

Я. А. Кулик¹
А. Ю. Барановська¹
М. В. Барабан¹

АДАПТАЦІЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДО ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ НАЗЕМНИХ РОБОТІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Досліджено можливості використання генетичних алгоритмів для оптимізації траєкторії руху безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з метою підвищення точності та ефективності оцінки якості повітря в різних умовах. Одним з головних завдань є забезпечення адаптивної автономної навігації БПЛА в динамічних середовищах, де параметри, пов'язані з забрудненням повітря, можуть змінюватися в реальному часі під впливом зовнішніх чинників, таких як погодні умови, географічні особливості або рівень антропогенного навантаження.

Генетичні алгоритми завдяки своїй здатності шукати оптимальні рішення в складних просторах даних можуть ефективно використовуватись для визначення оптимальних маршрутів збору інформації про забруднення повітря. Вони дозволяють БПЛА адаптувати свої траєкторії під поточні умови навколишнього середовища, враховуючи такі фактори, як напрямок і швидкість вітру, рівень забруднення у різних ділянках, наявність природних чи штучних перешкод у міській або сільській місцевості. Завдяки цьому підходу, алгоритми забезпечують злагоджену роботу в групі БПЛА, що дозволяє розподілити зони моніторингу, зібрати точніші дані і швидше реагувати на зміни в середовищі. Проаналізовано як генетичні алгоритми можуть поліпшити процес збирання й оброблення даних для подальшого аналізу якості повітря. Оптимізація траєкторій дозволяє зменшити витрати енергії БПЛА, збільшити обсяг і якість зібраних даних, що зі свого боку підвищує точність оцінок концентрацій шкідливих речовин у повітрі. Через це генетичні алгоритми використовуються як перспективний і ефективний інструмент для підвищення рівня автономності та загальної ефективності безпілотних систем у контексті моніторингу стану повітря в різних середовищах, таких як великі міста, промислові зони, сільськогосподарські території або природні заповідники.

Ключові слова: генетичні алгоритми, безпілотні літальні апарати, алгоритми оптимізації, оптимізація руху, машинне навчання, екологічні проблеми.

Вступ

Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкриває нові можливості для вдосконалення їхнього руху, забезпечуючи точнішу навігацію в складних умовах і оптимізацію маршрутів у реальному часі. Це також дозволяє підвищити ефективність групових польотів БПЛА, забезпечуючи безпечну координацію між ними та мінімізуючи ризик зіткнень. Управління рухом БПЛА є складним завданням через необхідність забезпечення польотів, оптимізації маршрутів та координації в групових польотах. Зміни в умовах навколишнього середовища, такі як погодні умови та наявність перешкод, підвищують вимоги до ефективних алгоритмів для безпечного та ефективного руху БПЛА.

Використання генетичних алгоритмів є перспективним підходом, оскільки вони здатні ефективно розв'язувати складні оптимізаційні задачі в динамічних середовищах, де традиційні методи можуть бути менш ефективними. Через їхню здатність швидко адаптуватися до змін умов навколишнього середовища цей підхід особливо корисний для забезпечення безперебійного та безпечного руху БПЛА. Ці алгоритми дозволяють ефективно вирішувати завдання координації руху в групі, уникнення зіткнень та оптимізації маршрутів у складних і динамічних умовах. У статті досліджуються можливості застосування генетичних алгоритмів для поліпшення руху БПЛА, зокрема їхня адаптація з наземних роботів на безпілотні літальні апарати, з метою підвищення ефективності

ті та безпеки в різних середовищах. У роботі запропоновано вдосконалений критерій оптимізації для генетичного алгоритму, адаптованого до задач керування групами безпілотних літальних апаратів. Формула враховує особливості тривимірного простору, енергоефективність, уникнення зіткнень та безпеку польотів. Результати моделювання підтвердили ефективність підходу, забезпечивши скорочення маршруту.

Актуальність використання генетичних алгоритмів для оптимізації руху наземних роботів

Генетичні алгоритми використовують еволюційний підхід до пошуку оптимальних рішень. Початкова популяція рішень генерується випадковим чином, і потім здійснюються еволюційні операції, такі як селекція, кросовер та мутація, для створення нових поколінь рішень. Цей процес повторюється протягом декількох ітерацій або поки не буде досягнуто заданої умови зупинки [1].

Сучасні наукові дослідження показують, що генетичні алгоритми можуть ефективно використовуватися для оптимізації маршрутів наземних роботів, враховуючи фактори на кшталт відстані, часу, обмежень швидкості та довкілля. Вони також здатні допомогти в плануванні траєкторій руху з урахуванням різних технічних обмежень і вимог. До того ж, ці алгоритми застосовуються для аналізу можливих перешкод на шляху та створення стратегій їхнього уникнення, що сприяє безпечному й ефективному пересуванню роботів у складних умовах.

Генетичні алгоритми є надзвичайно актуальними для оптимізації руху наземних роботів через їхню здатність вирішувати складні завдання у динамічному середовищі. Вони дозволяють роботам адаптуватися до змін у навколишньому середовищі, таких як непередбачувані перешкоди або зміна рельєфу, забезпечуючи пошук оптимальних маршрутів [2].

Однією з важливих переваг є можливість самоорганізації. Роботи можуть координувати свої дії в групі без централізованого управління, що полегшує виконання спільних завдань, таких як пошукові місії чи логістичні операції.

