

ТАНАСІЙЧУК СТЕПАН
Хмельницький національний університет
ГОВОРУЩЕНКО ТЕТЯНА
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-7942-1857>
e-mail: hovorushchenko@khmmu.edu.ua

АНАЛІЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ БПЛА (GPS ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ)

Проведено аналіз методів управління БПЛА та констатовано, що під час побудови комплексу управління БПЛА командний елемент або його частина виноситься за межі апарата і зв'язується з виконавчим елементом лінією передачі. Основною функцією, яку розв'язує СК, є керування рухом центру мас (три канали керування) і кутовими рухами БПЛА щодо центру мас (три канали керування). Таким чином, управління польотом БПЛА зводиться до управління параметрами його руху: кутовими координатами, кутовими швидкостями і прискореннями, лінійними координатами (дальністю, висотою, бічним переміщенням). Для БПЛА з високошвидкісними характеристиками і високою маневреністю потрібне дуже швидке доставлення команд управління з пункту керування на борт. Одночасно з цим пілотажне управління вимагає високого ступеня втручання оператора в процес управління літальним апаратом, що, своєю чергою, вимагає високої концентрації оператора, а також високого ступеня підготовки.

Наголошено на думці, що інтелектуальні методи керування БПЛА є важливою складовою сучасних безпілотних систем. Вони дозволяють пілотувати та керувати дроном з високою точністю та ефективністю, автоматично виконуючи різноманітні завдання. У цьому контексті БПЛА можуть використовуватися для збору інформації з висоти, що дозволяє збільшити площу, яку можна охопити відразу. Завдяки цьому БПЛА можуть використовуватися для виявлення вогню на великих територіях, таких як лісові масиви, де можливість вчасного виявлення вогню є критично важливою. Описано основні принципи роботи GPS системи та її роль у навігації БПЛА. Окрему увагу було приділено інтелектуальним польотним режимам БПЛА. Вони включають автоматичне пілотування, точне позиціонування, виявлення перешкод та інші функції, які дозволяють дрону автономно виконувати завдання з високою точністю.

Ключові слова: дрон, SLAM, GPS, позиціонування, нейронна мережа, робастне керування, Composition Mode, зсув положення.

TANASIYCHUK STEPAN, HOVORUSHCHENKO TETIANA
Khmelnitskyi National University

ANALYSIS OF UAV CONTROL METHODS (GPS POSITIONING AND INTELLIGENT CONTROL METHODS)

An analysis of UAV control methods was conducted, noting that during the construction of UAV control systems, the command element or its part is moved beyond the aircraft and connected to the executive element via a transmission line. The main function solved by the control system (CS) is controlling the movement of the center of mass (three control channels) and the angular movements of the UAV relative to the center of mass (three control channels). Thus, UAV flight control is reduced to controlling its motion parameters: angular coordinates, angular velocities and accelerations, linear coordinates (distance, altitude, lateral displacement). For UAVs with high-speed characteristics and high maneuverability, very fast delivery of control commands from the control point to the onboard system is required. Concurrently, manual control requires a high degree of operator intervention in the aircraft control process, which, in turn, demands high operator concentration and a high level of training.

It is emphasized that intelligent control methods for UAVs are an important component of modern unmanned systems. They allow for piloting and controlling drones with high precision and efficiency, automatically performing various tasks. In this context, UAVs can be used for gathering information from altitude, which increases the area that can be covered at once. Thus, UAVs can be used for detecting fires over large areas, such as forested areas, where timely fire detection is critically important. The basic principles of GPS system operation and its role in UAV navigation are described. Special attention was given to intelligent flight modes of UAVs. These include automatic piloting, precise positioning, obstacle detection, and other functions that enable drones to autonomously perform tasks with high precision.

Keywords: Drone, SLAM, GPS, positioning, neural network, robust control, Composition Mode, position shift.

Вступ

На сьогоднішній день безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко застосовуються у різних сферах господарства та є перспективним напрямком розвитку для багатьох країн. Одним з ключових аспектів у розробці кожного нового БПЛА є система навігації і орієнтації, яка є найскладнішою та вимагає особливої уваги. Виклик полягає в створенні ефективної системи, яка б за мінімальних витрат містила оптимальний набір датчиків для автономного польоту та забезпечувала високу точність. Розробка такої системи відкриє шлях до створення конкурентоздатних БПЛА. Результати досліджень можуть також сприяти у вдосконаленні існуючих систем навігації і орієнтації [1].

