

УДК 623.746.-519

Баранов Є.О.¹, Фурманова Н.І.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОД НАВІГАЦІЇ БПЛА В УМОВАХ ВІДСУТНОСТІ GPS-СИГНАЛУ НА ОСНОВІ ВІЗУАЛЬНОЇ ОДОМЕТРІЇ

Навігація безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах відсутності або придушення сигналів GPS є критично важливою проблемою для сучасних військових та цивільних застосувань [1, 2]. Традиційні методи навігації БПЛА суттєво залежать від доступності GPS-сигналів, що створює значні обмеження при виконанні місій у міських умовах, в приміщеннях або при навмисному придушенні навігаційного поля противником [3].

Аналіз останніх досліджень показує, що для вирішення даної проблеми активно розробляються альтернативні методи навігації на основі комп'ютерного зору та одометрії. Зокрема, значний прогрес досягнуто у розробці систем одночасної локалізації та картографування (SLAM) для БПЛА [4], а також у створенні гібридних навігаційних систем, що поєднують дані від різних сенсорів [5]. Однак існуючі рішення все ще мають обмеження щодо точності позиціонування та обчислювальної складності для реалізації на борту БПЛА.

Невирішеною частиною загальної проблеми залишається розробка ефективних методів візуальної одометрії, які б забезпечували необхідну точність навігації при прийнятних обчислювальних витратах в умовах відсутності GPS-сигналів. Особливо актуальним є створення алгоритмів, здатних працювати в режимі реального часу на обмежених обчислювальних ресурсах бортової системи БПЛА.

Метою роботи є підвищення точності та надійності автономної навігації БПЛА шляхом розробки методу візуальної одометрії, що забезпечує визначення параметрів руху літального апарату в режимі реального часу при відсутності GPS-сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити математичну модель визначення параметрів руху БПЛА на основі аналізу послідовності зображень, отриманих з бортової камери, та реалізувати її у вигляді програмного забезпечення для бортового обчислювача. Кінцевим результатом досліджень має стати метод візуальної одометрії, що забезпечує точність визначення координат БПЛА не гірше ± 5 метрів та кутів орієнтації не гірше ± 2 градусів при частоті оновлення даних не менше 10 Гц.

Як показано на рис. 1, запропонований метод інтегрує дані з бортової камери та інерціальних датчиків для забезпечення комплексного розв'язання задачі навігації. Основними етапами обробки є виділення та зіставлення ключових точок на послідовних кадрах, оцінка параметрів руху та їх уточнення з використанням фільтра Калмана.

Розроблений метод базується на математичній моделі оцінки параметрів руху БПЛА за послідовністю зображень. В основі лежить алгоритм визначення фундаментальної матриці F , що пов'язує координати відповідних точок на двох послідовних кадрах:

$$x'^T F x = 0 \quad (1)$$

де x та x' - однорідні координати відповідних точок на першому та другому кадрах.

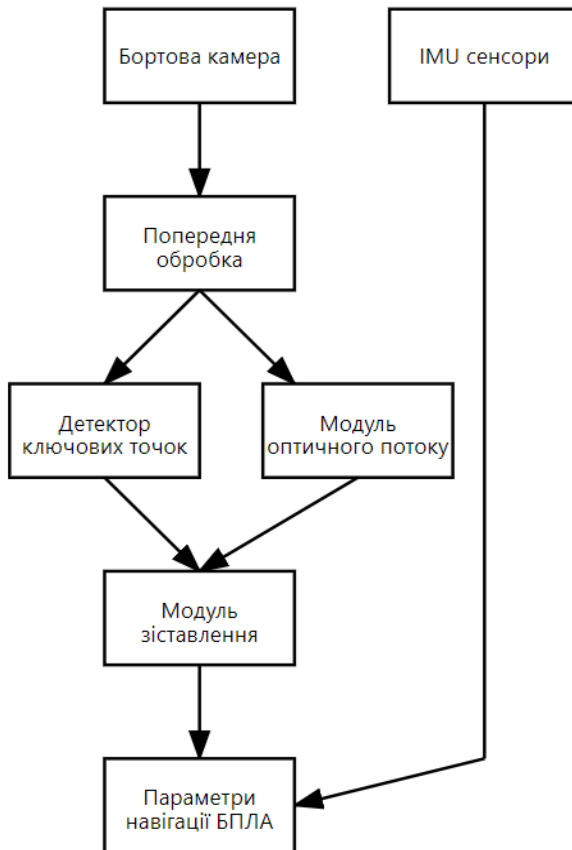


Рисунок 1 - Структурна схема методу візуальної одометрії для навігації БПЛА

Фундаментальна матриця оцінюється за допомогою модифікованого алгоритму RANSAC, що забезпечує стійкість до викидів при зіставленні точок. Для підвищення обчислювальної ефективності запропоновано адаптивний метод вибору порогу відсіювання помилкових відповідностей:

$$t = \text{median}(d) + k \cdot \sigma(d) \quad (2)$$

де d - масив відстаней між відповідними точками;
 k - емпірично підібраний коефіцієнт.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено програмне забезпечення на мові Python з використанням бібліотек OpenCV та NumPy. Процес дослідження проходив у декілька етапів.