Автономність, яку забезпечують генетичні алгоритми, є ще одним критичним фактором. Роботи можуть ухвалювати рішення незалежно від зовнішнього управління, що важливо для роботи у віддалених або небезпечних зонах. До того ж, інтеграція генетичних алгоритмів з сучасними методами штучного інтелекту, такими як нейронні мережі, значно розширює можливості роботів у сфері навігації та виконання складних завдань. Через це генетичні алгоритми є універсальним інструментом для вдосконалення рухових і координаційних навичок роботів [3].

Проте звичайні генетичні алгоритми мають кілька обмежень, які знижують їхню ефективність у складних завданнях, як планування шляхів для дронів. Основною проблемою є низька різноманітність початкової популяції, що часто веде до недостатньо ефективного пошуку. Також ці алгоритми можуть застрягати в локальних оптимумах, особливо в задачах з великою кількістю параметрів. Їм часто бракує швидкості збіжності та гнучкості для обробки великорозмірних даних. Через це стандартні підходи поступаються модифікованим методам, які враховують локальну оптимізацію чи альтернативні стратегії ініціалізації [4].

Для оцінки ефективності алгоритмів у задачах призначення завдань для багатьох БПЛА проведено експеримент за використання трьох підходів: Генетичного алгоритму (GA), Оптимізації мурашиними колоніями (ACO) та Оптимізації роїв частинок (PSO). На рис. 1 [5] та рис. 2 [5] показані результати експерименту для випадків з великим та ще більшим розміром задачі.

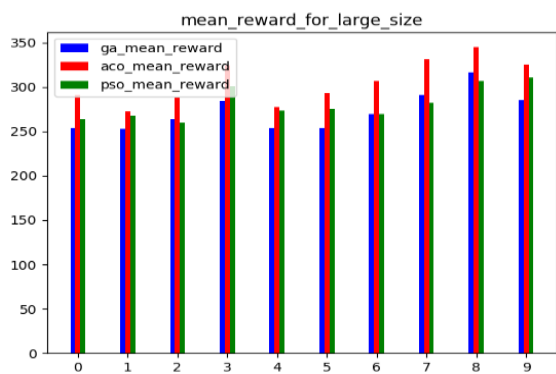


Рис. 1. Результати експерименту для випадків з великим розміром задачі

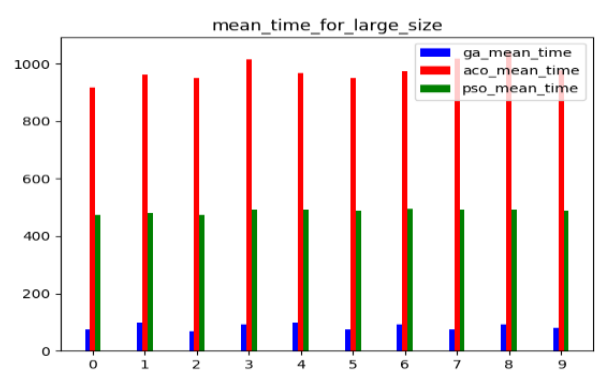


Рис. 2. Результати експерименту для випадків з ще більшим розміром задачі

На рис. 1 ("mean_reward_for_large_size") продемонстровано середню винагороду для кожного з алгоритмів у серії експериментів. Всі три алгоритми показують подібний рівень продуктивності, проте Генетичний алгоритм (GA) демонструє стабільні результати та лише незначно поступається ACO та PSO в окремих експериментах.

На рис. 2 ("mean_time_for_large_size") показано середній час виконання алгоритмів. Генетичний алгоритм (GA) має найкоротший час виконання серед розглянутих підходів, тоді як ACO витрачає суттєво більше часу. PSO посідає проміжну позицію між цими двома підходами. Таким чином, результати експерименту демонструють, що Генетичний алгоритм (GA) є ефективним підходом, який забезпечує хороший баланс між якістю рішення та швидкістю виконання, особливо у випадках з великими розмірами задач.

Застосування генетичний алгоритмів для керування рухом наземних роботів

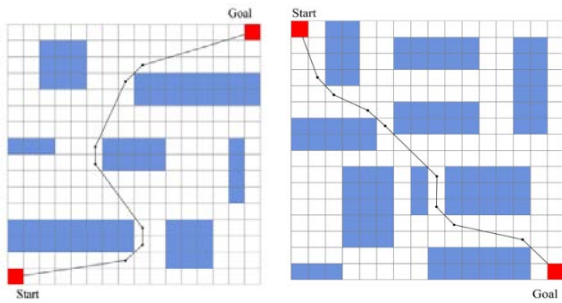


Рис. 3. Схематичне зображення пошуку оптимального шляху між перешкодами на шляху [6]

