

Мовчан К.О.Український науково-дослідного інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

СУЧАСНІ СТРАТЕГІЇ НАВІГАЦІЇ ДРОНІВ У ВИПАДКАХ ВІДСУТНОСТІ GPS СИГНАЛУ

У статті розглядається динамічний розвиток автономних інтелектуальних систем, зокрема безпілотних апаратів, та постійне вдосконалення їх навігаційних алгоритмів. Розкрито ключові аспекти навігації, локалізації та картографування, які є критично важливими для забезпечення надійного функціонування безпілотних транспортних засобів у реальних умовах експлуатації. З'ясовано, що одним із найбільш актуальних завдань є навігація дронів у середовищах з обмеженим або повністю відсутнім доступом до сигналів GPS. У статті визначено, що традиційні навігаційні системи значною мірою покладаються на GPS як основний елемент для точного позиціонування. Однак підкреслюється, що зростаюча складність завдань, які виконуються сучасними безпілотними апаратами, вимагає розробки альтернативних методів навігації. Ці методи є особливо важливими для експлуатації в умовах, де доступ до GPS може бути ускладнений або взагалі неможливий. Наведені приклади включають середовища з сильним затуханням сигналу, як-то приміщення, міські забудови, а також сценарії з навмисними перешкодами. Незважаючи на наявність сигналів GPS у деяких середовищах, їх точність виявляється недостатньою для виконання точних завдань, таких як високоточне картографування та навігація. Аналіз наукової літератури показав, що поточні дослідження зосереджені на розробці систем тривимірної реконструкції оточення в режимі, наближеному до реального часу. Такі системи забезпечують автономну роботу безпілотних апаратів, надаючи їм можливість створювати та оновлювати високоточні карти навколишнього середовища. Паралельно ведуться роботи зі створення мультисенсорних систем розпізнавання об'єктів. У статті визначено, що ці системи базуються на поєднанні даних від камер, лідарів та інерціальних вимірювальних блоків, що дозволяє дронам ефективно орієнтуватися в просторі та автономно приймати рішення в реальному часі. Особливу увагу приділено алгоритмам одночасної локалізації та картографування (SLAM), що є ключовими для автономної навігації. З'ясовано, що ці алгоритми дозволяють безпілотним апаратам створювати детальні карти навколишнього середовища та визначати власне місцеположення відносно цих карт. Відзначається, що SLAM-системи адаптуються до різних сценаріїв експлуатації: від міських ландшафтів до густих лісових масивів, забезпечуючи універсальність дронів для різних завдань, включаючи ті, що потребують автономної навігації в складних середовищах. Також розкрито важливість розвитку автономних систем для роботи в нічних умовах або під час складних метеорологічних явищ, коли традиційні системи навігації, що базуються на GPS, можуть виявитися ненадійними або навіть непридатними. Розробка альтернативних підходів до навігації, таких як використання систем комп'ютерного зору та мультисенсорного сприйняття, є критично важливою для забезпечення надійної експлуатації безпілотних систем у таких умовах. Наголошується, що поєднання технологій, таких як алгоритми SLAM, системи розпізнавання об'єктів та тривимірного моделювання, є важливим напрямком для подальшого розвитку автономних інтелектуальних систем. Інтеграція цих технологій дозволить створити більш гнучкі та надійні навігаційні рішення для різних типів безпілотних апаратів, включаючи дрони для цивільного та військового застосування. Підкреслюється, що технології спрямовані на вдосконалення навігаційних систем для дронів мають потенціал значно розширити межі застосування автономних безпілотних систем, забезпечуючи їх здатність виконувати складні завдання в найрізноманітніших середовищах, особливо в умовах обмеженого доступу до супутникових сигналів. Інтеграція новітніх алгоритмів і сенсорних технологій забезпечує можливість розгортання автономних дронів у найскладніших умовах, підвищуючи їх корисність і надійність у різних сферах діяльності.

Ключові слова: безпілотний апарат, візуальний SLAM, безкартографічна система, система з побудовою карт, система з використанням картографічної інформації, навігація в умовах відсутності GPS.

