

КОСТЕНКО Віталій

Національний Аерокосмічний Університет «ХАІ»

<https://orcid.org/0009-0003-4327-583X>

email: v.kostenko@khai.edu

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ ДЛЯ ГРУПОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА

У даній статті проведено аналіз сучасних алгоритмів планування траєкторій для групового використання БПЛА. Розглянуто традиційні методи, такі як алгоритм A* та Rapidly-exploring Random Tree (RRT). Окрему увагу приділено інтелектуальним підходам, насамперед еволюційним алгоритмам, таким як генетичні алгоритми (GA) та диференціальна еволюція (DE), а також біоінспірованим методам, зокрема оптимізації на основі мурашиних колоній (ACO) та алгоритмам рою часток (PSO).

У процесі аналізу систематизовано основні переваги та обмеження кожного з підходів, оцінено їхню придатність до розв'язання задач реального часу та групової координації. Для зручності порівняння сформовано узагальнювальну таблицю характеристик алгоритмів. Висновки роботи підтверджують, що оптимальний вибір алгоритму залежить від характеру місії, складності середовища та обмежень обчислювальних ресурсів. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні систем автономного керування БПЛА в умовах зростаючих вимог до швидкості, точності та надійності.

Ключові слова: БПЛА, планування траєкторії, оптимізація, динамічне середовище.

KOSTENKO Vitalii

National Aerospace University «KhAI»

ANALYSIS OF METHODS AND ALGORITHMS FOR TRAJECTORY PLANNING IN MULTI-UAV APPLICATIONS

The paper provides a comprehensive analysis of modern methods and algorithms for trajectory planning in multi-UAV (Unmanned Aerial Vehicle) systems, emphasizing their relevance in both military and civilian applications. Traditional approaches, including graph-based methods such as A* and sampling-based methods like Rapidly-exploring Random Tree (RRT), are examined with regard to their computational efficiency, adaptability, and limitations in dynamic environments. The study highlights the increasing importance of intelligent techniques, particularly evolutionary algorithms such as Genetic Algorithms (GA) and Differential Evolution (DE), as well as bio-inspired methods like Ant Colony Optimization (ACO) and Particle Swarm Optimization (PSO). These algorithms are evaluated in terms of their ability to address challenges related to real-time planning, multi-agent coordination, scalability, and resilience to dynamic changes.

The article identifies key factors that critically affect UAV trajectory planning: mission type, obstacle complexity, communication reliability, energy and computational constraints, and the ability to replan under uncertain conditions. A comparative analysis is presented, summarizing the advantages, drawbacks, and application domains of each algorithm. The results show that classical methods remain efficient in static or partially known environments, whereas intelligent approaches demonstrate greater flexibility and global optimization capabilities in complex, dynamic scenarios. However, their high computational demands may limit applicability in real-time missions.

The study concludes that the choice of algorithm must be guided by the nature of the mission, environmental complexity, and available resources. Future research directions include the development of hybrid solutions combining classical and intelligent methods, adaptive algorithms capable of real-time decision-making under uncertainty, and resilient architectures for large-scale UAV swarms. Such advancements will enhance autonomy, reliability, and efficiency of UAV applications in both defense and civilian sectors.

Keywords: UAV, trajectory planning, optimization, dynamic environment.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Перебіг російсько-української війни тільки підкреслив важливість застосування безпілотних літальних апаратів. На сьогодні БПЛА використовуються у військовій справі для розвідки та моніторингу, доставки вантажів, ураження цілей тощо. Їх стрімкий розвиток також зумовив поширення і у цивільній сфері застосування. Зокрема, вони широко використовуються у сільському господарстві для моніторингу посівів, у пошуково-рятувальних операціях, екологічному нагляді, логістиці, містобудуванні. Ефективність виконання тієї чи іншої задачі як окремим БПЛА, так і формацією напряму залежить від якості планування траєкторії, що є складною інженерною задачею. Вона повинна враховувати низку факторів: наявність перешкод, обмеження за енергоспоживанням, динаміку середовища, погодні умови, координовану роботу, обмеження по часу виконання завдання, аеродинамічні та маневрові характеристики кожного БПЛА.

