

## Перспективи впровадження систем автономної навігації БПЛА в умовах зруйнованої інфраструктури

Тамара Коренюк, магістр<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0001-8203-2406),  
Ілля Саченко, канд. техн. наук, доцент<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-3716-0249)

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

### АНОТАЦІЯ

В роботі розглянуто сучасні підходи до організації автономної навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах зруйнованої місцевості та відсутності спутникового зв'язку. Основну увагу було приділено алгоритмам одночасної локалізації та побудови карти (SLAM), зокрема ORB-SLAM, що дозволяють здійснювати орієнтування без використання GPS. Також було визначено ключові проблеми впровадження таких систем, серед яких – обмеженість обчислювальних ресурсів, вплив зовнішніх факторів (дим, пил, погане освітлення), а також питання надійності та безпеки. Окреслено перспективні напрямки подальших досліджень.

*Ключові слова:* БПЛА, автономна навігація, GPS, ORB-SLAM, зруйнована місцевість, алгоритми одночасної локалізації, орієнтування на місцевості.

### 1. ВСТУП

Сучасні умови застосування БПЛА вимагають розробки автономних систем навігації, здатних працювати в умовах зруйнованої місцевості, де неможливо використовувати супутниковий зв'язок та стабільну інфраструктуру. У зв'язку з цим виникає необхідність актуалізації та вдосконалення методів комп'ютерного зору й алгоритмів одночасної локалізації та побудови карт (SLAM), які дозволяють безпілотному апарату орієнтуватися у просторі, використовуючи дані з камери та допоміжних сенсорів.

Одним із найбільш поширених рішень є ORB-SLAM, що ґрунтується на виділенні та відстеженні ключових точок на отриманому зображенні. Алгоритм вирізняється відносною простотою, високою швидкістю роботи та стійкістю до шумових факторів, що робить його вдалим вибором для застосування на обмежених за ресурсами платформах, зокрема на БПЛА. Водночас робота у зруйнованих територіях супроводжується додатковими ускладненнями: зміною освітлення, наявністю пилу й диму, появою рухомих перешкод або техніки, а також відсутністю чітко виражених об'єктів для орієнтації. Це зумовлює потребу в адаптації класичних алгоритмів SLAM до умов динамічного середовища.

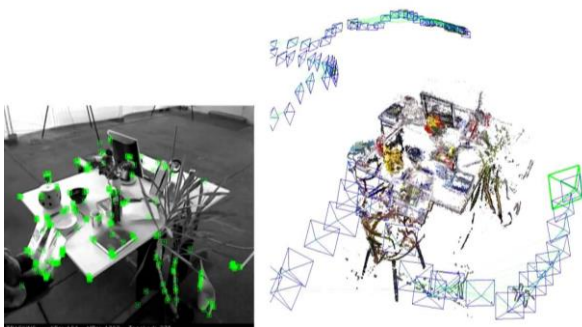


Рисунок 1. Приклад роботи ORB-SLAM

### 2. АНАЛІЗ

Алгоритми SLAM, зокрема ORB-SLAM та його модифікації, демонструють значний потенціал у завданнях автономної навігації БПЛА, де відсутній доступ до сигналів GPS. Основна ідея таких алгоритмів полягає у тому, що апарат одночасно визначає власне положення та будує карту навколишнього середовища. Це дозволяє безпілотнику здійснювати політ у реальному часі навіть у складних умовах.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється питанню підвищення точності локалізації, роботі в умовах змінного середовища та інтеграції SLAM з іншими сенсорними системами. У дослідженні «UAV-assisted Visual SLAM Generating Reconstructed 3D Scene Graphs in GPS-denied Environments», яке провели Radwan A., Tourani A., Bavle H., Voos H. та Sanchez-Lopez J. L., було показано, що використання VSLAM у поєднанні з методами семантичного аналізу сцени дозволяє формувати тривимірні сценграфи у GPS-заборонених середовищах [1]. Це розширює можливості автономної навігації – від простого уникнення перешкод до побудови повноцінних карт місцевості з позначенням ключових об'єктів.

У своєму оглядовому дослідженні Zhuang та інші детально проаналізували сучасний стан розвитку систем візуальної навігації для безпілотних літальних апаратів. Автори підкреслюють, що основними проблемами, які гальмують ефективність роботи SLAM-алгоритмів, є обмежені обчислювальні ресурси бортових систем, складність функціонування у середовищах зі слабкою текстурованістю (наприклад, у приміщеннях з однотипними стінами або відкритих просторах без характерних об'єктів), а також вплив динамічних елементів сцени, що можуть змінюватися під час польоту [2]. Додатковим викликом є необхідність забезпечення роботи алгоритмів у режимі реального часу, що вимагає високої продуктивності при мінімальних затримках.

Для подолання цих обмежень дослідники пропонують інтеграцію класичних методів SLAM із сучасними підходами на основі глибокого навчання. Зокрема, використання нейронних мереж для виявлення та відсіву динамічних об'єктів, підвищення стійкості алгоритмів у слабо структурованих середовищах, а також

прогнозування руху апарата може суттєво поліпшити точність і стабільність автономної навігації БПЛА.

Li M. в дослідженні «A Dynamic Visual SLAM System Incorporating Object Tracking for UAVs» запропонував систему, яка інтегрує візуальний SLAM з алгоритмами детекції об'єктів для вирішення задач відносного позиціонування та відстеження цілей. Такий підхід дозволяє БПЛА не лише орієнтуватися у просторі, а й виконувати більш складні завдання — наприклад, супровід об'єкта або автономне стеження [3].

