

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-84>

УДК 621.396: 551.508

ЧИГІНЬ ВАСИЛЬ

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0003-1593-6832>e-mail: vchygin@gmail.com**ПАЗИНЮК МИХАЙЛО**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0009-0009-1038-4611>e-mail: vchygin@gmail.com**НАУЛИЧНИЙ ВАСИЛЬ**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0009-0004-2483-1404>e-mail: com.dept@lpnu.ua**МИХАЙЛИШИН ПАВЛО**

Національна академія Сухопутних військ України

e-mail: vchygin@gmail.com

СИСТЕМА ФОТОЗАХОПЛЕННЯ ТА ПЕРЕСЛІДУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У ДВОХ КООРДИНАТАХ

У роботі представлено експериментальну систему та програмне забезпечення, опрацьовані для формування та дослідження керуючих сигналів, що подаються на двигуни безпілотного літального апарата (БПЛА), а також для реалізації автоматичного повертання дрона під час фотопереслідування рухомої цілі з метою підвищення ефективності процесів керування. У ролі апаратної бази використали квадрокоптер на рамі Q450, оснащеного двигунами D2212-920kv та пропелерами розміром 10×1,5 см. До складу системи увійшли автопілот Pixhawk PX-4 з відкритою архітектурою та бортовий комп'ютер Raspberry Pi 3 з камерою Pi V2 (роздільна здатність 1080×720 пікселів). Для фіксації параметрів обертання пропелерів апарат підвісили на тонкій жилці, орієнтуючи гвинти в горизонтальній площині.

До експериментальної установки також входять двоканальний цифровий осцилограф ISDS205A, що використовується для вимірювання тривалості імпульсів керування, та лазерний тахометр UT-372 для визначення швидкості обертання двигунів. Сформувавши програмний модуль, який визначає координату центру зображення об'єкта (в пікселях по осі X) та обчислює відповідні тривалості імпульсів, що передаються на четвертий канал керування автопілота. У процесі реалізації системи використовували бібліотеки DroneKit, datetime, errno, platform для реалізації логіки польоту, а також OpenCV, Picamera та sys — для опрацювання відеопотоку і комп'ютерного зору.

Ключові слова: фотозахоплення, програмне забезпечення, фотопереслідування, квадрокоптер, двовимірний простір, автопілотувальна система, Raspberry Pi, Pixhawk, бортовий комп'ютер.

CHYHIN VASYL**PAZYNIUK MYKHAILO****NAULYCHNYI VASYL****MYKHAYLYSHYN PAVLO**

Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy

SYSTEM OF IMAGE-BASED OBJECT CAPTURING AND FOLLOWING IN TWO DIMENSIONS

This paper presents a system and software package created to examine control signals supplied to the motors of an unmanned aerial vehicle (UAV), as well as to implement automatic drone turn during photo-tracking of a moving target in order to increase the efficiency of control processes. A Q450 quadcopter equipped with D2212-920kv engines and 10×1.5 cm propellers was used as the hardware base. The system included the Pixhawk PX-4 autopilot with an open architecture and a Raspberry Pi 3 on-board computer with a Pi V2 camera (resolution 1080×720 pixels). To record the propeller rotation parameters, the device was suspended on a thin wire, orienting the propellers in a horizontal plane.

Given setup also includes a digital oscilloscope ISDS205A to measure the duration of control pulses, and a laser tachometer UT-372 to determine the engine rotation speed. A software module has been developed that determines the coordinate of the center of the object image (in pixels along the X axis) and calculates the corresponding pulse durations transmitted to the fourth control channel of the autopilot. In the process of implementing the system, the DroneKit, datetime, errno, platform libraries were used to implement the flight logic, as well as OpenCV, Picamera and sys — for processing the video stream and computer vision.

Analysis of the results of the experimental study of the functioning of the system and software allows us to conclude about the feasibility and effectiveness of the proposed approach for controlling an unmanned aerial vehicle in conditions of continuous receipt of a stream of frames from the camera during pursuit. Theoretical developments and practical recommendations made on the basis of the work performed have both independent theoretical value for prospective research in the field of photocapture and photopursuit of small and distant moving objects, and have high practical value in connection with the need for real detection and measurement of the parameters of the movement of unmanned aerial vehicles.

Keywords: image capture, software, image-based following, quadcopter, two-dimensional system, autopilot, Raspberry Pi, Pixhawk, on-board computer.

Стаття надійшла до редакції / Received 09.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Дослідження у даній роботі логічно продовжує попередні напрацювання авторів [1–3], спрямовані на формування ефективної системи візуального виявлення та динамічного супроводу рухомих об'єктів у площині з двома координатами. У раніше виконаних роботах основну увагу приділили методам визначення координат рухомих об'єктів за допомогою стаціонарних фотозасобів і подальшого наведення на них власного безпілотного літального апарата за допомогою бортової платформи. Однак, питання реалізації автоматизованого фотопереслідування об'єкта у польоті в реальному часі, а також написання програмного забезпечення для оптимізації параметрів польоту у двовимірному просторі залишалися поза межами уваги.

