

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-71>

УДК 621.396: 551.508

ВАСИЛЬ ЧИГІНЬ

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0003-1593-6832>

e-mail vchygin@gmail.com

ВАСИЛЬ НАУЛИЧНИЙ

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0009-0004-2483-1404>

e-mail vasyl.naulychnyi@gmail.com

ПАВЛО МИХАЙЛИШИН

Національний університет "Львівська політехніка"

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА СИСТЕМА І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЗАХОПЛЕННЯ І ПЕРЕСЛІДУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У ДВОХ КООРДИНАТАХ

Створили експериментальну систему і програмне забезпечення для генерування і дослідження команд на двигуни безпілотного літального апарата (БПЛА) та його автоматичного повертання при фотопереслідуванні рухомого об'єкта з метою оптимізації процесів керування. Використали квадрокоптер з рамою Q450, двигунами D2212-920kv і пропелерами з розмірами 10x1,5 см. Встановили автопілот Pixhawk PX-4 з відкритим програмним кодом і бортовий комп'ютер Raspberry-3 з відеокамерою Pi V2 з розділенням 1080×720 пікселів. Квадрокоптер підвісили на жилах так, що пропелери знаходилися у горизонтальній площині. Експериментальна установка включає двоканальний цифровий осцилограф типу ISDS205A для вимірювання ширини імпульсів керування моторами і лазерний тахометр типу UT-372 для вимірювання швидкості обертання моторів. Склали програму, яка обчислює координати центра зображення X об'єкта в пікселях і відповідні тривалості імпульсів для керування обертанням моторами квадрокоптера за допомогою четвертого каналу приймача автопілота. Система польоту використовує бібліотеки Dronekit, datetime, errno, platform, а програма перетворення відеоряду зображень - бібліотеки sys, OpenCV, Picamera.

Ключові слова: експериментальна установка, програмне забезпечення, фотопереслідування, двомірне переміщення, квадрокоптер, автопілот, бортовий комп'ютер.

VASYL CHYHIN, VASYL NAULYCHNYI, PAVLO MYKHAYLYSHYN

National University "Lviv Polytechnic"

EXPERIMENTAL SYSTEM AND SOFTWARE FOR INVESTIGATION OF IMAGE CAPTURING AND FOLLOWING OF MOVING OBJECTS IN TWO DIMENSIONS

Establishing optimal parameters of the photo capture and tracking system for moving objects is promising; creating an experimental system and software for studying the UAV control system using an on-board computer and flight controller. An experimental system and software have been developed to generate and study commands for the motors of unmanned aerial vehicle (UAV) and its automatic rotation during following of a moving object using image capturing in order to optimize process of UAV controlling. A quadcopter with a Q450 frame has been used, along with D2212-920kv engines and 10 × 1.5cm propellers. An open source Pixhawk PX-4 autopilot and a Raspberry-3 on-board computer with a Pi V2 camera with a resolution of 1080 × 720 pixels have been installed. The quadcopter was suspended so that the propellers were in a horizontal position. The experimental setup includes a two-channel oscilloscope ISDS205A for measuring the width of the motors control pulses and a tachometer UT-372 for measuring the speed of rotation of the motors. We have compiled a program that calculates the coordinates of the center of the image X of the object in pixels and the corresponding pulse durations to control the rotation of the quadcopter motors using the fourth channel of the autopilot receiver. The flight system uses Dronekit, datetime, errno, platform libraries, and the video conversion program uses sys, OpenCV, Picamera libraries. 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 photo-tracking of small and distant moving objects, and have practical value in connection with ensuring a real high indicator and measurement of the parameters of the movement of unmanned aerial vehicles.

Keywords: experimental setup, software, image-based following, two-dimensional rotation, quadcopter, autopilot, on-board computer.

Стаття надійшла до редакції / Received 06.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми

Робота є продовженням власних досліджень [1-3] у напрямку створення системи для фото захоплення і переслідування рухомих об'єктів у двомірному просторі. У попередніх роботах [1-3] досліджували процеси вимірювання GPS-координат рухомих об'єктів стаціонарними фото засобами, а також політ власного БПЛА на ці координати за допомогою бортової комп'ютерної системи. При цьому не розглядали питання автоматизації фотопереслідування і створення відповідного програмного забезпечення для отримання оптимальних параметрів політної системи у двох координатах. Робота є особливо актуальною в даний час, оскільки безпілотні літальні апарати використовують все частіше, виконуючи завдання розвідки, проводячи незаконні спостереження. Тому проводяться інтенсивні пошуки нових способів виявлення і розпізнавання різного типу БПЛА, а також їх захоплення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У попередніх роботах одного з авторів [1-3] досліджувалися процеси виявлення і вимірювання параметрів польоту безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за допомогою наземних установок із звуковими і фото- приймачами. Створена вперше стаціонарна система фоторозпізнавання і фото захоплення за допомогою фотокамери типу Кенон-7Д і власного програмного дозволила вимірювати координати квадрокоптера типу Фантом-3 на віддалі порядку 1 км [4]. Крім того, за допомогою експериментального безпілотного авіаційного комплексу досліджено польоти власного БПЛА за попередньо виміряними стаціонарною фотосистемою координатами несанкціонованого об'єкта та його фото захоплення [5]. При цьому, використання бортового комп'ютера, відеокамери та оригінального програмного забезпечення дозволило вловити квадрокоптер сіткою. Проте, ця система давала можливість виконувати лише політ за наперед визначеними GPS-координатами, але автоматичне фотопереслідування рухомого об'єкта не відбувалося.

У доступних українських публікаціях описуються, в основному, шляхи застосування безпілотних літальних апаратів у військовій та цивільній справах [6,7]. Не виявлено робіт, зв'язаних з використанням бортового комп'ютера для виконання польотів БПЛА з фото захопленням і переслідуванням. В роботах [8, 9] описуються основні елементи, зокрема, сенсори автопілотів коптерів, проте не піднімається питання використання бортового комп'ютера для системи стабілізації і налаштування режимів програмованого польоту. В літературі не виявлено описання структури і принципу роботи автопілота типу Pixhawk. Основні характеристики сучасних міні-комп'ютерів, які можна використати у ролі бортових для керування польотів, детально описані на сайтах - Raspberry Pi3 [10], Odroid C2 [11], LattePanda [12]. Це – однокристальні плати, 4-ядерні, з тактовою частотою 1,5-2 ГГц, оперативною пам'яттю 1-2 Гбайти, вбудованою пам'яттю – 32 або 64 Гбайти. Комп'ютери Raspberry Pi3 і Odroid C2 передбачають операційну систему Linux, LattePanda - Windows-10. Розміри і маса перших двох є суттєво меншими (85x56 мм², 40 грам) від відповідних параметрів LattePanda (88x70 мм², 56 грам). Детальний аналіз параметрів цих та інших промислових міні-комп'ютерів дозволив вибрати оптимальний варіант у ролі бортового для експериментальних досліджень з фотопереслідування.

В інтернет виданнях виявлено ряд програмних забезпечень, зв'язаних з відлагодженням передполітних режимів та автоматичним керуванням польотів за наперед заданою схемою. Вони включають досить широкий спектр функцій для формування політних завдань. Типові програми керування Mission Planner [13] і Q-GroundControl [14] призначені для виконання ряду, строго визначених дій, зокрема, перевірки всіх сенсорів БПЛА перед пуском, заведення моторів, вильоту у вертикальному напрямку на певну задану висоту і виконання самого польоту у певному режимі (Gaided, Loiter тощо). Недоліком цих програм є неможливість створення сценарію з фотопереслідуванням і виконання дії знешкодження, вони є закритими для модернізації.

У роботах [15-18] розглядаються питання створення програм для фото захоплення. Так, автор [18] склав систему спостереження за рухомим кольоровим об'єктом - кубом і повертання руки робота за допомогою стаціонарної фотосистеми з використанням мікропроцесора типу ардуїно. У роботі [16] нерухомий об'єкт – червона куля розпізнається і знешкоджується за допомогою фотосистеми, встановленої на квадрокоптері. За даними [17], дрон типу DJI Mavic2 Pro може відслідковувати деякі значні за розмірами об'єкти (людину, автомобіль) і летіти на певній відстані від об'єкта (режим *Follow me*). Остання модель квадрокоптера Matrice 100 DJI [18] має можливість уникати зіткнення з предметами. Ні в одній з робіт [15-18] не розглядається функція фотопереслідування, зокрема, об'єкта з малими розмірами і наближення до нього на віддаль, достатню для виконання дії знешкодження. Програми [16-18] є також закритими для модернізації. Інформацію про типові бібліотеки OpenCV, Picamera, DroneKit, RPI.GPIO, які використовуються для знаходження та розпізнавання об'єкта, аналізу та обробки зображення, зв'язку бортового комп'ютера з бортовою камерою, управління БПЛА і виконання дій після завершення переслідування, можна знайти на офіційних інтернет сторінках.