Окремо варто відзначити роботи, спрямовані на вдосконалення самого ORB-SLAM. В дослідженні «ORB-SLAM3AB: Augmenting ORB-SLAM3 to Counteract Bumps with Optical Flow Inter-frame Matching» запропонували модифікацію ORB-SLAM3 із використанням оптичного потоку для покращення міжкадрового співставлення. Це дозволяє зменшити вплив вібрацій та нерівностей, що особливо актуально для БПЛА, які працюють у зруйнованій місцевості. Подібний підхід забезпечує більш плавну локалізацію навіть за умов швидких рухів чи струсів [4]. Basiri та ін. [5] розглянули поєднання ORB-SLAM2 із алгоритмом SVO та комплементарними фільтрами. Експерименти довели, що комбінований метод підвищує точність визначення траєкторії в умовах змінного освітлення та при обмеженій кількості надійних ознак на зображенні. Це демонструє, що перспективним напрямом розвитку SLAM є не стільки створення абсолютно нових алгоритмів, скільки інтеграція наявних рішень у комплексні системи.

Українські дослідники активно працюють над розвитком методів комп'ютерного зору та їх застосуванням у системах SLAM. У роботі Фесюка та Фургали проведено порівняльний аналіз популярних алгоритмів виділення ключових точок, серед яких SIFT, SURF, ORB та BRISK. Автори підкреслюють, що вибір детектора та дескриптора безпосередньо впливає на точність і стабільність роботи алгоритмів SLAM, адже саме якість виявлених ознак визначає надійність подальшого відстеження траєкторії та побудови карти середовища [6].

Результати дослідження показали, що алгоритм ORB поступається таким класичним методам, як SIFT, у точності та стійкості до шумів. Проте його ключова перевага полягає у високій швидкодії та здатності працювати в режимі реального часу, що робить ORB оптимальним вибором для систем з обмеженими обчислювальними ресурсами, зокрема для БПЛА. Таким чином, попри деякі компроміси у точності, ORB забезпечує баланс між продуктивністю та ефективністю, що пояснює його широке застосування в ORB-SLAM.

Таким чином, сучасні наукові дослідження підтверджують перспективність використання ORB-SLAM як базового алгоритму для автономної навігації БПЛА. Однак його ефективність у реальних умовах зруйнованої інфраструктури можлива лише за умови поєднання з іншими методами — сенсорною інтеграцією, алгоритмами глибокого навчання та побудовою динамічних карт. Такий підхід забезпечить високу точність орієнтації, стійкість до зовнішніх впливів і надійність у виконанні завдань у небезпечних та непередбачуваних умовах.

### 3. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показує, що алгоритми SLAM, зокрема ORB-SLAM та його модифікації, є основою

сучасних систем автономної навігації БПЛА. Вони забезпечують орієнтацію у просторі без використання GPS, що особливо важливо в умовах зруйнованої інфраструктури.

Сильними сторонами ORB-SLAM є простота, швидкість та можливість роботи на платформах з обмеженими ресурсами. Проте наявність зовнішніх факторів (пил, дим, погане освітлення, відсутність чітких орієнтирів) знижує ефективність алгоритму та підкреслює потребу в його адаптації до динамічних умов.

Сучасні дослідження доводять перспективність поєднання ORB-SLAM з методами комп'ютерного зору, глибокого навчання та додатковими сенсорами (IMU, лідари, стереокамери). Це дозволяє підвищити точність локалізації та розширити функціональні можливості БПЛА – від картографування до відстеження об'єктів.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення динамічних карт, гібридних систем та підвищення стійкості навігації у змінному середовищі. Реалізація таких рішень сприятиме формуванню нових поколінь інтелектуальних систем управління польотом БПЛА, здатних ефективно працювати у складних і небезпечних умовах.

### Список літератури

- [1] Radwan A., Tourani A., Bavle H., Voos H., Sanchez-Lopez J. L. UAV-assisted Visual SLAM Generating Reconstructed 3D Scene Graphs in GPS-denied Environments. arXiv. 2024. Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2402.07537>.
- [2] Zhuang L., Zhao H., Li Z., Liu Y., Gao F. Visual SLAM for Unmanned Aerial Vehicles: Localization and Perception. Drones. 2024. Vol. 8, No. 2. P. 51. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8020051>.
- [3] Li M. A Dynamic Visual SLAM System Incorporating Object Detection for UAV Relative Positioning and Target Tracking. Drones. 2024. Vol. 8, No. 6. P. 222. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8060222>.
- [4] Dong Y., Gong W., Li Q., Su K., He C., Wang Z. J. ORB-SLAM3AB: Augmenting ORB-SLAM3 to Counteract Bumps with Optical Flow Inter-frame Matching. arXiv preprint. 2024. Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2411.18174>.
- [5] Basiri A., Mariani V., Glielmo L. Improving Visual SLAM by Combining SVO and ORB-SLAM2 with a Complementary Filter to Enhance Indoor Mini-Drone Localization under Varying Conditions. Drones. 2023. Vol. 7, No. 6. P. 404. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7060404>.
- [6] Fesiuk A., Furgala Y. Keypoints on the Images: Comparison of Detection by Different Methods. Proceedings of the Lviv National University. 2023. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/372060599>.