

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-20>

УДК 004.42

Лігерко Роман Віталійович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0006-2886-7919>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АЛГОРИТМ АВТОНОМНОГО ПОШУКУ ШЛЯХУ ДРОНУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Лігерко Р.В. Алгоритм автономного пошуку шляху дрону для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. Робота присвячена розробці алгоритму автономного пошуку шляху дрона. Ідея використання такого методу зумовлена необхідністю до пошуку нових шляхів для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури і реагування в непередбачуваних ситуаціях і розробці нових підходів для уникнення проблем, пов'язаних з існуючими методами і технологіями моніторингу і навігації. Метою цієї роботи є дослідження існуючих методів моніторингу, розробка алгоритму вибору напрямку при виявленні перешкод, поєднання з іншими алгоритмами, інтеграція датчиків. Стаття представляє алгоритм автономного руху дрона для побудови тривимірної (3D) мапи приміщення. Алгоритм реалізує пошук і охоплення простору шляхом руху спочатку в площині двовимірного простору (2D), а потім у вертикальному напрямку, дозволяючи дрону ефективно картографувати 3D середовище.

Ключові слова: об'єкт критичної інфраструктури, дрон, алгоритм, автономний рух, моніторинг, навігація.

Ligerko R. Algorithm of autonomous drone path search for monitoring critical infrastructure objects. This work is devoted to the development of an autonomous drone pathfinding algorithm. The idea of using such a method is due to the need to find new ways to monitor critical infrastructure and respond in unforeseen situations and develop new approaches to avoid problems associated with existing methods and technologies of monitoring and navigation. The purpose of this work is the study of existing monitoring methods, the development of an algorithm for choosing a direction when obstacles are detected, combining it with other algorithms, and integrating sensors. The article presents an algorithm for the autonomous movement of a drone for building a three-dimensional (3D) map of a room. The algorithm implements the search and coverage of space by moving first in the plane of two-dimensional space (2D) and then in the vertical direction, allowing the drone to efficiently map the 3D environment.

Keywords: critical infrastructure object, drone, algorithm, autonomous movement, monitoring, navigation.

Проблематика. У сучасному світі дрони набули широкого застосування в різних галузях, включаючи доставку товарів, сільське господарство, інфраструктурний моніторинг та рятувальні операції. Однак, використання дронів, які можуть автономно виконувати завдання, потребує ефективних та безпечних алгоритмів пошуку шляху. Використання дронів для моніторингу критичної інфраструктури має кілька важливих переваг. Дрони здатні швидко здійснювати інспекції на великих територіях і в важкодоступних місцях, що зменшує час на перевірку стану об'єктів інфраструктури. Вони можуть виконувати інспекції у небезпечних умовах, таких як висотні споруди, електричні лінії або зони, забруднені хімічними речовинами, знижуючи ризик для людей. Сучасні дрони обладнані високоточними камерами, тепловізорами, лазерними сканерами, що дозволяє отримувати детальні зображення та 3D-моделі об'єктів. Сучасна побудова 3D-мап використовує технології, такі як LIDAR, дрони та алгоритми машинного навчання, для створення точних моделей простору в реальному часі [1]. Процес побудови 3D-мап зазвичай включає сканування простору з різних ракурсів для точного визначення форми об'єктів, їх відстаней та розташування, що дозволяє створювати деталізовані віртуальні моделі реального середовища [2]. Це підвищує якість моніторингу та дозволяє виявляти дрібні дефекти або пошкодження. Використання дронів може суттєво знизити витрати на інспекцію та обслуговування, оскільки зменшується потреба у важкому обладнанні або спеціалізованих командах. Вони можуть передавати дані в реальному часі, що дозволяє оперативного реагувати на аварійні ситуації та приймати рішення про негайне втручання.

