

КРЕПИЧ РОМАН

Відокремлений структурний підрозділ
Кам'янець-подільський фаховий коледж
НРЗВО «Кам'янець-подільський державний інститут»
<https://orcid.org/0000-0001-5515-6705>
e-mail: jagmstar@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОРЕЛЯЦІЙНИХ МЕТОДІВ ВІЗУАЛЬНОГО ВІДСТЕЖЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ БЕЗПІЛОТНИМИ СИСТЕМАМИ

В умовах сучасного розвитку комп'ютерного зору та автономної робототехніки, актуальним завданням є візуальне відстеження рухомих об'єктів за допомогою безпілотних авіаційних систем (БПЛА). У цій роботі представлено дослідження системи відстеження в реальному часі, що базується на методах кореляційних фільтрів, зокрема з використанням трекера CSRT. Система інтегрована в симуляційне середовище Software-in-the-Loop (SITL), яке включає компоненти PX4, MAVSDK та Gazebo Classic, дозволяючи реалістично моделювати польоти без потреби у фізичному обладнанні. Ключовими особливостями розробленого рішення є мінімальне обчислювальне навантаження, швидка реакція на динаміку об'єкта та здатність працювати автономно без доступу до хмарних сервісів. Експериментальні дослідження підтвердили високу стабільність відстеження навіть за умови помірних змін зовнішнього вигляду об'єктів та показали ефективність запропонованого підходу для платформ з обмеженою потужністю.

Отримані результати формують базу для подальшого впровадження розробки у реальні бортові системи БПЛА.

Ключові слова: Візуальне відстеження, безпілотні авіаційні системи, PX4 SITL, Gazebo Classic, трекер CSRT, обробка в реальному часі, кореляційні фільтри, виявлення об'єктів, автономні БПЛА.

KREPYCH ROMAN

Separate structural subdivision Kamianets-Podilskyi Professional College
of Educational and Rehabilitation Institution of Higher Education
"Kamianets-Podilskyi State Institute"

INVESTIGATING THE EFFECTIVENESS OF CORRELATION METHODS FOR VISUAL TRACKING OF MOVING OBJECTS BY UNMANNED SYSTEMS

In the context of rapid advancements in computer vision and autonomous robotics, the task of continuous visual tracking of moving objects using unmanned aerial systems (UAS) is highly relevant. This is due to the expanding applications of UAS in civil and military domains, including monitoring, surveillance, security, search and rescue, agriculture, infrastructure inspection, and logistics. Effective tracking enhances UAS autonomy and reduces operator workload, while demanding high accuracy, real-time performance, low power consumption, and limited onboard computing. Deep learning methods, despite high accuracy, require significant hardware (GPU, RAM) and power, making them impractical for direct deployment on typical small UAVs without added equipment.

This paper presents the development and performance investigation of a lightweight real-time tracking system designed for resource-constrained platforms. The system is based on correlation filter methods, known for high processing speed and low computational needs. Among various correlation trackers, the CSRT (Channel and Spatial Reliability Tracking) tracker was chosen for its optimal balance of accuracy and speed. The system is integrated into a Software-in-the-Loop (SITL) simulation environment utilizing PX4 (flight controller emulator), MAVSDK (autopilot interaction tool), and Gazebo Classic (3D simulator). This integration allows realistic flight and tracking simulation without physical hardware.

The system begins with manual selection of the target using `cv2.selectROI()`. After initialization, it autonomously tracks the object, calculating its position frame by frame. Key features include minimal computational load suitable for low-power computers, rapid response to object dynamics for smooth pursuit, and autonomous operation without cloud services, enhancing reliability in remote areas.

Experimental simulation studies confirmed high tracking stability under moderate changes in appearance, scale, or lighting. The system effectively kept the target centered, with corrective velocity commands via MAVSDK ensuring adequate response. Telemetry analysis (velocities, yaw, position, trajectories) validated the tracking and control strategy in dynamic conditions. Identified limitations include reduced accuracy with rapid scale changes, need for manual reinitialization after full loss, and impact of strong noise or sudden lighting changes. Despite these, correlation methods, especially CSRT, are suitable for resource-limited systems.

Obtained results form a solid basis for integrating the system into real onboard UAVs. Future work includes automatic reinitialization, multi-object tracking, trajectory prediction, and optimization for complex scenes/weather.

