

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АЕРОКОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
(повна назва інституту/факультету)

**Кафедра систем керування літальними апаратами**  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Сергій ПОНОМАРЕНКО**  
(підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Дипломний проєкт**

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою **«Системи керування літальними апаратами  
та комплексами»**

(назва)

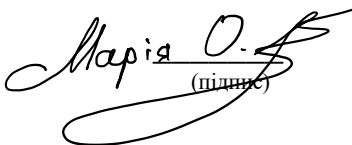
спеціальності \_\_\_\_\_ **173 «Авіоніка»** \_\_\_\_\_

(код та назва спеціальності)

на тему: "Система керування посадкою квадрокоптера на основі системи технічного зору"

Виконала: студентка IV курсу, групи АС-92  
(шифр групи)

Охримович Марія Ярославівна  
(Прізвище, ім'я, по батькові)

  
(підпис)

Керівник \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент   
(підпис)

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет навчально-науковий інститут аерокосмічних технологій  
(повна назва)

Кафедра систем керування літальними апаратами  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 173 «Авіоніка»  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Системи керування літальними апаратами  
та комплексами  
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Сергій ПОНОМАРЕНКО  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломний проєкт студенту**  
**Охримович Марії Ярославівні**

1. Тема проєкту «Система керування посадкою квадрокоптера на основі системи технічного зору».

керівник проєкту Бобков Юрій Володимирович, к.т.н., доцент,  
затверджені наказом по університету від «31» травня 2023 р. №2085-с

2. Термін подання студентом проєкту 10 червня 2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту: габаритні розміри злітно-посадкової площадки – 0,5...1,50 м; похибка визначення напрямку руху в точку посадки за даними системи технічного зору (СТЗ) - не більше 5 %; похибка визначення висоти – 1 %; основні функції – отримання та формування цифрового зображення, виділення контурів об'єктів, розпізнавання зображення злітно-посадкової площадки, керування посадкою квадрокоптера за сигналами СТЗ.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Огляд та аналіз систем керування посадкою квадрокоптера на основі СТЗ. Розробка структурної схеми системи керування. Вибір та обґрунтування технічних рішень. Розробка алгоритмів і

програмного забезпечення системи керування посадкою квадрокоптера за сигналами СТЗ. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

1) Схема електрична структурна (1 арк. ф. А1);

2) Алгоритм керування посадкою квадрокоптера. (1 арк.ф.А1).

3) Алгоритм роботи СТЗ (1 арк.ф.А1).

4) Плакати, що пояснюють основні положення дипломного проєкту (2 арк. ф. А1).

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вступ	25.04. 2023р.	
2	Огляд та аналіз систем керування посадкою квадрокоптера на основі СТЗ.	01.05. 2023р.	
3	Розробка структурної схеми системи керування.	05.05. 2023р.	
4	Вибір та обґрунтування технічних рішень.	15.05. 2023р.	
5	Розробка алгоритмів для системи керування посадкою квадрокоптера за сигналами СТЗ.	20.05. 2023р.	
6	Розробка програмного забезпечення.	01.06. 2023р.	
7	Висновки.	10.06. 2023р.	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Марія ОХРИМОВИЧ  
(ініціали, прізвище)

Керівник проєкту \_\_\_\_\_  
(підпис)

Юрій БОБКОВ  
(ініціали, прізвище)



## АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт складає 66 сторінок, в ній міститься 34 ілюстрацій, 5 таблиць, та 10 використаних джерел.

Дипломний проєкт освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» спеціальності 173-Авіоніка. Охримович Марія Ярославівна. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Інститут Аерокосмічних Технологій, кафедра «Системи керування літальними апаратами». Група АС-92. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.