Аналіз досліджень. Технології навігації дронів швидко розвиваються, що дозволяє їм виконувати широкий спектр завдань з високою точністю та ефективністю. Від доставок і моніторингу до рятувальних операцій, навігаційні системи є критичними для успішного виконання місій. Одними з найвідоміших на сьогодні таких технологій є SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) та ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF). Вони мають багато переваг, але також є певні недоліки та обмеження, про які варто знати, особливо у контексті їх використання для автономних дронів або роботів. SLAM алгоритми, особливо в реальному часі, можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів. Це може стати проблемою для дронів або роботів з обмеженою потужністю процесора та пам'яттю. SLAM погано працює в умовах, коли навколишнє середовище

швидко змінюється або містить рухомі об'єкти [3]. Наприклад, в динамічному міському середовищі або у приміщеннях із рухомими людьми та предметами, алгоритми можуть плутатися, що призводить до неправильного картування або локалізації. При роботі з великими просторами SLAM може генерувати карти з високою складністю, що підвищує навантаження на пам'ять і ускладнює обробку [4]. Також великі карти можуть містити помилки, що накопичуються з часом через неточності в датчиках. Алгоритми візуального SLAM можуть зазнавати труднощів у ситуаціях із недостатньою освітленістю або сильною зміною освітлення [5] (наприклад, перехід від темної кімнати до освітленої). Це може впливати на точність візуальної локалізації. ORB базується на візуальних даних, тому він дуже чутливий до змін освітлення та відсутності текстурованих поверхонь [6]. У середовищах із слабкою освітленістю або коли немає достатньо виразних текстур (стіни без малюнків або візерунків), алгоритм може не працювати належним чином. Основними викликами у розвитку навігаційних технологій для дронів є підвищення точності в умовах перешкод, зниження вартості сенсорів та покращення енергоефективності. Розробка нових алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для обробки даних з різних сенсорів також відкриває нові можливості для автономної навігації. Для виконання складних завдань в реальних умовах дрони повинні забезпечувати високий рівень автономності, де вони можуть самостійно планувати траєкторії, ухилятися від перешкод, приймати рішення і реагувати на динамічні зміни середовища. Зменшення втручання людини означає розвиток алгоритмів, які здатні самостійно адаптуватися до нових обставин і приймати рішення на основі поточних даних сенсорів в режимі реального часу. Недоліки існуючих підходів, таких як SLAM та ORB, вимагають вдосконалень у напрямках роботи з динамічними середовищами, енергетичної ефективності, інтеграції різних сенсорів та розширення можливостей у складних умовах. В роботі буде представлено алгоритм автономного пошуку шляху з такими перевагами як можливість працювати з різними датчиками, спрощення технології оцінювання напрямку, можливість застосування з кількома режимами роботи, можливість масштабування середовища моніторингу.

За допомогою дронів галузь моніторингу критичної інфраструктури активно розвивається, але ще не досягла масштабного впровадження. Сьогодні дрони використовуються для моніторингу електромереж, нафто- та газопроводів, мостів, дамб, портів тощо, проте повне впровадження використання цієї технології поки не здійснене. Приклади катастроф, які сталися на об'єктах критичної інфраструктури, коли варто було б використовувати дрони для моніторингу наслідків:

– аварія на дамбі в Бразилії (2019). Прорив греблі біля шахти у муніципалітеті Брумадінью призвів до масових руйнувань та загибелі понад 250 людей. Шлам із шахти затопив велику територію, знищивши навколишні села. Дрони могли б використовуватися для швидкої оцінки території після прориву, допомагаючи рятувальним службам ідентифікувати забруднені зони, оцінювати шкоду для навколишнього середовища та координувати пошуково-рятувальні операції;

– ураган "Марія" в Пуерто-Рико (2017). Після удару урагану "Марія" на Пуерто-Рико майже вся електромережа була зруйнована, а інфраструктура (дороги, мости, водопостачання) значно постраждала. Використання дронів могло б забезпечити швидке збирання даних про пошкодження електромереж, мостів та доріг. Це б значно прискорило відновлювальні роботи, а також допомогло доставляти медикаменти та провізію в важкодоступні райони;

– вибух у порту Бейрута (2020). Потужний вибух у порту Бейрута стався внаслідок неправильного зберігання аміачної селітри, що призвело до значних руйнувань та загибелі понад 200 людей. Дрони могли б використовуватися для безпечного обстеження руїн порту, оцінки ризиків подальших вибухів або обвалів, а також для моніторингу забруднення повітря та ґрунту, зменшуючи ризики для рятувальних служб.