Keywords: Visual tracking, unmanned aerial systems, PX4 SITL, Gazebo Classic, CSRT tracker, real-time processing, correlation filters, object detection, autonomous UAV.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Відстеження рухомих об'єктів – це процес виявлення, відстежування об'єкта. Відстеження об'єктів БПЛА на основі обробки зображень є одним із ключових викликів у сучасних дослідженнях. Основна мета таких систем – виявлення, розпізнавання та безперервне відстеження об'єктів у просторі в реальному часі, використовуючи відеодані з камер, інтегрованих у БПЛА. Завдяки високій маневреності та мобільності, безпілотні літальні апарати здатні ефективно слідувати за цілями навіть у складних умовах навколишнього середовища, надаючи розширені можливості для моніторингу та збору даних. Застосування технологій

відстеження об'єктів за допомогою БПЛА є надзвичайно різноманітним, використовується у військових операціях, сільському господарстві, безпеці, пошуково-рятувальних місіях, моніторингу навколишнього середовища, інспекції інфраструктури та логістиці. Розвиток технологій візуального відстеження значно підвищує автономність безпілотних систем, зменшує навантаження на оператора та покращує точність виконання завдань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розробка програмного забезпечення для візуального відстеження рухомих об'єктів БПЛА висуває жорсткі вимоги до алгоритмів обробки даних, включаючи поєднання високої точності відстеження, роботи в реальному часі, низького енергоспоживання та обмежених обчислювальних ресурсів. Оскільки БПЛА часто працюють автономно в умовах обмеженого енергоспоживання, розроблений метод має бути оптимізованим з огляду використання апаратних ресурсів. Сучасні методи відстеження об'єктів на основі глибокого навчання, такі як YOLO [12], SSD [13], Faster R-CNN [14], GOTURN [15] та SiamRPN, демонструють винятково високу точність та здатність працювати в складних сценах. Проте їх практична реалізація на ресурс-обмежених безпілотних платформах є надзвичайно складною через: необхідність високопродуктивних графічних процесорів (GPU), великих обсягів оперативної пам'яті, значне енергоспоживання, затримки обробки при роботі без апаратного прискорення. Таким чином, використання глибоких нейронних мереж на малих автономних платформах без додаткового обладнання вважається непрактичним. На відміну від цього, кореляційні методи відстеження, такі як MOSSE [7], KCF [8] та CSRT [9], пропонують збалансований компроміс між точністю та швидкістю. Ці методи надають кілька переваг, що є критично важливими для систем реального часу: висока швидкість обробки, низьке енергоспоживання, простота реалізації (доступні у відкритих бібліотеках, таких як OpenCV [11]), здатність адаптуватися до змін вигляду об'єкта. Хоча дане дослідження зосереджене на симуляції, ця робота є першою фазою ширшого плану розгортання системи відстеження на фізичних платформах БПЛА.

Формулювання цілей статті

У рамках даного дослідження були поставлені наступні цілі: розробити систему відстеження рухомого об'єкта на основі відеоданих з камери, встановленої на БПЛА; обрати метод відстеження, що балансує швидкість, точність та мінімальне споживання апаратних ресурсів; реалізувати обрану систему в симуляційному середовищі з використанням реалістичного візуального моделювання; перевірити продуктивність системи на практичних прикладах відстеження об'єкта у відеопотоці та оцінити її ефективність.

Виклад матеріалу дослідження

Проектування системи. У рамках дослідження була розроблена система візуального відстеження на основі кореляційних методів з симуляцією руху безпілотного літального апарата (БПЛА) в симуляційному середовищі. Основним методом відстеження був обраний кореляційний трекер CSRT [9], який забезпечує високу точність та підтримує зміни масштабу, обертання та часткову оклюзію об'єкта. Під час дослідження також тестувалися альтернативні кореляційні трекари - KCF [8] та MOSSE [7]. Проте CSRT [9] був обраний для подальшої реалізації як оптимальний компроміс між швидкістю та точністю.

Симуляційне середовище. Для симуляції руху БПЛА була застосована наступна архітектура: PX4 [3] SITL (Software-In-The-Loop), який є емулятором контролера польоту; Gazebo [4] Classic, що виступає як 3D симулятор, який забезпечує візуалізацію; та MAVSDK [6], що є набором інструментів для взаємодії з автопілотом через протокол MAVLink [5]. Система розгорнута на операційній системі Ubuntu 22.04 без використання Docker.

