

М. ЄНА

КОНТРОЛЬ МІСЬКОЇ МОБІЛЬНОСТІ БПЛА: РОЙОВИЙ ІНТЕЛЕКТ І УНИКНЕННЯ ЗІТКНЕНЬ

Предмет дослідження – інтелектуальне управління транспортними потоками в умовах міського середовища з використанням принципів ройового інтелекту та алгоритмів уникнення зіткнень для забезпечення безпечної та ефективної міської мобільності. Особлива увага приділяється управлінню безпілотними транспортними засобами й дронами. **Мета роботи** – розроблення алгоритму до управління міською мобільністю, що поєднує принципи ройового інтелекту й алгоритми уникнення зіткнень для оптимізації транспортних потоків, підвищення безпеки руху та зниження кількості аварій. **Завдання:** дослідити проблеми безпеки та ефективності міського транспорту в умовах зростання урбанізації; розробити алгоритм, що поєднує ройовий інтелект і уникнення зіткнень для управління рухом безпілотних транспортних засобів; провести серію експериментів для перевірки ефективності запропонованого підходу; проаналізувати результати експериментів і визначити потенціал в покращенні міської мобільності та забезпеченні безпеки на дорогах. **Методи:** математичне моделювання транспортних потоків із застосуванням алгоритму ройового інтелекту для координації руху безпілотних транспортних засобів та уникнення зіткнень. **Результати дослідження.** Інтеграція ройового інтелекту та алгоритмів уникнення зіткнень є перспективним напрямом для підвищення ефективності та безпеки міської мобільності. Застосування цього алгоритму може суттєво зменшити кількість аварій, оптимізувати транспортні потоки та сприяти створенню стійких транспортних систем у містах. **Висновки.** Запропонований алгоритм до управління міською мобільністю продемонстрував здатність покращити потоки транспорту, знизити ризик зіткнень і підвищити загальну безпеку на дорогах. Результати експериментів підтвердили ефективність застосування ройового інтелекту для координації транспортних засобів і алгоритмів уникнення зіткнень з метою запобігання аваріям.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; рій; уникнення зіткнень; міська мобільність дронів; інтегровані системи управління.

Вступ

Сучасні транспортні системи стикаються зі складними викликами, пов'язаними з міською мобільністю та безпекою на дорогах. Збільшення щільності населення та постійний розвиток інфраструктури створюють надмірне навантаження на транспортні мережі, що може призвести до затримок, заторів та дорожніх аварій. Одним із можливих розв'язків окреслених проблем є впровадження нових технологій і методів управління, що забезпечують оптимальний транспортний потік та знижують ризик аварій [1]. Розвиток інтелектуальних систем управління та впровадження інноваційних підходів, таких як ройовий інтелект і алгоритми уникнення зіткнень, можуть значно покращити ефективність і безпеку міського транспорту [2]. Робота спрямована на вивчення можливостей оптимізації транспортних потоків у міському середовищі та забезпечення безпеки на дорогах за допомогою нових технологій і методів управління [3]. Актуальність статті полягає в тому, що в ній розв'язуються нагальні проблеми, пов'язані з розвитком транспортних засобів для дронів у міських районах.

Ці виклики вирішуються через запропонований алгоритм до управління мобільністю дронів у міських умовах. Розглядаються можливості покращення реакції дронів на зміни в транспортних потоках і міському середовищі, забезпечення безпеки їх руху та оптимізації маршрутів доправлення [4].

Автор статті має на меті не лише виявити окреслені виклики, але й запропонувати практичні рішення для їх розв'язання, що робить це дослідження надзвичайно актуальним у сучасному контексті розвитку транспортних систем у містах [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд теоретичних підходів до управління мобільністю охоплює розгляд різних концепцій, моделей та методів, що використовуються для оптимізації руху транспортних засобів у міському середовищі.

Одним із ключових аспектів є трафік, його характеристики й динаміка. Це спонукає до аналізу транспортних потоків, їх розподілу в часі та просторі, а також вивчення взаємодії між різними типами транспорту [6].

