

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-20>

УДК 681

ОСТАПЕНКО Леонід

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0009-0006-1590-2500>
l.ostapenko@csn.khai.edu

ХАРЧЕНКО Вячеслав

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>
v.kharchenko@csn.khai.edu

АЛГОРИТМИ ФОРМУВАННЯ МАРШРУТІВ В 2D/3D ПРОСТОРИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОБІЛЬНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМУНІКАЦІЙ В УМОВАХ РУЙНУВАНЬ

Стаття присвячена порівняльному аналізу алгоритмів формування маршрутів в 2D та 3D просторах з використанням роботизованих мобільних засобів. Алгоритми детально розглядаються з точки зору їх використання для розгортання ланцюжка дронів в умовах руйнувань і радіозавад, які часто виникають під час катастроф та в інших надзвичайних ситуаціях. Особлива увага приділяється визначенню раціональних алгоритмів відповідно запропонованих показників для забезпечення надійних комунікацій і ефективного проведення пошуково-рятувальних операцій.

Ключові слова: рій БПЛА, планування маршрутів, літаюча LiFi мережа, порівняння алгоритмів.

OSTAPENKO Leonid, KHARCHENKO Vyacheslav

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

PATH PLANNING ALGORITHMS IN 2D/3D SPACES USING MOBILE DEVICES FOR ENSURING COMMUNICATIONS IN CONDITIONS OF DESTRUCTION

The article focuses on the comparative analysis of routing algorithms in 2D and 3D spaces using robotic mobile devices. The algorithms are thoroughly examined from the perspective of their use for deploying chains of drones in conditions of destruction and radio interference, which often occur during disasters and other emergency situations. Particular attention is given to identifying the rational algorithms considering a set of metrics for ensuring reliable communications and efficient execution of search-and-rescue operations.

Based on a detailed analysis of route formation algorithms in 2D/3D space in the presence of obstacles according to defined qualitative characteristics, the following conclusions can be drawn regarding their application for route finding for mobile systems.

1. For 2D space, the following algorithms are best:

- Algorithm A* (A-star): due to its ability to optimize pathfinding taking into account cost and heuristic evaluations, it shows high efficiency in 2D navigation;
- Dijkstra's algorithm: best suited for cases where you need to find the shortest path on large graphs with small weights;
- Advanced Wavefront algorithm: the ability to propagate waves from a starting point and label cells makes it ideal for scalable 2D environments.

2. In 3D space, the choice of algorithms is more limited:

- RRT (Rapidly-exploring Random Tree) algorithm: effectively solves the task of rapid random search and adaptation in complex 3D environments;
- Probabilistic Roadmap Method: the approach to the selection of nodes determines the ability to efficiently process large 3D spaces;

- Algorithm A*: versatility and ability to adapt to 3D tasks make it one of the best choices.

3. Combining different algorithms can improve routing efficiency. Examples of appropriate successful combinations of algorithms:

- A* and RRT: The combination of these algorithms can help in solving problems where it is necessary to quickly adapt to changes in the environment while providing the optimal path;
- Dijkstra and PRM: this combination can be useful for detailed work in complex environments where a combination of general planning and local detailed search is needed.

4. The analysis shows that there is a significant potential for the application and combination of different routing algorithms in solving different routing tasks in robotic systems. Effective use of algorithms depends on task conditions, environment dynamics, and computing resource requirements. The results of this research can serve as a basis for further developments in the field of robotic navigation systems, providing greater flexibility and efficiency in solving various practical tasks.

5. The novelty of the research results lies in the determination of characteristics and recommendations for the use of existing routing algorithms to create reliable communications using mobile technologies and robotic systems. Their practical significance lies in the fact that a systematized set of algorithms and provided recommendations can be used to create an information technology and decision support system for route formation.

6. Further research can be directed to the development of algorithms for decision support systems for planning [7], deployment [45] and maintenance of reliable operation [46] of flying networks, as well as combined robotic systems that combine UAVs and ground robots in conditions of moving 2D/3D obstacles, changes in conditions of use, etc.

Keywords: UAV swarm, path planning, flying LiFi network, algorithms comparison.

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

Системи індустріального інтернету речей можуть використовуватися в задачах моніторингу, а також розгортання мобільних засобів (безпілотних літальних апаратів і наземних роботів) для пошуку маршрутів, розгортання апаратів для забезпечення бездротових LiFi[1-3] і WiFi[4-5] джерел інформації та кризових центрів.

Такі задачі пов'язані зі збиранням і передаванням інформації в динамічних середовищах із заздалегідь невідомими перешкодами в 2D /3D просторі внаслідок руйнувань[6], в умовах електромагнітних і радіозавад, задимлення, нічний час тощо, при виконанні безпекових заходів для об'єктів критичної інфраструктури, складних транспортно-логістичних завдань, пошуково-рятувальних операціях та військових місіях тощо.

Метою дослідження є порівняльний аналіз існуючих алгоритмів маршрутизації для їх вибору і використання для створення надійних комунікацій із застосуванням мобільних роботизованих засобів та систем інтернету речей.

Задачі досліджень:

- сформувати множину алгоритмів для формування маршрутів для створення комунікацій в 2D/3D просторі;
- визначити характеристики, за якими мають порівнюватися алгоритми;
- провести аналіз за визначеними характеристиками і сформулювати рекомендації щодо їх використання.

Матеріали статті структуровано у такий спосіб: другому розділі надається стислий огляд 25 алгоритмів пошуку шляхів, визначено принципи функціонування та особливості застосування; третій розділ описує множину показників-характеристик, за якими далі аналізуються алгоритми у четвертому розділі; п'ятий розділ обговорює результати аналізу і порівняння алгоритмів: шостий розділ надає висновки і рекомендації стосовно вибору та використанню алгоритмів, а також описано новизну, практичне значення та напрями подальших досліджень.

ОГЛЯД АЛГОРИТМІВ

Аналіз публікацій [1-47] надав змогу визначити 25 алгоритмів для формування маршрутів в заданому просторі. Стисло розглянемо їх і проаналізуємо.

Алгоритм потенційних полів (Potential Fields)[8-11]:

Принцип роботи: безпілотний апарат (в подальшому Unmanned Vehicle, UV) сприймає оточуюче середовище, як набір потенційних полів, де кожне поле представляє собою вектор, що вказує напрямок до мети і відштовхує від перешкод. Рух визначається комбінацією цих полів.

Алгоритм просунутої хвилі (Advanced Wavefront)[12]: алгоритм поширює «хвилі» з початкової точки і розгортає їх в напрямку цільової точки, маркуючи клітинки на своєму шляху. Маршрут обирається шляхом послідовного переходу по клітинках з найменшою «хвилею».