Мета дослідження полягає в аналізі методів управління БПЛА на основі GPS позиціонування та інтелектуальних методів управління.

Огляд відомих методів та рішень

Управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) включає в себе різноманітні методи та алгоритми, спрямовані на забезпечення стабільності, точності керування, зменшення ризику втрати зв'язку та забезпечення безпеки польоту. У цьому контексті відрізняють три основних режими управління різноманітними робототехнічними комплексами (РТК): ручний, напівавтоматичний та автоматичний.

Стасенко Д. В. наголосив, що у складі системи управління ключовим елементом є навігаційна система, яка формує основу для автоматичного керування та налаштування автопілоту на певні режими польоту [5]. Навігаційна система БПЛА включає наступні основні компоненти:

– Інерціальний модуль: Використовуються гіроскопи та акселерометри для вимірювання змін у прискоренні та кутовій швидкості, що дозволяє визначити положення та орієнтацію БПЛА.

– Компаси: Визначають орієнтацію БПЛА відносно магнітного поля Землі, що необхідно для визначення напрямку польоту та корекції навігаційних даних.

– GPS-приймачі: Забезпечують глобальне позиціонування та визначають місцезнаходження та швидкість БПЛА за допомогою сигналів від супутників. GPS-приймачі є ключовим компонентом навігаційної системи БПЛА.

Bustos A. P. припустив, що GPS є одним із найважливіших елементів управління БПЛА, оскільки він дозволяє визначити точне місцезнаходження апарату в реальному часі і використовується для автономного контролю, пілотажу та керування польотом, забезпечуючи стабільну траєкторію польоту [8]. Березіна С. І. констатувала, що система GPS працює на основі принципу трilaterації, що передбачає отримання сигналів від трьох або більше супутників для визначення місцезнаходження об'єкта [2]. Hart S. узагальнив дані та зробив висновок про те, що БПЛА отримує сигнали від супутників, які перебувають на орбіті, і використовує часову різницю між сигналами для визначення свого місцезнаходження [9]. Для точного позиціонування БПЛА за допомогою GPS необхідно використовувати більше ніж чотири супутники, щоб забезпечити точність інформації про місцезнаходження та швидкість в реальному часі.

Іваненко Ю. В. акцентував увагу на тому, що GPS дозволяє БПЛА автоматично виконувати маршрути, визначити висоту польоту, коригувати своє положення та діяти у випадку непередбачуваних обставин [3]. Використання GPS також важливо для забезпечення безпеки польоту, дозволяючи БПЛА повертатися до базової точки або приймати інші заходи в разі потреби. У навігаційній системі БПЛА найчастіше використовується формат запису координат у градусах та десяткових градусах (DD), що дозволяє точно визначити місцезнаходження об'єкта.

Jiang G узагальнюючи наголосив, що GPS є важливою складовою навігаційної системи БПЛА, яка дозволяє точно визначити місцезнаходження та швидкість, необхідні для виконання різних завдань. Додатково до GPS можуть використовуватися інші навігаційні системи та сенсори для покращення точності визначення місцезнаходження та швидкості БПЛА [12].

GPS-позиціонування є ключовим для автоматичного керування польотом БПЛА, забезпечуючи можливість підтримки заданої траєкторії та виконання різноманітних завдань, таких як моніторинг або доставка вантажу. Ця технологія може застосовуватися як для автономного, так і для дистанційного керування (Guo X.) [10].

Ivanov D. встановив те, що у режимі автономного керування, GPS-дані дозволяють визначити траєкторію польоту та точку приземлення, в той час як у дистанційному керуванні, вони використовуються для передачі реального часу позиції БПЛА та керування польотом здалеку [11]. GPS-позиціонування важливе для забезпечення точного позиціонування та безпечного керування польотом, зменшуючи ризик непередбачуваних ситуацій під час польоту. Без навігаційної системи БПЛА не може виконувати свої завдання в автономному режимі або безпечно повертатися до бази після завершення польоту.

Milyakov D. A. Констатував, що інтелектуальне керування – методи управління, які використовують різні підходи штучного інтелекту, такі як штучні нейронні мережі, нечітка логіка, машинне навчання, еволюційні обчислення і генетичні алгоритми [15]. Інтелектуальні польотні режими БПЛА представляють собою програмні алгоритми та функції, що дозволяють автономно виконувати різні завдання, такі як автоматичний пілотаж, навігація, виконання зйомок з повітря, виявлення та слідкування за об'єктами, аналіз отриманих зображень та даних і так далі.

