vytvorila tak výsledky presnosti a možnosti využitia vizuálnej navigácie ako samostatnej navigačnej metódy. Príklad satelitnej snímky a snímky z dronu je priložený v nasledujúcich snímkach nižšie.



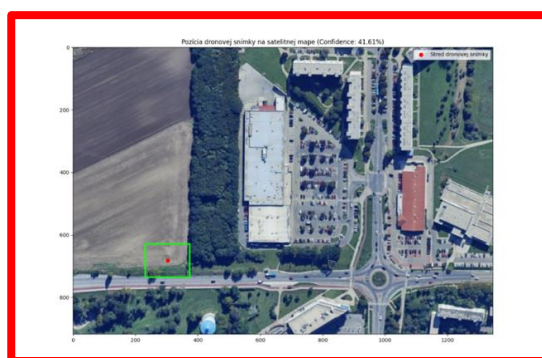
Obrázok 1. Satelitná snímka.



Obrázok 2. Snímka z dronu.

Cieľom experimentu bolo overiť, do akej miery je navrhnutá vizuálna navigácia schopná spoľahlivo s dostatočnou

presnosťou identifikovať polohu dronu v rôznych prostrediach a pri rôznych výškach snímania. V tejto časti práce sú preto rozobraté získané výsledky, hodnotenie úspešnosti systému v homogénnych a aj mestských oblastiach a analýza vplyvu zvolených výšok snímania. Tieto výsledky môžu podať celkový pohľad na výhody aj nevýhody použitia vizuálnej navigácie, čo prináša základ pre záverečné zhodnotenie vybranej navigačnej metódy. Na základe vyhodnotenia 18 relevantných snímok (šesť lokalít v troch rozličných výškach) bol analyzovaný výkon vizuálneho navigačného algoritmu. Vybrané výsledky sú k videniu nižšie. Zelený rám obrázku značí, že poloha bola vyhodnotená správne, červený rám značí, že poloha bola identifikovaná nesprávne. Zelený rám vo fotke ukazuje označenú oblasť fotografie so stredom (červenou bodkou) programom.



Obrázok 3. Nesprávne označená oblasť z výšky 30 metrov.



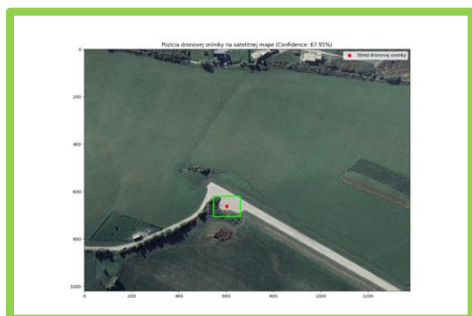
Obrázok 4. Správne označená lokalita z výšky 60 metrov.



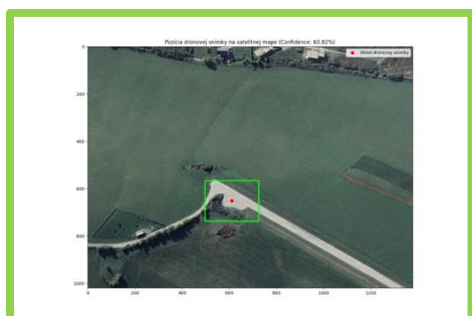
Obrázok 5. Správne označená lokalita z výšky 120 metrov.

V tomto prípade je možné vidieť že systém funguje správne v mestskom prostredí, v ktorom má dostatočný počet záchytných

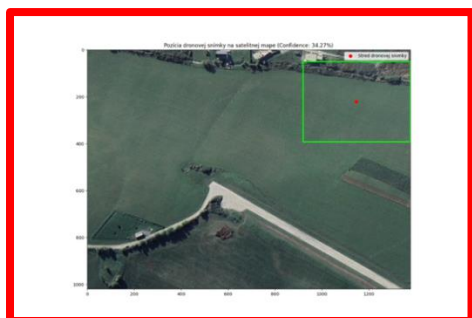
bodov. Systém však funguje len pri výške 120 metrov a 60 metrov, kedy svoju polohu určil správne. Pri výške 30 metrov, kde bola na dronovej snímke zachytená zákruta parkoviska sa pri prevode na čiernobiely odtiene táto zákruta podobala aj na hranu susedného poľa a systém vyhodnotil práve toto pole za správnu lokalitu. Z tohoto vyplýva, že v mestskej oblasti systém pracuje spoľahlivejšie vo vyšších miestach. Kde má dostatok rôznorodých záchytných bodov.



Obrázok 6. Správne označená oblasť z výšky 30 metrov.



Obrázok 7. Správne označená oblasť z výšky 60 metrov.



Obrázok 8. Nesprávne označená oblasť z výšky 120 metrov.

Pri homogénnom prostredí však nastáva opačný problém ako s mestským prostredím. Vyhodnotené boli správne snímky z výšky 30 metrov a 60 metrov, práve vďaka lepšiemu priblíženiu a sústreďeniu na konkrétny bod, ktorý bol v tomto prostredí zároveň aj jediným. Pri vyššej výške a to konkrétne 120 metrov, systém našiel väčšiu zhodu práve vo zvyšku homogénneho prostredia a práve kvôli tejto zhode bola detegovaná chybná oblasť.

5.3. Vplyv výšky dronu na výsledky

Nakoľko bola každá lokalita snímaná z rôznych výšok. Bola spravená analýza aj na vplyv výšky dronu na výsledky. Tie nám však dokazujú, že vplyv výšky v rôznych prostrediach sa často mení.