Алгоритм Дейкстри (Dijkstra's Algorithm)[13-15]: алгоритм обчислює найкоротший шлях до всіх вершин з використанням зважених ребер у графі. Вибирає найближчу нерозглянуту вершину та оновлює відстані до сусідніх вершин. Зазвичай використовується в поєднанні з іншими алгоритмами.

Алгоритм A (A-star)[16]:* використовує функції вартості $g(n)$, що представляє сумарну вартість від початку до вершини n , і евристичну оцінку $h(n)$, що передбачає вартість досягнення цілі з n . Він комбінує ці величини в функцію оцінки $f(n)=g(n)+h(n)$, яка використовується для вибору наступної вершини для розгляду, з метою мінімізації загальної вартості шляху. Процес триває до досягнення кінцевої точки, а оптимальний шлях відновлюється за допомогою зворотного слідування від кінцевої до початкової точки.

Алгоритм RRT (Rapidly-exploring Random Tree)[17-21]: алгоритм випадково генерує маршрут, враховуючи обмеження на швидкість та можливі перешкоди.

Алгоритм Вороного (Voronoi Algorithm)[22]: використовується для планування шляху шляхом розділення простору на зони, кожна з яких пов'язана з найближчою перешкодою, формуючи діаграму Вороного. Це дозволяє визначити "дороги" чи шляхи, які максимізують відстань від найближчих перешкод, забезпечуючи безпечний прохід. Діаграма Вороного є корисною в різних застосуваннях, від робототехніки до авіаційних систем, де потрібно уникати перешкод при плануванні маршруту. Цей алгоритм ефективний для великих відкритих просторів та складних середовищ з багатьма об'єктами.

Алгоритми навчання з підсиленням (Reinforcement Learning Algorithms)[23,24]: використовують навчання на основі спроб та помилок, де робот навчається оптимальному поведінці в середовищі з нагородами та покараннями. Можуть навчатися адаптуватися до різних умов та завдань.

Метод найкоротших шляхів Беллмана-Форда (Bellman-Ford Shortest Path)[13]: алгоритм обчислює найкоротший шлях в графі зі зваженими ребрами, враховуючи можливі негативні ваги і виявляючи цикли з від'ємним вагами.

Алгоритм Джонсона (Johnson's Algorithm)[25]: дозволяє знайти найкоротші шляхи між усіма парами вершин зваженого орієнтованого графу. Цей алгоритм працює, якщо у графі містяться ребра з додатною чи від'ємною вагою, але відсутні цикли з від'ємною вагою.

Алгоритм Флойда-Уоршелла (Floyd-Warshall Algorithm)[26,27]: алгоритм обчислює найкоротший шлях між всіма парами вершин в графі шляхом динамічного програмування.

Алгоритм Дублін (Dubins Path)[21,28,29]: використовується для знаходження найкоротшого шляху для руху робота з обмеженою радіусом обертання.

Генетичні алгоритми для пошуку маршруту[30,31]: використовують ідеї генетичних алгоритмів для еволюції та покращення маршрутів на основі їх якості.

Метод Монте-Карло (Monte Carlo Pathfinding)[32]: використовує випадкову генерацію маршрутів та оцінку їх якості шляхом випробування різних варіантів.

Алгоритм Динамічного програмування [33]: розбиває задачу пошуку маршруту на підзадачі і обчислює оптимальний маршрут, враховуючи рекурсивне рішення підзадач.

Метод геометричного планування шляху (geometrical path planning method) (GPP)[34]: використовується для навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у складних дво- та тривимірних середовищах. Цей метод враховує обмеження, пов'язані з перешкодами, та використовує комбінації геометричних підходів для забезпечення безпечного та ефективного маневрування БПЛА, оптимізуючи маршрути на основі вимірювань та відстаней до перешкод.

Алгоритм Максимального потоку [35]: використовує граф для моделювання потоків і шукає максимальний потік через мережу.

Алгоритм Дрейфуса-Вагнера (Dreyfus-Wagner Algorithm)[14]: Принцип роботи: використовується для пошуку найкоротших шляхів в графах з обмеженими можливостями руху. Особливості: добре використовувати для задач з обмеженими ресурсами.

Алгоритм Флойда-Варшалла (Floyd-Warshall's Algorithm)[36]: Принцип роботи: використовує матрицю суміжності графа для знаходження найкоротших шляхів між всіма парами вершин. Особливості: Ефективний для великих графів та задач з одноразовим обчисленням всіх шляхів.

Probabilistic Roadmap Method (PRM)[37]: метод планування шляху, заснований на вибірці, який створює дорожню карту вільного простору через випадкові вузли та з'єднує їх для визначення можливих шляхів. Використовується переважно в робототехніці для навігації в складних середовищах. Особливості: випадкова вибірка вузлів забезпечує ефективність у на великих просторах. Працює у два етапи: побудова дорожньої карти та вирішення запитів на шлях. Адаптивний до різних завдань, але може бути вимогливим до пам'яті та обчислювальних ресурсів.

Алгоритми роїв частинок (Particle Swarm Algorithm)[9]: Принцип роботи: Моделюють поведінку частинок, які рухаються у просторі і знаходять оптимальні рішення шляху, обмінюючи інформацію між собою. Особливості: ефективні для оптимізації шляхів у динамічних середовищах.

Алгоритм "Швидке планування шляху через великі колекції безпечних коробок" (Fast Path Planning Through Large Collections of Safe Boxes FPP-LCSB)[38]: Цей алгоритм використовує ідею розділення простору на "безпечні коробки", які представляють собою визначені зони, що вважаються безпечними для пересування. В процесі планування шляху, система спрямовує об'єкт (наприклад, робота) через ці коробки, мінімізуючи зіткнення з перешкодами та оптимізуючи маршрут з точки зору часу та витрат енергії.

Алгоритм заснований на мережі LSTM (Long Short-Term Memory)[39]: Алгоритм на основі нейронної мережі, використовує глибоке навчання для вдосконалення планування маршрутів у реальному часі. LSTM дозволяє мережі враховувати попередню інформацію про середовище та дії, що підвищує ефективність прийняття рішень за складних умов. Окрім того, алгоритм використовує ієрархічну функцію винагород і покарань, яка адаптована до специфіки планування маршрутів для БПЛА, забезпечуючи більш точне та обгрунтоване планування маршруту.

Точний геометрично-орієнтований алгоритм "An Exact Geometry-Based Algorithm" (EGPA) [40]: використовує геометричні мережі для знаходження найкоротшого шляху в двовимірному просторі, що оминає перешкоди. Основна ідея полягає у створенні мережі ліній, які з'єднують вершини перешкод та початкову та кінцеву точки. Алгоритм здатний знаходити оптимальний шлях з меншою обчислювальною складністю порівняно з іншими геометричними алгоритмами.