Теоретичні підходи також передбачають розроблення математичних моделей та алгоритмів прогнозування й управління транспортом. Ці моделі можуть бути основані на різних методах, зокрема теорії черг, теорії графів, агентного моделювання тощо [7]. Крім того, для вивчення транспортних систем важливе використання аналізу даних, зокрема технологій Інтернету речей (IoT) та технологій великих даних для збирання, оброблення та аналізу інформації про транспортні потоки [8]. У процесі розроблення теоретичних моделей управління міською мобільністю також важливо зважати на фактори, що впливають на рішення водіїв, пасажирів та інших учасників дорожнього руху. Це можуть бути психологічні, соціальні та економічні аспекти, а також рівень комфорту, безпеки та екологічності транспортних систем [9]. Отже, огляд теоретичних підходів до управління міською мобільністю охоплює широкий спектр аспектів – від технічних до соціально-економічних – з метою розроблення ефективних і стійких транспортних систем у міському середовищі.

Основні математичні аспекти, які можна виокремити, наведені нижче.

Формула для обчислення середньої швидкості транспортного потоку, що використовується для визначення середньої швидкості руху. У контексті UTM формула допомагає розрахувати середню швидкість дронів або інших безпілотних транспортних засобів щодо пройденої відстані [9].

Для оптимізації маршрутів і прогнозування часу доправлення:

$$V = S/T, \quad (1)$$

де S – загальна довжина дороги; T – час, протягом якого транспортний потік долає відстань.

Модель черг М/М/1 для аналізу транспортних систем допомагає розрахувати середню кількість об'єктів у черзі.

Важливо для аналізу та покращення транспортних потоків у міських умовах для забезпечення ефективної мобільності [10]:

$$L_q = \frac{L^2}{1-P}, \quad (2)$$

де L_q – середня кількість об'єктів у черзі; L_s – середня кількість об'єктів у системі; p – завантаження системи.

Формула для розрахунку індексу пропускної здатності дороги: формула допомагає визначити пропускну здатність дороги [11].

Для планування інфраструктури та виявлення потенційних вузьких місць:

$$K = Q/N, \quad (3)$$

де Q – максимальна кількість транспортних засобів, яку може вмістити дорога; N – кількість смуг руху.

Рівняння Вебула для аналізу транспортних потоків використовується для обчислення середньої швидкості руху [12].

З метою визначення оптимальної швидкості руху для забезпечення безпеки та ефективності транспорту:

$$V = V_f (1 - e^{-K/K_c}), \quad (4)$$

де V – середня швидкість руху; V_f – максимальна швидкість; N – інтенсивність транспортного потоку; K_c – критична інтенсивність потоку.

Модель Гріна для аналізу транспортного потоку застосовується для визначення кількості транспортних засобів у системі [13].

Це важливо для оцінки витрат та навантаження на транспортну систему:

$$N = N_{max} \frac{K}{K + K_c}, \quad (5)$$

де N – кількість транспортних засобів; N_{max} – максимальна кількість транспортних засобів; K – інтенсивність транспортного потоку; K_c – критична інтенсивність потоку.

За допомогою математичних моделей можна впроваджувати механізми й регулятори для покращення та оптимізації руху БпЛА в межах міст і сіл.

Алгоритм інтегрованого підходу до уникнення зіткнень і ройового інтелекту

У цьому розділі описується алгоритм, що поєднує принципи ройового інтелекту й алгоритми уникнення зіткнень. Окреслений алгоритм дає змогу координувати рух дронів у міському середовищі, мінімізуючи ризики зіткнень.

Основні положення алгоритму

Крок 1. Ініціалізація RRT (*Rapidly exploring Random Tree* – популярний алгоритм, що застосовується в робототехніці та плануванні руху [14]).

З метою генерації можливих маршрутів для роботів або інших систем із комплексними обмеженнями руху в просторах високих розмірностей поступово будується дерево із розширенням його в напрямку невивчених ділянок конфігураційного

простору та використанням випадкових зразків. Уявімо кожну точку дерева як двовимірний вектор:

$$p = (x, y), \quad (6)$$

де x і y – координати точки.

Початкові точки дерева можна обчислити так:

$$p_0 = (x_0, y_0). \quad (7)$$

Крок 2. Пошук шляху до цілі.

– Генерація випадкової точки:

$$p_{rand} = (x_{rand}, y_{rand}), \quad (8)$$

де x_{rand} , y_{rand} – випадкові значення в діапазоні $[0, "city_size"]$.