Програмне забезпечення. Основними компонентами програмного забезпечення є: Tracker.py (Python скрипт, який відповідає за обробку відеопотоку та виконання функцій трекінгу), Підключення до MAVSDK [6] (для передачі команд керування дроном) та Відеофайл (як джерело даних).

Результати та обговорення. Розроблена система була протестована в симуляційному середовищі, яке максимально імітує реальні умови польоту. Для подачі відеоданих використовувався попередньо записаний відеофайл. На початковому етапі оператор вручну вибирав цільовий об'єкт, використовуючи функцію `cv2.selectROI()`. Тестування показало, що метод CSRT [9] забезпечує високу стабільність відстеження при помірних змінах масштабу, форми, положення та умов освітлення об'єкта. Система продемонструвала плавне та точне відстеження без значних збоїв. Команди руху передавалися як цільові швидкості (velocity setpoints) до PX4 [3] SITL через MAVSDK [6], використовуючи протокол MAVLink [5]. Дрон в симуляторі адаптував свій рух, щоб утримувати цільовий об'єкт якомога ближче до центру кадру. Спостережувані результати включали невелику затримку реакції (< 100 мс), ефективне відстеження та стабільне утримання цілі біля центру кадру з допустимим відхиленням $< 10\text{--}15\%$ від ширини кадру. Експерименти проводилися в симуляційному середовищі PX4 [3] SITL з інтеграцією Gazebo [4] Classic. Нижче наведені основні кроки і рисунки проведення експериментів.

На рисунку 1 показано запуск емулятора дрона і запуск системи слідування. Після запуску програмного комплексу слідування за об'єктом користувач отримує можливість вибору опцій проведення експерименту (чи використовувати стандартні налаштування, можливість вибрати відео для експерименту, вибір кореляційного методу).

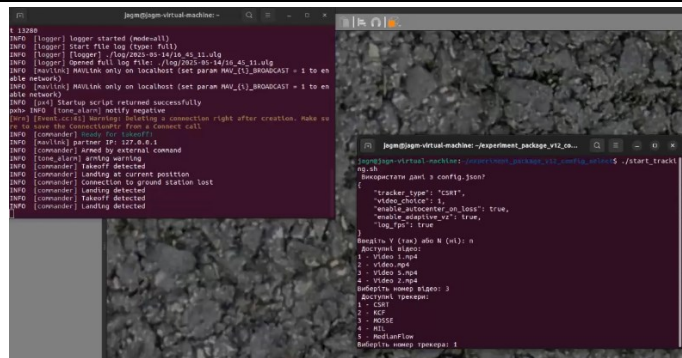


Рис. 1. Запуск системи і вибір налаштувань

Після вибору користувачем опції експерименту запускається емулятор дрона і тестове відео, де користувач може вибрати об'єкт за яким треба стежити, що представлено на рисунку 2. Дрон набирає початкову визначену висоту, що представлено на рисунку 3.

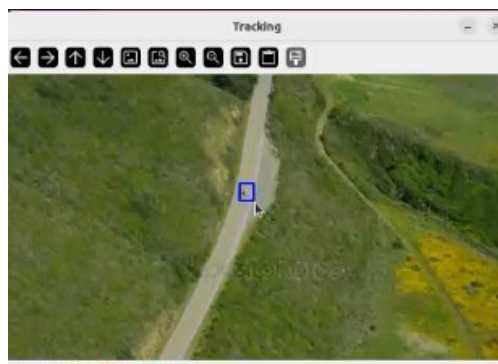


Рис. 2. Вибір області інтересу (ROI) для відстеження

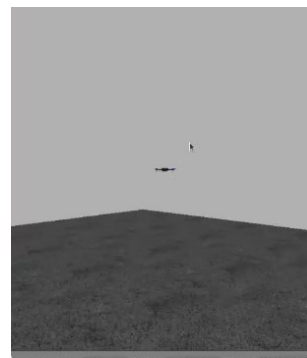


Рис. 3. Зліт дрона до початкової висоти

На рисунку 4 показано візуальне відстежування об'єкта і рух дрону. Швидкість руху дрону і зміщення від початкової точки показано на відео відстежування об'єкта для зручності розуміння алгоритму роботи дрона.