Особливої складності набуває планування траєкторій для групового застосування БПЛА. Із зростанням кількості дронів простір можливих рішень збільшується експоненційно, що ускладнює пошук ефективних

маршрутів у реальному часі. У такій ситуації ключову роль відіграє вибір алгоритму планування, від якого залежить здатність системи забезпечити адаптивність, обчислювальну ефективність і досягнення поставлених цілей.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Протягом останніх років спостерігається зростання наукового інтересу до задач планування маршрутів та оптимізації траєкторій безпілотних літальних апаратів. Це підтверджується зростанням кількості публікацій на відповідну тематику (Рис. 1), що відображає нагальну потребу в ефективних рішеннях для застосування БПЛА в реальних умовах.



Рис. 1. Динаміка наукових публікацій у 2000–2024 р.

У роботах [1–3] розглядаються методи планування траєкторій в умовах складного середовища із використанням вдосконалених алгоритмів A^* та швидкодіючого динамічного віконного підходу (DWA), що дозволяють враховувати змінні перешкоди, тривимірну конфігурацію простору та обмеження самих апаратів.

Значна кількість праць присвячена адаптації та покращенню алгоритмів RRT та їх варіантів для задач групового планування [4–8]. У роботах [5; 6] вдосконалено RRT шляхом інтеграції механізмів двостороннього пошуку та мінімізації динамічних витрат, що дозволяє формувати згладжені й фізично здійсненні траєкторії для рою БПЛА.

Генетичні алгоритми (GA) також активно застосовуються для розв’язання задач глобального планування маршрутів, особливо в сценаріях групового застосування [9–12]. У роботах [10; 11] розроблено ефективні методи розподілу завдань між кількома БПЛА, що дозволяють зменшити дублювання маршрутів і підвищити ефективність використання ресурсів.

Останніми роками також активно розвивається напрям застосування диференціальної еволюції (DE) та її гібридних варіантів. У працях [13–18] запропоновано поєднання DE з іншими метаевристичними підходами — сірою вовчою оптимізацією (GWO), феєрверковим алгоритмом — для забезпечення гнучкого планування в умовах змінного рельєфу.

Інший важливий напрямок становлять алгоритми, засновані на модифікованому методі мурашиних колоній (ACO), що демонструють високу ефективність при роботі в умовах численних перешкод. У дослідженнях [19–22] показано, що вдосконалені варіації ACO дозволяють зменшити довжину маршруту та час планування, а також підвищити стійкість до локальних мінімумів.

Дослідження із застосуванням рою часток (PSO) демонструють переваги у швидкій адаптації до змін у середовищі при плануванні для групи БПЛА. Роботи [25–27] фокусуються на плануванні траєкторій для формацій, з урахуванням вимог до уникнення зіткнень, дотримання структури рою та розподілу навантаження.

Мета статті полягає в всебічному аналізі популярних алгоритмів планування траєкторії польоту БПЛА, узагальненні викликів та перспектив відповідно до актуальних вимог.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Планування траєкторій для групи БПЛА є складним завданням, що охоплює широкий спектр технічних і організаційних аспектів. Ефективність його реалізації значною мірою залежить від урахування ключових факторів, що впливають на поведінку дронів в реальних умовах. Основні чинники, які мають вирішальне значення при плануванні траєкторій для групового застосування БПЛА:

- Тип та ціль завдання. Тип місії (моніторинг, доставка, картографування, розвідка, ураження тощо) визначає допустимий рівень ризику, щільність формації, пріоритети маршруту та вимоги до синхронізації дій. Це напряму впливає на вибір і оптимізацію траєкторій для кожного БПЛА та рою загалом.

- Перешкоди та складність середовища. Планування траєкторій повинно враховувати наявність статичних (будівлі, дерева, ЛЕП) і динамічних перешкод (інші БПЛА, птахи тощо).
- Комунікація та координація формації. Стабільний зв'язок між дронами та з наземною станцією є критичним для синхронної дії. Проблеми включають затримки, глушіння, перешкоди, а також потребу в автономності та здатності до самовідновлення після втрати окремих одиниць.
- Врахування фізичних обмежень БПЛА. Рух кожного дрону обмежений мінімальним радіусом повороту, максимальною швидкістю, кутами крену тощо.
- Обмеження енергетичних і обчислювальних ресурсів. Планування повинно враховувати обмежену ємність батареї, масу та об'єм корисного навантаження, похибки сенсорів, а також наявність обмежених обчислювальних ресурсів для роботи в реальному часі.
- Адаптивність і перепланування в реальному часі. Алгоритми повинні швидко реагувати на зміну умов (появу нових перешкод, зміну цілей, втрату апаратів).
- Масштабованість системи. Зі збільшенням кількості дронів зростають обсяги переданих даних і складність обчислень. Необхідні масштабовані рішення для підтримки ефективної роботи великого рою.