– Пошук найближчої точки всередині дерева:

$$p_{nearest} = (x_{nearest}, y_{nearest}). \quad (9)$$

– Напрямок до випадкової точки:

$$\vec{d} = \frac{p_{random} - p_{nearest}}{p_{random} - p_{nearest}}. \quad (10)$$

– Генерація нової точки:

$$p_{new} = p_{nearest} + step_{size} \times \vec{d}. \quad (11)$$

Крок 3. Побудова траєкторій до цілі.

– Пошук найближчої точки до цілі:

$$p_{goal} = (x_{goal}, y_{goal}). \quad (12)$$

– Побудова траєкторій від p_{goal} до p_{new} .

Крок 4. Уникнення зіткнень.

Обчислення напрямку уникнення. Напрямок уникнення перешкод обчислюється на основі векторів до найближчих перешкод:

$$\vec{a} = \frac{\sum_j (\vec{p}_{new} - \vec{o}_j)}{\sum_j (\vec{p}_{new} - \vec{o}_j)}, \quad (13)$$

де $\vec{o}_j$ – позиція j -ї перешкоди.

Крок 5. Оновлення швидкості.

Швидкість дрона оновлюється з огляду на вплив потенційної сили уникнення:

$$new_{velocity} = old_{velocity} + potential_{gain} \times \vec{a}. \quad (14)$$

Крок 6. Перевірка доступності точки.

Кожна p_{new} -точка перевіряється на наявність перешкод у її околі. Якщо точка розташована занадто близько до перешкоди, вона не буде долучена в маршрут.

Крок 7. Пошук індексу базової (батьківської) точки.

Ідентифікація індексу k точки в дереві, що розташована на мінімальній відстані від p_{new} .

Приклад ситуації, коли один із дронів успішно виявив лінію, і дрон із другої групи не зіткнувся з першим дроном, продемонстровано на рис. 1.

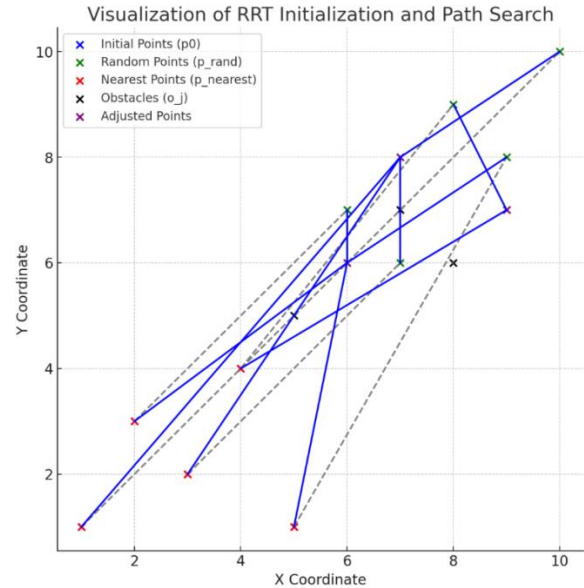


Рис. 1. Візуалізація ініціалізації RRT та пошуку шляху

Опис результуючого графіку:

– початкові точки: сині точки на графіку – це початкові координати дерева RRT. Ці точки є стартовими позиціями, з яких будується дерево;

– випадкові точки: зелені точки – випадково згенеровані координати всередині міста, які алгоритм застосовує для розширення дерева й пошуку нових шляхів;

– найближчі точки: червоні точки – це найближчі наявні точки дерева до кожної випадкової точки. Алгоритм визначає найближчу точку для побудови нового сегмента дерева;

– шляхи до випадкових точок: сірі пунктирні лінії з'єднують найближчі точки (червоні) з випадковими точками (зеленими), показуючи напрямки, у яких дерево розширюватиметься;

– перешкоди: чорні точки – це перешкоди, яких дрони мають уникати під час руху. Це можуть бути будівлі, дерева або інші об'єкти;

– кориговані траєкторії: сині лінії показують нові траєкторії, які дрони використовують для уникнення перешкод. Ці траєкторії спочатку йдуть до контрольних точок (фіолетових), щоб уникнути перешкод, а потім продовжуються до випадкових точок (зелених);

– кориговані точки: фіолетові точки – це контрольні точки, які дрони застосовують для уникнення перешкод.