Актуальність даної роботи зумовлена стрімким зростанням використання БПЛА в різних сферах, зокрема для виконання розвідувальних місій і несанкціонованого відеоспостереження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У попередніх роботах [1–3] автори дослідили підходи до виявлення та визначення параметрів траєкторії безпілотних літальних апаратів із використанням наземних систем, що містили акустичні й візуальні сенсори. Уперше було реалізовано стаціонарний комплекс для візуального розпізнавання та фіксації повітряних цілей, який базувався на використанні фотокамери Canon 7D та авторському програмному забезпеченні. Ця система дозволяла визначати положення квадрокоптера Phantom 3 на дистанції до одного кілометра [4].

В окремих експериментах [5] автори дослідили поведінку БПЛА, який автономно прямував до координат, встановлених за допомогою стаціонарної фотосистеми, з метою виявлення та візуального перехоплення несанкціонованого об'єкта. Завдяки використанню бортового комп'ютера, вбудованої камери та спеціалізованого програмного забезпечення вдалося здійснити фізичне захоплення коптера за допомогою сітки. Водночас, функціонал створеної системи був обмежений — вона забезпечувала лише політ за фіксованими GPS-координатами без можливості активного відстеження цілі, що змінює своє положення у просторі в реальному часі.

У наявних українських джерелах здебільшого висвітлюються аспекти використання безпілотних літальних апаратів у цивільній та військовій сферах [6, 7], однак відсутні публікації, присвячені використанню бортових комп'ютерів для реалізації режимів фотозахоплення та переслідування цілей. У роботах [8, 9] розглядаються загальні складові систем коптерів, зокрема сенсорні модулі автопілотів, проте не акцентується увага на інтеграції бортових комп'ютерів у контексті стабілізації та налаштування програмованих режимів польоту.

Основні технічні характеристики сучасних одноплатних комп'ютерів, потенційно придатних для виконання функцій бортового обчислювального модуля, детально представлені на офіційних ресурсах Raspberry Pi [10], Odroid [11], LattePanda [12]. Вказані пристрої є чотириядерними системами із тактовою частотою 1,5–2 ГГц та обсягом оперативної пам'яті 1–2 ГБ. Raspberry Pi 3 і Odroid C2 працюють під керуванням операційної системи Linux, тоді як LattePanda використовує Windows 10. Перші два рішення мають компактніші розміри (85×56 мм, маса – 40 г), ніж LattePanda (88×70 мм, маса – 56 г), що є важливим критерієм у виборі апаратної платформи для повітряного використання. Порівняльний аналіз параметрів цих та інших одноплатних комп'ютерів дозволив обрати оптимальний варіант для реалізації експериментальної системи фотозахоплення та переслідування.

В інтернет-джерелах описано низку програмних продуктів, призначених для налаштування передпольотних режимів та автоматичного керування за заздалегідь визначеними маршрутами. Наприклад, програмне забезпечення Mission Planner [13] та QGroundControl [14] забезпечує перевірку працездатності сенсорів БПЛА, пуск двигунів, набір висоти та політ у визначених режимах (Guided, Loiter тощо). Проте ці інструменти не підтримують сценарії активного фотопереслідування та дій щодо знешкодження цілі.

У роботах [15–18] розглядаються підходи до реалізації систем візуального захоплення. Наприклад, у [18] представлено систему виявлення та стеження за кольоровим об'єктом (кубом) із використанням фотокамери та мікроконтролера Arduino, що керує рухом маніпулятора. У [16] продемонстровано розпізнавання нерухомої одноколірної кулі та її знешкодження квадрокоптером, оснащеним фотосистемою. Згідно з [17], дрони типу DJI Mavic 2 Pro здатні автоматично слідкувати за великими об'єктами, такими як людина чи автомобіль, у режимі «Follow Me». Новітня модель Matrice 100 від DJI [18] додатково має функцію уникнення зіткнень. Однак у жодному з цих джерел не досліджується задача активного фотопереслідування об'єктів малих розмірів з наближенням до них на дистанцію, достатню для виконання операції знешкодження. Крім того, згадані програмні рішення є закритими для подальшого доопрацювання.

В окремих сучасних публікаціях, зокрема [19], приділяється значна увага системам візуального супроводу для БПЛА, що забезпечують виявлення, захоплення та стеження за рухомими об'єктами в режимі реального часу. У зазначеному дослідженні реалізовано інтеграцію глибоких нейронних мереж (YOLO, SSD) із класичними алгоритмами трекінгу, такими як KCF (Kernelized Correlation Filters), що дозволило досягти високої точності позиціонування цілей навіть за наявності складного фону та перешкод.