Упродовж останніх десятиліть велика увага приділяється класичним методам планування траєкторій, зокрема алгоритмам пошуку на графах A^* та методам, що базуються на випадковому дослідженні простору, як Rapidly-exploring Random Tree (RRT). Ці підходи демонструють високу ефективність у побудові допустимих траєкторій у відомих або частково відомих середовищах. Традиційні методи, як правило, передбачають попереднє створення картографічної моделі, яка дискретизується у вигляді графа або простору конфігурацій. Після цього алгоритм здійснює пошук оптимального або допустимого шляху до цільової точки з урахуванням заданих обмежень. У контексті застосування рою БПЛА такі алгоритми можуть забезпечити глобальне планування траєкторій з урахуванням конфігурації середовища, статичних перешкод та навігаційних обмежень.

Алгоритм A^* використовує евристичну функцію для оцінки потенційної вартості кожної точки шляху, що дозволяє ефективно знаходити оптимальний маршрут. Його сильними сторонами є висока швидкість обчислень і здатність адаптуватися до різних конфігурацій середовища, зокрема при плануванні маршрутів для БПЛА. Однак при роботі у тривимірному просторі або з великою кількістю цілей його продуктивність може знижуватись через збільшення кількості вузлів і складності обчислень.

Для подолання цих недоліків було запропоновано низку удосконалень. В роботі [1] було модифіковано евристичну функцію додаванням вагових коефіцієнтів для врахування складності середовища. Також алгоритм реалізує обробку нерегулярних та складних форм перешкод що підвищує точність моделювання простору та зменшує кількість зайвих поворотів.

У статті [2] представлено комбінований підхід на основі A^* і методу динамічного вікна (DWA). Завдяки використанню алгоритму Брезенхема для вибору ключових точок маршруту, динамічної зміни ваг залежно від перешкод та адаптивної евристики вдалося досягти зростання точності та скорочення довжини шляху.

У роботі [3] було запропоновано гібридну модель, де A^* застосовується для побудови початкового маршруту у складному 3D-середовищі, а подальша оптимізація виконується за допомогою FPA (алгоритму запилення квіток). Така комбінація забезпечує баланс між швидкістю знаходження допустимого шляху та подальшим покращенням його якості.

Алгоритм **Rapidly-exploring Random Tree (RRT)** є інкрементальним методом пошуку шляху, заснованим на випадковій вибірці. Його основна перевага полягає у простоті реалізації та відсутності потреби в складному налаштуванні параметрів, що робить його ефективним для задач з високою розмірністю та складною конфігурацією середовища. RRT починає пошук із початкової точки, що розглядається як корінь дерева, і поступово розширює дерево шляхом випадкового додавання нових вузлів. Такий підхід дозволяє алгоритму швидко охопити весь простір станів, водночас ураховуючи динамічні обмеження системи, що забезпечує фізично реалізовані траєкторії [4].

Попри переваги, RRT має і певні обмеження. Зокрема, траєкторії складаються з послідовних лінійних сегментів, що робить шлях нерівномірним і непридатним до прямого виконання без згладжування. Крім того, випадковість пошуку може призводити до повільної збіжності та потреби в значній кількості ітерацій для знаходження оптимального або навіть прийнятного маршруту [5].

У відповідь на ці виклики було запропоновано низку удосконалень алгоритму, таких як бідирекційне розширення [6], обрізання траєкторій [7] та згладжування шляху за допомогою мінімізації прискорення [8], що покращують якість маршруту та ефективність обчислень. Хоча застосування алгоритму RRT в динамічних середовищах може потребувати значних обчислювальних ресурсів, він залишається надзвичайно ефективним у статичних або слабо змінюваних умовах завдяки своїй адаптивності та масштабованості.

Окрему увагу варто приділити інтелектуальним підходам, насамперед еволюційним алгоритмам, таким як генетичні алгоритми (GA) та диференціальна еволюція (DE), а також біоінспірованим методам, зокрема оптимізації на основі мурашиних колоній (ACO) та алгоритмам рою часток (PSO).