Дана робота присвячена розробці системи управління посадкою квадрокоптера на основі системи технічного зору. Метою роботи є створення системи, яка базується на двох камерах, інтегрованих у конструкцію квадрокоптера, і є більш захищеною від пошкоджень. Для досягнення цієї мети були виконані такі завдання: розробка структурної схеми системи керування, розробка алгоритмів керування для посадки та розробка програмного забезпечення. Практичне значення даної роботи полягає в підвищенні експлуатаційних можливостей та безпеки квадрокоптера під час посадки. Система технічного зору дозволяє квадрокоптерам досягати точних і контрольованих посадок, автономно орієнтуватися і адаптуватися до різних умов навколишнього середовища.

Апробація результатів бакалаврського кваліфікаційного проєкту: виступ на конференції «гіротехнології, навігація і керування рухомими об'єктами – 2023».

Публікації: Результати роботи над дипломним проєктом опубліковано в тезах наукової конференції.

Ключові слова: системи технічного зору, системи управління, БПЛА, автономна посадка.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis consists of 68 pages, it contains 34 illustrations, 5 tables, and 10 used sources.

Diploma project of educational and qualification level "Bachelor" specialty 173-Avionics. Okhrymovych Maria. KPI named after Igor Sikorsky. Institute of Aerospace Technologies, Department of "Aircraft Control Systems". Group AS-92. - K.: KPI named after Igor Sikorskyi, 2023.

This work is devoted to the development of a quadcopter landing control system based on a technical vision system. The goal of the work is to create a system that is based on two cameras integrated into the design of the quadcopter, and is more protected from damage. To achieve this goal, the following tasks were performed: development of a structural diagram of the control system, development of control algorithms for landing, and development of software. The practical significance of this work is to increase the operational capabilities and safety of the quadcopter during landing. The technical vision system allows quadcopters to achieve precise and controlled landings, autonomously navigate and adapt to various environmental conditions.

Approbation of results (speeches on scientific and technical conferences): speech at the conference "gyrotechnologies, navigation and control of moving objects - 2023".

Publications: the results of work on the diploma project were published in the abstracts of the scientific conference.

Keywords: technical vision systems, control systems, UAV, autonomous landing.

# **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до дипломного проєкту

на тему: «Система керування посадкою квадрокоптера на основі системи  
технічного зору»

Київ-2023

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ .....	10
ВСТУП.....	11
1. Огляд та аналіз систем керування посадкою квадрокоптера на основі СТЗ.....	13
1.1 Системи керування рухом та посадкою квадрокоптера .....	13
1.2 Огляд системи технічного зору для керування рухом квадрокоптера.....	20
1.3 Приклад системи керування посадкою квадрокоптера на базі СТЗ.....	21
1.4 Висновки.....	27
2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	28
3.1 Розробка структурної схеми.....	28
3. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ПОБУДОВИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОСАДКОЮ КВАДРОКОПТЕРА ЗА СИГНАЛАМИ СТЗ.....	38
3.1 Вибір вибір відеокамери 1 – курсової та Відеокамери 2 – для наведення на ПО .....	38
3.2 Вибір ультразвукового (УЗ) висотоміра .....	40
3.3 Вибір мікроконтролера СТЗ.....	40
3.4 Вибір автопілота.....	42
3.5 Висновки.....	43
4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОСАДКОЮ КВАДРОКОПТЕРА ЗА СИГНАЛАМИ СТЗ.....	44
4.1 Загальний алгоритм пошуку ПО .....	44
4.2 Алгоритм визначення кута ризику для відеокамери 1 .....	46
4.3 Алгоритм визначення кута ризику та тангажу для відеокамери 2.....	49
5. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....	51
5.1 Підпрограма пошуку ПО .....	51
5.2 Підпрограма розрахунку відстані та кута ризику .....	57

					<b>ДП.АС92-2023.10.001ПЗ</b>					
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	<i>Система керування посадкою квадрокоптера на основі системи технічного зору.</i>					
Розроб.		Охримович М.Я.						Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Бобков Ю. В.							8	66
Консул.								КПІ ім. Ігоря Сікорського каф. СКЛІА гр. АС-92		
Н/контр.										
Затверд.		Пономаренко С.О.								