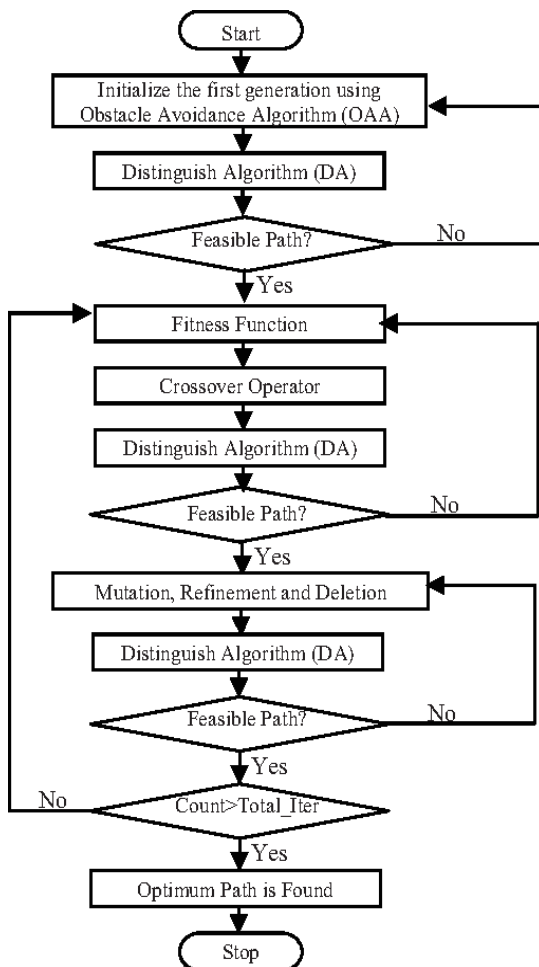


Рис. 4. Блок схема роботи генетичного алгоритму для наземних роботів

Застосування генетичних алгоритмів для керування рухом наземних роботів охоплює значну частину досліджень. Основною задачею наземних роботів є знаходження найкоротшого шляху від стартової точки до цільової точки, уникаючи певних перешкод. Приклад знаходження оптимального шляху показаний на рис. 3.

Процес використання генетичних алгоритмів для уникнення перешкод та знаходження оптимального шляху може бути описаний таким чином:

1. Початкові маршрути можуть бути представлені у вигляді послідовностей руху робота або координат точок, через які робот повинен пройти.

2. Кожен маршрут оцінюється з урахуванням кількості перешкод, які робот повинен уникнути, а також відстані, яку він має пройти. Метою є знаходження найкращого маршруту, який надає оптимальний компроміс між швидкістю та безпекою.

3. Найпристосованіші маршрути вибираються для продовження процесу. Це може бути здійснено шляхом вибору найкращих маршрутів з попередньої популяції.

4. Вибрані маршрути комбінуються між собою, щоб створити нові маршрути. Це може включати в себе обмін частинами маршрутів або випадкове змішування їхніх елементів.

5. Деякі маршрути можуть піддаватися випадковим змінам або додаванню/видаленню деяких точок маршруту. Це допомагає зберегти різноманітність у популяції та допомагає уникнути застрягання в локальних мінімумах.

6. Нові маршрути оцінюються на відповідність поставленим критеріям, таким як відсутність колізій або мінімізація відстані.

7. Цей процес повторюється доки не буде досягнуто критерію завершення, такого як поліпшення результатів або досягнення максимальної кількості ітерацій.

8. Найкращий знайдений маршрут вважається оптимальним для наземного робота і використовується для подальшої навігації в середовищі [7].

Такий підхід дозволяє наземним роботам ефективно уникати перешкод та знаходити оптимальні шляхи в складних середовищах. Схему такого алгоритму показано на рис. 4.

Застосування генетичний алгоритмів для керування рухом БПЛА

У сучасних дослідженнях, а саме в наукових статтях [8] та [9] генетичні алгоритми застосовані для БПЛА у подібному вигляді, з урахуванням додаткових факторів. У статті [8], акцентується на врахуванні уникнення зіткнень, функція оптимізації має вигляд:

$$F_{total} = \alpha \cdot F_{path}(x, y, z) + \beta \cdot F_{collision}, \quad (1)$$

де $F_{path}(x, y, z)$ — функція оптимізації маршруту у тривимірному просторі (координати x, y, z), що включає висоту (z); $F_{collision}$ — функція, що враховує уникнення зіткнень: мінімізує ризик зіткнення з іншими БПЛА або перешкодами у просторі; α, β — вагові коефіцієнти, що визначають значимість кожного фактора у загальній функції.

У статті [8] акцентовано на безпеці польоту, запропоновано вираз

$$F_{total} = \alpha \cdot F_{path}(x, y, z) + g \cdot F_{safety}, \quad (2)$$

де $F_{path}(x, y, z)$ — оптимізація маршруту у тривимірному просторі (як у попередньому випадку); F_{safety} — функція, що відповідає за показник безпеки польоту. Вона включає: дотримання мінімальної відстані до інших об'єктів (БПЛА чи перешкод), забезпечення стабільності та надійності польоту в складних умовах; α, g — вагові коефіцієнти, що визначають вплив відповідних функцій.

Проте обидва підходи мають недоліки, зокрема низьку ефективність для великих площ з малою кількістю БПЛА, що працюють в умовах швидких змін концентрації забруднень через вітер. Пропонується вдосконалити функцію, додавши до неї компоненти, які враховують енергоефективність та швидкість адаптації до динамічних умов середовища.

Перенесення алгоритму з наземних роботів на безпілотні літальні апарати передбачає адаптацію генетичних алгоритмів до тривимірного простору та специфічних характеристик польоту. Оскільки наземні роботи діють у двовимірному середовищі та мають фіксовані умови контакту з поверхнею, БПЛА оперують у складнішій тривимірній сфері з динамічними умовами. Основні етапи перенесення алгоритму можуть включати такі кроки [9]: адаптація координатної системи, розширення цільової функції, адаптація параметрів для кожного окремого БПЛА та для їхньої групи.

Адаптація координатної системи, для якої необхідно включення Z-координати (висоти): на відміну від наземних роботів, які обмежені рухом у площині, БПЛА можуть змінювати висоту. Включення координати Z розширює можливості маневрування, оскільки тепер апарат може підніматися та опускатися для уникнення перешкод, зміни траєкторії або адаптації до різних умов середовища.