Алгоритм "An energy-efficient genetic algorithm for global path planning" (EEGA)[41]: використовує ієрархічну модель з уникненням зіткнень для безпілотних надводних платформ. Алгоритм включає два рівні: глобальний і локальний. На глобальному рівні, використовується модифікований генетичний алгоритм з жадібною ініціалізацією популяції, багатоцільовою фітнес-функцією на основі штрафів, і спільним кросовером. Локальний рівень інтегрує метод "velocity obstacle" з підходом "dynamic window" для визначення допустимих швидкостей в уникненні зіткнень, що дозволяє динамічно адаптуватися до змін у середовищі.

Метод лінії видимості (Visibility Line Method)[42]: використовує графічні представлення об'єктів на карті, де вершини графу розміщуються у точках, що мають пряму видимість між собою. Цей метод

ефективно знаходить шлях, обходячи перешкоди та мінімізуючи загальну довжину маршруту, використовуючи лінії видимості як потенційні сегменти маршруту. Особливості: алгоритми, що застосовують лінії видимості, зазвичай працюють швидше в порівнянні з класичними методами, оскільки вони значно зменшують кількість обчислень, необхідних для визначення оптимального шляху в комплексних середовищах.

ОБҐРУНТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ

При виборі алгоритмів для планування маршрутів дронів важливо враховувати різноманітні аспекти, які можуть вплинути на їхню ефективність та придатність для конкретних сценаріїв використання.

Враховуючи специфіку завдань побудови ланцюжка зв'язку з використанням дронів, було визначено низку показників-характеристик, що впливають на ефективність алгоритмів. Кожен показник відповідає важливому аспекту його функціональності та використання в реальних умовах. Обґрунтування показників базується на аналізі вимог та особливостей середовища, в якому дрони будуть функціонувати, а також на потребах та обмеженнях, що виникають у вимірюванні та забезпеченні надійності ланцюжка зв'язку.

Аналіз алгоритмів виконано за наступними одинадцятьма характеристиками:

Працює на основі сітки (Grid-based): ця характеристика важлива, оскільки визначає, чи алгоритм використовує розміщення вузлів у вигляді сітки для представлення середовища. Алгоритми на основі сітки ефективні для просторового моделювання, де об'єкти можна розташовувати у відповідних клітинках сітки. Це дозволяє легко визначати шляхи та обходити перешкоди, що полегшує розробку програмного забезпечення для формування маршрутів у 2D/3D просторі.

Працює на основі вибірки (Sampling-based): характеристика стосується можливості алгоритму працювати з обмеженою кількістю точок або зразків у просторі. Алгоритми на основі вибірки ефективні для задач, де простір занадто великий для аналізу усіх можливих точок, та можуть використовувати лише обмежену вибірку для прийняття рішення щодо маршруту.

Працює на основі потенціалів поля (Potential field based): Цей критерій визначає, чи алгоритм використовує концепцію потенціальних полів для навігації. Використання потенціальних полів дозволяє дронам відчувати притягання та відштовхування від об'єктів у навколишньому середовищі, що допомагає уникати перешкод та знаходити оптимальний маршрут.

Працює на основі нейронних мереж: фіксує використання нейронних мереж для навчання моделей маршрутизації. Використання нейронних мереж може допомогти вирішити складні задачі, такі як динамічне змінювання умов середовища та швидка адаптація до нових обставин.

Bio-Inspired алгоритм: визначає використання алгоритмів, які базувалися на аналогії з природними процесами або поведінкою живих організмів. Використання таких алгоритмів може допомогти ефективно вирішувати проблеми маршрутизації в складних середовищах, враховуючи еволюційні стратегії та принципи адаптації.

Можливість будувати маршрут динамічно: оцінює, чи алгоритм може адаптуватися до змін у середовищі та перепланувати маршрути в реальному часі.

Вимогливий до пам'яті: визначає, наскільки багато оперативної пам'яті вимагає алгоритм для своєї роботи. Високі вимоги до пам'яті можуть бути неприйнятними для застосувань, де обмежений обсяг пам'яті.

Вимогливий до процесора: враховує те, наскільки багато обчислювальних ресурсів (наприклад, складність обчислень і об'єм пам'яті) потрібно для виконання алгоритму. Вимоги до процесора можуть стати обмеженням у реальному часі, особливо у вимірах з великою кількістю дронів або складними сценаріями.

Самодостатній алгоритм: визначає, чи є алгоритм достатнім для вирішення всіх завдань маршрутизації без необхідності використання додаткових методів або алгоритмів. Наприклад, задача формування графа та оцінювання ваги його ребер є додатковою для алгоритму Дейкстри тому він не може вважатися самодостатнім.

Працює в 2D або в 3D: враховує, наскільки добре алгоритм може пристосуватися до просторових обмежень. Можливість працювати як у 2D, так і у 3D просторі, дозволяє використовувати алгоритми для різноманітних задач маршрутизації.

Може працювати в зворотному напрямку: визначає, чи алгоритм може здійснювати зворотну навігацію, тобто будувати маршрути не лише від початкової точки до цільової, але й назад. Це важливо для задач, де дрони повинні повертатися до базової точки після завершення місії або у випадку втрати зв'язку.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ АЛГОРИТМІВ

Результати аналізу алгоритмів за визначеними характеристиками надано в таблицях 1-5, які розділено на групи відповідно до їх послідовності аналізу в попередньому розділі.

Таблиця 1

Аналіз першої групи алгоритмів

Характеристики алгоритмів	Типи алгоритмів				
	Potential Fields	Advanced Wavefront	Dijkstra's Algorithm	A*	RRT
Працює на основі сітки	Ні	Так	Ні	Так	Ні
Працює на основі вибірки	Ні	Ні	Так	Ні	Так
Працює на основі потенціалів поля	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Працює на основі нейронних мереж	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Bio-Inspired алгоритм	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Можливість будувати маршрут динамічно	Погано	Так	Ні	Так	Так
Вимогливий до пам'яті	Помірно	Так	Так	Помірно	Помірно
Вимогливий до процесора	Помірно	Помірно	Помірно	Помірно	Так
Самостійний алгоритм	Так	Так	Ні	Так	Так
Працює в 2D-просторі	Так	Так	Так	Так	Так
Працює в 3D-просторі	Ні	Ні	Ні	Так	Так
Може працювати в зворотному напрямку	Ні	Ні	Так погано	Так	Так

Таблиця 2

Аналіз другої групи алгоритмів

Характеристики алгоритмів	Типи алгоритмів				
	Voronoi Algorithm	Reinforcement Learning Algorithms	Bellman-Ford Shortest Path	Johnson's Algorithm	Floyd-Warshall Algorithm
Працює на основі сітки	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Працює на основі вибірки	Ні	Ні	Так	Так	Так
Працює на ос-нові потенціалів поля	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Працює на ос-нові нейронних мереж	Ні	Так	Ні	Ні	Ні
Bio-Inspired алгоритм	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Можливість будувати маршрут динамічно	Ні	Так	Так	Так	Так
Вимогливий до пам'яті	Помірно	Залежить від реалізації	Помірно	Так	Так
Вимогливий до процесора	Помірно	Залежить від реалізації	Так	Так	Так
Самостійний алгоритм	Ні	Так	Ні	Ні	Ні
Працює в 2D-просторі	Так	Так	Так	Так	Так
Працює в 3D-просторі	Так	Так	Так	Так	Так
Може працювати в зворотному напрямку	Ні	Залежить від реалізації	Так	Ні	Так