Розрізняють такі рівні інтелектуального управління БПЛА:

- Рівень 0: Робастне керування зі зворотним зв'язком
- Рівень 1. Адаптивне управління – рівень 0 + адаптивні керуючі параметри
- Рівень 2. Оптимальне управління – рівень 1 + мінімізація або максимізація функції якості
- Рівень 3. Планове управління – рівень 2 + здатність планувати заздалегідь не певні ситуації, імітувати і моделювати невизначеності

1. Адаптивне керування
Oliveira M. T. [16] представляє різні типи систем автоматичного керування із використанням нейронних мереж як адаптивного модуля системи. Розглянуті проблеми, які виникають із використанням нейронних регуляторів, зокрема, проблема ініціалізації вагових коефіцієнтів мережі. Також окреслені проблеми, які виникають при навчанні нейронних мереж. Особливістю приведених систем є їх робастність, проте, жодна з наведених систем автоматичного управління не здатна із заданою точністю витримувати обрані значення параметрів за умов невідомих збурень.

В статті Rosas-Cervantes A. [18] досліджуються стабільність і збіжність нейронної мережі відповідно до типу навчання мережі в системі автоматичного керування. Інтелектуальна система управління польотом використовує прямий адаптивний та динамічний інверсійний підхід управління. Результати льотних випробувань відзначають потреби в подальших дослідженнях з метою поглиблення розуміння ефективності та обмежень прямого адаптивного управління польотом. Akhloufi M. A. також запропонована гібридна адаптивна архітектура управління [6]. Гібридне адаптивне управління поєднує як прямі, так і непрямі методи

адаптивного управління для забезпечення більш ефективної стратегії управління. Непряме адаптивне управління відповідає за оновлення динамічного контролера інверсії з більш точної моделі, який оцінюється за методом найменших квадратів. Будь-які залишкові помилки потім будуть оброблені нейронною мережею прямого адаптивного управління. Перевагою гібридного методу адаптивного управління є можливість оцінити параметри моделі в режимі «он-лайн» та найкращим чином адаптувати нові параметри системи до зовнішніх збурень. В той же час, задача гарантованого витримання заданих параметрів системи при невідомих збуреннях не розглянута.

Perceira D. S. [17] проаналізовано задачі синтезу оптимальної системи керування літальним апаратом за умови випадкових зовнішніх збурень. Автором приведено використання методів динамічного програмування для вирішення задачі оптимального керування, розглянуті методи фільтрації, зокрема, фільтри Калмана-Бьюсі, Віннера, приведено приклад стохастичної оптимальної системи. Фільтр Віннера має обмеження на спостереження, оскільки спостереження мають відбуватися на безкінечному відрізку часу. Недоліком стохастичної оптимальної системи є необхідність апріорної інформації щодо типу збурень, так, для гарантування синтезу оптимальної стохастичної системи, шум має підпорядковуватись нормальному розподілу. Задача витримки заданих параметрів системою не розглядається.

Так, в роботі Telli K. [19] розроблені алгоритми оптимального управління БПЛА. Вирішується завдання мінімізації витрат на управління і максимальної швидкодії для моделі БПЛА як твердого тіла, яке описується рівняннями високого порядку (Ейлера і Пуассона). В роботі враховується обмеження на вектор управління, які існують в реальних БПЛА.

Перевагою даного підходу є формування управління при різних значеннях початкового і кінцевого векторів стану без зміни структури алгоритму управління, скорочений обсяг обчислювальних витрат до 20 разів при формуванні траєкторії в реальному часі.

Суттєвим недоліком цієї роботи є відсутність даних про реакцію системи на вплив шумів і зовнішніх сил. Задача витримки параметрів системи із гарантованою точністю при дії невідомих збурень не була розглянута.

Оптимальне керування на основі моделі інтелектуального управління включає в себе он-лайн розрахунки оптимізації. Для здійснення задачі оптимізації модель враховує динаміку системи, обмеження і цілі контролю. Такий підхід може бути використаний при створенні системи автоматичного керування гарантованою точності.

