

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ БПЛА ЗАСОБАМИ МАШИННОГО ЗОРУ ДЛЯ УПЕРЕДЖЕНОГО НАВЕДЕННЯ СИСТЕМ ПРОТИДІЇ

Анотація. Запропоновано методику прогнозування траєкторії руху БПЛА, що дозволяє підвищити точність упередженого наведення систем протидії у реальному часі. Базуючись на алгоритмах машинного зору, досліджено математичну модель екстраполяції координат цілі та спосіб обчислення точок перехоплення для оптичних приводів, що забезпечить стабільне утримання та прогнозування руху цілі при її інтенсивному маневруванні та високих кутових швидкостях.

Ключові слова: БПЛА, машинний зір, прогнозування траєкторії, упереджене наведення, системи протидії.

Abstract. A method for predicting the trajectory of a UAV movement is proposed, which allows to increase the accuracy of the advanced guidance of countermeasure systems in real time. Based on machine vision algorithms, a mathematical model of extrapolation of target coordinates and a method for calculating interception points for optical drives are investigated, which will ensure stable retention and prediction of target movement during its intensive maneuvering and high angular velocities.

Keywords: UAVs, machine vision, trajectory prediction, biased guidance, countermeasure systems.

Вступ

Сучасні безпілотні літальні апарати характеризуються високою динамікою польоту та здатністю до швидкої зміни траєкторії. Ефективна протидія таким засобам потребує не лише ідентифікації цілі, а й надточної синхронізації приводів наведення з її фактичним переміщенням. Використання лише поточних координат об'єкта часто є недостатнім через інерційність механічних систем та високі кутові швидкості цілі, що робить актуальним впровадження методів інтелектуального передбачення руху.

Метою роботи є обґрунтування та пропозиція методики прогнозування траєкторії руху БПЛА за допомогою машинного зору для забезпечення упередженого наведення систем протидії. Дослідження спрямоване на аналіз наявних математичних апаратів екстраполяції координат та вибір найкращих варіантів для застосування з подальшим покращенням алгоритмів.

Результати дослідження

Реалізація методики інтелектуального супроводження розпочинається з етапу високошвидкісного захоплення відео та первинної обробки візуальних даних. Алгоритми машинного зору виконують сегментацію вхідних кадрів для виділення динамічних об'єктів на фоні статичного середовища, застосовуючи методи адаптивної фонові субтракції. Завдяки використанню дескрипторів ознак система ідентифікує контури БПЛА, що дозволяє відокремити корисний сигнал від природних завад по типу хмарності, птахів або середовища і встановити стабільний фокус на відстежуваній цілі.

Процес оцінки динамічних параметрів руху базується на аналізі просторового зміщення центру мас об'єкта між послідовними кадрами в дискретні моменти часу. Шляхом обчислення різницьових координат формується вектор миттєвої швидкості та визначається величина лінійного прискорення цілі. Такий підхід дає змогу отримати первинні кінематичні характеристики польоту, які слугують вхідними даними для побудови апроксимаційної кривої траєкторії, що враховує інерційні властивості літального апарату та його аеродинамічні обмеження [1].

Математичне ядро методики прогнозування ґрунтується на застосуванні рекурсивного фільтра Калмана, що забезпечує мінімізацію середньоквадратичної помилки вимірювання координат у реальному часі. Алгоритм здійснює безперервну екстраполяцію положення об'єкта на основі статистичного аналізу його попередніх станів, що дозволяє нівелювати затримки, зумовлені часом обробки відеосигналу процесорним модулем. Використання адаптивних коефіцієнтів фільтрації дає змогу системі реагувати на раптову зміну вектору руху, підтримуючи високу достовірність передбаченого положення навіть за умов інтенсивного маневрування [2].

Формування цільових вказівок для приводів наведення здійснюється через обчислення координат точки перехоплення, яка визначається як ймовірне місце знаходження БПЛА через

інтервал часу, рівний сумарній затримці реакції системи. Даний часовий проміжок включає тривалість обчислювальних операцій машинного зору та інерційність механічних вузлів позиціонування. Упереджене керування оптичною віссю комплексу дозволяє випередити фактичне переміщення цілі, забезпечуючи точне суміщення апертури системи супроводження з об'єктом у кожний момент часу, незалежно від кутової швидкості його руху [3].