Також потрібно врахувати перешкоди в повітрі: у тривимірному просторі присутні не лише перешкоди на землі, як у наземних роботів, але й у повітрі — це можуть бути високі будівлі, дерева або інші БПЛА. Це значно ускладнює планування маршрутів, адже потрібно враховувати можливі зіткнення в різних точках простору. Також потрібно здійснити розширені обчислення — алгоритм має враховувати складність навігації в просторі, де кожна перешкода має тривимірну форму. Він аналізує відстань до кожної перешкоди, визначає можливі зіткнення і вибирає оптимальні шляхи для уникнення перешкод як по горизонталі, так і по вертикалі.

Наступний крок — розширення цільової функції. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) вимагають оптимізації швидкості й висоти для енергетичної ефективності. Генетичні алгоритми враховують ці фактори у цільовій функції, мінімізуючи витрати енергії під час маневрів, таких як підйом або спуск. Водночас вони забезпечують дотримання тривимірної зони безпеки для уникнення зіткнень з іншими БПЛА чи об'єктами. В умовах підвищеної щільності повітряного трафіку, як у міських районах, алгоритми включають аналіз потенційних зіткнень у всьому тривимірному просторі, забезпечуючи безпеку та ефективність польоту.

Використання групи БПЛА дозволяє максимально оптимізувати маршрути для адаптації до змін середовища, що забезпечує точніший і актуальний збір даних (рис. 5). У груповій роботі БПЛА важливо забезпечити ефективну координацію між апаратами для уникнення зіткнень і повторення маршрутів. Для цього необхідно враховувати як індивідуальні, так і колективні параметри для досягнення ефективного маршруту без зіткнень та мінімізації витрат [10].

Адаптація параметрів для кожного окремого БПЛА включає такі етапи:

- вага безпеки w , інтегрується в цільову функцію як параметр, що визначає вагу елемента безпеки відносно інших критеріїв, таких як довжина шляху. Вона визначає, наскільки важливим є уникнення небезпек у порівнянні з іншими факторами. Вибір значення базується на характеристиках операційного середовища та специфіці місії. Високе значення підвищує значимість параметрів безпеки, що призводить до збільшення відстані між БПЛА і потенційними перешкодами, тим самим знижуючи ризик колізій;

- визначення ваги довжини шляху: вага довжини шляху, що позначається як w_d , інтегрується в цільову функцію як множник, що визначає пріоритет коротшого маршруту. Вона впливає на баланс між оптимізацією маршруту та забезпеченням. Зменшення значення збільшує пріоритет скорочення довжини шляху, що критично для завдань, які потребують швидкої доставки чи зменшення витрат енергії;

- кількість ітерацій: визначає кількість циклів, протягом яких генетичний алгоритм виконує еволюційний процес оптимізації. Оптимальна кількість ітерацій необхідна для забезпечення досягнення збалансованих і якісних результатів. Недостатня кількість ітерацій може призвести до неоптимального пошуку простору рішень і, як наслідок, до неоптимальних рішень.

- розмір популяції: визначає кількість можливих рішень, що розглядаються в кожній ітерації. Великі популяції забезпечують більшу різноманітність рішень та знижують ймовірність потрапляння в локальні мінімуми, проте потребують більше обчислювальних ресурсів. Розмір популяції має бути достатнім для досягнення глобальних оптимумів, але в межах обчислювальних можливостей системи.

Після успішного виконання попередніх кроків можна здійснити адаптацію параметрів для групи БПЛА, що включає матричний підрахунок колізій (dc). У груповому сценарії необхідно враховувати ймовірність колізій між БПЛА. На першому етапі для кожного БПЛА встановлюються початкові параметри його позиції p_i , швидкості v_i , та траєкторії t_i . Для всіх БПЛА ці параметри формують множину вхідних даних, яка визначає їхнє просторове положення та маршрут. Далі визначаються зони потенційного зіткнення, що оточують кожний БПЛА, які представляються у вигляді сферичної області радіуса r_{safe} . Радіус безпеки r_{safe} визначається на основі динамічних характеристик БПЛА, таких як швидкість, можливість маневрування, та мінімальна допустима відстань між апаратами. Для кожної пари БПЛА формується матриця колізій, де кожен елемент матриці представляє оцінку ймовірності зіткнення між i -м та j -м БПЛА. Визначення цих значень ґрунтується на декількох параметрах: відстань між поточними позиціями БПЛА, зміна відстані між траєкторіями.

Якщо відстань між позиціями є меншою ніж мінімально допустима, то значення матриці колізій збільшується. Матричний підрахунок колізій інтегрується в генетичний алгоритм як елемент цільової функції, що відповідає за безпеку польотів. Зокрема, значення колізій впливають на адаптацію ваги безпеки у цільовій функції генетичного алгоритму, що забезпечує мінімізацію ймовірності колізій у кожній ітерації оптимізації [11].

Постановка задачі

Огляд джерел показав, що генетичні алгоритми можуть показувати хорошу ефективність для планування руху. Використання генетичних алгоритмів є перспективним підходом, оскільки вони здатні ефективно розв'язувати складні оптимізаційні задачі в динамічних середовищах, де традиційні методи можуть бути менш ефективними. Через їхню здатність швидко адаптуватися до змін

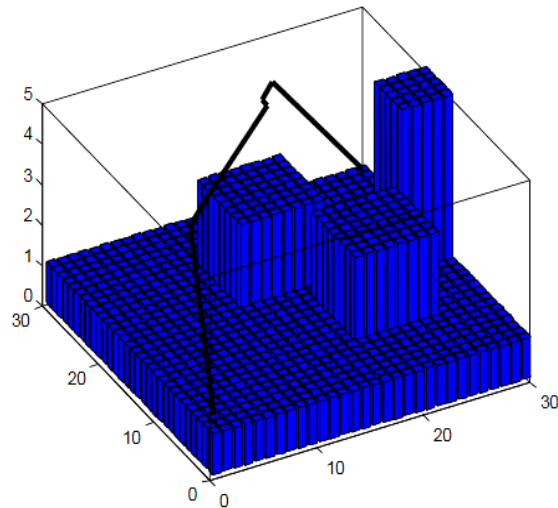


Рис. 5. Візуалізація пошуку найкращого шляху у тривимірному просторі

умов навколишнього середовища цей підхід особливо корисний для забезпечення безперервного та безпечного руху БПЛА.