Стандартні режими польоту призначені для забезпечення безпечного та ефективного пілотування БПЛА з меншим ризиком помилки. Це такі режими, як Beginner Mode, Positioning Mode, Attitude Mode та Sport Mode. Наприклад, Beginner Mode призначений для новачків, маючи обмежені можливості, щоб забезпечити просте та безпечне керування.

Невлюдов І. Ш. у режимі позиціонування (Positioning Mode) БПЛА використовує GPS або інші супутникові системи для точного визначення своєї позиції у просторі [4]. Цей режим дозволяє БПЛА автоматично утримувати задану позицію, користуючись сигналами з супутників. Така можливість забезпечує стабільність польоту та точність місцезнаходження, що особливо важливо при виконанні завдань, таких як зйомка відео чи точне маневрування.

У режимі орієнтації (Attitude Mode), керування БПЛА здійснюється за допомогою гіроскопів та акселерометрів, а не GPS. Це дозволяє оператору контролювати орієнтацію БПЛА, включаючи кут крену, тангажу та курс. Режим орієнтації надає більшу свободу управління БПЛА, що дозволяє виконувати складні маневри та керувати політними характеристиками.

Sport Mode призначений для швидкого польоту та має більшу маневреність. У цьому режимі БПЛА може рухатись з високою швидкістю та виконувати стрімкі повороти. Sport Mode зазвичай вимагає більшого досвіду управління БПЛА через його високу швидкість та маневреність.

Щодо комплексу інтелектуальних режимів, наявних у БПЛА, варто зазначити додаткові можливості. На різних моделях може бути доступний різний набір таких режимів, які дозволяють БПЛА працювати в автономному або напівавтоматичному режимі. Це дозволяє операторові зосередитися на виконанні завдань, таких як моніторинг або зйомка.

Berezhnyi A. Наголосив, що існує безліч інтелектуальних режимів управління БПЛА, які забезпечують автоматизоване керування та навігацію [7]. Наприклад, Кінематографічний режим (Cinematic Mode) поєднує в собі найкращі можливості режимів позиціонування та орієнтації для створення плавних кадрів. Режим TapFly дозволяє спрямовувати БПЛА у політ одним дотиком на мобільному пристрої, обходячи перешкоди автоматично.

Режим Active Track є одним з найпопулярніших та часто використовуваних інтелектуальних режимів польоту для БПЛА. Використовуючи модуль GPS та камеру, БПЛА може автоматично відстежувати об'єкти, які цікавлять оператора, включаючи людей, тварин або транспортні засоби. Цей режим дозволяє БПЛА автоматично слідкувати за обраними об'єктами після отримання відповідної команди. Режим відстеження має три варіанти: Track, Profile і Spotlight, які визначають позицію безпілота щодо об'єкта відстеження.

Режим QuickShot призначений для швидкого та зручного створення фотографій і відеокліпів. У своїх чотирьох підрежимах він дозволяє легко вибрати об'єкт для зйомки, натискаючи на нього на екрані або малюючи рамку навколо нього. Наприклад, популярним підрежимом є Dronie, де БПЛА летить угору і назад, тримаючи фокус на об'єкті.

Режим *Grid* зручний для аерозйомки з низької відстані. У цьому режимі швидкість руху БПЛА знижується, дозволяючи оператору здійснювати дуже точні рухи та зберігати стабільне положення безпілотної. Однак ефективність роботи цього режиму значно залежить від наявності та якості сигналу GPS.

Режим *Draw* дозволяє користувачеві вказати маршрут переміщення БПЛА, намальований на екрані мобільного пристрою. Швидкість руху може бути налаштована за допомогою повзунків у меню на дисплеї.

Massé С. узагальнив дані і висловив припущення, що у режимі *Waypoints* також можна встановлювати траєкторію польоту БПЛА, але в цьому випадку потрібно лише відзначити точки маршруту, які цікавлять [14]. Безпілотної буде рухатися, орієнтуючись на ці точки. Це корисно, якщо в цих точках БПЛА потрібно виконати різні завдання, наприклад, зняти матеріал або провести інспекцію об'єкта.

Цей режим є ефективним, оскільки БПЛА може гнучко вибирати найбільш раціональний маршрут переміщення від однієї точки до іншої. Також збільшується точність польоту, оскільки точки встановлюються з використанням координат. Крім того, ПЗ у БПЛА зберігає дані точок для повторення маршруту.