Мета роботи. Метою роботи є демонстрація роботи алгоритму автономного пошуку руху дрона, доведення ефективності його роботи як в штатному режимі, так і у критичній ситуації, аналіз ефективності роботи алгоритму з різними вхідними даними.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Типова система керування дроном складається з блоків обробки польоту, сенсорів для навігації та стабілізації, а також комунікаційного модуля для передачі команд і даних між оператором і дроном. Літаючий дрон складається з кількох ключових компонентів, які забезпечують його функціонування. Кожен з цих компонентів має свої особливості та відіграє важливу роль в роботі дрона. Основні його складові поділені на програмне забезпечення, яке контролює всі процеси дрона, від польоту до збору та обробки даних, забезпечує зв'язок з пультом управління або автономну роботу, представляє собою API керування дроном, прикладом є DJI SDK (Software Development Kit)

– це набір інструментів, створених компанією DJI – інтерфейс для створення додатків для дронів, що дозволяє програмувати автономні місії, отримувати дані з датчиків і камер. ПЗ також включає алгоритм пошуку, систему створення віртуальної мапи і зв'язок з віддаленим центром керування. Обладнання представляє собою типову пропелерну UAV (Unmanned Aerial Vehicle) систему, яка зображена на рисунку 1:

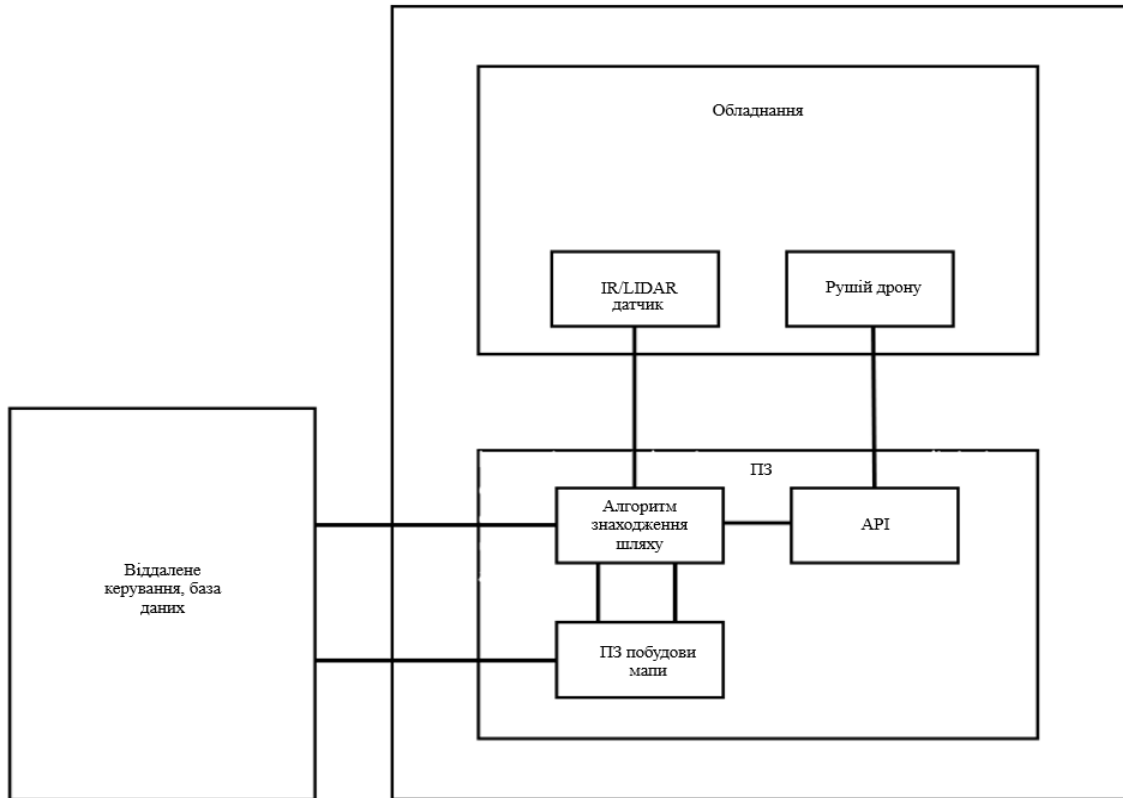


Рис. 1. Структура системи автономного моніторингу

На об'єктах критичної інфраструктури моніторинг може відбуватися як в звичайному режимі, тобто політ по заданих траєкторіях з ціллю моніторингу відхилення певних значень від нормалі, так і в режимі оперативного реагування, коли задача дронів буде заключатися у прольоті в місця куди людині було б дістатися важко і тим більше небезпечно.

Автономна робота дрона заключається в алгоритмі безперервного польоту(поки задача аналізу простору не буде виконана повністю) зі зміною основного напрямку у випадку зіткнення з непрохідною місцевістю і збором даних по пройденим маршрутам.

Алгоритм починає свою роботу з обмеження руху дрона у двовимірній площині, обираючи початкову точку дослідження. Дрон рухається вперед, використовуючи сенсори для виявлення перешкод. Якщо перешкода виявляється попереду, дрон вибирає напрямок куди можна продовжувати рух: наліво або направо. У нашому випадку, перевага надається правій стороні. Після повернення до початкової точки, дрон аналізує всі можливі праві шляхи, які він зафіксував під час початкового обходу. Він вибирає найближчу з таких точок і продовжує мапування, рухаючись знову вперед, і повторює процедуру до тих пір, поки всі шляхи не будуть досліджені.

Після того, як дрон повністю охопить площину в 2D, він повертається до початкової точки.

Використовуючи алгоритм A*, який використовується для знаходження найкоротшого шляху між двома точками на графі, дрон повертається до стартової позиції та переходить до наступного рівня – вгору або вниз.

Схему алгоритму зображено на рисунку 2.