У деяких проаналізованих дослідженнях, наприклад [19] значну увагу приділяють системам візуального відстеження для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які дозволяють виявляти, захоплювати та переслідувати рухомі об'єкти у режимі реального часу. У роботі [19] була розроблена система, що поєднує глибокі нейронні мережі (зокрема, архітектуру YOLO та SSD) з алгоритмами слідкування, такими як KCF (Kernelized Correlation Filters), для автоматичного виявлення та відстеження рухомих об'єктів. Це дозволило суттєво підвищити точність визначення положення об'єктів навіть у складних умовах оточення та при наявності 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. Важливим напрямом досліджень є також інтеграція алгоритмів одночасної локалізації і побудови карти (SLAM) з системами візуального відстеження. 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 недороговартісного обладнання із поєднанням оптимізованих

алгоритмів. Аналіз існуючих розробок 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 обробки відеоданих у реальному часі. Це підтверджує актуальність подальших досліджень у цій галузі з метою створення експериментальних систем нового покоління.

Окремі комерційні рішення, такі як програмне забезпечення Pix4Dmapper [23] та OpenDroneMap [24], широко застосовуються для фотограмметричної обробки даних із камер літальних об'єктів. Ці системи дозволяють створювати високоточні двовимірні та тривимірні моделі простору, але переважно орієнтовані на обробку статичних зображень, а не на динамічне відстеження рухомих об'єктів у реальному часі. Наприклад, програмний комплекс Pix4Dmapper, який широко застосовується для фотограмметричної обробки, дає змогу отримувати високоточні геореференційовані карти, цифрові моделі рельєфу та хмар точок 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 розрахунку 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 зйомки, зокрема, за змін освітлення, перспективи та наявності часткових перекриттів. Проте алгоритм SIFT вимагає значних обчислювальних ресурсів, що призводить до повільної роботи, особливо при аналізі великих зображень або великої кількості кадрів у реальному часі. Це обмежує можливості його застосування на пристроях із низькою обчислювальною потужністю або в системах, які мають працювати в режимі реального часу з високою швидкістю.

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 у фотограмметричних дослідженнях і на практиці в інженерних, геодезичних та будівельних задачах. Програмне забезпечення Metashape забезпечує високоточні результати шляхом поєднання алгоритмів автокореляції зображень, розрахунку орієнтування камер і побудови тривимірних хмар точок, а також геореференціювання з використанням GNSS-координат. Однак, ця платформа не розрахована 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 у задачах фотограмметрії, але їх функціонал переважно орієнтований на обробку статичних зображень. Системи, що здатні в реальному часі здійснювати фотозахоплення і переслідування рухомих об'єктів, наразі залишаються недостатньо розвиненими та потребують подальших досліджень і розробок. Це підтверджує актуальність створення спеціалізованого програмного забезпечення, здатного інтегрувати фотограмметричні технології з алгоритмами візуального відстеження та управління рухом БПЛА для розв'язання комплексних завдань у двох координатах у режимі реального часу.

На наш погляд, для встановлення оптимальних параметрів системи фотозахоплення і переслідування рухомих об'єктів є перспективним створення експериментальної системи і програмного забезпечення для дослідження системи керування БПЛА з використанням бортового комп'ютера і контролера польоту. Бажано використати квадрокоптер із суттєво зменшеними розмірами пропелерів для проведення експериментів всередині приміщення з режимом обертання навколо вертикальної та горизонтальної осей.

Політ БПЛА за координатами реалізується шляхом передачі заданих координат (широти та довготи), отриманих від БПЛА противника, власному безпілотному літальному апарату за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Ця програма, встановлена на наземній станції (пульт управління або персональний комп'ютер), автоматично формує та надсилає команди для коригування позиції власного БПЛА безпосередньо в польоті. Такий підхід дозволяє оперативну змінювати траєкторію руху безпілотника в автоматичному режимі, що значно прискорює процес порівняно з повільним ручним керуванням оператором.

Для реалізації запропонованої системи керування доцільно використовувати автопілот типу PixHawk 2. Вибір цього автопілота обумовлений тим, що він має відкриту архітектуру і дозволяє легко інтегруватися з бортовим комп'ютером за допомогою стандартного дата-кабелю. Як бортовий комп'ютер 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 2.

На наш погляд, для встановлення оптимальних параметрів системи фотозахоплення і переслідування рухомих об'єктів є перспективним створення експериментальної системи і програмного забезпечення для

дослідження системи керування БПЛА з використанням бортового комп'ютера і контролера польоту. Бажано використати БПЛА типу квадрокоптер із суттєво зменшеними розмірами пропелерів для проведення експериментів всередині приміщення з режимом виключно обертання навколо вертикальної осі.