5.3 Підпрограма розрахунку кута тангажу .....	58
ВИСНОВКИ .....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	61
ДОДАТОК А .....	62
ДОДАТОК Б.....	63
ДОДАТОК В .....	65

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		9

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

СТЗ – система технічного зору

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

МкПК – мікроконтролер польотного контролера

БВ – барометричний висотомір

ТБА – тривісний блок акселерометрів

ТГ – тривісний гіроскоп

GPS – Global Positioning System

БРО – блок регуляторів обертів

УЗ – ультразвуковий

ПО – посадковий об'єкт

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		10

## ВСТУП

Зростаюча популярність БПЛА призвела до їх широкого використання в різних галузях промисловості, включаючи фотографію, сільське господарство, доставку та спостереження. Одним із найважливіших завдань, з якими стикаються квадрокоптери, є його безпечна та ефективна посадка, особливо в складних умовах. Традиційні системи посадки покладаються на ручне керування або GPS, які можуть бути неточними та ненадійними в несприятливих погодних умовах або в місцях зі слабким сигналом GPS. Щоб вирішити цю проблему, у цій роботі запропоновано розробити систему посадки квадрокоптера на основі систем технічного зору.

Цей проєкт спрямований на розробку системи керування посадкою квадрокоптера, яка використовує систему технічного зору для точної та безпечної посадки дрона. Система технічного зору [1] — це комбінація камер, датчиків і алгоритмів обробки зображень, які дозволяють квадрокоптеру виявляти та відстежувати розташування та орієнтацію посадкового майданчика. Ця система дозволяє дрону автоматично регулювати своє положення та швидкість, забезпечуючи плавне та точне приземлення.

У завдання проєкту входить розробка системи керування посадкою квадрокоптера на основі системи технічного зору. Розробка системи зосереджена на виборі відповідних датчиків і камер, оптимізації алгоритмів обробки зображень та інтеграції системи технічного зору з контролером польоту квадрокоптера. Алгоритм керування розроблено для аналізу даних системи технічного зору в режимі реального часу та коригування траєкторії та швидкості польоту квадрокоптера для забезпечення безпечної посадки.

Важливість проєкту полягає в його потенціалі для підвищення безпеки та точності посадок квадрокоптерів у складних умовах, включаючи території зі слабким сигналом GPS або несприятливими погодними умовами.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		11

Система може бути застосована в різних галузях промисловості, де використовуються квадрокоптери, включаючи пошук і порятунок, інспекцію та геодезику. Результати проекту сприятимуть розробці більш досконаlih і надійних систем посадки квадрокоптерів, прокладаючи шлях для більш широкого застосування квадрокоптерів у різних галузях промисловості.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		12

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОСАДКОЮ КВАДРОКОПТЕРА НА ОСНОВІ СТЗ

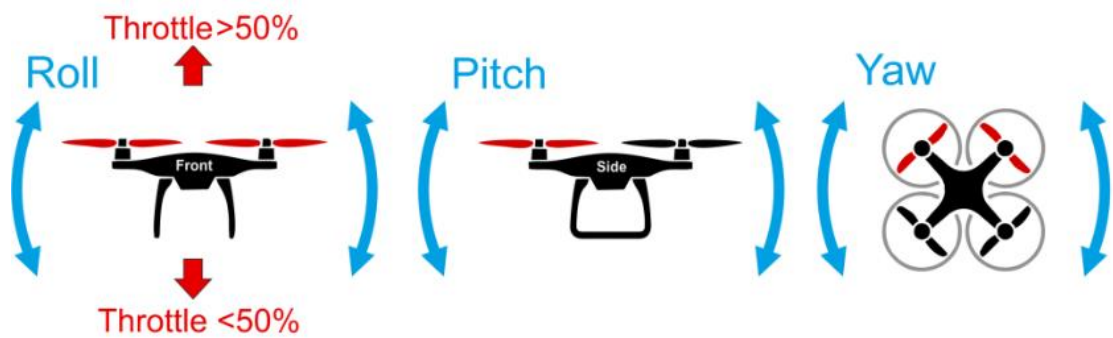
## 1.1 Системи керування рухом та посадкою квадрокоптера.