У значній частині досліджується застосування генетичних алгоритмів для керування рухом наземних роботів, що робить вартим уваги їхню адаптацію для руху БПЛА, для яких на тепер дещо менше досліджень. Ефективне планування маршрутів за допомогою генетичних алгоритмів допомагає мінімізувати витрати часу й енергії на пересування. Це не лише підвищує продуктивність, але й підвищує стійкість до обмежень таких, як низький заряд батареї або обмеження швидкості.

Наявні дослідження для оптимізації руху БПЛА генетичними алгоритмами також часто використовують розробки з урахуванням додаткових факторів. Адаптація координатної системи, для якої необхідно включення Z-координати (висоти): на відміну від наземних роботів, які обмежені рухом у площині, БПЛА можуть змінювати висоту. Включення координати Z розширює можливості маневрування, оскільки тепер апарат може підніматися та опускатися для уникнення перешкод, зміни траєкторії або адаптації до різних умов середовища.

Разом з тим потрібно враховувати перешкоди в повітрі: у тривимірному просторі присутні не лише перешкоди на землі, як у наземних роботів, але й у повітрі — це можуть бути високі будівлі, дерева або інші БПЛА, що значно ускладнює планування маршрутів, адже потрібно враховувати можливі зіткнення в різних точках простору.

Наявні дослідження часто не враховують втрати оптимальності на убезпечення польоту та уникнення зіткнення з іншими БПЛА.

Для обґрунтування використання генетичних алгоритмів у керуванні БПЛА можна розглянути задачу моніторингу території площею 10 км². Дрони з максимальною швидкістю 21 м/с і часом польоту до 45 хв повинні завершити завдання за 30 хв для мінімізації похибки через переміщення вітром повітряних мас. Використання традиційних підходів вимагає 10 дронів, тоді як генетичний алгоритм скорочує їхню кількість до 8, оптимізуючи маршрути.

Метою роботи є підвищення ефективності генетичних алгоритмів для БПЛА, що полягає у зменшенні загальної довжини маршруту з урахуванням додаткових факторів та скороченні часу виконання завдання, економить енергію. Для проведення вимірювання забрудненості довкілля це дозволить виконати точніше оцінювання вимірювання завдяки меншому впливу зміщення повітряних мас з часом. Врахування цих факторів може зробити маршрут навіть довшим, проте наявні реалізації генетичних алгоритмів не враховують витрати часу, що виникають у разі коректування курсу БПЛА для уникнення зіткнень або убезпеченні польоту.

Адаптація параметрів алгоритмів для груп безпілотних літальних апаратів

Для проведення експериментів вибрано середовище Webots [8], яке дозволяє проводити експерименти з моделюванням поведінки реальних пристроїв та перевіряти працездатність алгоритмів у віртуальному світі зі спрощеним навколишнім середовищем. Це середовище має підтримку спільноти з бібліотеками, де зокрема реалізовано генетичні алгоритми, які розв'язують задачу оптимізації руху для наземних роботів. Деякі їхні елементи можуть бути адаптовані для використання з групами БПЛА, проте потребують суттєвих змін. Функція оптимізації в базовому випадку записується як

$$F_{total} = F_{path}(x, y), \quad (3)$$

враховуючи лише маршрут у двовимірному просторі (координати x та y). Вона зосереджена на пошуку найкоротшого шляху між початковою та кінцевою точками, не враховуючи висоту польоту чи додаткові фактори (безпеку, уникнення зіткнень).

Візуалізація у середовищі Webots такого алгоритму у вигляді кроків 1—4 подана на рис. 6—9. У середовищі вибраний робот e-rack, який керується програмою руху на основі генетичних алгоритмів (фіолетовий предмет), який робот здатний зсунути, та жовтий предмет, який робот не здатний зсунути (перешкода). Найкраще покоління зберігається у файлі, симуляція закінчується. Під час повторного відкриття програми відтворюється найкращий результат. Користувач може змінювати параметри генетичних алгоритмів.

Проведено експерименти з наявною реалізацією генетичних алгоритмів у Webots. Цю реалізацію вибрано як основу для адаптації генетичного алгоритму для БПЛА. Проте вона потребує вдосконалення, оскільки недостатньо оптимальна та не враховує багато факторів впливу на рух. Також ця реалізація недостатньо підходить для БПЛА, оскільки не враховує зміну висоти та можливість зіткнень.