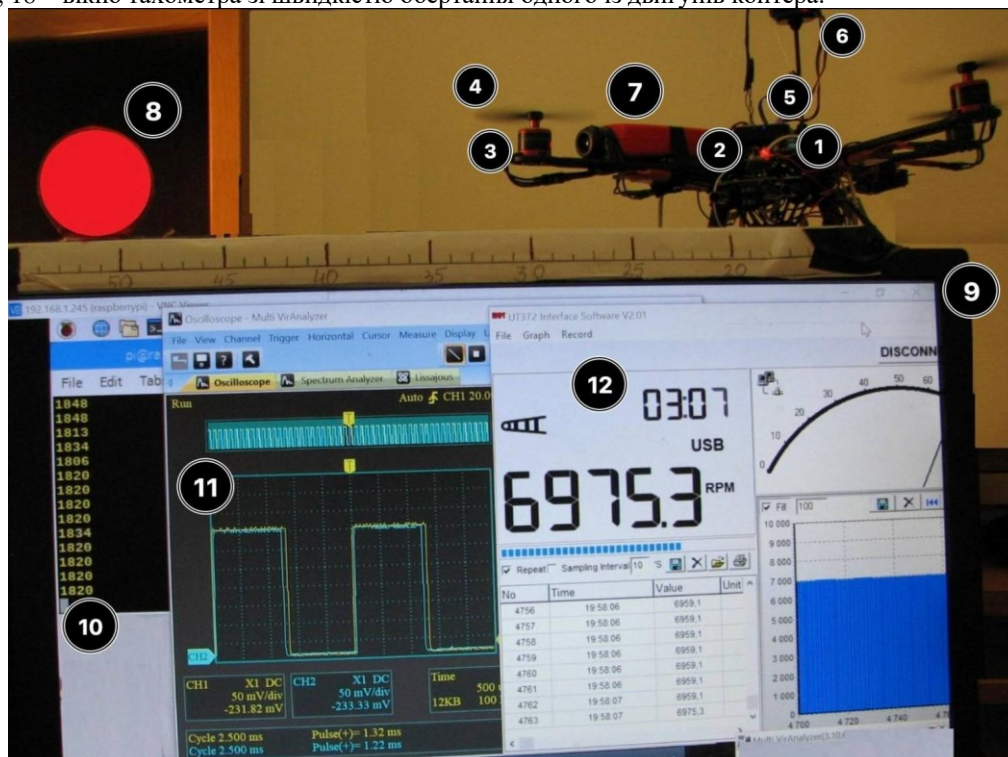
Метою роботи є створити апаратну частину і програмне забезпечення, а також провести експериментальні дослідження для оптимізації процесів керування польотом безпілотного літального апарата при фото захопленні і переслідуванні рухомої політної системи у двох координатах.

Виклад основного матеріалу

1. Експериментальна частина

Методика досліджень. Оскільки у відомій нам літературі не знайдено описання структури і принципу роботи автопілота типу Pixhawk, зокрема, не висвітлюється його швидкодія у керуванні моторами БПЛА, експериментальну схему вимірювань склали з умовою записів у файли часових залежностей якнайбільшої кількості параметрів фото захоплення і переслідування рухомого об'єкта. До таких величин віднесли координату X (пікселі) центру зображення об'єкта – червоного диска, число імпульсів K4, які формуються за певною формулою із відомого значення X і подаються на вхід цього автопілота, ширини імпульсів керування ІМП1 і ІМП2 (мілісекунди), які подаються від автопілота Pixhawk до регуляторів обертів моторів, швидкість обертання моторів (оберти за хвилину), які отримали за допомогою лазерного тахометра, а також відхилення зображення плями від лазерного променя (пікселі), прикріпленого до тіла квадрокоптера при реагуванні системи на відхилення об'єкта в горизонтальній площині. При цьому використали дві схеми кріплення бортового комп'ютера Raspberry – незалежне, із кріпленням на окремому нерухомому штосі, а також - на борту самого квадрокоптера. Після аналізу часових залежностей всіх цих величин, можна зробити висновки про причини можливих затримок реакції підсистем на відхилення об'єкта, виявлення найсуттєвіших затримок і пропозиції щодо їх усунення, оптимізації системи в цілому.