Після моделювання та візуалізації процесу була створена візуалізація для демонстрації роботи уникнення зіткнень у системі ройового інтелекту алгоритму (рис. 2).

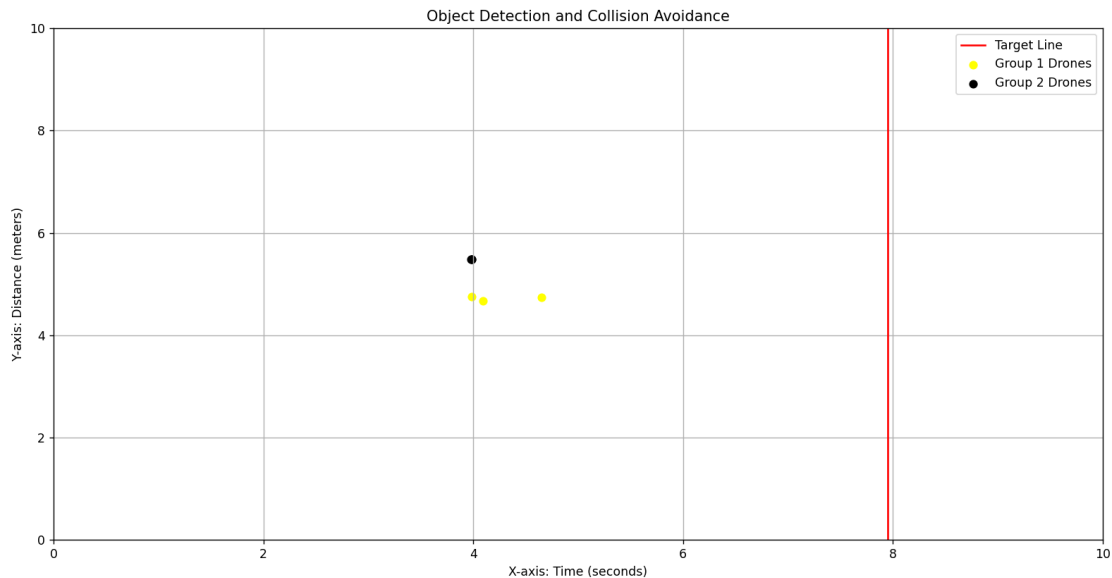


Рис. 2. Результат виявлення об'єкта одним із дронів та уникнення зіткнення

Основна мета цього графіка – показати, як дрони змінюють свої траєкторії, щоб уникнути зіткнень з іншими дронами та перешкодами.

У цьому разі було змодельовано рух двох груп дронів до цільової лінії.

На рис. 2 зображені такі елементи:

- червона лінія – цільова лінія, до якої рухаються дрони;
- жовті точки – дрони першої групи, що рухаються до цілі;
- чорні точки – дрони другої групи, які прямують за першою групою.

– **Кориговані траєкторії** показують, як дрони змінюють свої маршрути, щоб уникнути зіткнень з іншими дронами.

На графіку видно, як дрони першої групи поступово наближаються до цільової лінії, одночасно уникаючи зіткнень з іншими об'єктами або дронами другої групи.

– **Застосування в реальному світі.** Упровадження цього інтегрованого підходу є різноманітним та має значний вплив.

– **Автономні транспортні засоби.** У сфері автономного водіння ця структура дає змогу транспортним засобам навігувати в складних міських умовах, уникаючи зіткнень із пішоходами, транспортними засобами та іншими перешкодами в режимі реального часу.

– **Навігація дронів.** Дрони, обладнані цим алгоритмом, можуть автономно рухатися крізь захищені середовища, зокрема ліси або міські райони, уникаючи зіткнень із будівлями, деревами та іншими перешкодами.

– **Робототехніка на складах.** Автоматизовані транспортні засоби (AGV) [15], що працюють на складах, можуть упроваджувати цей підхід для оптимізації планування маршрутів, забезпечуючи ефективне транспортування товарів і уникнення зіткнень із полицями, обладнанням та іншими AGV.

– **Пошуково-рятувальні місії.** У ситуаціях, що потребують пошуково-рятувальних операцій, таких як природні катастрофи або небезпечні середовища, роботизовані команди можуть використовувати цей підхід для навігації крізь уламки та перешкоди, полегшуючи вчасне виявлення та порятунок постраждалих.