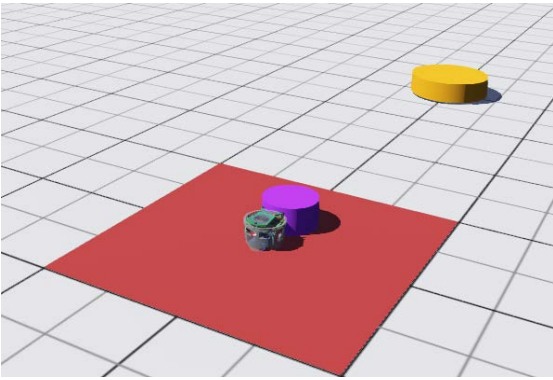


Рис. 6. Крок 1. Ініціалізація симуляції, робот штовхатиме фіолетовий елемент по траєкторії прямо перед ним

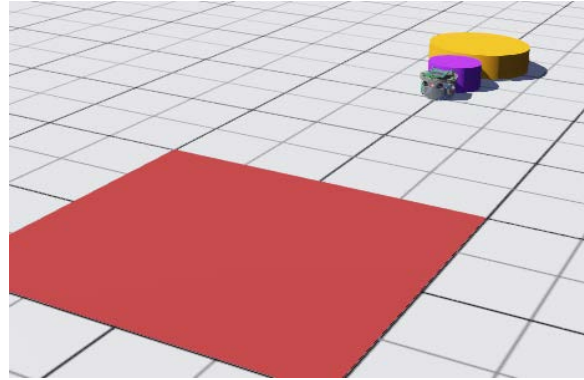


Рис. 7. Крок 2. Переносячи «вантаж», робот стикається з перешкодою у вигляді жовтого елемента

```

Console - All
---
running demo of best individual ...
select the 3D window and push the '0' key
to start genetic algorithm optimization
fitness: 0.500754
---
starting GA optimization ...
population size is 50, genome size is 16
generation: 0, genotype: 0
  
```

Рис. 8. Крок 3. Користувач середовища ініціює оптимізацію

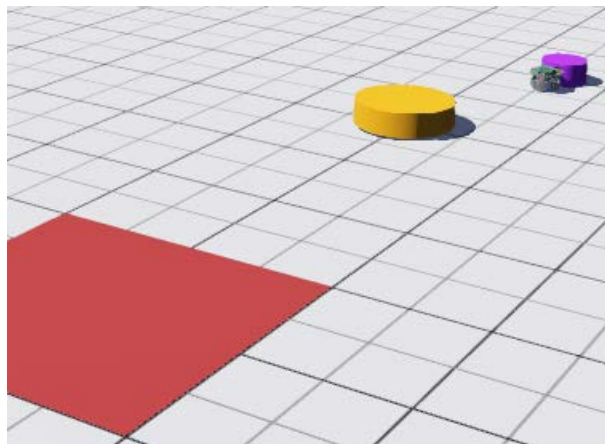


Рис. 9. Крок 4. Генерується до 50 поколінь, вибирається найкраще покоління для досягнення головної мети — обхід перешкоди та досягнення кінцевої точки

У статті пропонується підхід, який окрім послідовності дій, описаних в [11], додатково використовує комбінацію індивідуальних та колективних витрат, де загальна цільова функція повинна включати індивідуальні витрати, такі як довжина шляху та безпека, разом з витратами на уникнення зіткнень між БПЛА. Формалізація такої функції може бути виражена як

$$F_{total} = \alpha \cdot F_{path} + \beta \cdot F_{safety} + \gamma \cdot F_{collision} \quad (4)$$

де $F_{collision}$ містить компонент на основі матриці колізії, що враховує всі можливі колізії між БПЛА; α, β, γ — вагові коефіцієнти.



Значення функцій та коефіцієнтів необхідно знаходити емпірично з урахуванням конкретних умов, розрахунок для БПЛА часто буде динамічний через мінливий характер оточення БПЛА. Якщо для певних пар БПЛА отримані високі значення ймовірності зіткнення, то генетичний алгоритм перезапускає еволюційний процес з оновленими параметрами траєкторій та зон небезпеки, що забезпечує уникнення зіткнень на подальших етапах оптимізації.

На рис. 10 показані імітаційні експерименти з польотом групи БПЛА, програму польоту яких змінено відповідно до завдання пошуку

джерел забруднення з керуванням через генетичні алгоритми після навчання 50-ма епохами, схема яких показана на рис. 4 та реалізована для наземних роботів (рис. 6—9). Функцію оптимізації змінено відповідно до виразу (4), щоб врахувати додаткові фактори впливу, яких немає для наземних роботів і адаптувати генетичний алгоритм для групи БПЛА. Для моделювання використовувався

наявний у середовищі БПЛА Mavic 2 Pro на карті віртуального міста, оскільки високі будинки можуть перешкоджати його руху (рис. 10). Mavic 2 Pro оснащений стандартними датчиками для польоту БПЛА: компас, акселерометр, GPS, відеокамера та акумулятор на 5000 мАГ, що вистачає на 20...30 хвилин польоту. Розрахунок проводився для БПЛА типу коптерів, оскільки БПЛА типу «літаюче крило» матиме додаткові обмеження на зміну руху по висоті і повороти.

Оскільки середовище Webots програмно не оптимізоване для складних математичних обчислень, то розрахунок польоту для групи БПЛА за допомогою генетичних алгоритмів виконувався за використання програми [12], у якій задавались початкові і кінцеві координати, а також бажані проміжні координати руху, що відповідало координатам місця старту окремого БПЛА, місця вимірювання забрудненості довкілля, а також рекомендованим місцям для проміжного вимірювання забрудненості. Проміжні координати не є обов'язковими, проте дані виміряні в них можуть надати додаткову корисну інформацію, наприклад для емпіричної оцінки похибки методу вимірювання. Для задачі вимірювання забруднення часто використовується алгоритм DARP (Divide Areas Robot Planning), який передбачає оптимальний розподіл території для дослідження між декількома роботами шляхом кластеризації всього простору та виділення кожному БПЛА окремої території для вимірювань. Алгоритм DARP дозволяє звести керування групою БПЛА до визначення шляху як поєднання шляху кожного окремого БПЛА з урахуванням можливих зіткнень, накладань території вимірювання, що відображено у виразі (4). Ця програма не може виконувати візуалізацію в 3D і не відображає зміни висоти, що важливо для БПЛА, проте у розрахунках враховувалась висота і час для її набору. Після побудови оптимального маршруту, отримані розрахунки переносились у Webots, який має кращі засоби візуалізації в 3D для реальних БПЛА.