Експериментальна установка. Фотографія на рисунку 1 відображає основні елементи запропонованої експериментальної системи: 1 – бортовий комп'ютер Raspberry Pi3, 2 – автопілот Pixhawk Px4, 3 – провідники з'єднання комп'ютера Raspberry Pi3 та відеокамери Pi v2, закріплених у даному випадку на окремому нерухомому штосі, з автопілотом Pixhawk, 4 – мотори - безколекторні двигуни типу Sunnysky V2814-11 800KV, 5 – пропелери типу 10x45, 6 – лазерний ліхтарик із пучком зеленого кольору, 7 – GPS-приймач, 8 – лазерний тахометр типу UT-372, 9 – об'єкт переслідування - червоний диск, який переміщується на планці по горизонталі, 10 – пляма від лазерного променя, 11- літєво-полімерний акумулятор типу Multistar ємністю 5200 мА·год, 12 - комп'ютер стаціонарний, 13 – осцилографічна приставка - двоканальний USB-осцилограф типу ISDS205A для вимірювання ширини імпульсів керування моторами, 14 – монітор із зображеннями диска з камери, даних обчислень бортовим комп'ютером, ширини імпульсів і швидкості обертання моторів, 15 – вікно терміналу з фото захопленням, 16 – вікно з обчисленими кількостями імпульсів K4, 17 – вікно осцилографа з осцилограмою імпульсів ім1 і ім2 та їх ширинами, 18 – вікно тахометра зі швидкістю обертання одного із двигунів коптера.



1 - бортовий комп'ютер Raspberry Pi, 2 - автопілот 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 диска, 11 - вікно програми осцилографа з осцилограмою імпульсів ІМП1 і ІМП2 та їх ширинами, 12 - вікно програми із результатами вимірювань тахометра - швидкістю обертання мотора

Рис.1. Фотографія експериментальної установки

Камеру Raspberry Pi v2 використали у ролі фотоапарата, з отриманням і опрацюванням кожного наступного кадру за допомогою власної програми з інтервалом 1/30 секунди. Для зменшення тяги у приміщенні оригінальних для квадрокоптера з рамою Q450 пропелерів з розмірами 26х3 см використали суттєво менші пропелери з розмірами 10х1,5 см.

2. Програмне забезпечення системи фотопереслідування

Алгоритм двокоординатного фотопереслідування рухомих об'єктів. Опрацювали алгоритм двокоординатного фото переслідування, який є якісним розвитком попередньої системи, 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.