Таблиця 3

Аналіз третьої групи алгоритмів

Характеристики алгоритмів	Типи алгоритмів				
	Dubins Path	Генетичні алгоритми пошуку маршруту	Monte Carlo Pathfinding	Динамічне програмування	Geomet-rical path planning method
Працює на основі сітки	Ні	Ні	Ні	Залежить від реалізації	Так
Працює на основі вибірки	Ні	Ні	Так	Залежить від реалізації	Ні
Працює на ос-нові потенціалів поля	Ні	Ні	Ні	Залежить від реалізації	Ні
Працює на ос-нові нейронних мереж	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Bio-Inspired алгоритм	Так	Так	Ні	Ні	Ні
Можливість будувати маршрут динамічно	Ні	Так	Так	Ні	Так
Вимогливий до пам'яті	Ні	Залежить від реалізації	Помірно	Так	Помірно
Вимогливий до процесора	Ні	Залежить від реалізації	Помірно	Так	Помірно
Самостійний алгоритм	Так	Так	Так	Ні	Так
Працює в 2D-просторі	Так	Так	Так	Так	Так
Працює в 3D-просторі	Так	Так	Так	Так	Так
Може працювати в зворотному напрямку	Так	Залежить від реалізації	Так	Так	Так

Таблиця 4

Аналіз четвертої групи алгоритмів

Характеристики алгоритмів	Типи алгоритмів				
	Maximum Flow Algorithm	Dreyfus-Wagner Algorithm	Floyd-Warshall's Algorithm	Probabilistic Roadmap Method (PRM)	Particle Swarm Algorithm
Працює на основі сітки	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Працює на основі вибірки	Так	Так	Так	Так	Так
Працює на ос-нові потенціалів поля	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Працює на ос-нові нейронних мереж	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Bio-Inspired алгоритм	Ні	Ні	Так	Ні	Так
Можливість будувати маршрут динамічно	Так	Так	Ні	Так	Так
Вимогливий до пам'яті	Ні	Ні	Так	Так	Так
Вимогливий до процесора	Ні	Так	Так	Так	Так
Самостійний алгоритм	Ні	Ні	Ні	Так	Так
Працює в 2D-просторі	Так	Так	Так	Так	Так
Працює в 3D-просторі	Ні	Так	Так	Так	Так
Може працювати в зворотному напрямку	Ні	Ні	Ні	Так	Так

Таблиця 5

Аналіз п'ятої групи алгоритмів

Характеристики алгоритмів	Типи алгоритмів				
	FPP-LCSB	LSTM	EGPA	EEGA	Visibility Line method
Працює на основі сітки	Так	Так	Так	Так	Ні
Працює на основі вибірки	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
Працює на ос-нові потенціалів поля	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Працює на ос-нові нейронних мереж	Ні	Так	Ні	Ні	Ні
Bio-Inspired алгоритм	Ні	Ні	Ні	Так	Ні
Можливість будувати маршрут динамічно	Так	Так	Так	Так	Так
Вимогливий до пам'яті	Так	Так	Так	Помірно	Ні
Вимогливий до процесора	Так	Так	Так	Так	Помірно
Самостійний алгоритм	Так	Так	Так	Так	Так
Працює в 2D-просторі	Так	Так	Так	Так	Так
Працює в 3D-просторі	Так	Ні	Ні	Ні	Так
Може працювати в зворотному напрямку	Так	Ні	Ні	Ні	Так

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ

Оцінювання і вибір алгоритмів за визначеними показниками слід здійснювати з урахуванням того, що є певні неоднозначності і протиріччя, обумовлені такими чинниками:

- вимогливість до пам'яті та процесора: оцінка може бути неоднозначною, оскільки вимоги до ресурсів можуть залежати від реалізації алгоритму, величини вхідних даних та параметрів, ресурсів системи, а також від середовища, на якому використовується алгоритм;
- динамічна побудова маршруту: хоча деякі алгоритми можуть мати можливість побудови маршруту у динамічному режимі, це може бути ускладнено або неможливо в реальних умовах в залежності від обмежень датчиків, обчислювальної потужності та інших факторів;
- самодостатність алгоритму: визначення "самодостатнього алгоритму" може бути різним залежно від конкретної задачі та обставин його використання.

Аналізуючи алгоритми пошуку шляху, було знайдено кілька посилань на допоміжні алгоритми, такі як алгоритми пошуку перешкод[43][44]. Ці алгоритми неможна розглядати як самостійні, бо вони не виконують задачі формування маршруту але в парі з іншими можуть покращувати якість знайденого шляху.

На основі таблиць 1-5, можна сформулювати наступні висновки щодо алгоритмів формування маршрутів з використанням роботизованих засобів:

- універсальність у 2D та 3D просторі: більшість розглянутих алгоритмів ефективно працюють як у двовимірному, так і в тривимірному просторі, що робить їх придатними для широкого спектру задач маршрутизації, від простих наземних додатків до складніших аеронавігаційних систем;

- динамічна адаптація: майже всі алгоритми мають здатність до динамічного планування маршрутів, адаптуючись до змін у середовищі, що є критично важливим для роботизованих систем, які можуть зіткнутися з непередбаченими перешкодами або змінами в задачах;
- обчислювальні вимоги: більшість алгоритмів вимогливі до обчислювальних ресурсів, як пам'яті, так і процесорного часу, що може обмежувати їх застосування в обладнанні з обмеженою обчислювальною потужністю, наприклад, у дронах або мобільних роботах;
- спеціалізовані алгоритми для конкретних умов: деякі алгоритми, зокрема, засновані на потенціалах поля або біоінспіровані алгоритми, показують високу ефективність у певних умовах, наприклад, для обходу перешкод або для пошуку оптимальних шляхів у складних середовищах;
- обмежена підтримка зворотного планування: лише деякі алгоритми можуть ефективно працювати у зворотному напрямку, тобто планувати маршрут від цілі до початкової точки, що може бути важливо у випадку системи, де потрібно повертати дрони на базу (наприклад, для підзарядження).

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

На підставі детального аналізу алгоритмів формування маршрутів в 2D/3D просторі за наявності перешкод за визначеними якісними характеристиками можна зробити наступні висновки щодо їх застосування для пошуку маршруту для мобільних систем.