Постановка проблеми. Безпілотні апарати, часто відомі як дрони, представляють технологію, що швидко розвивається і характеризується здатністю виконувати різноманітні місії без наявності пілота на борту. Їхнє поширення в цивільному і військовому секторах пояснюється високою мобільністю, адаптивністю і широким спектром місій, які вони можуть виконувати – від розвідки і картографування до патрулювання, конвоювання, відстеження, знищення ворожих цілей та іншого роду задач. Проте, однією з найважливіших проблем у місіях дронів є необхідність надійної навігації в умовах відсутності або недоступності сигналів глобальної системи позиціонування (GPS – Global Positioning System), що становить одну з найсуттєвіших технічних проблем у сфері експлуатації автономних систем. Ця проблематика набуває особливої актуальності в контексті зростаючої потреби у функціонуванні дронів у середовищах з обмеженим доступом до супутникових навігаційних сигналів. Відсутність надійного GPS-сигналу може бути зумовлена різноманітними факторами, включаючи:

- природні перешкоди – густа рослинність, гірський рельєф, міські забудови;
- штучні джерела інтерференції – електромагнітні завади від промислових об'єктів;
- обмеження доступу – закриті приміщення, підземні споруди;
- умисне блокування сигналу – застосування спеціалізованих засобів радіоелектронної боротьби.

Важливість систем навігації, що доповнюють або заміняють GPS неможливо переоцінити, особливо в критично важливих місіях, де втрата сигналів GPS може призвести до провалу місії або навіть до катастрофічних наслідків. Наприклад, у військових операціях, де сигнали GPS можуть бути заглушені або підроблені противником, покладання виключно на GPS може поставити під загрозу здатність дрона виконати свою місію. Аналогічно, під час розвідувальних місій над густими лісами або в підземних умовах сигнали GPS можуть бути слабкими або взагалі відсутніми, що вимагає альтернативних стратегій навігації.

Математичний апарат, що лежить в основі керування автономними навігаційними системами (дронами), ґрунтується на таких дисциплінах, як нелінійна оптимізація, теорія графів та імовірнісні методи. Характерним прикладом є оптимізація графів, яка відіграє центральну роль у системах SLAM (simultaneous localization and mapping). Застосування нелінійної оптимізації та теорії гра-

фів є фундаментальним для вирішення задач, пов'язаних з навігацією дронів у складному середовищі. Нелінійні методи оптимізації дозволяють ефективно обробляти нелінійні взаємозв'язки між змінними, що є характерними для реальних систем. Теорія графів забезпечує зручний формалізм для представлення та аналізу складних просторових відношень між об'єктами, такими як позиціонування дронів та орієнтири. Інтеграція цих математичних концепцій не лише підвищує надійність навігаційних алгоритмів, але й сприяє розробці більш досконалих систем дронів, здатних працювати в складних умовах. Серед перспективних підходів до вирішення цієї проблеми можна виділити:

- інерційні навігаційні системи з корекцією дрейфу;
- візуальну одометрію на основі комп'ютерного зору;
- лідарні системи (LiDAR – Light Detection and Ranging, виявлення та визначення відстані за допомогою лазерного променя) для тривимірного картографування середовища;
- радіочастотне позиціонування з використанням наземних маяків.

Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, що зумовлює необхідність їх комплексного застосування для досягнення оптимальної ефективності навігації БПЛА в умовах відсутності GPS-сигналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальні дослідження функціонування дронів виявляють їх високу ефективність при вирішенні завдань у комплексних просторових конфігураціях з непередбачуваною топологією завдяки своїм ключовим характеристикам: мінімальним масо-габаритним показникам, підвищеній маневреності та гнучкості алгоритмів керування. Сучасні дрони оснащуються комплексом високоточних сенсорних систем, що включають:

- глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), такі як GPS, ГЛОНАСС або Galileo, для точного визначення географічних координат;
- оптико-електронні системи спостереження, що забезпечують візуальну інформацію про навколишнє середовище;
- лазерні системи виявлення і визначення дальності (LiDAR), за допомогою яких створюються детальні тривимірні карти місцевості;
- інерціальні навігаційні системи (INS – Inertial Navigation System) для визначення орієнтації та прискорення апарату.