Генетичний алгоритм (GA) є евристичним методом пошуку, що базується на принципах природного добору та генетики. Цей підхід ефективний для розв'язання задач оптимізації з великим і складним простором можливих рішень. У контексті планування траєкторій БПЛА генетичні алгоритми застосовуються для пошуку оптимальних або близьких до оптимальних маршрутів шляхом ітеративного формування та вдосконалення популяції можливих рішень упродовж кількох поколінь.

Основними операторами GA є селекція, кросингвер і мутація, що забезпечують еволюційне вдосконалення траєкторій згідно із заданою цільовою функцією. Зазвичай така функція враховує довжину маршруту, енергоспоживання, уникнення зіткнень та інші фактори. З покоління в покоління найкращі індивіди (маршрути) обираються для схрещування та мутації, що дозволяє уникати локальних екстремумів і ефективно досліджувати простір рішень.

Останні дослідження активно застосовують GA для складних задач багатодронового планування. Наприклад, в роботі [9] було представлено паралельний генетичний алгоритм планування маршрутів для групи БПЛА, реалізований на архітектурі CUDA. Це дозволило прискорити обчислення, що є критично важливим при роботі з великими кількостями даних і складними сценаріями. У роботі [10] GA застосували для кооперативного планування траєкторій у багатобазових системах БПЛА, оптимізуючи одночасне виконання багатьох завдань з урахуванням обмежень.

В статті [11] використовували GA для пошуку морських цілей групою БПЛА, демонструючи адаптивність алгоритму в динамічних умовах середовища. Крім того, в роботі [12] було запропоновано поєднання GA з кривими Безье для формування плавних та безпечних маршрутів, що є актуальним для реалізації автономних польотів.

Підсумовуючи, попри високу ефективність та гнучкість, GA потребують значних обчислювальних ресурсів і можуть стикатися з викликами при роботі в непередбачуваних або швидкозмінних умовах. Однак їх здатність працювати з багатьма цілями й адаптуватися до різних типів задач робить їх популярним вибором для сучасних систем планування БПЛА.

Алгоритм диференціальної еволюції (DE) належить до глобальних методів оптимізації та базується на комбінації мутації, кросингверу та відбору. Його відмінною рисою є формування мутаційного вектора на основі різниці між випадково обраними індивідами популяції, що сприяє ефективному дослідженню простору рішень. Порівняно з генетичними алгоритмами, DE зазвичай забезпечує швидшу збіжність і простішу реалізацію, завдяки чому став популярним у задачах планування траєкторій, особливо у багатовимірних і нелінійних середовищах.

Попри високу ефективність у глобальному пошуку, базова версія DE демонструє залежність від вибору параметрів та вимагає значної кількості ітерацій для досягнення стабільного результату. Це обмежує його застосування в режимі реального часу, особливо в умовах динамічних змін середовища.

Для подолання цих обмежень були розроблені численні модифікації DE. Зокрема, у дослідженні [13] наведено вдосконалений DE з обмеженнями для глобального планування маршрутів БПЛА. У роботі [14] представлено покращений алгоритм DE для планування 3D-траєкторій у складній гірській місцевості, який поєднує декілька стратегій оптимізації. У дослідженні [15] запропоновано гібридизацію DE з адаптивною модифікацією алгоритму рою часток, що дозволило покращити ефективність у складних просторових умовах. В роботі [16] реалізовано поєднання DE з алгоритмом сірих вовків, досягнувши покращення збіжності й стабільності траєкторій. У статті [17] DE комбінується з алгоритмом феєрверків, що дозволяє зменшити ризик потрапляння в локальні оптимуми. Робота [18] пропонує підхід з використанням "точки згину" (knee point) для балансування між конкурентними критеріями оптимізації.

Загалом, удосконалені варіанти алгоритму диференціальної еволюції поєднують високу ефективність глобального пошуку з помірною адаптивністю, що робить їх придатними для формування траєкторій БПЛА в складних та динамічних умовах. Водночас значні обчислювальні витрати потребують оптимізації для забезпечення обчислень у режимі реального часу.

