

Комплексна система моніторингу стану будівель із застосуванням фотограмметрії та маршрутного планування БПЛА

Єлизавета Соловей, студент¹ (ORCID: 0009-0005-6056-0944), Дарина Миронюк, студент¹ (ORCID: 0009-0004-5689-7387), Ігор Босенко, доктор філософії¹ (ORCID: 0000-0002-9046-4380),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі представлено комплексний підхід до моніторингу стану будівель із застосуванням фотограмметрії та автоматизованого планування маршрутів безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Фотограмметрія дозволяє отримувати високоточні тривимірні моделі фасадів і виявляти поверхневі дефекти, такі як тріщини, пошкодження швів та відшарування облицювання. Для ефективної реалізації процесу обльоту будівель застосовано графові алгоритми (A*, TSP), які забезпечують оптимізацію маршрутів БПЛА з урахуванням обмежень середовища та мінімізації енергоспоживання.

Ключові слова: фотограмметрія, маршрутизація БПЛА, графові алгоритми, 3D-моделювання фасадів.

1. ВСТУП

Традиційні методи обстеження фасадів є трудомісткими та часто залежать від умов освітлення й доступності об'єкта. Використання фотограмметрії у поєднанні з безпілотними літальними апаратами дозволяє отримувати високоточні 3D-моделі фасадів і виявляти поверхневі дефекти. Додатково, застосування алгоритмів автоматичного планування маршрутів забезпечує ефективність обльоту будівель, знижує витрати часу та енергії, що робить такий підхід перспективним для автоматизації процесу технічного моніторингу.

2. МЕТА РОБОТИ

Розробити комплексну систему моніторингу стану будівель, яка поєднує фотограмметрію для виявлення поверхневих дефектів фасадів та графові алгоритми маршрутизації для оптимізації польотів безпілотних літальних апаратів.

3. СХЕМИ ХМАР ТОЧОК

Щільна хмара точок [1] — це набір вершин у тривимірній системі координат, що відтворюють зовнішню поверхню об'єкта. Такі хмари широко застосовуються для 3D-моделювання, метрології, візуалізації об'єктів, створення анімацій та рендерів. Якщо для отримання хмари точок невеликого предмета достатньо 3D-сканера, то під час роботи з великими об'єктами — архітектурними спорудами, будинками, житловими комплексами чи навіть цілими містами — використовують інші методи, зокрема аерофотограмметрію (отримання даних з безпілотників).

4. МАРШРУТИЗАЦІЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У 3D-ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Для ефективного збору зображень фасадів використовуються графові алгоритми, які дозволяють визначати оптимальні траєкторії польоту з урахуванням геометрії об'єкта, наявності перешкод та обмеженого ресурсу акумулятора. Алгоритм A* забезпечує пошук найкоротшого шляху між окремими точками зйомки, тоді як задача комівояжера (TSP) визначає оптимальну

послідовність обльоту багатьох цільових точок. Такий підхід мінімізує витрати часу та енергії, забезпечує повне охоплення будівлі та підвищує якість отриманих 3D-моделей..

4.1. А та TSP у маршрутизації БПЛА

Алгоритм A* є одним із ключових інструментів для планування маршрутів безпілотних літальних апаратів. Він дозволяє знаходити найкоротший і безпечний шлях між точками зйомки, враховуючи наявні перешкоди та особливості середовища. Завдяки використанню евристичного алгоритму ефективно відсіює неперспективні напрямки пошуку, що скорочує час обчислень і підвищує швидкість реакції системи у динамічних умовах.

Для обльоту кількох цільових об'єктів A* поєднують із задачею комівояжера (TSP), яка визначає оптимальну послідовність відвідування точок. На стратегічному рівні TSP формує загальний план маршруту, а на тактичному рівні A* у режимі реального часу коригує траєкторію з урахуванням несподіваних перешкод. Такий підхід забезпечує економію часу та енергії дрона, а також повне й ефективне охоплення будівель при фотограмметричному моніторингу. [2]



Рисунок 1. Полігон даху і оптимальний маршрут обльоту (TSP)

Правильно побудований полігон даху та послідовність точок обльоту (рис. 1) гарантують, що дрон здійснить зйомку з необхідними покриттями кадрів і під потрібними кутами. Це забезпечує високу точність побудови 3D-моделі об'єкта, зменшує спотворення та пропуски в даних. Завдяки поєднанню TSP для планування загальної послідовності обльоту та A для локальної корекції траєкторії, фотограмметрична модель набуває

максимальної деталізації й достовірності навіть у складних умовах з перешкодами.

4.2. Виявлення об'єктів за допомогою хмар точок LiDAR

Датчики камери багаті інформацією про текстуру та колір, але не мають прямої інформації про глибину сцени. Таким чином, виявлення тривимірних об'єктів лише за допомогою камери є складним завданням. Для вирішення цієї проблеми були запропоновані різні методи, такі як псевдо-LiDAR, стереозображення та структури світла (structured light), які намагаються відновити глибину сцени на основі 2D-зображень [3].