Для задачі симуляції роботи групи БПЛА у середовищі з перешкодами запущено код, у якому розглядається окремо кожна одиниця БПЛА, де обмеження через зону огляду інших імітується в цій програмі у вигляді перешкод [12]. Приклади моделювання показані на рис. 11.

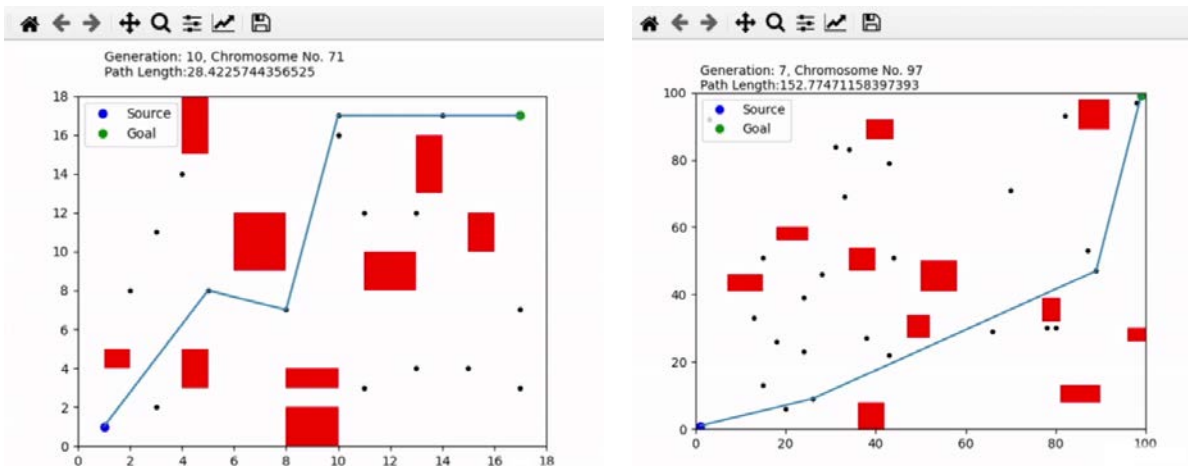


Рис. 11. Візуалізація роботи групи БПЛА у середовищі з перешкодами

У цій програмі задається початкова і кінцева точки маршруту, перешкоди та додаткові точки, які можуть входити в маршрут. Програма розраховує довжину маршруту та відображає проміжні параметри роботи генетичного алгоритму. Позначення осей є умовними й відображають відносні координати простору, в якому відбувається рух. Під час тестування після 50-ти поколінь досягнуто скорочення загальної довжини маршруту на 25 %, що доводить доцільність такого підходу, та дозволяє стверджувати про підвищення ефективності.

Висновок

Запропоновано новий підхід, який інтегрує генетичний алгоритм для оптимального польоту групи БПЛА. Цей підхід дозволяє ефективно перенести навчання генетичних алгоритмів з наземних роботів на групу БПЛА, враховуючи специфіку тривимірного середовища та аеродинамічні характеристики польоту. Новизна запропонованого підходу полягає у врахуванні додаткових факторів, таких як висота польоту та енергетичні витрати (у запропонованій моделі враховують такі фактори, як безпека польоту та уникнення зіткнень), де загальна цільова функція повинна включати індивідуальні витрати, такі як довжина шляху та безпека, разом з витратами на уникнення зіткнень між БПЛА, оскільки вони безпосередньо впливають на загальне енергоспоживання. Зокрема,

під час маневрування для уникнення перешкод чи забезпечення необхідної зони БПЛА витрачають додаткову енергію на зміну траєкторії, висоти чи швидкості, через що алгоритм є придатнішим для роботи в складних умовах повітряного простору.

Проведене моделювання підтвердило, що вдосконалена функція оптимізації, реалізована через генетичний алгоритм, значно підвищує ефективність керування групами БПЛА. Запропонована формула дозволяє враховувати тривимірні аспекти маршруту, забезпечує енергоефективність і безпеку. Під час тестування після 50 поколінь досягнуто скорочення загальної довжини маршруту на 25 %, що доводить доцільність такого підходу та дозволяє стверджувати про підвищення ефективності.