Алгоритм оптимізації мурашиної колонії (ACO) моделює кооперативну поведінку реальних мурах, які знаходять найкоротший шлях до джерела їжі через взаємодію та накопичення феромонів. У дослідженні [19] представлено модифіковану версію ACO для планування траєкторій БПЛА. Зокрема, авторами реалізовано динамічну евристичну функцію, удосконалено механізм переходу між вузлами, а також запроваджено згладжування маршрутів за допомогою кубічних B-сплайнів. Такі оновлення сприяють швидшій збіжності алгоритму та покращенню плавності траєкторій. Проте застосування алгоритму у змінному середовищі обмежується його високими обчислювальними витратами, що ускладнює роботу в реальному часі.

Подальші вдосконалення зосередилися на оптимізації правил оновлення феромонів та коригуванні вагових коефіцієнтів в евристичній оцінці. Результати показали покращення у швидкості збіжності та плавності маршрутів у 3D-просторі. Водночас, незважаючи на точність, алгоритм зберігає високу

обчислювальну складність та демонструє посередню ефективність у динамічних умовах, особливо при наявності раптових перешкод [20].

У роботі [21] запропоновано підхід, що базується на використанні провідного агента з пріоритетами та механізму феромонного оновлення елітними особинами. Цей метод дозволяє формувати більш ефективні маршрути та зменшити кількість ітерацій, необхідних для досягнення задовільного результату. Проте і в цьому випадку зберігається залежність від стабільності середовища, що обмежує гнучкість алгоритму в умовах реального часу.

Ще одну версію вдосконаленого АСО-методу було представлено в дослідженні [22], де впроваджено багатофакторну евристику та введено обмеження на рівень феромонів. Це дозволило уникнути передчасної збіжності до локальних екстремумів та скоротити загальну довжину маршруту. Такий підхід виявився ефективним у складних конфігураціях простору, але водночас ускладнив реалізацію алгоритму в динамічних середовищах, що швидко змінюються.

Загалом, АСО-алгоритм демонструє гнучкість у задачах з високою складністю та варіативністю, однак його застосування в реальному часі обмежується високими обчислювальними витратами. Завдяки здатності адаптуватися до складної просторової структури та забезпечувати помірну оптимізацію траєкторій, АСО є перспективним підходом для планування руху БПЛА в складних, хоча й відносно стабільних умовах.

Методу рою часток (PSO) моделює поведінку групи часток, які колективно досліджують простір можливих рішень, орієнтуючись як на власний досвід, так і на найкращі знайдені позиції інших часток у популяції. Завдяки високій швидкості збіжності, простоті реалізації та здатності до глобального пошуку, алгоритм PSO активно використовується для планування траєкторій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в статичних та частково змінних середовищах. Водночас основними обмеженнями PSO залишаються чутливість до параметрів і ризик передчасної збіжності до локальних екстремумів, що потребує додаткових механізмів адаптації в умовах динамічної обстановки.

У науковій літературі запропоновано низку вдосконалень методу рою часток (PSO), спрямованих на підвищення його ефективності в задачах планування траєкторій безпілотних літальних апаратів. Так, в статті [23] адаптували anytime-алгоритми для сценаріїв із кількома БПЛА, де критичною є можливість отримання розв'язку навіть у разі обмеженого часу. Цей підхід дозволяє поступово покращувати маршрут у міру доступності нових обчислювальних ресурсів, що важливо для систем реального часу. В дослідженні [24] реалізовано PSO у 4D-просторі, включаючи часовий вимір, що дало змогу ефективно уникати зіткнень у динамічному середовищі з просторово-часовими обмеженнями. В роботі [25] запропонували всебічно покращений варіант PSO, який демонструє високу швидкість збіжності та якість рішень, особливо в завданнях формування рою у просторах великої розмірності. Подальші вдосконалення запропоновані в дослідженні [26], де розроблено ієрархічну версію PSO, яка враховує різні рівні загроз і дозволяє адаптивно планувати маршрути в умовах змінного ризику. В роботі [27] було поєднано класичний PSO з адаптивними ваговими коефіцієнтами і диференціальною еволюцією, створивши гібридний алгоритм NTPSO-ADE. Такий підхід забезпечив вищу здатність до глобальної оптимізації, адаптивність до змін середовища та ефективну координацію кількох дронів.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз методів та алгоритмів планування траєкторій БПЛА