Управління рухом і посадкою квадрокоптера вимагає поєднання апаратних і програмних систем. Апаратне забезпечення це і є сам квадрокоптер, який складається з рами, двигунів, гвинтів, датчиків і контролера польоту[2]. Контролер польоту — це центральний процесор квадрокоптера, який отримує вхідні дані від різних датчиків, щоб підтримувати стабільність і контролювати рух квадрокоптера.

Програмні системи, які керують рухом і посадкою квадрокоптера, відомі як алгоритми керування польотом. Ці алгоритми використовують дані від датчиків для розрахунку орієнтації квадрокоптера, висоти, швидкості та інших параметрів, а потім відповідно регулюють двигуни та гвинти для досягнення бажаного маневру.

Щоб керувати рухом квадрокоптера, алгоритми керування польотом використовують комбінацію команд тангажу, крену, ристання й газу[3] (рис 1.1). Тангаж і крен керують рухом квадрокоптера вперед/назад і вліво/вправо, а ристання навколо вертикальної осі. Дросель контролює висоту або вертикальне переміщення квадрокоптера.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		13



Крен та дросель

Тангаж

Рискання

Рисунок 1.1 – Орієнтація квадрокоптера у просторі

Керування рухом і посадкою квадрокоптера вимагає поєднання апаратних і програмних систем, які працюють разом для досягнення бажаних маневрів (Рисунок 1.2):

- Підйом (збільшення оборотів на несучих гвинтах).
- Зниження (зменшення оборотів на несучих гвинтах).
- Рух у сторону (збільшення оборотів однієї половини гвинтів і зменшення оборотів іншої половини гвинтів).
- Поворот (збільшення оборотів у гвинтів з обертом за годинниковою стрілкою і зменшення оборотів у гвинтів як обертаються проти годинникової стрілки).

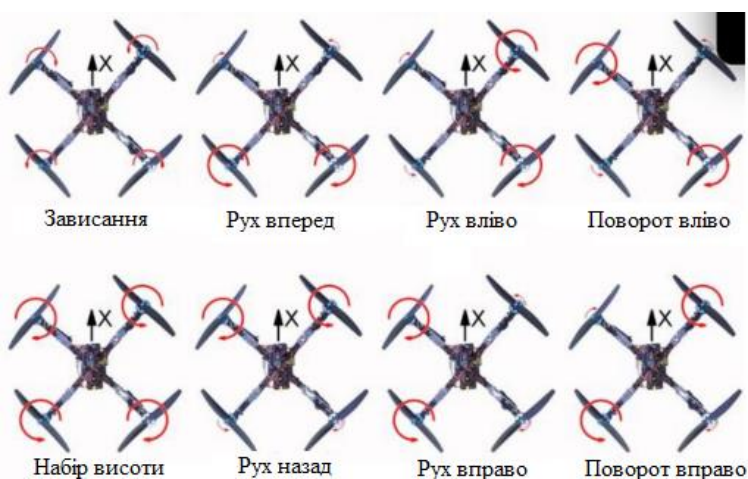


Рисунок 1.2 – Схема керування польотом квадрокоптера обертами несучих гвинтів

Щоб посадити квадрокоптер, алгоритми керування польотом використовують комбінацію команд тангажу, крену, рискання та газу, щоб поступово зменшувати висоту та швидкість квадрокоптера, поки він не досягне землі. Алгоритми також регулюють двигуни та гвинти, щоб підтримувати стабільність і запобігати перекиданню чи падінню квадрокоптера.