Іншим перспективним напрямом є застосування фільтрів Калмана [20] для підвищення стійкості відстеження рухомих об'єктів. Наприклад, автори дослідження [21] запропонували використання вдосконаленого фільтра Калмана, який інтегрує дані з кількох сенсорів (оптичної камери, лазерного далекоміра та IMU) і дозволяє прогнозувати положення об'єкта, якщо він тимчасово зникає з поля зору. Це забезпечує стабільне відстеження в умовах змінної видимості або при різких маневрах об'єкта. У праці [22] запропоновано комплексне рішення, яке об'єднує візуальні SLAM-алгоритми з методами виявлення об'єктів на основі машинного навчання. Такий підхід дозволяє БПЛА точно позиціонувати себе в просторі та ефективно визначати траєкторію рухомого об'єкта.

Проте варто зазначити, що дані алгоритми потребують потужного обладнання, оскільки аналіз зображення даними методами складається з комплексної багатопланової архітектури. При відстеженні об'єктів виділяється потреба застосування недорогостартісного обладнання із поєднанням оптимізованих алгоритмів. Аналіз існуючих методів свідчить про недостатню кількість повністю відкритих та інтегрованих систем, які поєднували б функції виявлення, фотозахоплення і переслідування рухомих об'єктів малих розмірів з використанням сучасних бортових комп'ютерів та алгоритмів опрацювання відеоданих у реальному часі.

Окремі комерційні рішення, такі як програмне забезпечення Pix4Dmapper [23] та OpenDroneMap [24], широко застосовуються для опрацювання даних із камер літальних об'єктів. Ці системи дозволяють створювати високоточні двовимірні та тривимірні моделі простору, але переважно орієнтовані на опрацювання статичних зображень, а не на динамічне відстеження рухомих об'єктів у реальному часі. Наприклад, програмний комплекс Pix4Dmapper дає змогу отримувати високоточні геореференційовані карти, цифрові моделі рельєфу із зображень, отриманих з борту дрона. Pix4Dmapper застосовує передові алгоритми автоматичного розпізнавання ключових точок зображень та технології суміщення фотознімків, що дозволяє мінімізувати похибку отриманих моделей. OpenDroneMap використовує технології Structure-from-Motion (SfM) [25], яка дозволяє створювати тривимірні моделі на основі автоматичного обчислення позицій камери та співставлення отриманих зображень. Попри відкритість цього програмного забезпечення, воно орієнтоване переважно на створення статичних моделей, і не має інтегрованих функцій динамічного відстеження рухомих об'єктів у режимі реального часу.

Додатково серед проаналізованих методів розпізнавання виявлено, що доцільним рішенням для задачі виявлення та переслідування стало також застосування алгоритмів визначення ключових точок інтересу на зображеннях, зокрема, детектора SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [26]. Використання саме цього методу дозволяє забезпечити високу точність і надійність ідентифікації об'єктів у різних умовах відео слідкування, зокрема, за змін освітлення, перспективи та наявності часткових перекриттів. Проте алгоритм SIFT вимагає значних ресурсів для обчислень, що призводить до повільної роботи, особливо при аналізі великих зображень або великої кількості кадрів у реальному часі. Це обмежує його застосування на пристроях із низькою обчислювальною потужністю.

Водночас, серед програмних комплексів для керування польотами, таких як ArduPilot, Mission Planner та QGroundControl, не передбачено гнучких функцій для сценаріїв фотопереслідування об'єктів малої величини та автоматичного наближення до них на задану відстань для взаємодії або нейтралізації. Серед комерційних рішень відомою є також платформа Agisoft Metashape [27], що застосовується на практиці в інженерних, геодезичних та будівельних задачах. Однак, ця платформа не передбачена на роботу з рухомими об'єктами в режимі реального часу та не інтегрується безпосередньо у системи керування польотом.

Аналізуючи перелічені вище програмні продукти, можна зробити висновок, що вони забезпечують високу точність та ефективність, але їхній функціонал переважно орієнтований на опрацювання статичних зображень. Системи, що здатні в реальному часі здійснювати фотозахоплення і переслідування рухомих об'єктів, наразі залишаються недостатньо розвиненими та потребують подальших досліджень.

На нашу думку, одним із перспективних підходів до визначення оптимальних характеристик системи візуального захоплення та супроводження рухомих об'єктів є створення експериментальної платформи разом із програмним забезпеченням для дослідження алгоритмів керування БПЛА на базі бортового комп'ютера та контролера польоту. Для випробувань у закритих приміщеннях доцільно використовувати квадрокоптер із зменшеним діаметром пропелерів, що дозволить безпечно реалізовувати режими обертання навколо вертикальної й горизонтальної осей.

Для реалізації запропонованої системи керування доцільно використовувати автопілот типу PixHawk. Вибір цього автопілота обумовлений тим, що він має відкриту архітектуру і дозволяє легко інтегруватися з бортовим комп'ютером за допомогою стандартного дата-кабелю. У ролі бортового комп'ютера пропонується використовувати міні-комп'ютер Raspberry Pi 3, який має відкриту операційну систему на основі Linux, що значно спрощує його програмування та налаштування. Додатковими перевагами даного комп'ютера є наявність вбудованого модуля Wi-Fi, що полегшує встановлення зв'язку з наземною станцією, а також порту UART, який забезпечує пряме з'єднання з автопілотом PixHawk.