Режим стеження за рельєфом (*Terrain Follow Mode*) доступний тільки у БПЛА з оптичними сенсорами, які спрямовані вниз. До них належать такі моделі, як *Phantom 4 Pro* і *Mavic*, а також деякі промислові та сільськогосподарські безпілотної. У цьому режимі БПЛА може підтримувати постійну висоту над землею навіть під час підйому на гору з ухилом до 20 градусів. Різницю висот можна налаштувати від 1 до 10 метрів, але ця функція не активується, якщо БПЛА перетинає місцевість зі схилом вниз.

Spotlight Pro є покращеною версією підрежиму *Spotlight ActiveTrack*, що пропонує більше функціональності. Цей режим дозволяє БПЛА літати в автономному режимі, в той час як камера продовжує відстежувати обраний об'єкт. У *Spotlight Pro* також доступний підрежим *Composition Mode*, що дозволяє користувачу обрати область на екрані для відстеження об'єкта. Камера розпочне відстеження лише тоді, коли об'єкт перетне вказані межі та увійде в окреслену область.

Фіксація курсу (*Course Lock*) дозволяє БПЛА летіти у певному напрямку, обмежуючи маневреність і забезпечуючи літальному апарату певний «коридор» руху туди і назад. Ця функція не обмежує контроль над підвісом і камерою, тому якість зйомки не постраждає. Вона корисна для польотних завдань вздовж визначеного маршруту, де відхилення від нього може вплинути на досягнення основних цілей.

Режим «Точки інтересу» (*Points of Interest*) подібний до режиму кругової зйомки. У цьому режимі БПЛА облітає обраний об'єкт по колу, зберігаючи фокус камери на ньому. Можливо відрегулювати швидкість, висоту і радіус польоту. Під час руху за заданим шаблоном пілот може призупинити рух БПЛА, не змінюючи фокус камери на об'єкті.

Khan М. Наголосив, що в багатьох сучасних безпілотної системах БПЛА можуть автоматично приймати рішення з управління, використовуючи вбудовані алгоритми та сенсори для навігації, збору даних та уникнення перешкод [13]. Оператор може задати конкретний маршрут або регіон для руху БПЛА, і він автоматично пролітає цю траєкторію. Кожен інтелектуальний режим керування має свої переваги та обмеження, які оператор повинен враховувати.

Порівняння способів навігації БПЛА

В даний час, для переміщення БПЛА в просторі, все частіше використовують системи, що створюють карту в процесі руху, застосовуються алгоритми одночасної навігації та картографування (*map-building simultaneous localization and mapping – SLAM*). SLAM (одночасна локалізація та картографування – одночасна локалізація та побудова карти) в даний час є новим напрямком розвитку для вчених. Метод SLAM використовує мобільні незалежні інструменти для побудови карти у відомому просторі з одночасним контролем поточної позиції та пройденої відстані. Розробка SLAM сприяла орієнтації БПЛА як на наземні, так і на безпілотної пристрої.

Існує дві великі групи Slam алгоритмів-SLAM frontend і Slam backend.

Slam frontend вирішує наступні завдання.

1. Аналізу та інтеграції нових даних (*data association*). На цьому етапі проводиться виділення особливостей (*Feature / landmarks extraction*) на знову отриманих даних. Особливості-Це такі характеристики, які легко можуть бути виділені в середовищі і використовуватися в подальшому для орієнтації в просторі.

2. Обчислення зсуву (*Local Motion Estimation*). Зсув положення виділених особливостей на сцені можна визначити, зіставивши набір особливостей, отриманих на поточному кроці, з набором особливостей, отриманих на попередньому кроці. Так як особливості самі по собі стаціонарні, очевидно, що цей зсув – результат зміни положення камери (робота). На основі цієї інформації можна виразити координати камери через систему лінійних рівнянь.

3. Оновлення структури (*Features Integration*), що зберігає історію переміщень, де кожен стан являє собою глобальне положення робота і взаємне розташування досліджуваних особливостей на певному проміжку часу. На цьому етапі проводиться аналіз, і отримані раніше дані додаються в загальну структуру для зберігання інформації про світ за весь час дослідження.

На основі аналізу різних способів оптичної навігації можна скласти порівняльну таблицю і виділити переваги і недоліки кожного способу. В таб. 1 наведено порівняння основних методів, що застосовуються сьогодні для вирішення завдань оптичної навігації БПЛА та GPS навігації. Тут показані переваги «+» і недоліки «-» розглянутих способів навігації.