1. Для 2D-простору кращими є такі алгоритми:
 - Алгоритм A* (A-star): завдяки своїй здатності оптимізувати пошук шляху з врахуванням вартості та евристичних оцінок, він показує високу ефективність у 2D-навігації;
 - Алгоритм Дейкстри: найкраще пристосований для випадків, де потрібно знайти найкоротший шлях на великих графах з невеликими вагами;
 - Алгоритм Вейвфронт (Advanced Wavefront): здатність поширювати хвилі від стартової точки та маркувати клітини робить його ідеальним для масштабованих 2D середовищ.
2. У 3D-просторі вибір алгоритмів більш обмежений:
 - Алгоритм RRT (Rapidly-exploring Random Tree): ефективно вирішує завдання швидкого випадкового пошуку та адаптації в складних 3D середовищах;
 - Probabilistic Roadmap Method: підхід до вибірки вузлів обумовлює здатність ефективно обробляти великі 3D простори;
 - Алгоритм A*: універсальність та здатність адаптуватися до тривимірних завдань роблять його одним з кращих виборів.
3. Комбінування різних алгоритмів може підвищити ефективність маршрутизації. Приклади доцільних успішних комбінацій алгоритмів:
 - A* та RRT: Комбінація цих алгоритмів може допомогти в розв'язанні задач, де необхідно швидко адаптуватися до змін у середовищі при одночасному забезпеченні оптимального шляху;
 - Дейкстри та PRM: ця комбінація може бути корисною для детальної роботи в складних середовищах, де необхідно поєднання загального планування та локального деталізованого пошуку.
4. Аналіз засвідчує, що існує значний потенціал для застосування та комбінування різних алгоритмів маршрутизації у вирішенні різних завдань маршрутизації в роботизованих системах. Ефективне використання алгоритмів залежить від умов завдань, динаміки середовища, та вимог до обчислювальних ресурсів. Результати цього дослідження можуть слугувати базою для подальших розробок в галузі роботизованих навігаційних систем, забезпечуючи більшу гнучкість та ефективність у вирішенні різноманітних практичних завдань.
5. Новизна результатів досліджень полягає у визначенні характеристик і рекомендацій щодо використання існуючих алгоритмів маршрутизації для створення надійних комунікацій з використанням мобільних технологій і роботизованих систем. Їх практичне значення полягає в тому, що з систематизованою множиною алгоритмів і наданими рекомендаціями можуть бути використані для створення інформаційної технології та системи підтримки прийняття рішень для формування маршрутів.
6. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розроблення алгоритмів для систем підтримки прийняття рішень щодо планування [7], розгортання [45] і підтримки надійного функціонування [46] літаючих мереж, а також комбінованих роботизованих систем, які об'єднують БПЛА і наземних роботів в умовах рухливих 2D/3D перешкод, зміни умов використання тощо.

Література

1. L. Aggarwal, "Lifi based data transmission", Interantional J. Scientific Res. Eng. Manage., т. 06, № 03, берез. 2022. Дата звернення: 9 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.55041/ijrem11948>
2. V. M. Baeza та R. A. Garcia. "LiFi Technology Overview: Taxonomy, and future directions". Research Gate. Дата звернення: 7 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: https://www.researchgate.net/publication/369369233_LiFi_Technology_Overview_taxonomy_and_future_directions

3. C. Agarwal, M. Kulshrestha, H. Rathore та K. J. “High speed wireless internet using lifi”, SSRN Electron. J., 2018. Дата звернення: 9 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3168420>
4. P. Yarbrough, T. Welker, D. Silva, R. Islam, V. V. Patamsetti та O. Abiona, “Analyzing li-fi communication benefits compared to wi-fi”, Int. J. Commun., Netw. System Sci., т. 15, № 06, с. 67–77, 2022. Дата звернення: 10 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.4236/ijcns.2022.156006>
5. D. N. Anwar, R. Ahmad, H. Bany Salameh, H. Elgala та M. Ayyash, “Performance analysis of neural network-based unified physical layer for indoor hybrid LiFi–WiFi flying networks”, Neural Comput. Appl., верес. 2023. Дата звернення: 13 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09017-7>
6. Y. Zhang, Y. Hong, M. Guizani, S. Wu, P. Zhang та R. Liu, “A multi-layer information dissemination model and interference optimization strategy for communication networks in disaster areas”, IEEE Trans. Veh. Technol., с. 1–14, 2023. Дата звернення: 27 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/tvt.2023.3304707>
7. K. Leichenko, H. Fesenko, V. Kharchenko та O. Iliashenko, “Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: Algorithms of finding the path for UAV placement”, Radioelectron. Comput. Syst., т. 2024, № 1, с. 176–195, лют. 2024. Дата звернення: 13 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.14>
8. J. Agirrebeitia, R. Avilés, I. F. de Bustos та G. Ajuria, “A new APF strategy for path planning in environments with obstacles”, Mechanism Mach. Theory, т. 40, № 6, с. 645–658, черв. 2005. Дата звернення: 7 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2005.01.006>
9. L. Zheng, W. Yu, G. Li, G. Qin та Y. Luo, “Particle swarm algorithm path-planning method for mobile robots based on artificial potential fields”, Sensors, т. 23, № 13, с. 6082, лип. 2023. Дата звернення: 14 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/s23136082>
10. F. Xu, H. Zhao, Z. Nie, X. Zhou та Z. Tao, “Path planning based on improved artificial potential field method”, Proc. Int. Conf. Artif. Life Robot., т. 25, с. 592–598, січ. 2020. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.5954/icarob.2020.os11-13>
11. N. Wang, J. Dai та J. Ying, “UAV formation obstacle avoidance control algorithm based on improved artificial potential field and consensus”, Int. J. Aeronautical Space Sci., серп. 2021. Дата звернення: 7 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00407-6>
12. M. Psocka, F. Duchoň, M. Roman, T. Michal та D. Michal, “Global path planning method based on a modification of the wavefront algorithm for ground mobile robots”, Robotics, т. 12, № 1, с. 25, лют. 2023. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/robotics12010025>
13. S. W. G. AbuSalim, R. Ibrahim, M. Zainuri Saringat, S. Jamel та J. Abdul Wahab, “Comparative analysis between dijkstra and bellman-ford algorithms in shortest path optimization”, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., т. 917, с. 012077, верес. 2020. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/917/1/012077>
14. S. Hougardy, J. Silvanus та J. Vygen, “Dijkstra meets Steiner: A fast exact goal-oriented Steiner tree algorithm”, Math. Program. Computation, т. 9, № 2, с. 135–202, лип. 2016. Дата звернення: 21 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1007/s12532-016-0110-1>
15. X. Bai, L. Wang, Y. Hu, P. Li та Y. Zu, “Optimal path planning method for IMU systemlevel calibration based on improved Dijkstra’s algorithm”, IEEE Access, с. 1, 2023. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3240518>
16. G. Tang, C. Tang, C. Claramunt, X. Hu та P. Zhou, “Geometric a-star algorithm: An improved a-star algorithm for AGV path planning in a port environment”, IEEE Access, т. 9, с. 59196–59210, 2021. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3070054>
17. P. Xin, X. Wang, X. Liu, Y. Wang, Z. Zhai та X. Ma, “Improved bidirectional RRT* algorithm for robot path planning”, Sensors, т. 23, № 2, с. 1041, січ. 2023. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/s23021041>
18. R. Mashayekhi, M. Y. I. Idris, M. H. Anisi, I. Ahmedy та I. Ali, “Informed rrt*-connect: an asymptotically optimal single-query path planning method”, IEEE Access, т. 8, с. 19842–19852, 2020. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2969316>
19. I. Ko, B. Kim та F. C. Park, “Randomized path planning on vector fields”, Int. J. Robot. Res., т. 33, № 13, с. 1664–1682, жовт. 2014. Дата звернення: 14 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1177/0278364914545812>
20. J. Zhang, Y. An, J. Cao, O. Y. Shibo та L. Wang, “UAV trajectory planning for complex open storage environments based on an improved RRT algorithm”, IEEE Access, с. 1, 2023. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3252018>
21. Y. Yang, H. Leeghim та D. Kim, “Dubins path-oriented rapidly exploring random tree* for three-dimensional path planning of unmanned aerial vehicles”, Electronics, т. 11, № 15, с. 2338, лип. 2022. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/electronics11152338>