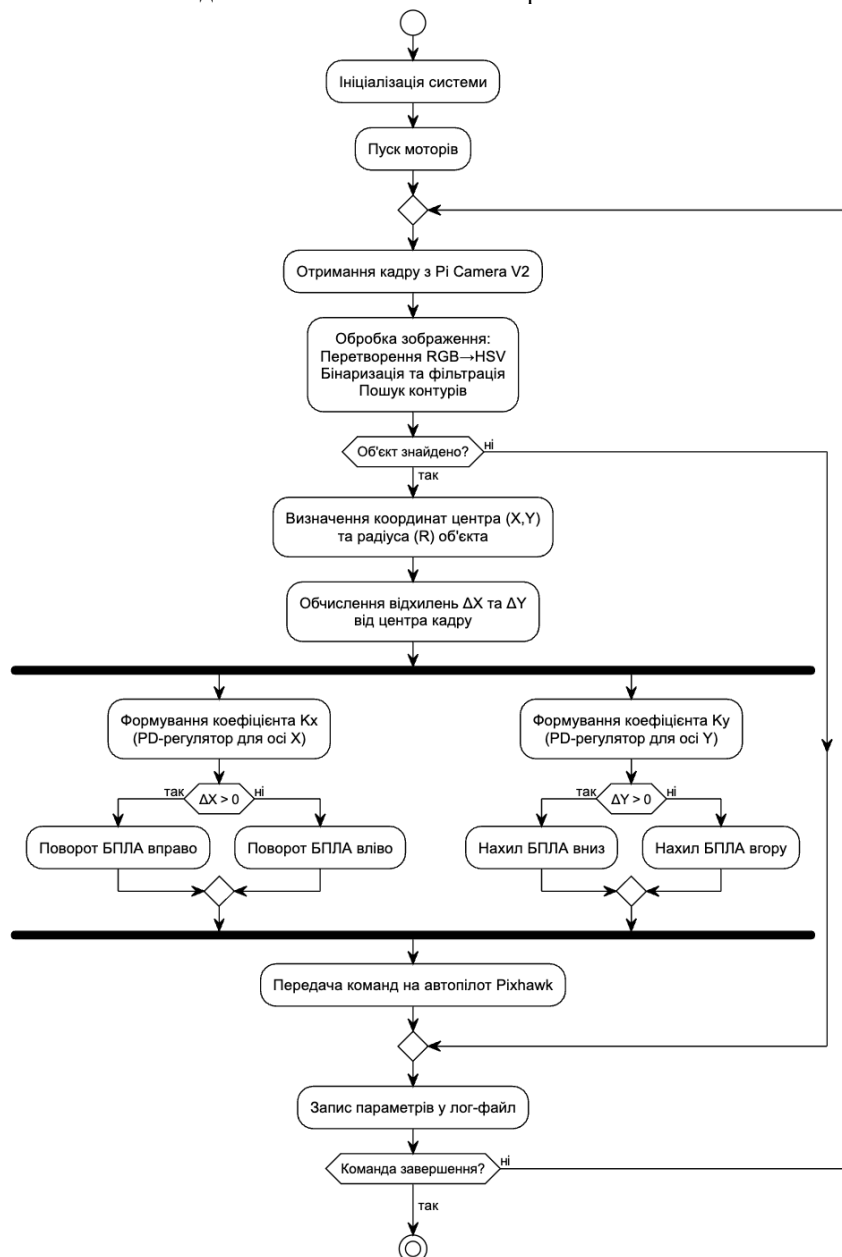


Рис. 2. Блок-схема алгоритму двокоординатного фотопереслідування об'єкта

Початковий етап роботи включає ініціалізацію відеокамери та встановлення з'єднання з автопілотом Pixhawk через бібліотеку DroneKit по MAVLink-протоколу. Після запуску 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 розробленого 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 по обох осях (ΔX та ΔY).

На основі величини 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.

Розраховані 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

При вимірюваннях параметрів фотопереслідування і керування квадрокоптером отримали наступні часові залежності (Рис.3): а. переміщення зображення диска по осі X (пікселі), б. обчислені програмою числа імпульсів K_4 , які подаються комп'ютером Raspberry через систему телеметрії на автопілот PixHawk, в. ширини імпульсів, які формуються автопілотом PixHawk (мілісекунди), г. швидкість обертання моторів (оберти за хвилину). Як видно з графіків на рисунку 3, залежності а) переміщення зображення червоного диска по осі X і б) кількості ШІМ-імпульсів K_4 , в основному, синхронно повторюють один одного.

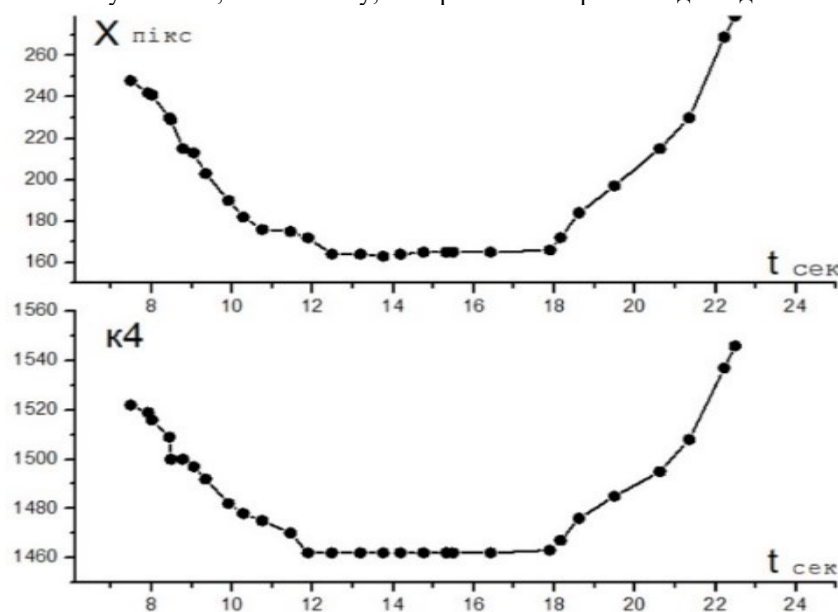


Рис.3. Графіки часових залежностей а) переміщення диска по осі X , б) створених програмою кількості ШІМ-імпульсів K_4 , які подаються на автопілот PixHawk

Так, в межах від 8 до 12 секунд диск плавно переміщався і, при цьому, зображення зміщувалось в межах 250-160 пікселів до центру матриці камери. При цьому обчислена кількість ШІМ-імпульсів K_4 синхронно

зменшувалась в межах 1530-1460. У діапазоні часу 12-18 секунд диск не переміщався і число К4 не змінювало свого значення 1460. Після цього, в межах 18-22 секунд диск плавно переміщався у протилежному напрямку, аж до положення зображення 280 пікселів. При цьому кількість ШІМ-імпульсів К4 синхронно збільшувалась до значення 1550. Затримки в часі кількості ШІМ-імпульсів К4 у порівнянні зі зміщенням Х не спостерігається протягом одного циклу випробування.