Метою роботи є створення апаратного забезпечення та програмної компоненти, а також виконання експериментальних досліджень з метою оптимізації процесів автоматичного керування польотом безпілотної літальної апарату під час виконання завдань фотозахоплення та переслідування рухомої цілі у двовимірному просторі.

Виклад основного матеріалу

1. Експериментальна частина

Методика досліджень. У зв'язку з відсутністю у наявних джерелах детального описання структури та принципу функціонування автопілота Pixhawk (його характеристик, необхідних для створення системи керування двигунами БПЛА), опрацювали експериментальну вимірювальну систему, яка передбачає фіксацію у файлах часових залежностей максимальної кількості параметрів, що характеризують процеси фотозахоплення та переслідування об'єкта. Приклад такого параметру - координата X (у пікселях) центру зображення цілі – диска; кількість імпульсів, сформованих за відповідною формулою на основі значення X і поданих на вхід автопілота; ширини імпульсів керування (у мілісекундах), які генеруються автопілотом Pixhawk та передаються до регуляторів швидкості обертання моторів; значення частоти обертання двигунів (в обертах за хвилину), виміряні за допомогою тахометра; зміщення світлової плями відносно лазерного променя (у пікселях), зафіксованого на корпусі квадрокоптера під час реакції системи на зміну положення об'єкта в горизонтальній площині.

Реалізували два варіанти розміщення бортового комп'ютера Raspberry Pi: перший — із закріпленням на окремій нерухомій опорі, другий — безпосередньо на борту квадрокоптера. Аналіз часових характеристик усіх згаданих параметрів дозволяє виявити джерела затримок реакції окремих підсистем на зміну положення об'єкта, визначити найкритичніші з них та сформулювати рекомендації щодо усунення виявлених недоліків з метою подальшої оптимізації функціонування системи.

Експериментальна установка. На рисунку 1 представлено основні компоненти запропонованої експериментальної установки: 1 - бортовий комп'ютер типу Raspberry Pi, 2 - модуль Pixhawk, 3 - мотори, 4 - пропелери, 5 - лазерний ліхтарик, 6 - GPS-приймач, 7 - тахометр, 8 - червоний диск (об'єкт переслідування), 9 - монітор, 10 - вікно терміналу із результатами вимірювань зміщень червоного диску, 11 - вікно програми осцилографа з осцилограмою імпульсів, 12 - вікно програми із результатами вимірювань тахометра.

У ролі фотофіксуючого елемента використали камеру Raspberry Pi v2, яка здійснювала захоплення зображень з частотою 30 кадрів на секунду, які опрцьовувалися власним програмним забезпеченням. Для зменшення сили тяги під час випробувань у приміщенні замість стандартних для рами Q450 пропелерів розміром 26×3 см встановили компактніші – 10×1,5 см.

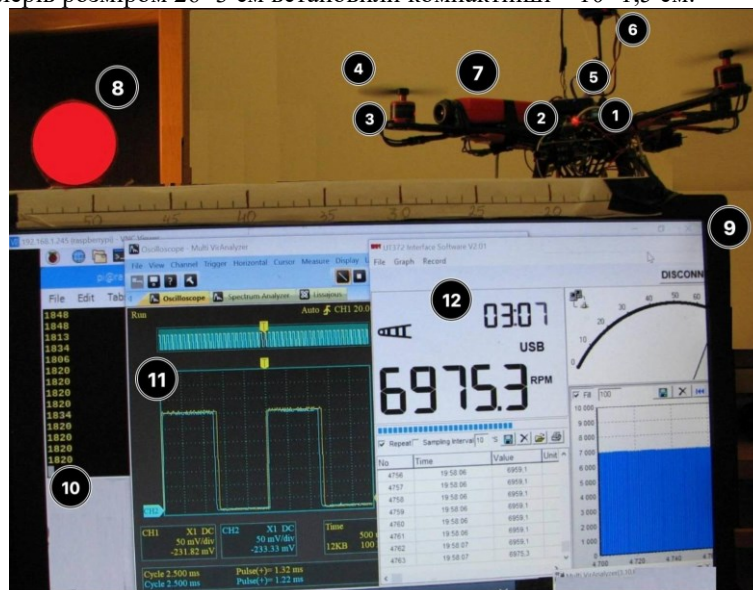


Рис.1. Фотографія експериментальної установки

2. Програмне забезпечення

Алгоритм двокоординатного фотопереслідування рухомих об'єктів. Опрацювали алгоритм двокоординатного фотопереслідування, який є якісним розвитком попередньої системи [28], значно розширюючи її функціональні можливості завдяки одночасному стеженню за об'єктом у двох вимірах. Програмне забезпечення реалізовано на бортовому комп'ютері Raspberry Pi з використанням мови Python та операційної системи Raspbian. Комплекс фотопереслідування працює на основі постійного відстеження положення рухомого об'єкта за допомогою бортової камери Pi Camera V2 з роздільною здатністю 1080×720 пікселів. Зазначена роздільна здатність є оптимальною, забезпечуючи достатню деталізацію зображення при помірному навантаженні на процесор бортового комп'ютера.