Алгоритми	Складність	Переваги	Обмеження	Особливості застосування
Традиційні	A*	Помірна	Висока точність; швидкий пошук у відомих середовищах; надійна навігація	Зниження ефективності в 3D і при великій кількості цілей; високе використання пам'яті
	RRT	Низька	Швидке планування в складних конфігураційних просторах, придатний для високимірних задач	Складні обчислення в динаміці, можливі неефективні траєкторії
Інтелектуальні	GA	Висока	Гнучкість, масштабованість, ефективність при багатодроновому плануванні	Високі обчислювальні витрати; залежність від параметрів; складність у динамічних умовах
	DE	Висока	Висока швидкість збіжності; простота реалізації; точна оптимізація	Обмежена адаптивність у реальному часі; залежність від вибору параметрів
	ACO	Помірна	Гнучкість; здатність до пошуку в складних конфігураціях	Високі обчислювальні витрати; низька ефективність у швидкозмінних умовах
	PSO	Помірна	Висока швидкість збіжності; ефективність у формуванні рою	Застригання в локальних оптимумах
				Статичні та динамічні середовища. Підходить для багатодронових задач з перешкодами
				Статичні та динамічні середовища. Задачі покриття, узгодженого руху, планування в 3D з часовими обмеженнями

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У статті проведено аналіз основних підходів до планування траєкторій для групового застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Розглянуто як класичні алгоритми (A*, RRT), так і інтелектуальні методи — еволюційні (GA, DE) та біоінспіровані (ACO, PSO).

Окремо проаналізовано ключові фактори, які впливають на якість планування траєкторій у складі формації БПЛА: тип і цілі завдання, наявність статичних і динамічних перешкод, обмеження по енергії, зв'язку, а також масштабованість та здатність до перепланування. Результати аналізу показують, що вибір алгоритму має здійснюватися з урахуванням специфіки середовища, вимог до швидкості та точності, а також доступних обчислювальних ресурсів.

Класичні алгоритми, такі як A* та RRT, демонструють високу ефективність у відомих або частково відомих середовищах, особливо у статичних умовах. Їхні удосконалення дозволяють зменшити обчислювальну складність та покращити згладженість траєкторій. Проте вони можуть бути менш ефективними в умовах високої динаміки та великої кількості агентів.

Інтелектуальні підходи, включно з генетичними алгоритмами (GA), диференціальною еволюцією (DE), методом рою часток (PSO) та алгоритмами мурашиних колоній (ACO) забезпечують більшу гнучкість у складних і змінних середовищах, демонструючи здатність до глобальної оптимізації. Однак ці методи часто вимагають значних обчислювальних ресурсів, що може обмежувати їх використання в режимі реального часу.

Подальші дослідження у сфері планування траєкторій для групового застосування БПЛА мають охоплювати кілька ключових напрямів. Зокрема, актуальною є розробка алгоритмів, здатних до адаптивного прийняття рішень у режимі реального часу з урахуванням обмежених обчислювальних ресурсів та змінного середовища. Перспективним також є вдосконалення технологій виявлення динамічних перешкод, інтеграція планування з методами штучного інтелекту, розробка гібридних обчислювальних структур, а також забезпечення відмовостійкості та ефективного розподілу ресурсів у багатодронових системах. Реалізація цих підходів сприятиме підвищенню автономності, надійності та ефективності застосування БПЛА в реальних умовах.