– **Ройова робототехніка.** Цей підхід також можна застосувати до систем ройової робототехніки, де кілька агентів співпрацюють для досягнення спільної мети. Інтеграція механізмів уникнення зіткнень дає змогу ройовим роботам пересуватися в густонаселених середовищах без перешкод і зіткнень.

Загалом інтеграція технологій уникнення зіткнень і ройового інтелекту має значний потенціал для підвищення автономії та безпеки різних роботизованих систем у широкому спектрі застосувань [16].

Результати досліджень та їх обговорення

Ройовий інтелект – це модель, натхненна поведінкою тварин у зграї або рої. Перелічимо основні компоненти моделі ройового інтелекту.

Крок 1: положення кожного. Положення кожного індивіда i в час t може бути подане у вигляді вектора:

$$p_i(t) = (x_i(t), y_i(t)), \quad (15)$$

де $x_i(t)$, $y_i(t)$ – координати індивіда.

Крок 2: швидкість кожного. Швидкість індивіда i в час t може бути подана у вигляді вектора:

$$p_i(t) = (V_{x_i}(t), V_{y_i}(t)), \quad (16)$$

де $V_{x_i}(t)$, $V_{y_i}(t)$ – компоненти швидкості по осях x та y .

Крок 3: лідерство та взаємодія. Кожен у рої може бути притягнутий до лідера або інших індивідів на основі певних правил і функцій притягання [17].

Крок 4: оновлення положення та швидкості. Положення та швидкість кожного оновлюються відповідно до правил руху, що можуть містити прагнення до мети, уникнення перешкод і вирівнювання з навколишніми індивідами (рис. 3 і 4).

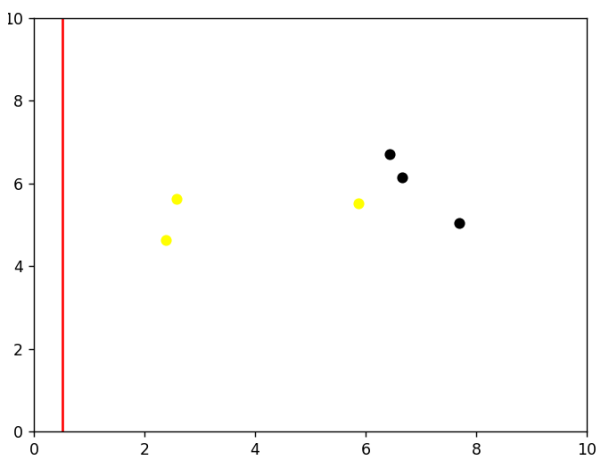


Рис. 3. Візуалізація алгоритму інтегрованого підходу до уникнення зіткнень та ройового інтелекту

Інтегрований підхід до уникнення зіткнень і ройового інтелекту, запропонований у цьому дослідженні, є надійною основою для автономної навігації в динамічних середовищах. Поєднання алгоритму швидкого дослідження випадкового дерева (RRT) з принципами ройового інтелекту показало обнадійливі результати в побудові оптимальних маршрутів з одночасним уникненням зіткнень.

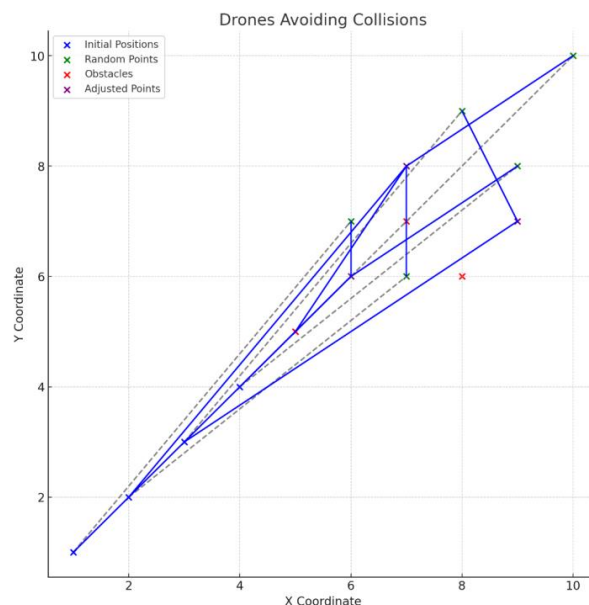


Рис. 4. Уникнення зіткнень дронами

Практичне застосування цього підходу є надзвичайно широким і охоплює різні сфери:

– **автономні транспортні засоби** можуть застосовувати цей алгоритм для безпечної навігації в міських умовах, уникаючи зіткнень із пішоходами та іншими перешкодами;

– **навігація дронів** у складних міських середовищах, зокрема густонаселених районах чи лісах, також може бути покращена внаслідок інтеграції запропонованих алгоритмів;

– **склади з робототехнікою** – автоматизовані транспортні засоби здатні оптимізувати свої маршрути для ефективного транспортування товарів, уникаючи перешкод;

– **пошуково-рятувальні місії** можуть мати значні переваги завдяки цьому підходу, оскільки дрони або автономні транспортні засоби здатні швидко та безпечно пересуватися в умовах надзвичайних ситуацій, таких як природні катастрофи;

– **системи ройової робототехніки** можуть використовувати цей підхід для синхронізації руху багатьох агентів без зіткнень, особливо в густонаселених середовищах.

Візуалізація на рис. 3 і 4 демонструє, як дрони змінюють свої траєкторії для уникнення перешкод і досягають кінцевих точок без зіткнень. Це підтверджує ефективність інтеграції ройового інтелекту та алгоритмів уникнення зіткнень у реальних умовах.

Отже, результати дослідження доводять, що запропонований підхід значно підвищує ефективність

і безпеку міської мобільності для безпілотних транспортних засобів і дронів. Інтеграція зазначених технологій може суттєво зменшити кількість аварій та оптимізувати транспортні потоки в міському середовищі. Це сприятиме створенню більш стійких і безпечних систем управління міською мобільністю.

Висновки

Синтез теоретичних підходів до управління міською мобільністю наголошує на багатовимірній природі оптимізації руху транспортних засобів у міському середовищі. Заглиблюючись у різні концептуальні межі, математичні моделі та алгоритмічні методології, дослідники можуть добути глибокі інсайти, необхідні для розвитку ефективних і стійких транспортних систем. Основою цього завдання є глибоке розуміння динаміки трафіку, що охоплює просторово-часовий розподіл транспортних потоків і складні взаємодії між різними видами транспорту.

Математичні формулювання – від фундаментальних рівнянь, що керують середньою швидкістю, до складних моделей черг, зокрема M/M/1, – пропонують кількісні підходи до аналізу та оптимізації транспортних явищ. Особливе значення серед цих формулювань мають рівняння, що визначають індекси пропускну здатності доріг і характеристики транспортних потоків, які є ключовими для планування інфраструктури та виявлення потенційних вузьких місць на міських магістралях.

Крім того, інтеграція новітніх технологій, зокрема Інтернету речей (IoT) та аналітики великих даних, доповнює традиційні моделі, надаючи безпрецедентний доступ до даних трафіку в реальному часі. Використовуючи ці технологічні досягнення, дослідники можуть добути практичні інсайти щодо поведінки транспортних потоків. Це сприятиме прийняттю більш обґрунтованих рішень у сфері управління міською мобільністю. Водночас інноваційні алгоритмічні структури, такі як схеми уникнення

зіткнень, насичені принципами ройового інтелекту, знаменують зрушення в плануванні траєкторій для автономних транспортних засобів.

Проведене дослідження демонструє важливість інтеграції сучасних підходів до управління міською мобільністю, що беруть до уваги як традиційні методи моделювання транспортних потоків, так і інноваційні алгоритми, що ґрунтуються на ройовому інтелекті та уникненні зіткнень. Поєднання концептуальних і математичних основ дає змогу розробляти комплексні рішення для оптимізації руху в умовах зростання урбанізації.

Алгоритм, описаний у цьому дослідженні, оснований на принципах алгоритму швидкого дослідження випадкових дерев (RRT) і відтворює передовий підхід, що систематично вивчає можливі шляхи в умовах складних міських середовищ. Інтегруючи механізми уникнення зіткнень і адаптивні налаштування швидкості на основі можливих вигравів, ця структура втілює комплексний підхід до забезпечення як безпеки, так і ефективності в міських транспортних системах.