Розглянемо способи управління польотом квадрокоптера. Найпоширеніші методи:

- **Дистанційне керування:** передавач дистанційного керування використовується для надсилання сигналів до контролера польоту квадрокоптера, який потім регулює двигуни та гвинти для досягнення бажаного руху.
- **Автономний політ:** за допомогою бортових датчиків, GPS і розширених алгоритмів керування польотом квадрокоптери можуть літати автономно без необхідності ручного керування. Автономний політ можна використовувати для таких завдань, як аерофотозйомка, геодезія та пошуково-рятувальні операції.
- **Мобільний додаток:** керування за допомогою мобільного додатку на смартфоні чи планшеті. Додаток спілкується з квадрокоптером через Wi-Fi або Bluetooth і забезпечує зручний інтерфейс для керування рухом і камерою.
- **Керування жестами:** деякими квадрокоптерами можна керувати жестами. Камера квадрокоптера фіксує рухи рук користувача і перетворює їх на команди польоту.
- **Голосове керування:** також можна керувати за допомогою голосових команд. Бортова система розпізнавання голосу квадрокоптера розпізнає голосові команди користувача та перетворює їх у команди польоту.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		15

Загалом спосіб керування квадрокоптером залежить від програми та вподобань користувача. Дистанційне керування є найпоширенішим методом для любителів і професіоналів, тоді як автономні польоти та мобільні програми зазвичай використовуються для комерційних застосувань. Управління жестами та голосом є відносно новими технологіями, що розвиваються, які пропонують інтуїтивно зрозумілий спосіб керування квадрокоптерами без використання рук.

Основними стадіями польоту квадрокоптера є:

- **Зліт:** на цьому етапі квадрокоптер піднімається над землею та піднімається на бажану висоту. Контролер польоту регулює двигуни та гвинти для підтримки стабільності та контролю висоти.
- **Зависання:** коли квадрокоптер досягає потрібної висоти, він переходить у фазу зависання. Контролер польоту регулює двигуни та гвинти для підтримки стабільного висіння та утримання квадрокоптера в одному місці.
- **Маневрування:** під час цієї фази квадрокоптер рухається в потрібному напрямку, регулюючи команди тангажу, крену, ристання й газу. Контролер польоту регулює двигуни та гвинти для досягнення бажаного руху, зберігаючи стабільність.
- **Посадка:** на етапі посадки квадрокоптер опускається на землю та торкається землі. Контролер польоту регулює двигуни та гвинти, щоб поступово зменшувати висоту та швидкість квадрокоптера, поки він безпечно не приземлиться.
- **Вимкнення:** після приземлення двигуни квадрокоптера та контролер польоту вимикаються. Після цього квадрокоптер готовий до наступного польоту або технічного обслуговування.

Політ квадрокоптера може бути складним і динамічним процесом, який вимагає точного контролю різних параметрів, таких як висота, швидкість, орієнтація

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		16

та стабільність. Контролер польоту та алгоритми керування польотом відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпечного та ефективного польоту квадрокоптера.

Посадка часто вважається найскладнішим етапом польоту квадрокоптера, оскільки вимагає точного контролю та координації рухів квадрокоптера. Посадку також можна розділити на кілька етапів:

- 1) **Політ за направленням до місця посадки:** квадрокоптер спочатку потрібно провести в напрямку місця приземлення. Пілот або система автопілоту надсилає команди диспетчеру польоту, щоб направити квадрокоптер до передбачуваного місця посадки.
- 2) **Знаходження місця посадки:** коли квадрокоптер опиниться в безпосередній близькості від запланованого місця приземлення, пілот або система автопілоту повинні визначити безпечне та придатне місце приземлення. Це передбачає оцінку таких факторів, як місцевість, перешкоди, вітрові умови та близькість до людей або майна. Також квадрокоптер може сісти на посадкову площадку, у такому випадку посадка відбувається за допомогою СТЗ.
- 3) **Зависання над місцем посадки:** коли місце приземлення визначено, квадрокоптер повинен зависнути прямо над ним. Контролер польоту регулює двигуни та гвинти для підтримки стабільного висіння на потрібній висоті.
- 4) **Стабілізація положення квадрокоптера:** коли квадрокоптер зависає над місцем посадки, диспетчер польоту повинен стабілізувати його положення, щоб забезпечити безпечне та контрольоване зниження. Це включає в себе регулювання кута тангажу, крену та ристання квадрокоптера для протидії будь-яким зовнішнім факторам.
- 5) **Зниження:** коли квадрокоптер стабільно зависає над місцем приземлення, можна починати процес зниження. Контролер польоту

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		17

поступово зменшує висоту квадрокоптера, зберігаючи стабільність і контроль.