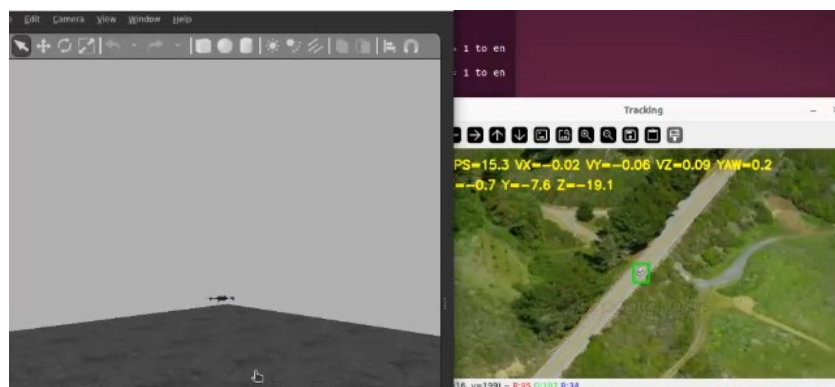


Рис. 4. Візуальне відстеження рухомого об'єкта

Аналіз телеметрії. Аналіз телеметрії, отриманої під час симуляційних польотів, показав успішне динамічне відстеження об'єкта. Швидкості дрона (VX, VY, VZ) залишалися в межах допустимих діапазонів зі плавними переходами. Коригування кута ристання (Yaw) демонструє здатність дрона до переорієнтації з метою утримання об'єкта по центру кадру. Дані положення (Північ, Схід, Вниз) вказують на поступові та контрольовані зміни в просторі без різких відхилень, при цьому вертикальне положення (Z) залишалося відносно постійним під час відстеження. 2D та 3D траєкторії дрона. Загалом, результати аналізу телеметрії підтверджують ефективність реалізованої стратегії відстеження та керування.

На рисунку 5 представлений графік, що відображає зміну положення дрона впродовж відстежування об'єкта. Рисунок 6 представляє повертання дрона за об'єктом впродовж експерименту.

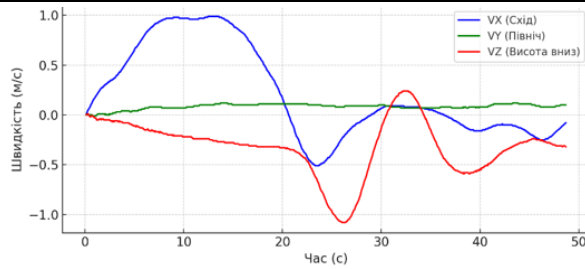


Рис. 5. Зміна швидкостей дрона з часом (VX, VY, VZ)

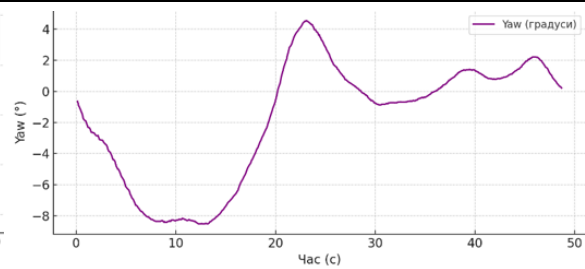


Рис. 6. Зміна кута повороту дрона (Yaw)

На рисунку 7 представлена 3D траєкторія руху дрону впродовж експерименту.

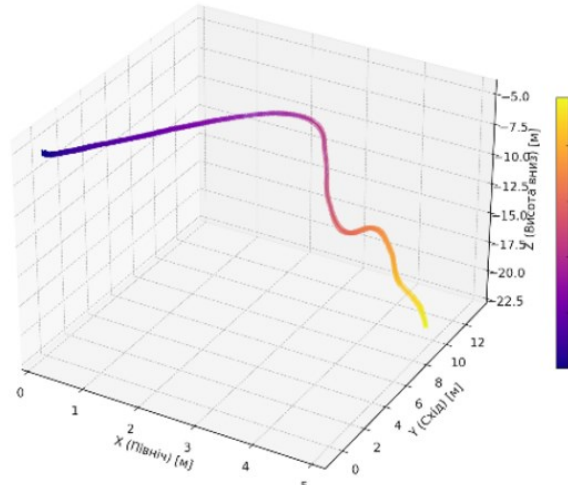


Рис. 7. 3D траєкторія дрона (X-Y-Z)

Сценарії тестування системи. Нижче подано таблицю із проведеними сценаріями тестування системи трекінгу дрона. Оцінка проводилась на основі експериментів із відео та емуляцією у Gazebo [4].