Оснащені такими технологіями дрони добре справляються з такими завданнями, як:

- точна локалізація в просторі з точністю до сантиметрів;
- виявлення та класифікація об'єктів у реальному часі за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору та машинного навчання;
- автономне планування траєкторій руху та уникнення перешкод на основі аналізу тривимірного простору.

Попит на дрони, які здатні автономно орієнтуватися у складних умовах без втручання людини, зростає, що вимагає інтеграції ключових підсистем:

- системи навігації та управління рухом, що забезпечують точне позиціонування та маневрування в просторі;
- алгоритми локалізації та картографування (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping), які дозволяють дрону будувати карту навколишнього середовища та визначати своє положення в ній;
- системи прийняття рішень на основі штучного інтелекту для виконання специфічних завдань місії та адаптації до змінних умов середовища.

Нещодавні дослідження підкреслюють важливість комплексних навігаційних систем. Так у роботі [1] проводиться огляд навігаційних компонентів дронів. Аналіз показує, що лише 16% досліджень успішно реалізували повну навігаційну стратегію, тоді як 62% зосереджені переважно на локалізації дрону. Очікується, що майбутній напрямок досліджень у цій галузі буде пов'язаний з впровадженням передових датчиків, камер та мініатюрних радіолокаційних систем. До того ж датчики в поєднанні зі складними алгоритмами, такими як адаптивні методи штучного інтелекту (ШІ), значно покращать можливості сприйняття дроном. Крім того, вдосконалення технологій локалізації є критично важливим, особливо з огляду на те, що 62% досліджень в цьому напрямку зосереджені на мінімізації ризику зіткнення, що часто вимагає використання високоточних симуляторів.

Аналіз сучасних систем навігації на основі комп'ютерного зору виявляє різноманіття стратегій. Наприклад, у роботі [2] поділяють навігацію на основі машинного зору на наступні компоненти: безкартографічні стратегії, стратегії з побудовою карт та картографічні стратегії з використанням заздалегідь збережених карт. Кожен з цих компонентів далі розділяється на підкомпоненти, такі як локалізація, картографування, уникнення перешкод та планування маршруту. Інше дослідження [3] розширює цей аналіз, оцінюючи навігаційні системи дронів на основі технічного зору як у приміщенні, так і на відкритій місцевості.

В той же час в роботі [4] підкреслюють ефективність поєднання монокулярних і стереокамер з інерційними вимірювальними блоками (IMU – inertial measurement unit) для оцінки положення, що виявляється швидшим і ресурсоефективнішим порівняно з методами одночасної локалізації і картографування (SLAM). Крім того, для автономної навігації досліджується технологія оптичного потоку (OF – optical flow). В роботі [5] розглядають методи на основі OF і визначають такі проблеми, як кількісна оцінка, обробка зображень з високою роздільною здатністю в реальному часі та інтеграція систем мультибачення.

Сучасні тенденції в автономній навігації дронів вказують на зростаючу залежність від технологій штучного інтелекту. В дослідженнях [6] надають детальний огляд, класифікуючи підходи ШІ на методи оптимізації, такі як оптимізація рою частинок (PSO – Particle Swarm Optimization), алгоритми оптимізації колоній мурах (ACO – ant colony optimization) і генетичні алгоритми (GA – genetic algorithm), а також методи навчання, такі як навчання з підкріпленням (RL – reinforcement learning), глибоке навчання з підкріпленням (DRL – deep reinforcement learning) і глибоке навчання (DL – deep learning). Порівняння їхніх можливостей, часової складності та налаштування параметрів дозволяє припустити, що майбутні досягнення, ймовірно, будуть зосереджені на обробці великих обсягів даних, обчислювальній потужності, енергоефективності та відмовостійкості. Крім того, дослідження фокусуються на вдосконаленні алгоритмів планування маршруту, уникнення перешкод, а також підвищенні точності локалізації апаратів. У роботі [7] класифікують методи 3D-планування маршрутів на п'ять категорій, аналізуючи їх на основі часової складності, статичних і динамічних середовищ та можливості застосування в реальному часі. В той же час в роботі [8] пропонується єдина метрика оцінки продуктивності, що дозволяє визначити, які методи є оптимальними за різних умов. Інші дослідження, як-от [5, 6], порівнюють традиційні алгоритми і методи, засновані на обчислювальному інтелекті, відповідно, надаючи уявлення про часові витрати, відхилення і застосовність у 2D і 3D середовищах.