- б) **Посадка:** на останньому етапі посадки квадрокоптер приземляється на землю або призначену посадкову платформу. Контролер польоту регулює двигуни та гвинти, щоб квадрокоптер плавно зупинився та вимкнув двигуни, коли він безпечно приземлився.

Кожен етап процесу посадки вимагає ретельного планування, координації та контролю для забезпечення безпечної та успішної посадки. На етапі виявлення цілі датчики встановлені на БПЛА покликані збирати та обробляти інформацію з навколишнього середовища навколо зони посадки, виконувати обчислення точок ознак, вилучення ознак, зіставлення ознак та інші операції на зображенні для досягнення відстеження та виявлення орієнтирів. Інформація про відносне положення БПЛА та орієнтира безперервно передається на головний контролер.

Система керування польотом коригує та спрямовує положення та висоту літального апарату відповідно до позиції та величини посадкового місця, а також корегує положення при посадці у реальному часі на високій швидкості та успішно приземляється в призначеному місці.

У галузі досліджень автономної посадки БПЛА посадка на статичну ціль або стандартну злітно-посадкову смугу та перон є основою для вивчення автономної посадки в динамічних сценаріях.

Автономну посадку БПЛА в статичних сценах можна розділити на два різні типи: автономну посадку на основі кооперативної цілі та автономну посадку на основі природного сценарію. Концепція місцевої посадки полягає в тому, що БПЛА можуть ідентифікувати характеристики навколишнього середовища для посадки за відсутності штучних кооперативних цілей.

У даній роботі ми будемо використовувати автономну посадку на основі кооперативної цілі. Найважливішим кроком для автономного приземлення на основі

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		18

кооперативних цілей є виявлення та розпізнавання штучно створеного маркера. Він може точно ідентифікувати та визначити поточне положення БПЛА в польоті шляхом виділення функцій, щоб реалізувати наведення автономної посадки БПЛА.

Штучний маркер — це своєрідний ідентифікаційний знак, створений штучно відповідно до геометричного малюнка або принципу певних геометричних законів. Розробка точності та ефективності шаблонів ідентифікації та застосування відповідних алгоритмів виявлення ознак, може стати важливим способом покращення здатності БПЛА до автономної посадки.

Сучасні розпізнавальні знаки можна розділити на такі категорії: «Т», «Н», круглі, прямокутні та комбіновані знаки (Рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Категорії посадкових розпізнавальних знаків

Для системи посадки мультикоптера на основі СТЗ у даній роботі ми будемо використовувати розпізнавальний знак категорії «Комбінований з Н». Далі будемо позначати як посадковий знак «Н» (Рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Посадковий розпізнавальний знак «Н»

Габаритні розміри посадкової площадки 0.5...1,50 м.

Похибка визначення координат за даними системи технічного зору – не більше 5%.

Форма «Н» є чи не найранішою кооперативною мішенню в області автономної посадки БПЛА. Університет Південної Каліфорнії взяв на себе лідерство у вивченні системи автономної посадки БПЛА. Вони використовували безпілотний гелікоптер AVATAR і реалізовували позиціонування БПЛА шляхом визначення цілі «Н» [4].

## 1.2 Огляд системи технічного зору для керування рухом квадрокоптера.

Системи технічного зору це сукупність програмно алгоритмічних комплексів та апаратних засобів, які застосовуються для отримання та обробки зображення об'єктів.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		20

## Класифікація СТЗ:

- За кількістю первинних перетворювачів:
  - 1) *Одномірні*: фіксують інформацію вздовж однієї осі, як-от лінійний сканер.
  - 2) *Двомірні*: фіксують інформацію у двовимірній площині, як-от цифрова камера.
  - 3) *Трьохмірні*: фіксують інформацію в тривимірному просторі, наприклад камера глибини або LiDAR.