Pri homogénnom prostredí ako je napríklad pole alebo voda bola väčšia výška práve nevýhodou, pretože zaznamenávala väčšiu oblasť, čo viedlo pri homogénnom prostredí k nájdeniu viacerých spoločných bodov. Výška v tomto prípade poskytovala síce väčší prehľad, ale zároveň znižovala množstvo detailov, čo viedlo k nesprávnemu určeniu zhody v tomto prostredí. Pri takomto prostredí sa za najspoľahlivejšie ukázala práve nižšia výška pre zachytenie aj drobných detailov, v ktorých program spoznal podobnosti.

5.4. Výpočet súradníc

Keď systém našiel zhodu a určil polohu dronu vyznačením na satelitnej snímke, na základe vopred daných súradníc vypočítal geografické súradnice polohy dronu.

V prípadoch, kde bola zhoda správne identifikovaná systém pracoval pomerne presne, a geografické súradnice vyrátal presne v tolerancii 90 metrov. Pre lepšiu predstavu na nasledujúcich snímkach je možné vidieť súradnice GPS z dronu, súradnice získané výpočtom z kódu a reálne porovnanie týchto bodov.

Zemepisná šírka: 49° 10' 11,724" S
Zemepisná dĺžka: 18° 46' 49,362" V

Obrázok 9. GPS údaje z dronu.

Približná poloha dronu (GPS): 49.10146294117647 18.46469985486212

Obrázok 10 Súradnice získané programom



Obrázok 11. Porovnanie výsledku údajov.

Výpočet súradníc je pomerne presný a potvrdzuje nám možnosť využitia vizuálnej navigácie ako samostatnej navigačnej metódy. Je potrebných pár úprav pre zdokonalenie celého systému, ale systém má veľký potenciál na presné určenie polohy dronu.

6. Záver

Cieľom tejto práce bolo porovnanie navigačných metód pre bezpilotné lietajúce zariadenia a overenie funkčnosti vybranej navigačnej metódy. V práci sú spomínané alternatívne metódy navigácie bezpilotných lietajúcich prostriedkov ako je napríklad vizuálna navigácia, celestiálna navigácia alebo aj novinky v oblasti navigácie dronov ako sú napríklad neuromorfné kamery. Práve z týchto metód bola vybratá na základe

porovnania vizuálna navigácia, ktorá vyzerala najperspektívnejšie na testovanie praktickej časti.

Vizuálna navigácia je aktuálne najperspektívnejšou alternatívnou metódou, ktorá by mohla nahradiť tradičné alternatívne metódy alebo byť im vhodným doplnkovým systémom. V praktickej časti bolo zamerané na testovanie limitov a presnosti fungovania vizuálnej navigácie. Test prebiehal v rôznych lokalitách (homogénne prostredie poľa a mestská oblasť) a v rôznych výškach letu dronu (30 metrov, 60 metrov a 120 metrov).

Overovaná metóda, ktorá pracuje na základe hľadania podobností medzi snímkom z dronu a satelitnou snímkom nám vytvorila základ možnosť nasledujúceho štúdia a vývinu tejto metódy. Výsledky nám poukázali na nedostatky a limity, ktoré sú potrebné prekonať. Medzi tieto limity patrí napríklad spomínané homogénne prostredie či väčšia nižšia výška letu v mestských oblastiach. Ukázalo sa však, že systém na určovanie súradníc je pomerne presný a malými úpravami by bol vhodný na použitie v realite. Vizuálna navigácia má teda veľkú šancu stať sa plnohodnotnou navigačnou metódou pre bezpilotné lietajúce zariadenia.

Táto práca vytvára pevný základ pre ďalší výskum a vývoj v oblasti navigácie dronov, pričom získané poznatky môžu byť cenným prínosom pre budúce aplikácie v praxi.

Pod'akovanie

Tento výskum bol podporený v rámci projektu FUTUREFOR – Aplikácie programu Copernicus pre monitorovanie lesov novej generácie, výzva HORIZON-CL3-2023-DRS-01, Zmluvné číslo 101180278.

Referencie

Bhattacharjee, A., 2024. Fingerprinting of Cellular Infrastructure Based on Broadcast Information. Cham: Springer.

Davis, dátum neznámy Davis. [Online] Available at: <https://www.davisinstruments.com/pages/what-is-celestial-navigation> [Cit. 21 Január 2025].

FlySight, 2024. FlySight. [Online] Available at: <https://www.flysight.it/what-are-neuromorphic-sensors-what-you-need-to-know/> [Cit. 19 Január 2025].

GEOMAD, dátum neznámy GEOMAD. [Online] Available at: <https://geomad.sk/sluzby/letecke-snimkovanie/> [Cit. 17 Február 2025].

Krešák, J. & Bérešová, A., 2014. Integrácia medzi inerciálnym navigačným systémom a globálnym navigačným systémom, s.l.: Perner's Contacts.

Pivarčiová, Božek & Popelka, 2015. Možnosti zvyšovania prevádzkovej spoľahlivosti robotizovaných systémov, Zvolen: Vega.

Sanz, M., 2023. Sistema de odometria visual para la localización de robots móviles. s.l.:s.n.

Soklasa, 2010. Vizuálna navigácia autonómnych robotov s využitím podobnostného vyhľadávania, Brno: Masarykova Univerzita.

Straka, R., 2025. Skenovanie technológiou lidar, s.l.: SKYmove.

Štec, F., 2024. Globálna sématická mapa pre navigáciu autonómnych lietajúcich prostriedkov. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave.

Thi, M. N. V., 2023. Wireless Communications for Unmanned Aircraft System. s.l.:SRES Publishing.

ThinkAutonomous, 2024. ThinkAutonomous. [Online] Available at: <https://www.thinkautonomous.ai/blog/visual-inertial-odometry/> [Cit. Január 2025].

Yuichiro, S. & Kentaro, K., 2024. Experimental study on indoor drone positioning using Wi-Fi. s.l.:IEICE.