Порівняння способів навігації БПЛА

Спосіб навігації	Характеристики способів навігації					
	Розмір території не обмежений	Висока точність на коротких траскторіях	Інваріантна до змін в середовищі	Не накопичує помилку	Не потребує стаціонарних об'єктів	Робота в умовах з високим вмістом перешкод
GPS	+	-	+	+	+	-
SLAM	-	+/-	-	+	-	+
КЕНС	-	+	-	+	+	+
Візуальна одометрія	+	+	+	-	+	+

Метод візуальної одометрії не залежить від радіоперешкод, має високу точність, не залежить від розташування додаткових стаціонарних об'єктів але має і недоліки пов'язані з накопичення помилки в ході роботи методу. Проблема накопичення помилки вирішена в деяких алгоритмах SLAM.

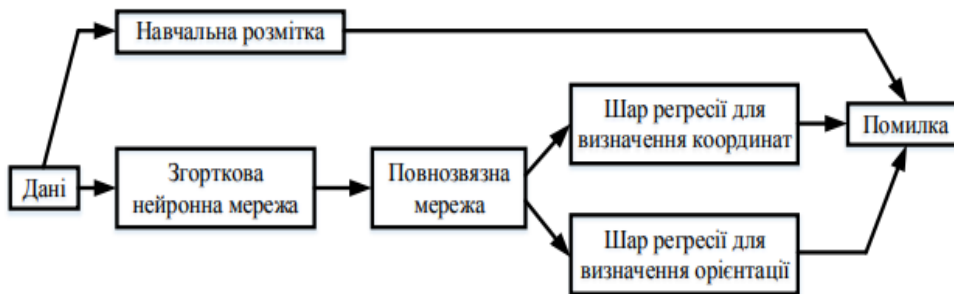


Рис. 1. – Архітектура нейронної мережі для визначення положення в просторі за зображенням відео камери

Основне завдання SLAM-синхронне визначення місця розташування і складання карти. Вона пов'язана з побудовою карти невідомого простору БПЛА під час навігації по споруджуваній карті. Проблема одночасної локалізації та побудови карти є фундаментальним завданням при створенні автономних БПЛА, і алгоритм SLAM в цьому випадку є базовим методом для багатьох навігаційних систем.

Висновки

Встановлено, що використання інтелектуальних польотних режимів значно підвищує продуктивність та ефективність безпілотних систем, зменшує навантаження на пілота та ризики, пов'язані з людським чинником. Інтелектуальні методи керування є важливою складовою розвитку сучасних безпілотних систем, що дозволяють ефективно керувати БПЛА та виконувати різноманітні завдання автоматично.

У такому контексті безпілотні літальні апарати можуть бути використані для збору інформації з висоти, що дозволяє охопити велику площу землі одночасно. Це дозволяє виявляти вогонь на великих територіях, таких як лісові масиви, де швидке виявлення вогню є критично важливим.

Література

1. Аполлонов Д. В., Бібікова К. І., Шибяєв В. М. Формування алгоритмів системи автоматичного управління перетворюваного безпілотного літального апарату. *Праці МАІ*. 2022. № 122. doi: 10.34759 / trd2022-122-23.
2. Березіна С. І., Логачов С. В., Солонець О. І. Метод координатної прив'язки знімків, отриманих з БПЛА, за елементами зовнішнього орієнтування. *Системи озброєння і військова техніка*, 2018. Вип. (1). С. 76-83.
3. Іваненко Ю. В. Огляд методів керування безпілотними літальними апаратами. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. С. 26-30.
4. Невлюдов І. Ш., Новоселов С. П., Сухачов К. І. Метод одночасної локалізації та картографування для побудови 2,5D-карти навколишнього середовища засобами ROS. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 145-160. doi: https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.145.
5. Стасенко Д. В., Островка Д. В., Теслюк В. М. Розроблення автономної системи керування мобільною робототехнічною системою з використанням моделей на підставі штучних нейромереж. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2021. 31 (6), С. 112-117. https://doi.org/10.36930/40310617.
6. Akhloufi M. A., Castro N. A., Couturier A., Unmanned aerial systems for wildland and forest fires: *Sensing, perception, cooperation and assistance, Drones*, 2021, vol. 5, no. 15, doi: 10.3390/drones5010015.