Визначення просторового положення дронів за допомогою комплексу датчиків є ключовим напрямком сучасних досліджень у сфері навігації. Наприклад, в роботі [9] розглядають стратегії локалізації на основі абсолютного зору, пристосовані для зовнішніх умов, порівнюючи їх на основі

популярних методів, практичних налаштувань та показників ефективності. В [10] зосереджуються на внутрішніх середовищах, де GPS-сигнали слабкі, класифікуючи стратегії локалізації на основі типів датчиків, включаючи камери, IMU, інфрачервоні, радіопередавачі/приймачі та ультразвукові пристрої та обговорюються їх переваги і обмеження.

Постановка завдання. Незважаючи на значні досягнення в галузі автономної навігації дронів, існуючі дослідження все ще стикаються з проблемами, такими як відсутність комплексного дослідження, яке охоплює всю стратегію навігації, включаючи незалежні підкомпоненти від збору даних до політики управління або планування шляху. Крім того, існує потреба в більш ретельних оціночних показниках для визначення ефективності цих стратегій, а також у тестуванні в реалістичних умовах для виявлення потенційних сфер для вдосконалення. Метою даної статті є аналіз сучасних стратегій навігації дронів в умовах відсутності GPS на основі використання карт, загальних характеристик і попередніх знань.

Виклад основного матеріалу. Відповідно з стратегіями аналізу навколишнього середовища і попередньої інформації, що використовується в навігації дронів, особливо в умовах відсутності GPS, системи візуальної локалізації і картографування можна умовно розділити на три окремі категорії: системи, які не використовують картографію, картографічні системи і системи з побудовою карт. Ці системи відіграють вирішальну роль у різних місіях, таких як військові операції, картографування, розвідка та супровід, де традиційні методи на основі GPS або недоступні, або ненадійні через глушіння сигналу, перешкоди або деградацію.

В умовах, коли доступ до GPS-сигналів обмежений, системи без використання картографії відіграють ключову роль, дозволяючи дронам здійснювати навігацію на основі даних про особливості навколишнього середовища, отриманих в режимі реального часу. Ці системи покладаються не на заздалегідь визначені карти, а на безперервне спостереження за навколишнім середовищем, визначаючи характерні особливості для навігації. Серед найбільш відомих методів, що використовуються в безкартографічній навігації, є методи оптичного потоку і методи відстеження об'єктів, кожен з яких має свої унікальні переваги і обмеження.

Методи оптичного потоку можна умовно поділити на дві групи: глобальні методи, вперше запропоновані в роботі [11], і локальні методи,

досліджені у роботі [12]. У дослідженні [13] представлено новаторський підхід до автономної навігації, який базується на імітації візуальної системи бджіл. Запропонована методика використовує бінокулярну камерну систему для оцінки оптичного потоку відносно навколишніх об'єктів. Алгоритм навігації ґрунтується на аналізі та порівнянні швидкості оптичного потоку з обох камер: ідентичні значення інтерпретуються як прямолінійний рух, тоді як розбіжності ініціюють корекцію траєкторії. Однак ефективність даного методу суттєво знижується в середовищах з низькою текстурною варіативністю. Незважаючи на це обмеження, робота заклала фундамент для подальшого розвитку алгоритмів аналізу оптичного потоку, особливо в контексті детекції та трекінгу об'єктів.

Слід відзначити, що за останні роки було зроблено значні вдосконалення. Запропонований у [14] метод базується на оптичному потоці для детектування змін сцени та характеристики навколишнього середовища. Синергія оптичного потоку та інерційних вимірювальних пристроїв (IMU) дозволяє значно розширити маневрені можливості дронів, включаючи точне зависання та виконання складних операцій, як-от посадка на мобільні платформи [15]. Впровадження технологій щільного оптичного потоку уможливило детектування руху множинних динамічних об'єктів [16], що є фундаментальним для реалізації високорівневих функцій спостереження та динамічного трекінгу.