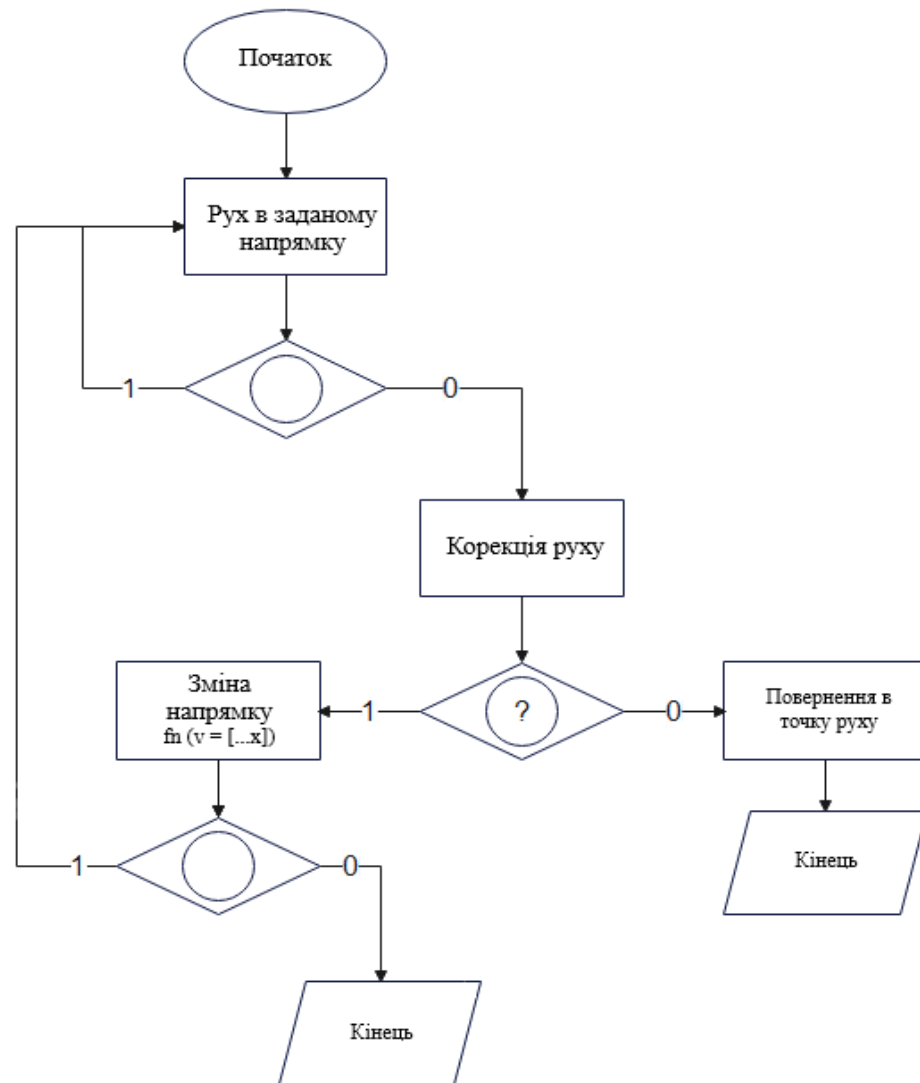


Рис. 2. Блок-схема алгоритму автономного пошуку шляху

Процес побудови карти продовжується на новому рівні. Дрон повторює цей процес для всіх рівнів приміщення. Кожен новий рівень досліджується аналогічно 2D площині. Після того, як усі можливі напрямки будуть досліджені, дрон має повну віртуальну 3D мапу приміщення. Умови закінчення сканування рівня можна описати за допомогою множин (1):

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \text{ де } |A| = n, \quad (1)$$

де A – множина можливих шляхів.

B – множина, яка складається з двох підмножин (2):

$$B = B1 \cup B2; B1 \cap B2 = \emptyset, \quad (2)$$

де $B1$ – шляхи куди пройти неможливо з самого початку, а $B2$ – шляхи, які наповнюються з часом, тобто ті, які дрон уже пройшов.

З плином часу елементи з множини A поступово переходять у множину $B1$, поки A не стане порожньою. А множина $B2$ наповнюється елементами незалежно від інших процесів (3):

$$f_A(t): A \rightarrow B1; f_{B2}(t): \emptyset \rightarrow B2 \quad (3)$$

Зміни множин з плином часу можна виразити рівняннями:

$$A(t) = A(0) - f_A(t); B1(t) = f_A(t) \quad (4)$$

Маршрут автономного польоту дрона можна побачити на рисунку 3.