Таблиця 1

Сценарії тестування системи

№	Сценарій	Очікувана поведінка	Фактичний результат
1	Прямолінійний рух	Дрон стабільно слідує за об'єктом.	☑ Виконано без збоїв.
2	Зигзагоподібний рух	Дрон адаптується до зміни напрямку.	☑ Помірна стабільність.
3	Зміна швидкості	Швидкість дрона коригується відповідно.	☑ Затримки мінімальні.
4	Зміна висоти	Дрон слідує по осі Z.	☑ Реагує з деякою інерцією.
5	Зникнення об'єкта	Трекер швидко відновлює об'єкт.	⚠ Втрачає, якщо зникає >2 сек.
6	Статичний об'єкт	Дрон зависає на місці.	☑ Повністю стабільно.
7	Фальшивий об'єкт поруч	Трекер не переключається.	☑ CSRT тримає об'єкт.
8	Кілька об'єктів	Трекер тримає лише цільовий.	☑ Якщо вибір ручний - стабільно.
9	Зміна масштабу	BBox адаптується.	☑ CSRT масштабується добре.
11	Емуляція у Gazebo	Дрон коректно рухається у симуляції.	☑ Повна відповідність.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі.

В рамках даного дослідження було аргументовано доцільність використання кореляційних методів для відстеження рухомого об'єкта на основі обробки відеозображення, а саме метод CSRT [9], був обраний як найбільш підходящий за критеріями роботи в реальному часі, енергоефективності та автономності, і він продемонстрував високу продуктивність на обмежених апаратних ресурсах. Експериментальна перевірка ефективності системи була проведена в симуляційному середовищі PX4 [3] SITL та Gazebo [4] Classic.

Результати досліджень доводять доцільність використання кореляційних методів для подальшої реалізації в реальних безпілотних системах, що використовуються для моніторингу, спостереження, забезпечення безпеки та пошуково-рятувальних операцій, де ресурси бортового комп'ютера обмежені. Фінальним етапом запланованих робіт є розгортання розробленої системи на фізичній платформі БПЛА.

References

1. Chertenko, L., Kaptiurova, D., & Bondar, O. (2023). Practical aspects of 3D scanning results application in shoe last design. *3DBODY.TECH 2023 – 14th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies*, Lugano, Switzerland, 17–18 October 2023. Ascona, Switzerland. <https://doi.org/10.15221/23.28>
2. Goonetilleke, R. S. (2017). *The science of footwear*. CRC Press.
3. Піггл, Л., & Тіллер, В. (2012). *Книга NURBS*. Springer Science & Business Media.
4. Чертенко, Л. П., & Гопенко, А. В. (2017). Дослідження можливостей 3D САПР для проектування поверхні взуттєвої колодки. *Herald of Khmelnytskyi National University*, (3(249)), 80–86.
5. Wang, J., Zhang, X., Zhang, G., & Fang, F. (2011). Rapid parametric design methods for shoe-last customization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(1–4), 173–186. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3144-y>
6. Driscu, M., & Costea, M. (2014). Shoe last shape customization. *Leather and Footwear Journal*, 14(3), 181–190. <https://doi.org/10.24264/lfj.14.3.4>
7. Azariadis, P. N., Nearchou, A. C., & Aspragathos, N. A. (2002). An evolutionary algorithm for generating planar developments of arbitrarily curved surfaces. *Computers in Industry*, 47(3), 357–368. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(01\)00155-5](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(01)00155-5)
8. Song, J., & Kim, H. (2004). A study on surface flattening for 3 dimensional shoe pattern design. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 9.
9. Ma, X., Zhang, Y., Zhang, M., & Luximon, A. (2012). An algorithm for shoe-last bottom flattening. In V. G. Duffy (Ed.), *Advances in applied human modeling and simulation* (pp. 295–304). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12319>
10. Chung, W., Kim, S. H., & Shin, K. H. (2008). A method for planar development of 3D surfaces in shoe pattern design. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 1510–1519. <https://doi.org/10.1007/s12206-008-0609-0>
11. Саломао, А. (2025, May 20). Односторонній дисперсійний аналіз: розуміння, проведення та презентація. *Mind the Graph Blog*. <https://mindthegraph.com/blog/uk/одностороння-анова/>