Результати цього дослідження доводять, що поєднання теоретичних моделей і сучасних алгоритмічних рішень є ефективним підходом до розвитку безпечної та стійкої міської мобільності. Запропонований алгоритм для управління міською мобільністю з використанням ройового інтелекту показав високий потенціал для покращення безпеки та ефективності транспортних потоків, що має значні перспективи для подальшого впровадження в міські транспортні системи.

Отже, поєднання теоретичних моделей та алгоритмічних інновацій, проаналізованих у цій роботі, формує цілісне розуміння управління міською мобільністю. Гармонізуючи технічну майстерність із соціально-економічними імперативами, майбутні зусилля в цій сфері мають потенціал для відкриття нової ери інтелектуальних, стійких і надійних міських транспортних систем.

Список літератури

1. Na S., Niu H., Lennox B., Arvin F. Bio-Inspired Collision Avoidance in Swarm Systems via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(3), P. 2511-2526. DOI: 10.1109/TVT.2022.3145346
2. Pawełczyk M. Ł., Wojtyra M. Real World Object Detection Dataset for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle Detection. *IEEE Access*, 2020, 8, P. 174394-174409. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026192
3. Sytsma J., Thompson D., Sicoli J. Drone Ultrasonic Detection. Australian International Aerospace Congress, 2023. URL: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002> (дата звернення 11.11.2024).

4. Petersen K. Tackling air pollution with autonomous drones. MIT School of Engineering, 2021. URL: <https://news.mit.edu/2021/tackling-air-pollution-with-autonomous-drones-0624> (дата звернення 11.11.2024)
5. Chu J. New 'traffic cop' algorithm helps a drone swarm stay on task. MIT News Office, 2023. URL: <https://news.mit.edu/2023/new-traffic-cop-algorithm-drone-swarm-wireless-0313> (дата звернення 11.11.2024)
6. Enwerem C., Baras J.S. Consensus-Based Leader-Follower Formation Tracking for Control-Affine Nonlinear Multiagent Systems. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09156>
7. Xu Z., Yan T., Yang S.X., Gadsden S.A. Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023. DOI: 10.1109/TII.2023.3272666
8. Ye Y., Hu S., Zhu X., Sun Z. An Improved Super-Twisting Sliding Mode Composite Control for Quadcopter UAV Formation. *Machines*, 2024, 12(1), 32 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12010032>
9. Hadi B., Khosravi A., Sarhadi P. Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2023. DOI:10.48550/arXiv.2304.00225
10. Zhang J., et al. Perdix: A Swarm of Swarming UAVs. *Journal of Field Robotics*, 2019, Vol. 36(6), P. 1240–1255.
11. Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter. 2023. 19 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/2301.01234.pdf>
12. Sytsma J., Thompson D., Sicoli J. Drone Ultrasonic Detection. Australian International Aerospace Congress, 2023. P. 221–225. URL: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002>.
13. Kosanam B., Kukkadapu A. Swarm Intelligence Based Traffic Control System. *IRA-International Journal of Technology & Engineering*, 2017. P. 46-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.21013/jte.v7.n2.p5>
14. Tahir A. Formation Control of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles. Doctoral Dissertation. University of Turku, Turku, Finland. 2023. 449 p. URL: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-9411-3>
15. Pathak R., Barzin R., Bora G. C. Data-driven precision agricultural applications using field sensors and Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Precision Agriculture and Aviation*. 2018. Vol. 1(1). P. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20180101.0004>
16. Ali Z. A. Introductory chapter: Motion planning for dynamic agents. InTechOpen. 2024. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/1178552>
17. Gielis J., Shankar A., Prorok A. A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems. *Current Robot Reports*. 2022. Vol. 3(3). P. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9