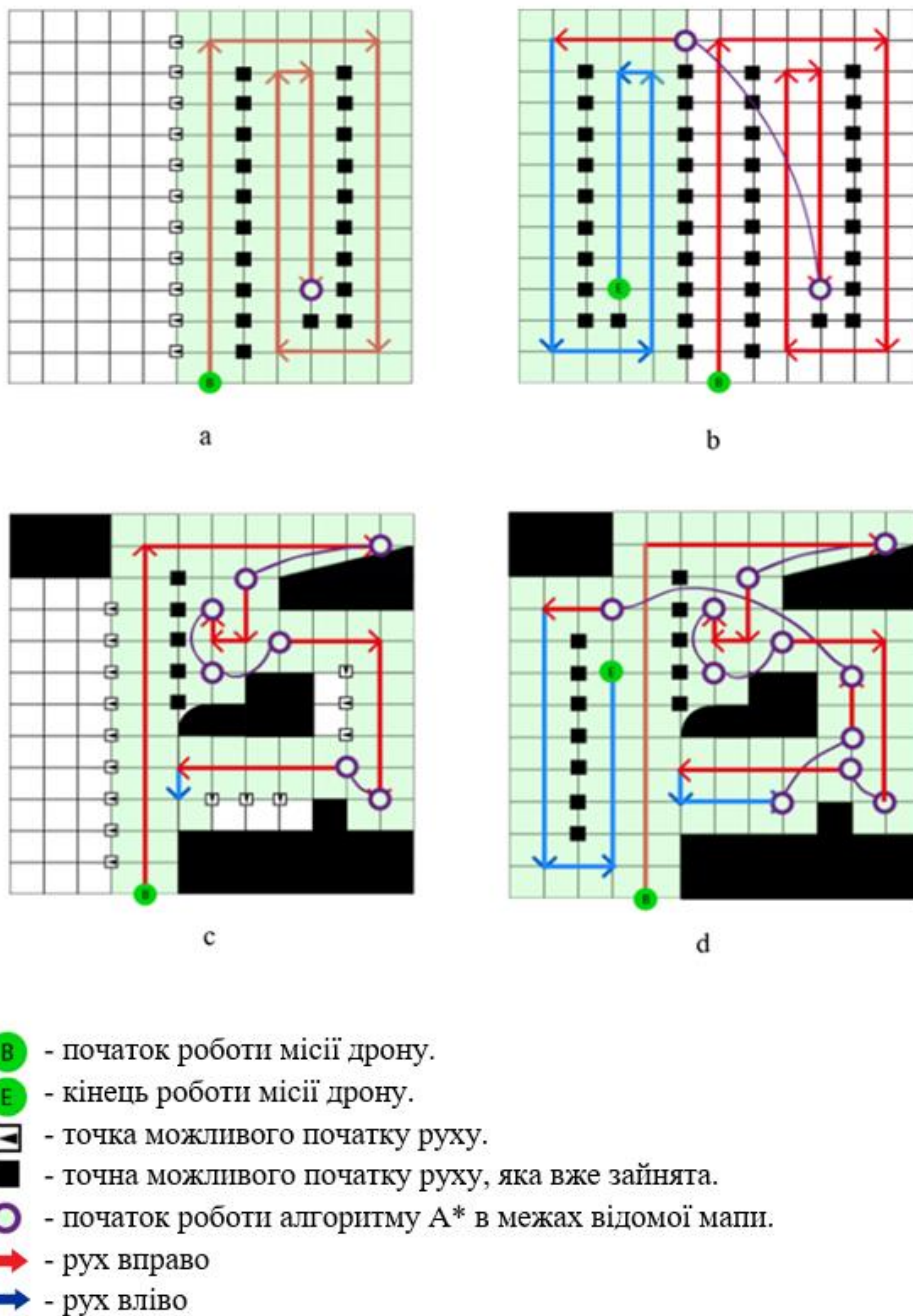


Рис. 3. Ілюстрація роботи алгоритму в штатному режимі і в критичній ситуації: а – початок роботи алгоритму в штатних умовах; б – кінець роботи алгоритму в штатних умовах; с – початок роботи алгоритму в критичній ситуації; д – кінець роботи алгоритму в критичній ситуації

Час охоплення рівня (5) залежить від величини кроку дрона d_{step} , оскільки більші кроки зменшують кількість кроків, необхідних для покриття площі рівня. Швидкість дрона V знижується залежно від відстані сенсора d_s , що впливає на частоту зупинок і розворотів.

$$V_a = \frac{V}{d_s}; S_L = \frac{A}{d^2}, \quad (5)$$

де A – площа рівня (m^2), V – швидкість дрона (m/c); d_s – відстань спрацювання сенсора(m).

Можна вирахувати час проходження одного рівня – t_{level} та усього простору в цілому – T_{total} .

$$t_{level} = \frac{A}{V_a \cdot d_{step}^2} = \frac{A}{v \cdot d_{step}^2 \cdot d_s}; T_{total} = n_z \cdot t_{level} = \frac{A \cdot n_z}{v \cdot d_{step}^2 \cdot d_s}, \quad (6)$$

де n_z – кількість рівнів; d_{step} – величина кроку дрона (m);

Кількість кроків на одному рівні залежить від площі A і величини кроку d_s , що визначає розмір одного кроку по площині. Також визначаємо кількість кроків на рівні (6). Коригована швидкість руху дрона з урахуванням відстані сенсора. Чим більша відстань спрацювання сенсора d_s , тим раніше дрон реагує на перешкоди, що знижує ефективну швидкість. Можна визначити час охоплення одного рівня (7). Час охоплення одного рівня залежить від площі, кроку дрона, швидкості дрона і відстані сенсора. Можна порахувати загальний час картографування (8). Результат ефективності роботи алгоритму з різними вхідними параметрами можна побачити в табл. 1.