Однак продуктивність таких моделей нижча, ніж у справжніх 3D-сенсорів, таких як LiDAR, Time-of-Flight (ToF) або RGB-D камери, оскільки вони генерують глибину непрямым шляхом і можуть накопичувати помилки в процесі реконструкції. Наприклад, дані псевдо-LiDAR не ідентичні даним справжнього LiDAR через похибки генерації глибини з 2D-зображень, що може призводити до неточностей у побудові 3D-моделей і визначенні розмірів об'єктів.

Сучасна фотограмметрія використовує хмари точок LiDAR для точного 3D-моделювання об'єктів. Комбінація різних представлень і сенсорів дозволяє підвищити точність і деталізацію моделей, зменшити втрати інформації та покращити реконструкцію складних об'єктів. Такі 3D-моделі дозволяють БПЛА планувати оптимальні маршрути обльоту: алгоритм A* обирає безпечний шлях між точками, враховуючи перешкоди, а TSP мінімізує загальну довжину маршруту, забезпечуючи повне покриття об'єкта. Поєднання високоточної 3D-візуалізації з оптимізованим плануванням маршрутів дозволяє ефективно збирати фотограмметричні дані, зменшує час польоту та підвищує якість реконструкції будівель і об'єктів.

4.3. Найкращі практики збору фотограмметричних даних фасадів будівель

1. Кільцевий обліт низьких будівель (рис. 2).

Для невисоких будівель найбільш ефективним є кільцевий обліт (circular flight path), що забезпечує рівномірне покриття фасаду з усіх боків. Такий метод дозволяє отримати зображення під різними кутами, забезпечує достатнє перекриття кадрів і зменшує ймовірність пропуску деталей, таких як тріщини чи пошкодження облицювання. Кільцевий обліт особливо корисний для будівель зі складною геометрією або з виступаючими елементами.

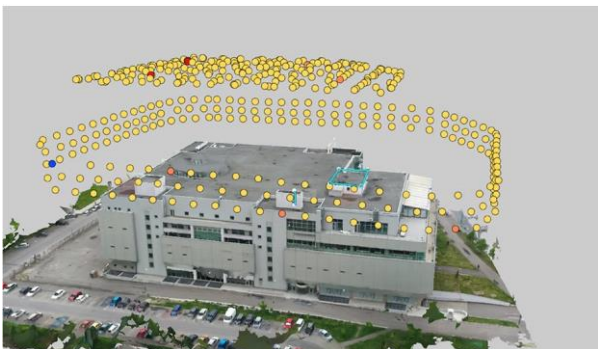


Рисунок 2. Схема захоплення фасаду низької будівлі за допомогою кільцевого обльоту БПЛА

2. Оптимальна висота та перекриття зображень.

Висота польоту повинна гарантувати видимість усіх елементів фасаду, а також уникати перешкод, таких як дерева, антени або зовнішні конструкції. Рекомендується горизонтальне та вертикальне перекриття зображень на рівні 70–80%, що дозволяє забезпечити достатню кількість точок для зшивання фотографій у високоточну хмару точок.

3. Планування маршруту з урахуванням перешкод та енергоспоживання.

Використання графових алгоритмів, таких як A* та TSP, дозволяє побудувати оптимальні траєкторії польоту. Алгоритм A* забезпечує локальну корекцію маршруту в реальному часі, дозволяючи уникати несподіваних перешкод. Задача комівояжера (TSP) визначає оптимальну послідовність обльоту точок на стратегічному рівні, мінімізуючи загальну довжину маршруту та витрати енергії дрона. Комбінація цих алгоритмів забезпечує повне покриття будівлі та високоточне збирання фотограмметричних даних.

4. Поділ об'єкта на логічні зони та контроль якості

Для складних або великих будівель рекомендується поділ фасаду на окремі сегменти або полігони для обльоту. Це дозволяє спростити планування польоту, контролювати перекриття кадрів та уникнути пропусків у даних. Після завершення польоту слід виконати попередню перевірку якості зібраних даних на місці, оцінити покриття фасаду та при необхідності повторити обльоти [4].

5. ВИСНОВКИ

1. Поєднання фотограмметрії та автоматизованого планування маршрутів БПЛА дозволяє створювати високоточні 3D-моделі фасадів і ефективно виявляти поверхневі дефекти.

2. Застосування алгоритмів A* та TSP забезпечує оптимальні траєкторії польоту, мінімізує витрати енергії та часу, а також гарантує повне покриття об'єкта.

3. Використання хмар точок LiDAR підвищує точність реконструкції складних об'єктів і покращує деталізацію 3D-моделей.

Список літератури

- [1] Solar-M, "Преваги фотограмметрії за допомогою дронів." [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://drones.solar-m.com.ua/perevagy-fotogrammetriyi-za-dopomogoyu-droniv>.
- [2] Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107.
- [3] MDPI, "Wavelet Convolutional Neural Network-Based 3D Object Detection for Autonomous Driving." [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/7010>
- [4] Hammer Missions, "Drone Photogrammetry for Buildings: 20 Tips for Repeatable Results." [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.hammermissions.com/post/drone-photogrammetry-for-building-inspections>