7. Bereznyi A., Trystan A., Lavrov O. Information technology of automatic detection and identification of stationary objects with unmanned aerial vehicles. *Сучасні інформаційні системи*. Харків, 2020. Вип. 4 (1). С. 5–10. doi: 10.20998 / 2522–9052.2020.
8. Bustos A. P. et al. Visual SLAM: why bundle adjust? International conference on robotics and automation (ICRA). Montreal, QC, Canada. 20–24 May. 2019. 1043. doi: <https://doi.org/10.1109/icra.2019.8793749>.
9. Hart, S.; Steane, V.; Bullock, S.; Noyes, J. M. Understanding Human Decision-Making when Controlling UAVs in a Search and Rescue Application. *Hum. Interact. Emerg. Technol.* 2022, 68. <https://doi.org/10.54941/ahfe1002768>.
10. Guo, X.; Hou, S.; Niu, P.; Zhao, D. A Review of Control Methods for Quadrotor UAVs. In *Proceedings of the 2022 5th International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology (EEET)*, Beijing, China, 2–4 December 2022; pp. 132–138. <https://doi.org/10.1109/EEET58130.2022.00030>.
11. Ivanov D. Periodic formation within a large group of mobile robots in conditions of limited communications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1046. Cham: Springer, 2019. С. 107–112. doi: 10.1007 / 978–3–030–30329–7_10.
12. Jiang G. et al. A simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 2.5D map building based on low-cost lidar and vision fusion. *Applied sciences*. 2019. Vol. 9, № 10. 2105. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102105>.
13. Khan, M.; Qureshi, I.; Khanzada, F. A hybrid communication scheme for efficient and low-cost deployment of future flying ad hoc network (FANET). *Drones* 2019, 3, 16. <https://doi.org/10.3390/drones3010016>.
14. Massé, C.; Gougeon, O.; Nguyen, D. T.; Saussie, D. Modeling and Control of a Quadcopter Flying in a Wind Field: A Comparison Between LQR and Structured H_{∞} Control Techniques. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Dallas, TX, USA, 12–15 June 2018; pp. 1408–1417. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453402>.
15. Milyakov D. A., Merkulov V. I. The approach to managing a group of UAVs as a system with distributed parameters. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 150. С. 39–45. doi: 10.1016 / j. procs. 2019.02.009.
16. Oliveira, M. T.d.; Miranda, R. K.; da Costa, J. P.C.; de Almeida, A. L.; Sousa, R. T.d. Low cost antenna array based drone tracking device for outdoor environments. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2019, 2019, 5437908. <https://doi.org/10.1155/2019/5437908>.
17. Pereira, D. S.; De Morais, M. R.; Nascimento, L. B.; Alsina, P. J.; Santos, V. G.; Fernandes, D. H.; Silva, M. R. Zigbee protocol-based communication network for multi-unmanned aerial vehicle networks. *IEEE Access* 2020, 8, 57762–57771. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982402>.
18. Rosas-Cervantes A. et al. Sensors Multi-Robot 2.5 D localization and mapping using a monte carlo algorithm on a multilevel surface. *MDPI Journals Awarded Impact Factor*. 2021. Vol. 21. № 13. 4588. doi: <https://doi.org/10.3390/s21134588>.
19. Telli, K.; Kraa, O.; Himeur, Y.; Ouamane, A.; Boumezhaz, M.; Atalla, S.; Mansoor, W. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Systems* 2023, 11, 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>.