Одним із перспективних напрямків у дослідженні безкартографічної навігації є відстеження візуальних ознак. Цей метод передбачає ідентифікацію та відстеження інваріантних об'єктів, таких як кути, лінії та інші характерні елементи середовища. Виявляючи ці об'єкти та аналізуючи їхній відносний рух на послідовних знімках, дрони можуть точно визначити їхній рух і положення [17]. Однією з сильних сторін відстеження об'єктів є його здатність повторно спостерігати раніше виявлені об'єкти з різних кутів, відстаней і за різних умов освітлення, що робить його дуже придатним для надійної навігації в різноманітних умовах [18].

Проте природні середовища часто характеризуються високим рівнем невизначеності та динамічності, що ускладнює надійне виявлення та уникнення перешкод для безпілотних літальних апаратів. Для подолання цієї проблеми у роботі [19] запропоновано інтегрувати візуальне розпізнавання орієнтирів з нечіткою логікою для підвищення адаптивності систем навігації.

Система з використанням картографії є важливою основою для автономної навігації дронів в умовах відсутності GPS сигналу. Ці системи покладаються на заздалегідь визначені просторові схеми, представлені у вигляді карт, що дозволяє дрону орієнтуватися в навколишньому середовищі, плануючи шляхи і здійснювати уникнення перешкод в разі потреби. Існує два основних типи карт, що використовуються в цих системах: карти на основі деревоподібної системи і карти основані на основі сітки зайнятості. Ці карти різняться за ступенем деталізації: від детальних 3D-моделей всього середовища до спрощених зображень просторових взаємозв'язків між об'єктами довкілля.

Кarti на основі деревоподібної системи широко використовуються завдяки їхньому ефективному відображенню тривимірних просторів. Наприклад, дослідники у [20] використовували об'ємний 3D-сенсор для розробки високодеталізованих карт міського середовища. Використовуючи багатовимірну деревоподібну карту, згенерована сенсором 3D-модель дозволила автономній роботизованій платформі ефективно досліджувати такі середовища. Ці карти не лише відображають зайняті території, але й надають детальне зображення вільних і невідомих просторів, що посилюється технікою стиснення, яка дозволяє ефективно зберігати і оновлювати дані. Аналогічно, автори [21] розвинули цю ідею, розробивши фреймворк з відкритим вихідним кодом для тривимірного моделювання середовища, що ще більше оптимізувало представлення на основі деревоподібної системи.

З іншого боку, карти на основі сітки зайнятості надають універсальний метод для навігації в складних 3D-середовищах. На відміну від карт на основі деревоподібної системи, які зосереджені на ієрархічній просторовій декомпозиції, сітки зайнятості явно зберігають детальну інформацію як про перешкоди, так і про вільні простори. У роботі [22] продемонстровано ефективність інтеграції стереозору для побудови таких карт у реальному часі. Запропонований авторами метод сегментації даних за розширеною лінією сканування дозволяє зменшити вплив шумів, характерних для стереозору, що підвищує точність отриманих карт.

Альтернативною методикою є багатовимірною сітка зайнятості, розроблена авторами [23]. Цей підхід не лише збирає дані про вільні та зайняті зони досліджуваного середовища, але й включає поступові оновлення для виправлення потенційно помилкових даних датчиків. Завдяки постійній фільтрації та об'єднанню нової сенсорної інфор-

мації, ця система може покращити точність карти з часом, що має вирішальне значення для динамічних середовищ.

Системи одночасного картографування та навігації набули значного поширення як в автономних, так і в напівавтономних системах. Їх популярність стрімко зростає завдяки прогресу в техніці візуальної одночасної локалізації та картографування (VSLAM – visual simultaneous localization and mapping), яка дозволяє дрону створювати карти і локалізувати себе, використовуючи візуальні дані в реальному часі. Технологія VSLAM була значно вдосконалена протягом багатьох років, як зазначено в роботах [24, 25], і зараз вона є важливим інструментом в умовах відсутності GPS.