На рисунку 2 за допомогою блок-схеми показано принципи роботи алгоритму двокоординатного фотопереслідування. Розглянемо детальніше кожен етап його роботи.

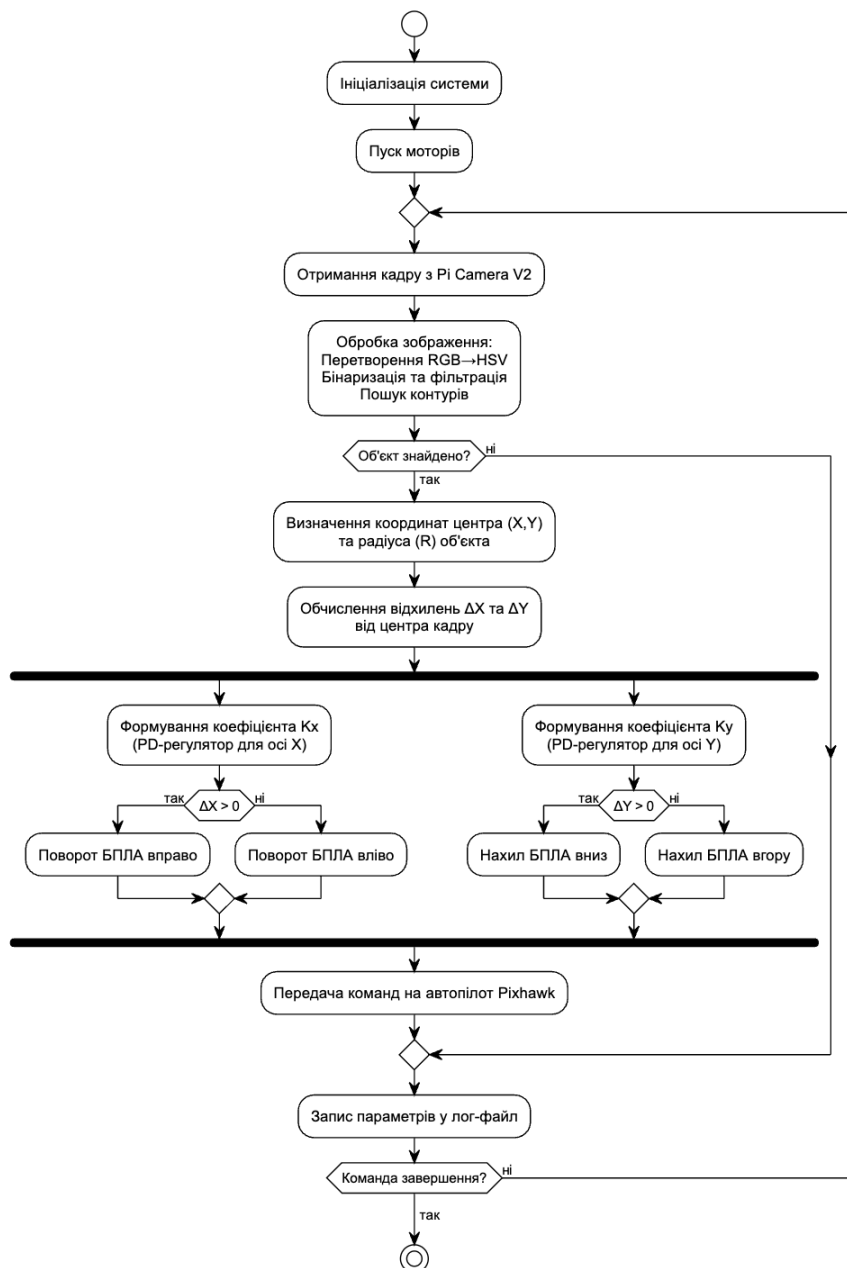


Рис. 2. Візуалізація алгоритму фотопереслідування об'єкта

Початковий етап роботи включає ініціалізацію відеокамери та встановлення з'єднання з автопілотом Pixhawk через бібліотеку DroneKit по MAVLink-протоколу. Після пуску моторів система переходить у режим неперервного аналізу відеопотоку, здійснюючи послідовні трансформації кожного кадру. Для стабільного розпізнавання об'єкта в різних умовах освітлення застосовується перетворення колірної моделі з RGB у HSV з подальшою бінаризацією зображення за допомогою функції `inRange()`. Пороги бінаризації є конфігурованими параметрами, що дозволяє налаштовувати систему під конкретний колір об'єкта. Для підвищення якості бінарного зображення застосовується каскад фільтрів: розмивання за Гаусом для зменшення шумів, ерозія для усунення дрібних артефактів та дилатація для заповнення прогалин у контурах.