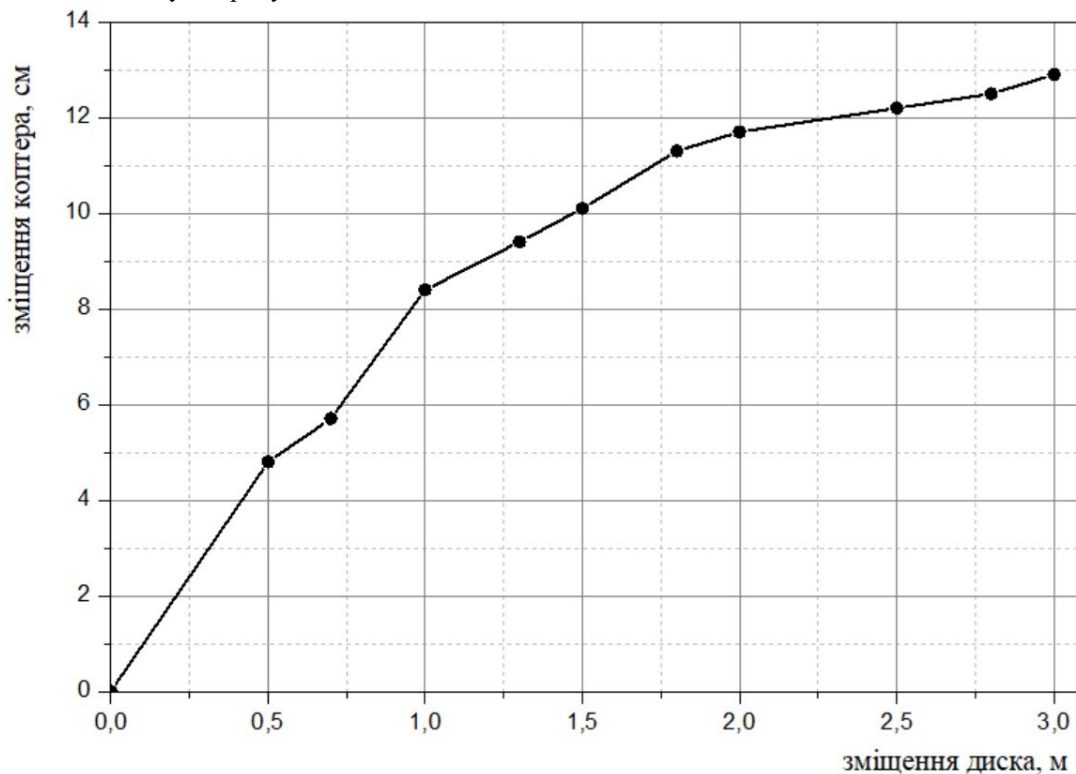


Рис.4. Графік залежності зміщення коптера Фантом-3 по осі Y (сантиметри), відповідного до зміщення диска у цьому ж напрямку (метри)

На рисунку 4. зображено графік залежності зміщення коптера Фантом-3 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.

Підсумовуючи результати експериментального випробування системи і програми фотопереслідування об'єкта - червоного диска у двовірному просторі, можна стверджувати про те, що запропонована система і програмне забезпечення є достатніми для оцінки ступеня оптимізації процесів керування польотом безпілотного літального апарата при фотозахопленні і переслідуванні об'єктів. Отримані вперше часові залежності переміщення зображення диска і створені програмою числа імпульсів К4, які подаються бортовим комп'ютером Raspberry на автопілот PixHawk, свідчать про можливість продовження роботи у напрямку вивчення всіх параметрів, які характеризують повну систему фотозахоплення і переслідування, що стає метою наших наступних досліджень.

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. Чигін В. І., Проценко М. М., Шабатура Ю. В., Бугайов М. В. Вдосконалення способу виявлення безпілотних літальних апаратів за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів // Військово-технічний збірник АСВ. – 2019. – № 20. – С. 58–63. – DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>.