References

1. Apollonov D. V., Bibikova K. I., Shybajev V. M. Formuvannya alghorytmiv systemy avtomatichnogo upravlinnja peretvorjuvanogho bezpilotnogho litalnogho aparatu. *Praci MAI*. 2022. # 122. doi: 10.34759 / trd2022–122–23.
2. Berezina S. I., Loghachov S. V., Solonec O. I. Metod koordynatnoji pryv'jazky znimkiv, otrymanykh z BPLA, za elementamy zovnishnjogho orijentuvannja. *Systemy ozbrojennja i vijskova tekhnika*. 2018. Vyp. (1). S. 76–83.
3. Ivanenko Ju. V. Oghljad metodiv keruvannja bezpilotnymi litaljnymi aparatamy. *Systemy upravlinnja, navighaciji ta zv'jazku*. 2023. S. 26–30.
4. Nevljudov I. Sh., Novoselov S. P., Sukhachov K. I. Metod odnochasnoji lokalizaciji ta kartoghrafuvannja dlja pobudovy 2,5D-karty navkolyshnjogho seredovyssha zasobamy ROS. Suchasnyj stan naukovykh doslidzenij ta tekhnologij v promyslovosti. 2023. # 2 (24). S. 145–160. doi: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.145>.
5. Stasenko D. V., Ostrovka D. V., Tesljuk V. M. Rozroblennja avtonomnoji systemy keruvannja mobiljnoju robototekhnichnoju systemoju z vykorystannjam modelej na pidstavi shtuchnykh neŭromerezh. *Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy*, 2021. 31 (6), S. 112–117. <https://doi.org/10.36930/40310617>.
6. Akhloufi M. A., Castro N. A., Couturier A., Unmanned aerial systems for wildland and forest fires: Sensing, perception, cooperation and assistance, *Drones*, 2021, vol. 5, no. 15, doi: 10.3390/drones5010015.
7. Bereznyi A., Trystan A., Lavrov O. Information technology of automatic detection and identification of stationary objects with unmanned aerial vehicles. *Suchasni informacijni systemy*. Kharkiv, 2020. Vyp. 4 (1). S. 5–10. doi: 10.20998 / 2522–9052.2020.
8. Bustos A. P. et al. Visual SLAM: why bundle adjust? International conference on robotics and automation (ICRA). Montreal, QC, Canada. 20–24 May. 2019. 1043. doi: <https://doi.org/10.1109/icra.2019.8793749>.
9. Hart, S.; Steane, V.; Bullock, S.; Noyes, J. M. Understanding Human Decision-Making when Controlling UAVs in a Search and Rescue Application. *Hum. Interact. Emerg. Technol.* 2022, 68. <https://doi.org/10.54941/ahfe1002768>.
10. Guo, X.; Hou, S.; Niu, P.; Zhao, D. A Review of Control Methods for Quadrotor UAVs. In *Proceedings of the 2022 5th International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology (EEET)*, Beijing, China, 2–4 December 2022; pp. 132–138. <https://doi.org/10.1109/EEET58130.2022.00030>.
11. Ivanov D. Periodic formation within a large group of mobile robots in conditions of limited communications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1046. Cham: Springer, 2019. S. 107–112. doi: 10.1007 / 978–3–030–30329–7_10.
12. Jiang G. et al. A simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 2.5D map building based on low-cost lidar and vision fusion. *Applied sciences*. 2019. Vol. 9, # 10. 2105. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102105>.
13. Khan, M.; Qureshi, I.; Khanzada, F. A hybrid communication scheme for efficient and low-cost deployment of future flying ad hoc network (FANET). *Drones* 2019, 3, 16. <https://doi.org/10.3390/drones3010016>.

14. Massé, C.; Gougeon, O.; Nguyen, D. T.; Saussié, D. Modeling and Control of a Quadcopter Flying in a Wind Field: A Comparison Between LQR and Structured H_{∞} Control Techniques. In Proceedings of the 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dallas, TX, USA, 12–15 June 2018; pp. 1408–1417. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453402>.
15. Milyakov D. A., Merkulov V. I. The approach to managing a group of UAVs as a system with distributed parameters. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 150. S. 39–45. doi: 10.1016/j.procs.2019.02.009.
16. Oliveira, M. T.d.; Miranda, R. K.; da Costa, J. P.C.; de Almeida, A. L.; Sousa, R. T.d. Low cost antenna array based drone tracking device for outdoor environments. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2019, 2019, 5437908. <https://doi.org/10.1155/2019/5437908>.
17. Pereira, D. S.; De Morais, M. R.; Nascimento, L. B.; Alsina, P. J.; Santos, V. G.; Fernandes, D. H.; Silva, M. R. Zigbee protocol-based communication network for multi-unmanned aerial vehicle networks. *IEEE Access* 2020, 8, 57762–57771. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982402>.
18. Rosas-Cervantes A. et al. Sensors Multi-Robot 2.5 D localization and mapping using a monte carlo algorithm on a multilevel surface. *MDPI Journals Awarded Impact Factor*. 2021. Vol. 21. # 13. 4588. doi: <https://doi.org/10.3390/s21134588>.
19. Telli, K.; Kraa, O.; Himeur, Y.; Ouamane, A.; Boumechraz, M.; Atalla, S.; Mansoor, W. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Systems* 2023, 11, 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>.