Виявлення контурів об'єктів здійснюється функцією `findContours()`, після чого відбувається аналіз знайдених контурів та вибір найбільшого за площею, який з високою ймовірністю відповідає шуканому об'єкту. Для спрощення подальших обчислень навколо виділеного контуру описується коло за допомогою функції `minEnclosingCircle()`, що дозволяє отримати координати центра об'єкта (X, Y) та його радіус (R). Принципова відмінність опрацьованого алгоритму від попередньої версії полягає в реалізації паралельного керування положенням БПЛА одночасно у двох площинах. Для цього система обчислює відхилення координат центра об'єкта від центра кадру за обома осями (ΔX та ΔY).

На основі значення відхилення по горизонталі (ΔX) формується коефіцієнт пропорційного керування K_x , який визначає інтенсивність повороту БПЛА навколо вертикальної осі. При значенні $\Delta X > 0$ (об'єкт знаходиться праворуч від центра) генеруються команди на прискорення правої пари двигунів та сповільнення лівої пари, а при $\Delta X < 0$ – навпаки. Одночасно з цим аналізується вертикальне

відхилення (ΔY) та обчислюється коефіцієнт K_y , який керує нахилом квадрокоптера відносно горизонтальної площини. При значенні $\Delta Y > 0$ (об'єкт знаходиться нижче центра кадру) формуються команди на збільшення обертів передньої пари двигунів та зменшення обертів задньої пари, а при $\Delta Y < 0$ – навпаки.

Обчислені параметри керування передаються до автопілота Pixhawk у вигляді команд MAVLink, які трансформуються у відповідні ширини ШІМ-імпульсів для регулювання швидкості обертання кожного з чотирьох двигунів квадрокоптера. Експериментальні дослідження показали, що затримка між виявленням зміщення об'єкта та відповідною реакцією системи керування не перевищує 120 мс, що є прийнятним для ефективного переслідування об'єктів, що рухаються з помірною швидкістю.

Комплекс оснащено розвинутою системою логування, яка в реальному часі записує всі ключові параметри процесу переслідування: часові мітки, координати об'єкта, ширини керуючих імпульсів, швидкості обертання двигунів та події системи (захоплення, втрата цілі, активація знешкодження). Аналіз цих даних дозволяє проводити детальну оцінку ефективності алгоритму та здійснювати його налаштування. Створений алгоритм двокоординатного фотопереслідування демонструє кращу ефективність при відстеженні малорозмірних рухомих об'єктів у різних умовах освітлення та на змінному фоні, суттєво перевершуючи попередню версію системи за точністю та надійністю стеження.

3. Результати експериментальних досліджень

Під час експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку параметрів фотозахоплення та керування квадрокоптером, отримали значення імпульсів, що обчислюються програмою і передаються з комп'ютера Raspberry Pi через телеметрію до автопілота Pixhawk, а також залежності зміщення квадрокоптера по осі Y, відповідного до зміщення диска (об'єкта) у цьому ж напрямку

Отримали також експериментальне підтвердження можливості коптера здійснювати фотопереслідування, керуючись модулем Pixhawk, із застосуванням формул, заданих завчасно, для обчислення значень необхідних відхилень у системі двох координат.

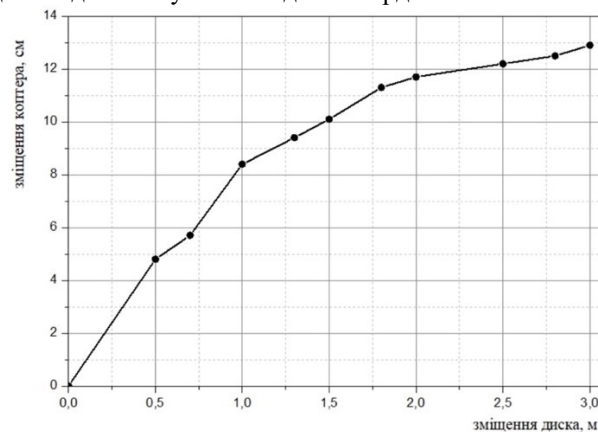


Рис.3. Графік залежності зміщення коптера по осі Y (сантиметри), відповідного до зміщення диска у цьому ж напрямку (метри)

На рисунку 3 зображено графік залежності зміщення коптера по осі Y (сантиметри), відповідного до зміщення диска у цьому ж напрямку (метри). Як видно, швидкість росту зміщення коптера знижується при більших відстанях кулі від камери коптера (більших, ніж 1 метр). Це можна пояснити ростом сил пружності нитки підвіски (жилки) при збільшенні відхилення коптера від первинної осі підвіски у спокійному стані.

Висновки

Робота є особливо актуальною в даний час, оскільки безпілотні літальні апарати використовуються все частіше, виконуючи завдання розвідки, проводячи незаконні дії. Тому опрацювали нові способи виявлення і розпізнавання різного типу БПЛА, а також їх захоплення. Провели пошук нових оптимальних методів оптичного захоплення і переслідування невеликого розміру об'єктів, а також при складанні програми реалізації таких методів.

Аналіз результатів експериментального дослідження функціонування системи та програмного забезпечення дозволяє зробити висновок про доцільність та ефективність запропонованого підходу для керування безпілотним літальним апаратом в умовах безперервного отримання потоку кадрів з камери при переслідуванні.