22. S.-K. Huang, W.-J. Wang та С.-Н. Sun, “A path planning strategy for multi-robot moving with path-priority order based on a generalized Voronoi diagram”, Appl. Sci., т. 11, № 20, с. 9650, жовт. 2021. Дата звернення: 26 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/app11209650>
23. G. Zhu та ін., “AUV dynamic obstacle avoidance method based on improved PPO algorithm”, IEEE Access, с. 1, 2022. Дата звернення: 7 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3223382>
24. Z. Liu, Q. Wang та B. Yang, “Reinforcement learning-based path planning algorithm for mobile robots”, Wireless Commun. Mobile Comput., т. 2022, с. 1–10, трав. 2022. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1155/2022/1859020>
25. A. A. Tamimi, “Comparison studies for different shortest path algorithms”, Int. J. Comput. & Technol., т. 14, № 8, с. 5979–5986, черв. 2015. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.24297/ijct.v14i8.1857>
26. L. Sahoo, S. Sen, K. Tiwary, S. Samanta та T. Senapati, “Modified floyd–warshall’s algorithm for maximum connectivity in wireless sensor networks under uncertainty”, Discrete Dyn. Nature Soc., т. 2022, с. 1–11, квіт. 2022. Дата звернення: 14 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1155/2022/5973433>
27. G. S. Shahi, R. S. Batth та S. Egerton, “A comparative study on efficient path finding algorithms for route planning in smart vehicular networks”, Int. J. Comput. Netw. Appl., т. 7, № 5, с. 157, жовт. 2020. Дата звернення: 11 лют. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.22247/ijcna/2020/204020>
28. M. Shanmugavel, A. Tsourdos, B. White та R. Żbikowski, “Co-operative path planning of multiple UAVs using Dubins paths with clothoid arcs”, Control Eng. Pract., т. 18, № 9, с. 1084–1092, верес. 2010. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.02.010>
29. “The shortest path planning for manoeuvres of UAV”, Acta Polytech. Hung., т. 10, № 01, січ. 2013. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.12700/aph.10.01.2013.1.13>
30. J. Luo, Y. Tian та Z. Wang, “Research on unmanned aerial vehicle path planning”, Drones, т. 8, № 2, с. 51, лют. 2024. Дата звернення: 13 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/drones8020051>
31. E. K. Xidias та P. N. Azariadis, “Computing collision-free motions for a team of robots using formation and non-holonomic constraints”, Robot. Auton. Syst., т. 82, с. 15–23, серп. 2016. Дата звернення: 7 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.04.008>
32. P. Liu, J. Sun, R. Fu, Y.-L. Chen, W. Feng та X. Wu, “A new path planning algorithm with uncertainty information of robot's initial position”, у 2013 IEEE Int. Conf. Inf. Automat. (ICIA), Yinchuan, China, 26–28 серп. 2013. IEEE, 2013. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/icinfa.2013.6720470>
33. R. Kala, A. Shukla та R. Tiwari, “Robot path planning using dynamic programming with accelerating nodes”, Paladyn, J. Behav. Robot., т. 3, № 1, січ. 2012. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.2478/s13230-012-0013-4>
34. X. Liang, G. Meng, Y. Xu та H. Luo, “A geometrical path planning method for unmanned aerial vehicle in 2D/3D complex environment”, Intell. Service Robot., т. 11, № 3, с. 301–312, трав. 2018. Дата звернення: 13 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1007/s11370-018-0254-0>
35. M. S. Ibrahim, S. Rahman, M. S. Hasan, M. U. Ahmad та A. Abrar, “Flow-Based path planning for multiple homogenous uavs for outdoor formation-flying”, у 2022 7th Int. Conf. Mech. Eng. Robot. Res. (ICMERR), Krakow, Poland, 9–11 груд. 2022. IEEE, 2022. Дата звернення: 31 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/icmerr56497.2022.10097797>
36. J. Miura, “Support vector path planning”, у 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., Beijing, China, 9–15 жовт. 2006. IEEE, 2006. Дата звернення: 6 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/iros.2006.282140>
37. Q. Jin, Q. Hu, P. Zhao, S. Wang та M. Ai, “An improved probabilistic roadmap planning method for safe indoor flights of unmanned aerial vehicles”, Drones, т. 7, № 2, с. 92, січ. 2023. Дата звернення: 14 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/drones7020092>
38. T. Marcucci, P. Nobel, R. Tedrake та S. Boyd, “Fast path planning through large collections of safe boxes”, ArXiv.org, січ. 2024. Дата звернення: 14 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.01072>
39. Z. Jiandong, G. Yukun, Z. Lihui, Y. Qiming, S. Guoqing та W. Yong, “Real-time UAV path planning based on LSTM network”, J. Syst. Eng. Electron., с. 1–12, 2024. Дата звернення: 30 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.23919/jsee.2023.000157>
40. H. Jafarzadeh та C. H. Fleming, “An exact geometry-based algorithm for path planning”, Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., т. 28, № 3, с. 493–504, верес. 2018. Дата звернення: 14 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.2478/amcs-2018-0038>