Різні типи СТЗ мають різні переваги та обмеження, і вибір того, який тип використовувати, залежить від конкретного застосування та вимог.

### 1.3 Приклади системи керування посадкою квадрокоптера на базі СТЗ.

Цікавий приклад системи керування посадкою квадрокоптера (Рисунок 1.5) на базі СТЗ описано у статті «Estimation and Control of a Quadrotor Vehicle Using Monocular Vision and Moir'e Patterns» [5].



Рисунок 1.5 – Квадрокоптер

Автори пропонують новий метод, який використовує одну камеру для оцінки положення квадрокоптера шляхом аналізу візерунків муару, прикріплених до землі (Рисунок 1.6).

Муар — це інтерференційні візерунки, які є результатом накладання двох або більше періодичних візерунків. Аналізуючи візерунки муару, положення та орієнтацію квадрокоптера можна оцінити в реальному часі.

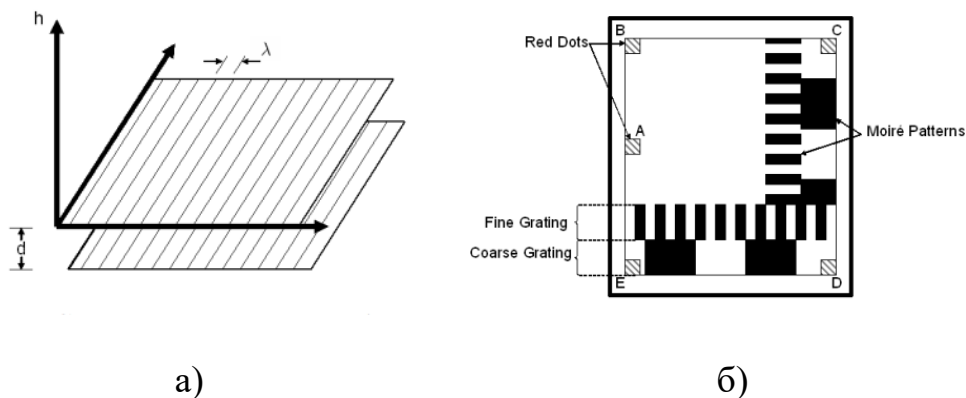


Рисунок 1.6 – а) Решітки для створення муарових зображень, б) муарова мішень з позначеними ключовими характеристиками

Також пропонується стратегія керування, заснована на модельному прогностичному контролері (МРС) для керування положенням та орієнтацією квадрокоптера за допомогою оціненого стану. Алгоритм обробляє зображення, витягаючи інформацію про позицію та положення камери відносно цілі з використанням геометрії та чотирьох одноточкових дискретних перетворень Фур'є на візерунках муару (Рисунок 5).

Перевіряється підхід шляхом моделювання та експериментів на реальній платформі квадрокоптера. Результати показують, що запропонований метод може точно оцінити положення та орієнтацію квадрокоптера та досягти точного контролю його руху.

Вдалося створити систему оцінки на основі СТЗ за допомогою однієї встановленої камери вниз на БПЛА, із супроводжуючою ціллю у вигляді візерунків муару у полі зору камери.

Оцінка позиції та повороту з супутніми методами керування, реалізовані на квадрокоптері (Рисунок1.3) з дистанційним керуванням.

Льотні випробовування доводять можливість використання системи як варіанту відносної навігації для операцій у приміщенні та на відкритому просторі.

Наступною розглянутою статтею є «Vision-based Autonomous Quadrotor Landing on a Moving Platform» де представляється система, яка дозволяє квадрокоптеру самостійно приземлитися на рухому платформу (Рисунок1.7). Стан літального апарату оцінюється за допомогою систем захоплення руху [6]GPS [7], [8] або комп'ютерного зору [9]. Система розроблена для вирішення проблем, пов'язаних із посадкою квадрокоптера на рухому платформу, що вимагає точного керування та координації між квадрокоптером і платформою.