Теоретичні напрацювання та практичні рекомендації, зроблені на основі виконаної роботи, володіють як самостійною теоретичною цінністю для перспективних досліджень в області фотозахоплення і фотопереслідування малих і далеких рухомих об'єктів, так і мають високу практичну цінність у зв'язку з необхідністю реального виявлення і вимірювання параметрів руху безпілотних літальних апаратів.

Література

1. В.І. Чигінь, М.М. Проценко, Ю.В. Шабатура, М.В. Бугайов. Вдосконалення способу виявлення безпілотних літальних апаратів за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів. Військово-технічний збірник АСВ, 2019. N20, стр 58-63. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>
2. Чигінь В.І., Михайлишин П.Я. Вимірювання координат безпілотних літальних об'єктів з використанням звукової і відеоапаратури. V Всеукраїнська наук.-техн. конф. у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» м. Славське, 29 січ.-2 лют. 2019 р. С.10-12.
3. Федішин Назар, Чигінь Василь. Дослідження звукової системи виявлення літальних об'єктів з використанням гармонік в акустичному сигналі. Міжнар. конф. молодих вчених та аспірантів "ІЕФ-2017. Інститут електронної фізики НАН України, м. Ужгород " 23- 26 трав. 2017. С.13-15.
4. Василь Чигінь, Павло Михайлишин. Експериментальний безпілотний авіаційний комплекс для фотозахоплення. Вісник Хмельницького Національного університету. 2019, № 2 (271), с. 202-205.
5. Василь Чигінь, Павло Михайлишин. Експериментальні дослідження безпілотного авіаційного комплексу при фотозахопленні. Вісник Хмельницького Національного університету. 2020, № 3(285), р. 170-174
6. В. Глозов, А. Гуніна, Ю. Телешук. Аналіз можливостей застосування безпілотних літальних апаратів для військових цілей. Фотограмметрія, геоінформаційні системи та картографія. Вип. 1 (33), 2017. С.139-146.
7. М.З. Лаврівський. Розвиток безпілотних літальних апаратів в Україні та світі для виконання завдань цивільного захисту. Науковий вісник НЛТУ України, 2017, т. 27, № 1. С.151-153.
8. Мясіщев О.А. Режими польоту контролерів польоту APT2.6 і Pixhawk БПЛА / О. А. Мясіщев, В.В. Швець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 1 (257). – С. 78–82.
9. Pixhawk [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pixhawk.org/>
10. RaspberryPi [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.raspberrypi.org/products>
11. HardKernel [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hardkernel.comshopodroid-c2>
12. Nastolnye-kompyutery LattePanda [Електронний ресурс]. режим доступу: <https://hotline.ua/computer-nastolnye-kompyuterylattePanda-lattePanda-2g32gb>
13. ArduPilot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ardupilot.org/ardupilot/>
14. QgroundControl [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://qgroundcontrol.com/>
15. Автоматичне відстеження об'єкта на Python. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://robotos.in/uroki/avtomaticheskoe-otslezhivanie-ob-ekta-na-python>.
16. Ballon Finder [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=yRmXwRqPesY&feature=youtu.be>.
17. Режим active track 2.0 на dji mavic 2 pro. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=qEmd5g2fMcE&feature=youtu.be>
18. Експериментальна система DJI. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vido.com.ua/article/12354/eksperimentalnaia-sistiema-dji-pomoghalet-priedotvrashchat-stolknovieniia-dronov-zalogh-biezopasnogho-vozdushnogho-dvizhieniia/>
19. Lo, L.-Y.; Yiu, C.H.; Tang, Y.; Yang, A.-S.; Li, B.; Wen, C.-Y. Dynamic Object Tracking on Autonomous UAV System for Surveillance Applications. *Sensors* 2021, 21, 7888. <https://doi.org/10.3390/s21237888>
20. Kalman Filter Explained Simply [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://thekalmanfilter.com/kalman-filter-explained-simply/>.
21. Gabr K., Abdelkader M., Jarraya I., Almusalami A., Koubaa A. SMART-TRACK: A Novel Kalman Filter-Guided Sensor Fusion For Robust UAV Object Tracking in Dynamic Environments [Електронний ресурс] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2410.10409. – DOI: 10.48550/arXiv.2410.10409. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2410.10409>
22. Wu D. Object detection and tracking for drones: A system design using dynamic visual SLAM // Applied and Computational Engineering. – 2024. – Vol. 81. – P. 71–82. – DOI: 10.54254/2755-2721/81/20241013.
23. Pix4Dmapper Photogrammetry Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/>.
24. OpenDroneMap: The open source photogrammetry toolkit [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opendronemap.org>.
25. What Is Structure from Motion? [Електронний ресурс] // MathWorks Documentation. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/what-is-structure-from-motion.html>.
26. Introduction to SIFT in OpenCV [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.opencv.org/4.x/da/df5/tutorial_py_sift_intro.html.