З постійною мініатюризацією дронів їх можливості щодо корисного навантаження стають все більш обмеженими. Це обмеження змушує дослідників зосередитися на простіших і легших датчиках, в першу чергу, на одній або декількох камерах, замість того, щоб покладатися на більш громіздкі і складні датчики, такі як лазерний радар або гідролокаційні системи. Ранні спроби створити системи візуальної навігації, такі як проект [26] базувалися на примітивних алгоритмах обробки зображень та були обмежені у обчислювальних ресурсах. З часом методи SLAM, що базуються на зоровому аналізі, вдосконалювалися для подолання цих обмежень і перетворилися на більш складні алгоритми, призначені для відновлення як положення камери, так і структурних особливостей оточуючого середовища. Ці сучасні алгоритми можна умовно поділити на три типи залежно від того, як вони обробляють дані візуальних сенсорів: непрямі, прямі та гібридні методи. Кожен підхід має різні сильні та слабкі сторони залежно від конкретних вимог до навігації та картографування.

Непрямі методи обробляють зображення, спочатку виділяючи ключові точки або особливості, такі як кути або контури, а потім використовують ці особливості для оцінки руху камери та структури оточення. Цей підхід зазвичай включає етапи виявлення, опису та зіставлення особливостей. Непрямі методи є ефективними в умовах, де сцена містить багато текстурованих об'єктів, що дозволяє легко виділити та зіставити особливості. Однак, вони можуть бути менш ефективними в умовах слабкої освітленості або при відсутності чітких текстур.

Прямі методи працюють безпосередньо з інтенсивностями пікселів зображення, що дозволяє уникнути етапу виділення особливостей. Ці

методи використовують всю доступну інформацію зображення для оцінки руху та структури, що робить їх більш стійкими до змін освітлення та текстури. Прямі методи можуть бути особливо корисними в умовах, де сцена має мало виражених особливостей або коли зображення містять багато шуму. Однак, вони можуть потребувати більше обчислювальних ресурсів через необхідність обробки великої кількості даних.

На відміну від непрямих або прямих методів, гібридні методи поєднують елементи як непрямих, так і прямих підходів, намагаючись використати переваги обох. Вони можуть, наприклад, використовувати непрямі методи для грубої оцінки руху, а потім уточнювати цю оцінку за допомогою прямих методів. Гібридні методи забезпечують гнучкість і можуть адаптуватися до різних умов, що робить їх універсальними для широкого спектра застосувань. Проте, їх реалізація може бути складнішою через необхідність інтеграції різних підходів.

На додаток до досягнень в SLAM, слід відмітити, що останні дослідження все більше зосереджуються на інтеграції декількох потоків даних від інерційних вимірювальних одиниць (IMU), ультразвукових датчиків і передових алгоритмів комп'ютерного зору. Ці датчики в поєднанні з візуальними даними дозволяють дронам краще орієнтуватися в складному середовищі навіть без GPS. Крім того, можливості обробки даних в реальному часі стали більш надійними, що дозволяє дронам обробляти величезні обсяги даних, з малою затримкою на прийняття рішення, що має вирішальне значення як для безпечного руху, так і для операційної ефективності.

Висновки. В умовах відсутності сигналу GPS навігаційні системи дронів використовують альтернативні системи, які можна розділити на три типи: безкартографічні, системи з побудовою карт та картографічні системи з використанням заздалегідь збережених карт. Кожна з них має свої переваги і недоліки. Безкартографічні системи покладаються виключно на дані датчиків у реальному часі, що дозволяє миттєво уникати перешкод і коригувати маршрут. Ці системи легкі в обчислювальному плані, але їм важко працювати в складних або великомасштабних середовищах через брак довгострокової інформації про навколишнє середовище. Картографічні системи використовують вже існуючі карти, що забезпечує ефективну навігацію зі зниженими обчислювальними вимогами. Однак вони обмежені точністю та повнотою картографічних даних, що робить їх ненадійними в динамічних або невідомих середовищах. Системи з побудовою карт, такі що базуються на технології VSLAM, дозволяють дрону створювати і оновлювати карти під час польоту, пропонуючи більшу гнучкість у складних середовищах. Такі системи забезпечують детальний 3D аналіз навколишнього середовища, але за рахунок підвищеної обчислювальної складності, вимог до обробки даних в реальному часі і енергоспоживання. До того ж розмиття при русі, шуми датчиків і проблеми синхронізації залишаються проблемами для всіх систем, особливо в динамічних умовах. Тому у майбутніх дослідженнях слід звернути увагу на необхідності покращення об'єднання різноманітних сенсорів у мультисенсорну систему, зменшення обчислювального навантаження та покращення прийняття рішень у реальному часі в складних, великомасштабних середовищах.