2. Чигін 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». – Славське, 29 січ.–2 лют. 2019 р. – С. 10–12.
3. Федисин Н., Чигін В. Дослідження звукової системи виявлення літальних об'єктів з використанням гармонік в акустичному сигналі // ІЕФ–2017 : Міжнар. конф. молодих вчених та аспірантів. – Ужгород: Інститут електронної фізики НАН України, 23–26 трав. 2017. – С. 13–15.
4. Чигін В., Михайлишин П. Експериментальний безпілотний авіаційний комплекс для фотозахоплення // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 2(271). – С. 202–205.
5. Чигін В., Михайлишин П. Експериментальні дослідження безпілотного авіаційного комплексу при фотозахопленні // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 3(285). – С. 170–174.
6. Глотов В., Гуніна А., Телешук Ю. Аналіз можливостей застосування безпілотних літальних апаратів для військових цілей // Фотограмметрія, геоінформаційні системи та картографія. – 2017. – Вип. 1(33). – С. 139–146.
7. Лаврівський М. З. 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., Швець В. В. Режими польоту контролерів польоту АРТ2.6 і Pixhawk БПЛА // 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 Lattepana [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hotline.ua/computer-nastolnye-kompyuterylattepana-lattepana-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-pomoghaet-priedotvrashchat-stolknovieniia-dronov-zalogh-biezopasnogho-vozdushnogho-dvizhieniia/>

References

1. Chyhin V. I., Protsenko M. M., Shabatura Yu. V., Buhaiov M. V. Vdoskonalennia sposobu vyivlennia bezpilotnykh litalnykh aparativ za rezultatsy spektralnogo analizu akustychnykh syhnaliv // Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk ASV. – 2019. – № 20. – S. 58–63. – DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>.
2. Chyhin V. I., Mykhailishyn P. Ya. Vymiryuvannia koordynat bezpilotnykh litalnykh obiektiv z vykorystanniam zvukovoi i videoaparatury // V Vseukrainska nauk.-tehn. konf. u tsaryni metrolohii «Technical Using of Measurement – 2019». – Slavske, 29 sich.–2 liut. 2019 r. – S. 10–12.
3. Fedysyn N., Chyhin V. Doslidzhennia zvukovoi systemy vyivlennia litalnykh obiektiv z vykorystanniam harmonik v akustychnomu syhnali // IEF–2017 : Mizhnar. konf. molodykh vchenykh ta aspirantiv. – Uzhhorod: Instytut elektronnoi fizyky NAN Ukrainy, 23–26 trav. 2017. – S. 13–15.
4. Chyhin V., Mykhailishyn P. Eksperymentalnyi bezpilotnyi aviatsiyni kompleks dlia fotozakhoplennia // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2019. – № 2(271). – S. 202–205.
5. Chyhin V., Mykhailishyn P. Eksperymentalni doslidzhennia bezpilotnoho aviatsiynoho kompleksu pry fotozakhopleni // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2020. – № 3(285). – S. 170–174.
6. Hlotov V., Hunina A., Teleshchuk Yu. Analiz mozhlyvostei zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia viiskovykh tsilei // Fotohrammetriia, heoinformatsiini systemy ta kartohrafiia. – 2017. – Vyp. 1(33). – S. 139–146.
7. Lavrivskiy M. Z. Rozvytok bezpilotnykh litalnykh aparativ v Ukraini ta sviti dlia vykonannia zavdan tsyvilnoho zakhystu // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. – 2017. – T. 27, № 1. – S. 151–153.
8. Miasishchev O. A., Shvets V. V. Rezhymy polotu kontroleriv polotu ART2.6 i Pixhawk BPLA // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2018. – № 1(257). – S. 78–82.
9. Pixhawk [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://pixhawk.org/>
10. RaspberryPi [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.raspberrypi.org/products>
11. HardKernel [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.hardkernel.comshopodroid-c2>
12. Nastolnye-kompyutery Lattepana [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://hotline.ua/computer-nastolnye-kompyuterylattepana-lattepana-2g32gb>
13. ArduPilot [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://ardupilot.org/ardupilot/>
14. QgroundControl [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://qgroundcontrol.com/>
15. Avtomatichne vidstezhennia obiekta na Python [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://robotos.in/uroki/avtomaticheskoe-otslezhivanie-ob-ekta-na-python>
16. Ballon Finder [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.youtube.com/watch?v=yRmXwRqPesY&feature=youtu.be>
17. Rezhym active track 2.0 na dji mavic 2 pro [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.youtube.com/watch?v=qEmd5g2fMcE&feature=youtu.be>
18. Eksperymentalna systema DJI [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://vido.com.ua/article/12354/eksperimentalnaia-sistiema-dji-pomoghaet-priedotvrashchat-stolknovieniia-dronov-zalogh-biezopasnogho-vozdushnogho-dvizhieniia/>