27. Agisoft Metashape [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agisoft.com/>.

28. В. Чигін, М. Черненко. Експериментальна система і програмне забезпечення для дослідження фотопереслідування рухомих об'єктів безпілотним літальним апаратом. Вісник Хмельницького Національного університету. 2020, № 4 (287), с. 84-88.

References

1. V.I. Chyhin, M.M. Protsenko, Yu.V. Shabatura, M.V. Bugayov. Improving the method of detecting unmanned aerial vehicles based on the results of spectral analysis of acoustic signals. Military-technical collection of DIA, 2019. N20, pp. 58-63. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>
2. Chyhin V.I., Mykhailishyn P.Ya. Measure the coordinates of unmanned aerial vehicles using audio and video equipment. V All-Ukrainian scientific and technical conf. in the field of metrology "Technical Using of Measurement – 2019, " Slavske, January 29-February 2. 2019. P.10-12.
3. Fedyshyn Nazar, Chyhin Vasyl. Investigation of the sound system for detecting flying objects using harmonics in an acoustic signal. International. conf. of young scientists and graduate students "IEF-2017. Institute of Electronic Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Uzhhorod", May 23-26. 2017. P.13-15.
4. Vasyl Chyhin, Pavlo Mykhailishyn. Experimental unmanned aerial vehicle for photo capture. Bulletin of Khmelnytsky National University. 2019, № 2 (271), p. 202-205.
5. Vasyl Chyhin, Pavlo Mykhailishyn. Experimental studies of unmanned aerial vehicles during photo capture. Bulletin of Khmelnytsky National University. 2020, № 3(285), p. 170-174
6. V. Glotov, A. Gunina, Y. Teleshuk. Analysis of the possibilities of using unmanned aerial vehicles for military purposes. Photogrammetry, geographic information systems and cartography. V. 1 (33), 2017. P.139-146.
7. M.Z. Lavrovsky. Development of unmanned aerial vehicles in Ukraine and the world to perform civil defense tasks. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine, 2017, vol. 27, № 1. P.151-153.
8. Myasishchev O.A. Flight modes of flight controllers APT2.6 and Pixhawk UAV / O.A. Myasishchev, V.V. Shoemaker // Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical sciences. - 2018. - № 1 (257). - P. 78–82.
9. Pixhawk URL: <https://pixhawk.org/>
10. RaspberryPi URL: <https://www.raspberrypi.org/products>
11. HardKernel URL: <https://www.hardkernel.comshopodroid-c2>
12. Nastolnye-kompyutery LattePanda URL: <https://hotline.ua/computer-nastolnye-kompyuterylattePanda-lattePanda-2g32gb>
13. ArduPilot URL: <http://ardupilot.org/ardupilot/>
14. QGroundControl URL: <http://qgroundcontrol.com/>
15. Automatic tracking of an object on python. URL: <https://robotos.in/uroki/avtomaticheskoe-otslezhivanie-ob-ekta-na-python>.
16. Ballon Finder. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yRmXwRqPesY&feature=youtu.be>.
17. DJI Mavic 2 pro active track 2.0 mode. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qEmd5g2fMcE&feature=youtu.be>
18. Experimental DJI system. URL: <https://vido.com.ua/article/12354/eksperymentalnaia-sistiema-dji-pomoghaet-priedotvrashchat-stolknovieniia-dronov-zalogh-bezopasnogho-vozdushnogho-dvizheniia>
19. Lo, L.-Y.; Yiu, C.H.; Tang, Y.; Yang, A.-S.; Li, B.; Wen, C.-Y. Dynamic Object Tracking on Autonomous UAV System for Surveillance Applications. Sensors 2021, 21, 7888. URL: <https://doi.org/10.3390/s21237888>
20. Kalman Filter Explained Simply. URL: <https://thekalmanfilter.com/kalman-filter-explained-simply/>.
21. Gabr K., Abdelkader M., Jarraya I., Almusalami A., Koubaa A. SMART-TRACK: A Novel Kalman Filter-Guided Sensor Fusion For Robust UAV Object Tracking in Dynamic Environments // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2410.10409. – DOI: 10.48550/arXiv.2410.10409. URL: <https://arxiv.org/abs/2410.10409>
22. Wu D. Object detection and tracking for drones: A system design using dynamic visual SLAM // Applied and Computational Engineering. – 2024. – Vol. 81. – P. 71–82. – DOI: 10.54254/2755-2721/81/20241013.
23. Pix4Dmapper Photogrammetry Software. URL: <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/>.
24. OpenDroneMap: The open source photogrammetry toolkit. URL: <https://opendronemap.org>.
25. What Is Structure from Motion // MathWorks Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/what-is-structure-from-motion.html>.
26. Introduction to SIFT in OpenCV. URL: https://docs.opencv.org/4.x/da/df5/tutorial_py_sift_intro.html.
27. Agisoft Metashape. URL: <https://www.agisoft.com/>.
28. V. Chyhin, M. Chernenko. Experimental system and software for investigation of photo-pursuit of moving objects by unmanned aerial vehicle. Bulletin of Khmelnytsky National University. 2020, № 4 (287), p. 84-88.