Список літератури:

1. Gyagenda N., Hatilima J.V., Roth H., Zhmud V. A review of GNSS-independent UAV navigation techniques, *Robot. Auton. Syst.* vol.152, 2022, pp.104069–104073.
2. Lu Y., Xue Z., Xia G.-S., Zhang L. A survey on vision-based UAV navigation, *Geo-Spatial Inf. Sci.* 21 (1), 2018, pp.21–32.
3. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges, *Drones* 7 (2), 2023, pp.89–106.
4. Balamurugan G., Valarmathi J., Naidu V.P.S. Survey on UAV navigation in GPS denied environments, in: 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System, 2016, pp.198–204.
5. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2013, pp.710–716.
6. Rezwan S., Choi W. Artificial intelligence approaches for UAV navigation: Recent advances and future challenges, *IEEE Access*, 10, 2022, pp.26320–26339.
7. Yang L., Qi J., Xiao J., Yong X. A literature review of UAV 3D path planning, in: *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2014, pp. 2376–2381.
8. Amarat S.B., Zong P. 3D path planning, routing algorithms and routing protocols for unmanned air vehicles: a review, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 91, No. 9, 2019, pp. 1245–1255.
9. Couturier A., Akhloufi M.A. A review on absolute visual localization for UAV, *Robot. Auton. Syst.* 135, 2021, pp.103666–103674.

10. Pérez Rubio M.D.C., Gualda Gómez D., J.D. Vicente Ranera, Villadangos Carrizo J.M., Ureña Ureña J. Review of UAV positioning in indoor environments and new proposal based on US measurements, *Robotics and Autonomous Systems* 152, No. 2, 2019, pp. 104069–104077.
11. Horn B.K., Schunck B.G. Determining Optical Flow, *Artificial Intelligence*, 17, 1981, pp.185–203.
12. Lucas B. D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, Canada, 1981, pp. 121–130.
13. Gaspar J., Winters N., Santos-Victor J. Vision Based Navigation and Environmental Representations with an Omnidirectional Camera, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.16, No. 6, pp.890–898.
14. Nourani-Vatani N., Vinicius P., Borges K., Roberts J. M., Srinivasan M. V. On the Use of Optical Flow for Scene Change Detection and Description, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol.74, No. 3, 2014, pp. 817–825.
15. Herissé B., Hamel T., Mahony R., Russotto F. Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Platform Using Optical Flow, *IEEE Transactions on Robotics*, vol.28, No. 1, 2012, pp.77–89.
16. Maier J., Humenberger M. Movement Detection Based on Dense Optical Flow for Unmanned Aerial Vehicles, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol.10, No. 2, 2013, pp.146–157.
17. Cho D., Tsiotras P., Zhang G., Holzinger M. Robust Feature Detection, Acquisition and Tracking for Relative Navigation in Space with a Known Target, Paper Presented at the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Boston, 2013, pp.1853–1871.
18. Szenher M. D. Visual Homing in Dynamic Indoor Environments, PhD diss., University of Edinburgh, 2008, pp.228.
19. Li H., Yang S. X. A Behavior-based Mobile Robot with a Visual Landmark-recognition System, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.8, No. 3, 2003, pp.390–400.
20. Fournier J., Ricard B., Laurendeau D. Mapping and Exploration of Complex Environments Using Persistent 3D Model, *Computer and Robot Vision*, Fourth Canadian Conference on, IEEE, Montreal, Canada, 2007, pp.403–410.
21. Hornung A., Wurm K. M., Bennewitz M., Stachniss C., Burgard W. OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees, *Autonomous Robots* vol.34, No. 3, 2013, pp.189–206.
22. Gutmann J., Fukuchi M., Fujita M. 3D Perception and Environment Map Generation for Humanoid Robot Navigation, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 27, No. 10, 2008, pp.1117–1134.
23. Dryanovski I., Morris W., Xiao J. Multi-Volume Occupancy Grids: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Model for Micro Aerial Vehicles, *Intelligent Robots and Systems*, IEEE/RSJ International Conference, China, 2010, pp.1553–1559.
24. Strasdat H., Montiel J. M., Davison A. J. Visual SLAM: Why Filter?, *Image and Vision Computing*, 30 (2), 2012, pp.65–77.
25. Aulinas J., Petillot Y. R., Salvi J., Lladó X. The SLAM Problem: A Survey, *Conference on Artificial Intelligence Research and Development*, 11th International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence, Spain, 184(1), 2008, pp.363–371.
26. Moravec H. P. The Stanford Cart and the CMU Rover, *Proceedings of the IEEE*, 71 (7), 1983, pp.872–884.