Запропонований підхід дозволить оперативніше та ефективніше здійснювати моніторинг великих площ, підвищуючи загальну ефективність використання БПЛА у різних галузях, таких як екологічний моніторинг та інші застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] "Using a Unmanned Aerial Vehicle to Assess Air Pollution and Identify Dominant Emission Sources," *Journal of Ecological Engineering*. [Electronic resource]. Available: <http://www.jeeng.net/Using-a-Unmanned-Aerial-Vehicle-to-Assess-Air-Pollution-and-Identify-Dominant-Emission,154880,0,2.html> . Accessed 30.08.2024.
- [2] "An enhanced genetic algorithm for path planning of autonomous UAV in target coverage problems," *Science Direct*. [Electronic resource]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494621007171> . Accessed: 30.08.2024.
- [3] J. Jonca, M. Pawnuk, Y. Bezyk, A. Arsen, and I. Sowka, "Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution," *MDPI*. [Electronic resource]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11516> . Accessed: 02.09.2024.
- [4] H. Xu, et al., ERRT-GA: Expert Genetic Algorithm with Rapidly Exploring Random Tree Initialization for Multi-UAV Path Planning. [Electronic resource]. Available: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/8/367> . Accessed: 02.09.2024.
- [5] K. Xiao, J. Lu, Y. Nie, L. Ma, X. Wang and G. Wang, "A Benchmark for Multi-UAV Task Assignment of an Extended Team Orienteering Problem," in *2022 China Automation Congress (CAC)*, Xiamen, China, 2022, pp. 6966-6970, <https://doi.org/10.1109/CAC57257.2022.10054991> . ArXiv preprint arXiv: 2003.09700. <https://arxiv.org/abs/2009.00363> Accessed: 01.09.2024.
- [6] R. Sarkar, D. Barman, and N. Chowdhury, "Domain knowledge based genetic algorithms for mobile robot path planning having single and multiple targets," *Science Direct*. [Electronic resource]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157820304900> . Accessed: 01.09.2024.
- [7] *Multi-Objective Genetic Algorithms: Combining CS and Evolution*. [Electronic resource]. Available: <https://medium.com/@jordanstorms/multi-objective-genetic-algorithms-combining-cs-and-evolution-4ac111ef98a4> . Accessed: 02.09.2024.
- [8] "Using Numerical Optimization Methods," *Webots Guide. Cyberbotics*. [Electronic resource]. Available: <https://www.cyberbotics.com/doc/guide/using-numerical-optimization-methods#using-numerical-optimization-methods> , Accessed: 03.09.2024.
- [9] C. Ramirez-Atencia, G. Bello-Orgaz, M. D. R-Moreno, and D. Camacho, "Problems using Multi-objective Genetic Algorithms. Springer," [Electronic resource]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-016-2376-7> , Accessed: 04.09.2024.
- [10] H. Choi, Y. Kim, and H. Jin Kim, "Genetic Algorithm Based Decentralized Task Assignment for Multiple Unmanned Aerial Vehicles in Dynamic Environments," *Research Gate*. [Electronic resource]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228451002_Genetic_Algorithm_Based_Decentralized_Task_Assignment_for_Multiple_Unmanned_Aerial_Vehicles_in_Dynamic_Environments . Accessed: 04.09.2024.
- [11] H. Shorakei, M. Vahdani, B. Imani, and A. Gholami, "Optimal cooperative path planning of unmanned aerial vehicles by a parallel genetic algorithm," *Research Gate*. [Electronic resource]. Available: https://www.researchgate.net/publication/263494098_Optimal_cooperative_path_planning_of_unmanned_aerial_vehicles_by_a_parallel_genetic_algorithm . Accessed: 04.09.2024.
- [12] "Genetic Algorithm for Path Planning," *GitHub*. [Electronic resource]. Available: <https://github.com/rofe-dl/genetic-algorithm-shortest-path> . Accessed: 07.12.2024.

Рекомендована кафедрою автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 11.11.2024

Кулик Ярослав Анатолійович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: kulyk.y.a@vntu.edu.ua ;

Барановська Анастасія Юрївна — студентка факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, e-mail: xktsumst@gmail.com ;

Барабан Марія Володимирівна — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: baraban@vntu.edu.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Ya. A. Kulyk¹
A. Yu. Baranovska¹
M. V. Baraban¹

Adaptation of Genetic Algorithms in the Task of Optimizing Ground Robot Motion for UAV Group Control

¹Vinnitsia National Technical University

This article explores the possibilities of using genetic algorithms to optimize the trajectory of unmanned aerial vehicles (UAVs) in order to improve the accuracy and efficiency of air quality assessment under various conditions. One of the main objectives is to ensure adaptive autonomous navigation of UAVs in dynamic environments, where parameters related to air pollution can change in real-time under the influence of external factors, such as weather conditions, geographical features, or levels of anthropogenic impact.

Genetic algorithms, due to their ability to search for optimal solutions in complex data spaces, can be effectively used to determine the optimal routes for collecting information about air pollution. They allow UAVs to adapt their trajectories to the current environmental conditions, taking into account factors such as wind direction and speed, pollution levels in different areas, and the presence of natural or artificial obstacles in urban or rural environments. Thanks to this approach, the algorithms provide coordinated work within a group of UAVs, which allows for the division of monitoring zones, the collection of more accurate data, and faster responses to changes in the environment. The article also discusses how genetic algorithms can improve the process of data collection and processing for further air quality analysis. The optimization of trajectories reduces the energy consumption of UAVs, increases the volume and quality of collected data, which in turn enhances the accuracy of assessments of harmful substance concentrations in the air. This makes genetic algorithms a promising and effective tool for increasing the autonomy and overall efficiency of unmanned systems in the context of air quality monitoring in various environments, such as large cities, industrial zones, agricultural areas, or nature reserves.

Keywords: genetic algorithms, unmanned aerial vehicles (UAVs), optimization algorithms, motion optimization, machine learning, environmental issues.

Kulyk Yaroslav A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automatization and Intellectual Informational Technologies, e-mail: kulyk.y.a@vntu.edu.ua ;

Baranovska Anastasiia Yu. — Student of the Department of Intellectual Informational Technologies and Automation, e-mail: xktsumst@gmail.com ;

Baraban Maria V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automatization and Intellectual Informational Technologies, e-mail: baraban@vntu.edu.ua