41. H. Niu, Y. Lu, A. Savvaris та A. Tsourdos, “An energy-efficient path planning algorithm for unmanned surface vehicles”, *Ocean Eng.*, т. 161, с. 308–321, серп. 2018. Дата звернення: 24 берез. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.025>
42. R. B. Omar, “Path planning for unmanned aerial vehicles using visibility line-based methods”, thesis, Univ. Leicester, 2012. Дата звернення: 13 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: <http://hdl.handle.net/2381/10906>
43. K. Sharma та ін., “Early detection of obstacle to optimize the robot path planning”, *Drones*, т. 6, № 10, с. 265, верес. 2022. Дата звернення: 7 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/drones6100265>
44. H. Yu, J. Zhu, Y. Wang, W. Jia, M. Sun та Y. Tang, “Obstacle classification and 3D measurement in unstructured environments based on tof cameras”, *Sensors*, т. 14, № 6, с. 10753–10782, черв. 2014. Дата звернення: 7 серп. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/s140610753>
45. К. Лейченко та Г. Фесенко, “Програмний засіб підтримки планування розгортання lifi мережі на основі бпла для забезпечення передачі даних в умовах руйнувань”, *Системи упр., навігації та зв’язку. Зб. наук. пр.*, т. 1, № 75, с. 193–200, лют. 2024. Дата звернення: 1 трав. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.26906/sunz.2024.1.193>
46. К. Лейченко, Г. Фесенко та В. Харченко, “Стратегії розгортання та методи забезпечення надійності рою бпла для утворення lifi мережі”, *Measuring Comput. Devices Technol. Processes*, № 1, с. 21–31, берез. 2024. Дата звернення: 1 трав. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-3>

References

1. L. Aggarwal, “Lifi based data transmission”, *Interantional J. Scientific Res. Eng. Manage.*, vol. 06, no. 03, Mar. 2022. Accessed: Aug. 9, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.55041/ijssrem11948>
2. V. M. Baeza and R. A. Garcia. “LiFi Technology Overview: Taxonomy, and future directions.” Research Gate. Accessed: Aug. 7, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/369369233_LiFi_Technology_Overview_taxonomy_and_future_directions
3. C. Agarwal, M. Kulshrestha, H. Rathore, and K. J. “High speed wireless internet using lifi”, *SSRN Electron. J.*, 2018. Accessed: Aug. 9, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3168420>
4. P. Yarbrough, T. Welker, D. Silva, R. Islam, V. V. Patamsetti, and O. Abiona, “Analyzing li-fi communication benefits compared to wi-fi”, *Int. J. Commun., Netw. System Sci.*, vol. 15, no. 06, pp. 67–77, 2022. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/ijcns.2022.156006>
5. D. N. Anwar, R. Ahmad, H. Bany Salameh, H. Elgala, and M. Ayyash, “Performance analysis of neural network-based unified physical layer for indoor hybrid LiFi–WiFi flying networks”, *Neural Comput. Appl.*, Sep. 2023. Accessed: Apr. 13, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09017-7>
6. Y. Zhang, Y. Hong, M. Guizani, S. Wu, P. Zhang, and R. Liu, “A multi-layer information dissemination model and interference optimization strategy for communication networks in disaster areas”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 1–14, 2023. Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tvt.2023.3304707>
7. K. Leichenko, H. Fesenko, V. Kharchenko, and O. Illiashenko, “Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: Algorithms of finding the path for UAV placement”, *Radioelectron. Comput. Syst.*, vol. 2024, no. 1, pp. 176–195, Feb. 2024. Accessed: Apr. 13, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.14>
8. J. Agirrebeitia, R. Avilés, I. F. de Bustos, and G. Ajuria, “A new APF strategy for path planning in environments with obstacles”, *Mechanism Mach. Theory*, vol. 40, no. 6, pp. 645–658, Jun. 2005. Accessed: Aug. 7, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2005.01.006>
9. L. Zheng, W. Yu, G. Li, G. Qin, and Y. Luo, “Particle swarm algorithm path-planning method for mobile robots based on artificial potential fields”, *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 6082, Jul. 2023. Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23136082>
10. F. Xu, H. Zhao, Z. Nie, X. Zhou, and Z. Tao, “Path planning based on improved artificial potential field method”, *Proc. Int. Conf. Artif. Life Robot.*, vol. 25, pp. 592–598, Jan. 2020. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5954/icarob.2020.os11-13>
11. N. Wang, J. Dai, and J. Ying, “UAV formation obstacle avoidance control algorithm based on improved artificial potential field and consensus”, *Int. J. Aeronautical Space Sci.*, Aug. 2021. Accessed: Aug. 7, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00407-6>
12. M. Psołka, F. Duchoň, M. Roman, T. Michal, and D. Michal, “Global path planning method based on a modification of the wavefront algorithm for ground mobile robots”, *Robotics*, vol. 12, no. 1, p. 25, Feb. 2023. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/robotics12010025>
13. S. W. G. AbuSalim, R. Ibrahim, M. Zainuri Saringat, S. Jamel, and J. Abdul Wahab, “Comparative analysis between dijkstra and bellman-ford algorithms in shortest path optimization”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 917, p. 012077, Sep. 2020. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/917/1/012077>
14. S. Hougardy, J. Silvanus, and J. Vygen, “Dijkstra meets Steiner: A fast exact goal-oriented Steiner tree algorithm”, *Math. Program. Computation*, vol. 9, no. 2, pp. 135–202, Jul. 2016. Accessed: Apr. 21, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12532-016-0110-1>
15. X. Bai, L. Wang, Y. Hu, P. Li, and Y. Zu, “Optimal path planning method for IMU systemlevel calibration based on improved Dijkstra’s algorithm”, *IEEE Access*, p. 1, 2023. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3240518>
16. G. Tang, C. Tang, C. Claramunt, X. Hu, and P. Zhou, “Geometric a-star algorithm: An improved a-star algorithm for AGV path planning in a port environment”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 59196–59210, 2021. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3070054>