Таблиця 1. результати дослідження з різними вхідними даними

Площа(м ²)	Швидкість (м/с)	Відстань сенсора (м)	Кількість рівнів	Відстань кроку(м)	Загальний час(с)
100	2	1	3	1	150
100	2	2	3	1	75
100	4	1	6	1	150
100	4	2	6	1	75
200	2	1	3	1.5	133
200	2	2	3	1.5	66
200	4	1	6	1.5	133
200	4	2	6	1.5	66
300	2	1	3	2	112
300	2	2	3	2	56

Висновки. У роботі було розглянуто проблеми моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, доведено доцільність використання технології автономного руху дронів, описано роботу технології автономного руху дронів з урахуванням складових частин дрону і алгоритму автономного руху. Запропонований алгоритм автономного руху дрона для побудови 3D мапи є корисним для застосування в різних галузях, де потрібне точне картографування простору без участі людини. Основна користь алгоритму полягає в його здатності адаптуватися до складних умов середовища, забезпечуючи високу точність і ефективність процесу. Завдяки тому, що дрон може самостійно обирати напрямок руху, реагувати на перешкоди, і використовувати інформацію для побудови карти в реальному часі.

Список бібліографічного опису

1. Горнунг А., Вурм К. М., Бенневіц М., Стахніс К., Бургард В. OctoMap (2013) ефективна ймовірнісна 3D-картографічна система на основі Octrees. Автономні роботи, С. 189–206.
2. Ньюком Р. А., Лавгроув С. Дж., Девісон А. Дж. DTAM (2011) Щільне відстеження та картографування в реальному часі. Матеріали міжнародної конференції IEEE з комп'ютерного зору, С. 2320–2327.
3. Монтемерло М., Трун С., Коллер Д., Вегбрайт Б. FastSLAM (2002) Факторизоване рішення проблеми одночасної локалізації та картографування. Матеріали конференції AAAI. AAAI Press, С. 593–596.
4. Девісон А. Дж., Рейд І. Д., Молтон Н. Д., Стасе О. MonoSLAM (2007) Однокамерний SLAM у реальному часі. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, С. 1052–1067.
5. Каммінз М. Дж., Ньюмен П. FAB-MAP (2008) Імовірнісна локалізація та відображення в просторі видимості. International Journal of Robotics Research, С. 647–665.
6. Монтіель Дж. М. М., Мурта Д., Торрес Дж., Тарроні П. ORB-SLAM (2015) Універсальна і точна монокулярна система SLAM. IEEE Transactions on Robotics, С. 1147–1163.

References

1. Hornung A., Wurm K. M., Bennewitz M., Stachnis K., Burghard W. OctoMap (2013) An efficient probabilistic 3D mapping system based on Octrees. Autonomous Robots, P. 189–206.
2. Newcome R. A., Lovegrove S. J., Davison A. J. DTAM (2011) Dense tracking and mapping in real time. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, P. 2320–2327.
3. Montemerlo M., Thrun S., Koller D., Wegbright B. FastSLAM (2002) A factorized solution to the simultaneous localization and mapping problem. Proceedings of the AAAI Conference. AAAI Press, P. 593–596.
4. Davison A. J., Reid I. D., Molton N. D., Stasse O. MonoSLAM (2007) Real-time single-camera SLAM. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, P. 1052–1067.
5. Cummins M. J., Newman P. FAB-MAP (2008) Probabilistic localization and mapping in view space. International Journal of Robotics Research, P. 647–665.
1. Montiel J. M. M., Murta D., Torres J., Tarroni P. ORB-SLAM (2015) A universal and accurate monocular SLAM system. IEEE Transactions on Robotics, P. 1147–1163