Movchan K.O. MODERN DRONE NAVIGATION STRATEGIES IN GPS-DENIED ENVIRONMENTS

The article discusses the dynamic development of autonomous intelligent systems, including unmanned vehicles, and the continuous improvement of their navigation algorithms. The key aspects of navigation, localisation and mapping, which are critical for ensuring the reliable functioning of unmanned vehicles in real-world conditions, are revealed. It has been found that one of the most pressing tasks is the navigation of drones in environments with limited or no access to GPS signals. The article identifies that traditional navigation systems rely heavily on GPS as the main element for accurate positioning. However, it is emphasised that the increasing complexity of tasks performed by modern unmanned vehicles requires the development of alternative navigation methods. These methods are particularly important for operation in environments where access to GPS may be difficult or impossible. Examples include environments with strong signal attenuation, such as indoors, urban areas, and scenarios with intentional interference. Despite the presence of GPS signals in some environments, their accuracy is not sufficient to perform precise tasks such as high-precision mapping and navigation. An analysis of the scientific literature has shown that current research is focused on the development of near-real-time three-dimensional environment reconstruction systems. Such systems provide autonomous operation of unmanned vehicles, enabling them to create and update high-precision environmental maps. In parallel, work is underway to create multi-sensor object recognition systems. The article defines that these systems are based on a combination of data from cameras, lidars and inertial

measurement units, which allows drones to effectively navigate in space and make autonomous decisions in real time. Particular attention is paid to simultaneous localisation and mapping (SLAM) algorithms, which are key to autonomous navigation. It is found that these algorithms allow unmanned vehicles to create detailed maps of the environment and determine their own location relative to these maps. It is noted that SLAM systems adapt to various operating scenarios: from urban landscapes to dense forests, providing the versatility of drones for various tasks, including those requiring autonomous navigation in complex environments. The paper also highlights the importance of developing autonomous systems to operate at night or during severe weather events, when traditional GPS-based navigation systems may be unreliable or even unsuitable. The development of alternative approaches to navigation, such as the use of computer vision and multisensory perception systems, is critical to ensuring the reliable operation of unmanned systems in such conditions. It is emphasised that the combination of technologies such as SLAM algorithms, object recognition systems and three-dimensional modelling is an important direction for the further development of autonomous intelligent systems. The integration of these technologies will allow for more flexible and reliable navigation solutions for various types of unmanned vehicles, including drones for civilian and military use. It is emphasised that technologies aimed at improving navigation systems for drones have the potential to significantly expand the scope of autonomous unmanned systems, ensuring their ability to perform complex tasks in a variety of environments, especially in conditions of limited access to satellite signals. The integration of the latest algorithms and sensor technologies enables autonomous drones to be deployed in the most challenging environments, increasing their usefulness and reliability in various fields of activity.

Key words: *unmanned apparatus, visual SLAM, mapless system, map-building system, map-base system, navigation in GPS-denied environment.*