17. P. Xin, X. Wang, X. Liu, Y. Wang, Z. Zhai, and X. Ma, "Improved bidirectional RRT* algorithm for robot path planning", *Sensors*, vol. 23, no. 2, p. 1041, Jan. 2023. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23021041>
18. R. Mashayekhi, M. Y. I. Idris, M. H. Anisi, I. Ahmedy, and I. Ali, "Informed rrt*-connect: an asymptotically optimal single-query path planning method", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 19842–19852, 2020. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2969316>
19. I. Ko, B. Kim, and F. C. Park, "Randomized path planning on vector fields", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 33, no. 13, pp. 1664–1682, Oct. 2014. Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0278364914545812>
20. J. Zhang, Y. An, J. Cao, O. Y. Shibo, and L. Wang, "UAV trajectory planning for complex open storage environments based on an improved RRT algorithm", *IEEE Access*, p. 1, 2023. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3252018>
21. Y. Yang, H. Leeghim, and D. Kim, "Dubins path-oriented rapidly exploring random tree* for three-dimensional path planning of unmanned aerial vehicles", *Electronics*, vol. 11, no. 15, p. 2338, Jul. 2022. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11152338>
22. S.-K. Huang, W.-J. Wang, and C.-H. Sun, "A path planning strategy for multi-robot moving with path-priority order based on a generalized Voronoi diagram", *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 20, p. 9650, Oct. 2021. Accessed: Apr. 26, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11209650>
23. G. Zhu et al., "AUV dynamic obstacle avoidance method based on improved PPO algorithm", *IEEE Access*, p. 1, 2022. Accessed: Aug. 7, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3223382>
24. Z. Liu, Q. Wang, and B. Yang, "Reinforcement learning-based path planning algorithm for mobile robots", *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 2022, pp. 1–10, May 2022. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2022/1859020>
25. A. A. Tamimi, "Comparison studies for different shortest path algorithms", *Int. J. Comput. & Technol.*, vol. 14, no. 8, pp. 5979–5986, Jun. 2015. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24297/ijct.v14i8.1857>
26. L. Sahoo, S. Sen, K. Tiwary, S. Samanta, and T. Senapati, "Modified floyd–warshall's algorithm for maximum connectivity in wireless sensor networks under uncertainty", *Discrete Dyn. Nature Soc.*, vol. 2022, pp. 1–11, Apr. 2022. Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2022/5973433>
27. M. Shanmugavel, A. Tsourdos, B. White, and R. Żbikowski, "Co-operative path planning of multiple UAVs using Dubins paths with clothoid arcs", *Control Eng. Pract.*, vol. 18, no. 9, pp. 1084–1092, Sep. 2010. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.02.010>
28. G. S. Shahi, R. S. Bath, and S. Egerton, "A comparative study on efficient path finding algorithms for route planning in smart vehicular networks", *Int. J. Comput. Netw. Appl.*, vol. 7, no. 5, p. 157, Oct. 2020. Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22247/ijcna/2020/204020>
29. "The shortest path planning for manoeuvres of UAV", *Acta Polytech. Hung.*, vol. 10, no. 01, Jan. 2013. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12700/aph.10.01.2013.1.13>
30. J. Luo, Y. Tian, and Z. Wang, "Research on unmanned aerial vehicle path planning", *Drones*, vol. 8, no. 2, p. 51, Feb. 2024. Accessed: Apr. 13, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/drones8020051>
31. E. K. Xidias and P. N. Azariadis, "Computing collision-free motions for a team of robots using formation and non-holonomic constraints", *Robot. Auton. Syst.*, vol. 82, pp. 15–23, Aug. 2016. Accessed: Aug. 7, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.04.008>
32. P. Liu, J. Sun, R. Fu, Y.-L. Chen, W. Feng, and X. Wu, "A new path planning algorithm with uncertainty information of robot's initial position", in *2013 IEEE Int. Conf. Inf. Automat. (ICIA)*, Yinchuan, China, Aug. 26–28, 2013. IEEE, 2013. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/icinf.2013.6720470>
33. R. Kala, A. Shukla, and R. Tiwari, "Robot path planning using dynamic programming with accelerating nodes", *Paladyn, J. Behav. Robot.*, vol. 3, no. 1, Jan. 2012. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/s13230-012-0013-4>
34. X. Liang, G. Meng, Y. Xu, and H. Luo, "A geometrical path planning method for unmanned aerial vehicle in 2D/3D complex environment", *Intell. Service Robot.*, vol. 11, no. 3, pp. 301–312, May 2018. Accessed: Apr. 13, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11370-018-0254-0>
35. M. S. Ibrahim, S. Rahman, M. S. Hasan, M. U. Ahmad, and A. Abrar, "Flow-Based path planning for multiple homogenous uavs for outdoor formation-flying", in *2022 7th Int. Conf. Mech. Eng. Robot. Res. (ICMERR)*, Krakow, Poland, Dec. 9–11, 2022. IEEE, 2022. Accessed: Mar. 31, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/icmerr56497.2022.10097797>
36. J. Miura, "Support vector path planning", in *2006 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, Beijing, China, Oct. 9–15, 2006. IEEE, 2006. Accessed: Aug. 6, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/iros.2006.282140>
37. Q. Jin, Q. Hu, P. Zhao, S. Wang, and M. Ai, "An improved probabilistic roadmap planning method for safe indoor flights of unmanned aerial vehicles", *Drones*, vol. 7, no. 2, p. 92, Jan. 2023. Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/drones7020092>
38. T. Marucci, P. Nobel, R. Tedrake, and S. Boyd, "Fast path planning through large collections of safe boxes", *ArXiv.org*, Jan. 2024. Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.01072>
39. H. Jafarzadeh and C. H. Fleming, "An exact geometry-based algorithm for path planning", *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 28, no. 3, pp. 493–504, Sep. 2018. Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/amcs-2018-0038>
40. Z. Jiandong, G. Yukun, Z. Lihui, Y. Qiming, S. Guoqing, and W. Yong, "Real-time UAV path planning based on LSTM network", *J. Syst. Eng. Electron.*, pp. 1–12, 2024. Accessed: Apr. 30, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/jsee.2023.000157>
41. H. Niu, Y. Lu, A. Savvaris, and A. Tsourdos, "An energy-efficient path planning algorithm for unmanned surface vehicles", *Ocean Eng.*, vol. 161, pp. 308–321, Aug. 2018. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.025>
42. R. B. Omar, "Path planning for unmanned aerial vehicles using visibility line-based methods", thesis, Univ. Leicester, 2012. Accessed: Apr. 13, 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2381/10906>
43. K. Sharma et al., "Early detection of obstacle to optimize the robot path planning", *Drones*, vol. 6, no. 10, p. 265, Sep. 2022. Accessed: Aug. 7, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/drones6100265>
44. H. Yu, J. Zhu, Y. Wang, W. Jia, M. Sun, and Y. Tang, "Obstacle classification and 3D measurement in unstructured environments based on tof cameras", *Sensors*, vol. 14, no. 6, pp. 10753–10782, Jun. 2014. Accessed: Aug. 7, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s140610753>
45. K. Leichenko and H. Fesenko, "Prohramnyi zasib pidtrymky planuvannya rozghortannia lifi merezhi na osnovi bpla dlia zabezpechennia peredachi danykh v umovakh ruinuvan", *Systemy upr., navihatsii ta zviazku. Zb. nauk. pr.*, vol. 1, no. 75, pp. 193–200, Feb. 2024. Accessed: May 1, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.26906/sunz.2024.1.193>
46. K. Leichenko, H. Fesenko, and V. Kharchenko, "Stratehii rozghortannia ta metody zabezpechennia nadiinosty roiu bpla dlia utvorennia lifi merezhi", *Measuring Comput. Devices Technol. Processes*, no. 1, pp. 21–31, Mar. 2024. Accessed: May 1, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-3>