Література

1. X. Bai, H. Jiang, J. Cui, K. Lu, P. Chen, and M. Zhang, "UAV Path Planning Based on Improved A* and DWA Algorithms," *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2021, Article ID 4511252, 2021.
2. He, Y., Hou, T., & Wan, M. (2024). A new method for unmanned aerial vehicle path planning in complex environments. *Scientific Reports*, 14(1), 9257.
3. A. A. Kareem, M. J. Mohamed, and B. K. Oleiwi, "Unmanned aerial vehicle path planning in a 3D environment using a hybrid algorithm," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 6020–6020, Apr. 2024. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i2.6020>
4. Noreen, I., Khan, A., & Habib, Z. (2016). Optimal Path Planning using RRT Based Approaches: A Survey and Future Directions.
5. Zu, W. et al. (2018). Multi-UAVs cooperative path planning method based on improved RRT algorithm.
6. Huang, J. & Sun, W. (2020). A method of feasible trajectory planning for UAV formation based on bi-directional fast search tree.
7. Shi, B. et al. (2020). UAV Trajectory Generation Based on Integration of RRT and Minimum Snap Algorithms.
8. Chen, J. & Yu, J. (2021). An Improved Path Planning Algorithm for UAV Based on RRT.
9. Cekmez, U.; Ozsiginan, M.; Sahingoz, O.K. (2016). Multi-UAV path planning with parallel genetic algorithms on CUDA architecture. *Proceedings of the 2016 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, pp. 1079–1086.
10. Cao, Y.; Wei, W.; Bai, Y.; Qiao, H. (2019). Multi-base multi-UAV cooperative reconnaissance path planning with genetic algorithm. *Clust. Comput.*, 22, 5175–5184.
11. Li, L.; Gu, Q.; Liu, L. (2020). Research on path planning algorithm for multi-UAV maritime targets search based on genetic algorithm. *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*, pp. 840–843.
12. Sahingoz, O.K. (2013). Flyable path planning for a multi-UAV system with Genetic Algorithms and Bezier curves. *Proceedings of the 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 41–48.
13. Zhang, X., & Duan, H. (2015). An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning. *Applied Soft Computing*, 26, 270–284. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.10.025>
14. Zhang, M., Han, Y., Chen, S., Liu, M., He, Z., & Pan, N. (2023). A Multi-Strategy Improved Differential Evolution algorithm for UAV 3D trajectory planning in complex mountainous environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 125, 106672.

15. Huang, C., Zhou, X., Ran, X., Wang, J., Chen, H., & Deng, W. (2023). Adaptive cylinder vector particle swarm optimization with differential evolution for UAV path planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105942.
16. Yu, X., Jiang, N., Wang, X., & Li, M. (2022). A hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and differential evolution for UAV path planning. *Expert Systems with Applications*, 215, 119327. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119327>
17. Zhang, X., & Zhang, X. (2022). UAV Path Planning Based on Hybrid Differential Evolution with Fireworks Algorithm. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 13267, pp. 354–364. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11301-2_30
18. Yu, X., Li, C., & Yen, G. G. (2021). A knee-guided differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle path planning in disaster management. *Applied Soft Computing*, 98, 106857. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106857>
19. Qi, D., Zhang, Z., & Zhang, Q. (2022). Path planning of multirotor UAV based on the improved ant colony algorithm. *Journal of Robotics*, 2022, 2168964.
20. Li, G., & Li, Y. (2023). UAV path planning based on improved ant colony algorithm. In *Proceedings of the Second International Conference on Algorithms, Microchips, and Network Applications (AMNA 2023)* (pp. 59–63). Zhengzhou, China.
21. Huan, L., Ning, Z., & Qiang, L. (2021). UAV path planning based on an improved ant colony algorithm. In *Proceedings of the 2021 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)* (pp. 357–360). Wuhan, China: IEEE.
22. Song, H., Jia, M., Lian, Y., Fan, Y., & Liang, K. (2022). UAV path planning based on an improved ant colony algorithm. *Journal of Electronic Research and Application*, 6, 10–25.
23. Sujit, P.; Beard, R. (2009). Multiple UAV path planning using anytime algorithms. *Proceedings of the 2009 American Control Conference*, pp. 2978–2983.
24. Alejo, D.; Cobano, J.; Heredia, G.; Ollero, A. (2013). Particle swarm optimization for collision-free 4D trajectory planning in UAVs. *Proceedings of the 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 298–307.
25. Shao, S.; Peng, Y.; He, C.; Du, Y. (2020). Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization. *ISA Transactions*, 97, 415–430.
26. Chung, W. et al. (2022). Hierarchical Particle Swarm Optimization for Multi UAV Waypoints Planning under Various Threats. *Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 50, 385–391.
27. Lu, L.; Dai, J.; Ying, J. (2022). Distributed multi-UAV cooperation for path planning by an NTVPSO-ADE algorithm. *Proceedings of the 2022 41st Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 5973–5978.