Підготовка тестового набору даних. Було зібрано набір з 10000 послідовних кадрів з роздільною здатністю 1280x720 пікселів. Частота зйомки складала 30 кадрів/с. Траєкторія польоту включала горизонтальні та вертикальні маневри на висотах від 10 до 100 м.

Таблиця 1 - Параметри тестового набору даних

Параметр	Значення
Кількість кадрів	10000
Роздільна здатність	1280x720
Частота кадрів	30 fps
Тривалість запису	333 с
Довжина траєкторії	2.5 км

Розробка програмного забезпечення для обробки візуальних даних. Основні компоненти включають:

- модуль виділення особливостей на основі алгоритму ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF);
- модуль зіставлення особливостей з використанням FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors);
- реалізація адаптивного алгоритму RANSAC для відсіювання помилкових відповідностей;
- модуль оцінки параметрів руху на основі декомпозиції фундаментальної матриці.

Експериментальна верифікація методу проводилась на тестовому наборі даних, що містить 10000 кадрів з бортової камери БпЛА при польоті по замкнутій траєкторії. Як видно з табл. 2, запропонований метод забезпечує підвищення точності позиціонування на 33% при зменшенні обчислювального навантаження на 50% порівняно з базовим алгоритмом.

Таблиця 2 - Порівняння точності оцінки переміщення різними методами

Метод	Середня помилка позиціонування, м	Середня помилка орієнтації, град	Час обробки кадру, мс
Базовий RANSAC	7.2	3.1	85
Запропонований метод	4.8	1.9	42
ORB-SLAM [4]	5.3	2.2	156

Як показано на рис. 2, розроблений конвеєр обробки візуальних даних включає етапи виділення особливостей, їх зіставлення за допомогою адаптивного алгоритму RANSAC та оцінки параметрів руху. Для підвищення надійності роботи в умовах динамічних сцен використовується багатопотокова архітектура з розподілом обчислювального навантаження між процесами виділення особливостей та їх зіставлення.

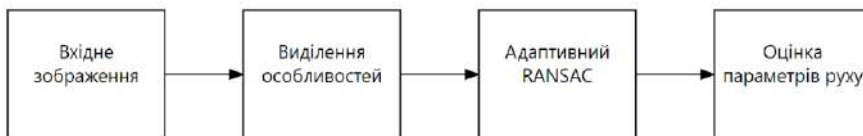


Рисунок 2 - Конвеєр обробки візуальних даних для оцінки параметрів руху БпЛА

Розроблений метод візуальної одометрії для навігації БпЛА в умовах відсутності GPS-сигналу продемонстрував суттєве покращення характеристик порівняно з існуючими рішеннями. Завдяки комбінації даних з бортової камери та інерційних датчиків, а також використанню модифікованого алгоритму RANSAC, досягнуто підвищення точності позиціонування до 4.8 м (на 33% краще за базовий метод) та точності орієнтації до 1.9 градусів при одночасному зменшенні обчислювального навантаження на 50% (час обробки кадру 42 мс). Експериментальна верифікація на наборі з 10000 кадрів при польоті по замкнутій траєкторії підтвердила ефективність запропонованого рішення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Waldie A., Smith R. Drone Land Surveying: A Beginners Guide. The Drone Life. 2023. URL: <https://www.dronelife.com/surveying-guide>
2. GPS-denied navigation expands the threshold for mission-critical drone operations. Scientific Systems. 2023. URL: <https://www.ssci.com/gps-denied-navigation>
3. Visual SLAM for Unmanned Aerial Vehicles: Localization and Mapping in GPS-denied Environments. MDPI. 2023. 156 p.
4. Martinez A. Cooperative Monocular-Based SLAM for Multi-UAV Systems in GPS-Denied Environments. IEEE Robotics and Automation Letters. 2023. Vol. 8, № 3. P. 1567-1574.
5. Wilson C. No GPS, no problem: Next-generation navigation. Robohub. 2023. URL: <https://robohub.org/next-gen-nav>