References

1. Na, S., Niu, H., Lennox, B. and Arvin, F. (2022), "Bio-Inspired Collision Avoidance in Swarm Systems via Deep Reinforcement Learning," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, No. 3, P. 2511-2526. DOI: 10.1109/TVT.2022.3145346.
2. Pawełczyk, M. Ł., Wojtyra, M. (2020), "Real World Object Detection Dataset for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle Detection," in *IEEE Access*, Vol. 8, P. 174394-174409. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026192
3. Sytsma, J., Thompson, D., and Sicoli, J. (2023), "Drone Ultrasonic Detection", Australian International Aerospace Congress. available online: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002> (last accessed 11 November 2024).
4. Petersen, K. (2021), "Tackling air pollution with autonomous drones," MIT School of Engineering. available online: <https://news.mit.edu/2021/tackling-air-pollution-with-autonomous-drones-0624> (last accessed 11 November 2024).
5. Chu, J. (2023), "New 'traffic cop' algorithm helps a drone swarm stay on task," MIT News Office. available online: <https://news.mit.edu/2023/new-traffic-cop-algorithm-drone-swarm-wireless-0313> (last accessed 11 November 2024).
6. Enwerem, C. and Baras, J.S. (2023), "Consensus-Based Leader-Follower Formation Tracking for Control-Affine Nonlinear Multiagent Systems," available online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09156>
7. Xu, Z., Yan, T., Yang, S.X., and Gadsden, S.A. (2023), "Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. DOI: 10.1109/TII.2023.3272666
8. Ye, Y., Hu, S., Zhu, X., and Sun, Z. (2024), "An Improved Super-Twisting Sliding Mode Composite Control for Quadcopter UAV Formation", *Machines*, 12(1), 32 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12010032>
9. Sarhadi, P., et al. (2023), "Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. DOI: 10.48550/arXiv.2304.00225
10. Zhang, J., et al. (2019), "Perdix: A Swarm of Swarming UAVs", *Journal of Field Robotics*, Vol. 36, No. 6, P. 1240–1255.

11. "Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter". 2023. 19 p. available at: <https://arxiv.org/pdf/2301.01234.pdf>
12. Sytsma, J., Thompson, D., and Sicoli, J. (2023), "Drone Ultrasonic Detection", Australian International Aerospace Congress. P. 221–225. available at: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002>
13. Kosanam, B., Kukkadapu, A. (2017), Swarm Intelligence Based Traffic Control System. *IRA-International Journal of Technology & Engineering*. P. 46-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.21013/jte.v7.n2.p5>
14. Tahir, A. (2023), "Formation Control of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles", Doctoral Dissertation, University of Turku, Turku, Finland. 449 p. available at: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-9411-3>
15. Pathak, R., Barzin, R. and Bora, G.C. (2018), "Data-driven precision agricultural applications using field sensors and Unmanned Aerial Vehicle", *International Journal of Precision Agriculture and Aviation*, Vol. 1(1), P. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20180101.0004>
16. Ali, Z.A. (2024), "Introductory chapter: Motion planning for dynamic agents", InTechOpen. available at: <https://www.intechopen.com/chapters/1178552>
17. Gielis, J., Shankar, A. and Prorok, A. (2022), "A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems", *Current Robot Reports*, Vol. 3(3), P. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9

Надійшла (Received) 20.10.24

Відомості про авторів / About the Authors

Сна Максим Вікторович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: yenamaxim98@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-0664-3244>

Yena Maksym – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, PhD Student at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

UAV URBAN MOBILITY CONTROL: SWARM INTELLIGENCE AND COLLISION AVOIDANCE

Subject matter: Intelligent management of traffic flows in urban environments using swarm intelligence principles and collision avoidance algorithms to ensure safe and efficient urban mobility. Special attention is given to the management of unmanned vehicles and drones. **Goal:** To develop and analyze an approach to managing urban mobility that combines swarm intelligence principles and collision avoidance algorithms to optimize traffic flows, improve traffic safety, and reduce the number of accidents. **Tasks:** Investigate the safety and efficiency problems of urban transportation in the context of growing urbanization; develop a model that integrates swarm intelligence and collision avoidance algorithms for managing the movement of unmanned vehicles; conduct a series of experiments to test the effectiveness of the proposed approach; analyze the results of the experiments and determine the potential for improving urban mobility and ensuring road safety. **Methods:** Mathematical modeling of traffic flows using the swarm intelligence algorithm to coordinate the movement of unmanned vehicles and avoid collisions. **Results:** The proposed urban mobility management algorithm has demonstrated the ability to improve traffic flows, reduce the risk of collisions, and increase overall road safety. The results of the experiments confirmed the effectiveness of using swarm intelligence for coordination vehicles and collision avoidance algorithms to prevent accidents.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs); swarm, collision avoidance; urban drone mobility; integrated management systems.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Сна М. В. Контроль міської мобільності бпла: ройовий інтелект і уникнення зіткнень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.059>

Yena, M. (2024), "Uav urban mobility control: swarm intelligence and collision avoidance", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.059>