Забезпечення стійкості алгоритму до короточасних втрат візуального контакту з об'єктом реалізується через механізми ймовірнісної асоціації даних. У випадках перекриття цілі перешкодами або різкої зміни інтенсивності фонового освітлення, система переходить у режим віртуального супроводження на основі накопиченої статистики попередніх станів руху. Даний підхід запобігає зриву автоматичного відстеження та дозволяє відновити точну локалізацію БПЛА у прогнозованій області кадру відразу після його виходу із зони контролю, що є критичним фактором для безперервного функціонування комплексів протидії [4].

Висока продуктивність обчислювальних процесів досягається шляхом оптимізації алгоритмів обробки зображень для роботи на графічних ядрах спеціалізованих процесорів. Впровадження методу виділення динамічних зон інтересу дозволяє концентрувати обчислювальні ресурси виключно на фрагменті кадру, де з найвищою ймовірністю знаходиться об'єкт, суттєво скорочуючи загальний час циклу обробки. Завдяки зниженню системної латентності забезпечується частота оновлення координат, що перевищує 60 Гц, гарантуючи плавність руху виконавчих механізмів та виключаючи ризик виникнення автоколивань у контурі наведення [3].

Підсумковий етап реалізації методики передбачає замикання контуру керування через зворотний зв'язок за величиною неузгодженості між прогнозованим та фактичним положенням цілі. Формування динамічної поправки в реальному часі дозволяє алгоритму самостійно адаптувати параметри екстраполяції при зміні маневрування безпілотної апарату. Створена логіка взаємодії між модулем машинного зору та сервосистемою формує інтелектуальне середовище, здатне випереджати дії БПЛА, зводячи динамічну помилку супроводження до мінімальних значень, порівнянних із фізичними габаритами об'єкта спостереження.

Висновки

Результати дослідження підтверджують, що запропонована методика прогнозування траєкторії на основі машинного зору дозволяє суттєво підвищити точність автоматизованого супроводження малогабаритних БПЛА. Використання алгоритмів екстраполяції координат у поєднанні з рекурсивною фільтрацією даних забезпечує ефективну компенсацію системних затримок та інерційності механічних приводів, що гарантує стабільне утримання об'єкта в центрі оптичної осі комплексу. Впровадження даного підходу мінімізує вплив інтенсивного маневрування цілі та високих кутових швидкостей на якість безперервного відстеження [4]. Такий підхід робить методику інтелектуального наведення критично важливим компонентом для створення перспективних систем ідентифікації та супроводження, здатних надійно функціонувати в умовах сучасних бойових дій та високої щільності застосування безпілотних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kim S. AFJPDA: A Multiclass Multi-Object Tracking with Appearance Feature-Aided Joint Probabilistic Data Association [Електронний ресурс] / Sukkeun Kim, Ivan Petrunin, Hyo-Sang Shin // Journal of Aerospace Information Systems. – 2024. – С. 1–11. – Режим доступу: <https://doi.org/10.2514/1.i011301>.
2. Yena M. Development of real time data processing algorithms for UAV traffic optimization [Електронний ресурс] / Maksym Yena // INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES. – 2025. – № 1(31). – С. 49–60. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.049>.
3. Tracking Multiple Unmanned Aerial Vehicles through Occlusion in Low-Altitude Airspace [Електронний ресурс] / Sufyan Ali Memon [та ін.] // Drones. – 2023. – Т. 7, № 4. – С. 241. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/drones7040241>.
4. Lupandin A. Analysis of Modern Neural Network Methods for Visual Information Processing in High-Speed UAV Navigation Systems [Електронний ресурс] / Antonii Lupandin,

Кордонський Ярослав Володимирович – студент, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, слухач кафедри військової підготовки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: 04-22-237.stud@vntu.vn.ua.

Віщун Ігор В'ячеславович – викладач кафедри військової підготовки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: viv@vntu.edu.ua

Kordonsky Yaroslav V. – student, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, student of the Department of Military Training, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: 04-22-237.stud@vntu.vn.ua.

Ihor Viacheslavovych Vishchun – Lecturer, Department of Military Training, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: viv@vntu.edu.ua