References

1. X. Bai, H. Jiang, J. Cui, K. Lu, P. Chen, and M. Zhang, "UAV Path Planning Based on Improved A* and DWA Algorithms," *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2021, Article ID 4511252, 2021.
2. He, Y., Hou, T., & Wan, M. (2024). A new method for unmanned aerial vehicle path planning in complex environments. *Scientific Reports*, 14(1), 9257.
3. A. A. Kareem, M. J. Mohamed, and B. K. Olewi, "Unmanned aerial vehicle path planning in a 3D environment using a hybrid algorithm," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 6020–6020, Apr. 2024. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i2.6020>
4. Noreen, I., Khan, A., & Habib, Z. (2016). Optimal Path Planning using RRT Based Approaches: A Survey and Future Directions.
5. Zu, W. et al. (2018). Multi-UAVs cooperative path planning method based on improved RRT algorithm.
6. Huang, J. & Sun, W. (2020). A method of feasible trajectory planning for UAV formation based on bi-directional fast search tree.
7. Shi, B. et al. (2020). UAV Trajectory Generation Based on Integration of RRT and Minimum Snap Algorithms.
8. Chen, J. & Yu, J. (2021). An Improved Path Planning Algorithm for UAV Based on RRT.
9. Cekmez, U.; Ozsiginan, M.; Sahingoz, O.K. (2016). Multi-UAV path planning with parallel genetic algorithms on CUDA architecture. *Proceedings of the 2016 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, pp. 1079–1086.
10. Cao, Y.; Wei, W.; Bai, Y.; Qiao, H. (2019). Multi-base multi-UAV cooperative reconnaissance path planning with genetic algorithm. *Clust. Comput.*, 22, 5175–5184.
11. Li, L.; Gu, Q.; Liu, L. (2020). Research on path planning algorithm for multi-UAV maritime targets search based on genetic algorithm. *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*, pp. 840–843.
12. Sahingoz, O.K. (2013). Flyable path planning for a multi-UAV system with Genetic Algorithms and Bezier curves. *Proceedings of the 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 41–48.
13. Zhang, X., & Duan, H. (2015). An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning. *Applied Soft Computing*, 26, 270–284. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.10.025>
14. Zhang, M., Han, Y., Chen, S., Liu, M., He, Z., & Pan, N. (2023). A Multi-Strategy Improved Differential Evolution algorithm for UAV 3D trajectory planning in complex mountainous environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 125, 106672.
15. Huang, C., Zhou, X., Ran, X., Wang, J., Chen, H., & Deng, W. (2023). Adaptive cylinder vector particle swarm optimization with differential evolution for UAV path planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105942.
16. Yu, X., Jiang, N., Wang, X., & Li, M. (2022). A hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and differential evolution for UAV path planning. *Expert Systems with Applications*, 215, 119327. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119327>
17. Zhang, X., & Zhang, X. (2022). UAV Path Planning Based on Hybrid Differential Evolution with Fireworks Algorithm. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 13267, pp. 354–364. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11301-2_30

18. Yu, X., Li, C., & Yen, G. G. (2021). A knee-guided differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle path planning in disaster management. *Applied Soft Computing*, 98, 106857. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106857>
19. Qi, D., Zhang, Z., & Zhang, Q. (2022). Path planning of multirotor UAV based on the improved ant colony algorithm. *Journal of Robotics*, 2022, 2168964.
20. Li, G., & Li, Y. (2023). UAV path planning based on improved ant colony algorithm. In *Proceedings of the Second International Conference on Algorithms, Microchips, and Network Applications (AMNA 2023)* (pp. 59–63). Zhengzhou, China.
21. Huan, L., Ning, Z., & Qiang, L. (2021). UAV path planning based on an improved ant colony algorithm. In *Proceedings of the 2021 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)* (pp. 357–360). Wuhan, China: IEEE.
22. Song, H., Jia, M., Lian, Y., Fan, Y., & Liang, K. (2022). UAV path planning based on an improved ant colony algorithm. *Journal of Electronic Research and Application*, 6, 10–25.
23. Sujit, P.; Beard, R. (2009). Multiple UAV path planning using anytime algorithms. *Proceedings of the 2009 American Control Conference*, pp. 2978–2983.
24. Alejo, D.; Cobano, J.; Heredia, G.; Ollero, A. (2013). Particle swarm optimization for collision-free 4D trajectory planning in UAVs. *Proceedings of the 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 298–307.
25. Shao, S.; Peng, Y.; He, C.; Du, Y. (2020). Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization. *ISA Transactions*, 97, 415–430.
26. Chung, W. et al. (2022). Hierarchical Particle Swarm Optimization for Multi UAV Waypoints Planning under Various Threats. *Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 50, 385–391.
27. Lu, L.; Dai, J.; Ying, J. (2022). Distributed multi-UAV cooperation for path planning by an NTVPSO-ADE algorithm. *Proceedings of the 2022 41st Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 5973–5978.