Рисунок 1.7 – Квадрокоптер під час посадки на платформу що рухається.

Запропонована система використовує камеру, встановлену на квадрокоптері (Рисунок 1.8), для відстеження руху платформи (Рисунок 1.8), оцінки її положення та орієнтації в режимі реального часу. Система також включає алгоритм обробки зображень, який витягує характеристики із зображень камери та використовує їх для відстеження руху платформи.

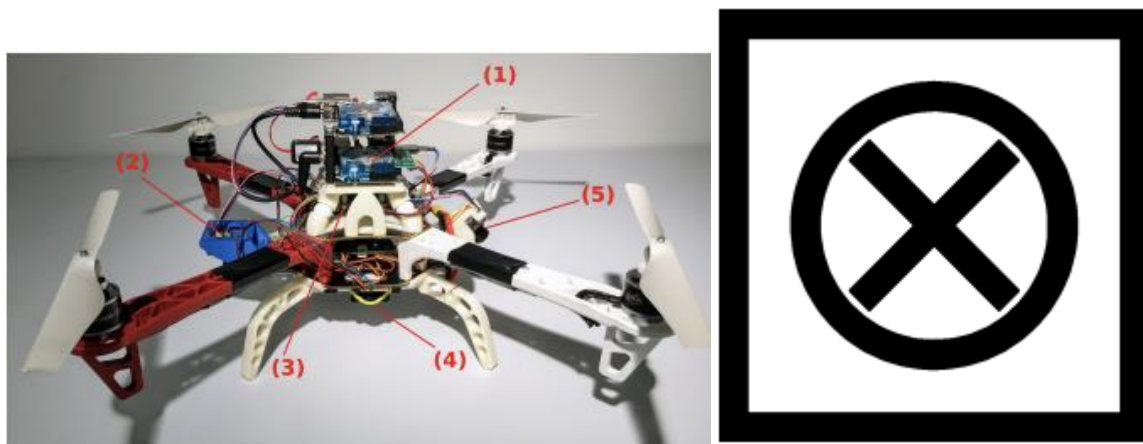


Рисунок 1.8 – Квадрокоптер який використовувався у дослідженні та мітка на яку він сідає.

Після визначення положення та орієнтації платформи система використовує алгоритм керування для коригування рухів квадрокоптера та спрямування його до безпечної посадки на платформу. Алгоритм керування розроблений для обліку руху платформи та внесення коригувань у режимі реального часу для забезпечення успішної посадки.

Автори оцінили продуктивність системи за допомогою моделювання та експериментів, продемонструвавши, що система здатна успішно посадити квадрокоптер на рухому платформу з високим ступенем точності. Вони також порівняли продуктивність системи з іншими найсучаснішими системами посадки, показавши, що запропонована система перевершує їх з точки зору точності та швидкості.

Загалом запропонована система забезпечує багатообіцяючий підхід до того, щоб квадрокоптери сідали на рухомі платформи за допомогою системи технічного

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		24

зору. Система може бути корисною в різноманітних програмах, включаючи пошуково-рятувальні місії, служби доставки та аерофотозйомку.

Наступним прикладом може слугувати стаття «A Vision System for Landing an Unmanned Aerial Vehicle» тут описано проектування та реалізацію системи технічного зору для наведення посадки безпілотного літального апарату (БПЛА)[10]. Система використовує методи комп'ютерного зору для виявлення та відстеження цілі, що приземляється, що дозволяє БПЛА приземлитися з високою точністю.

Описані проблеми, пов'язані з розробкою систем наведення приземлення для БПЛА, таких як потреба в точних і своєчасних даних датчиків і здатність працювати за різного освітлення та погодних умов. Автори пропонують систему на основі технічного зору, яка використовує камеру, встановлену на БПЛА, для виявлення та відстеження цілі на землі. Нижче на рис 1.9 наведена організація апаратури на БПЛА.

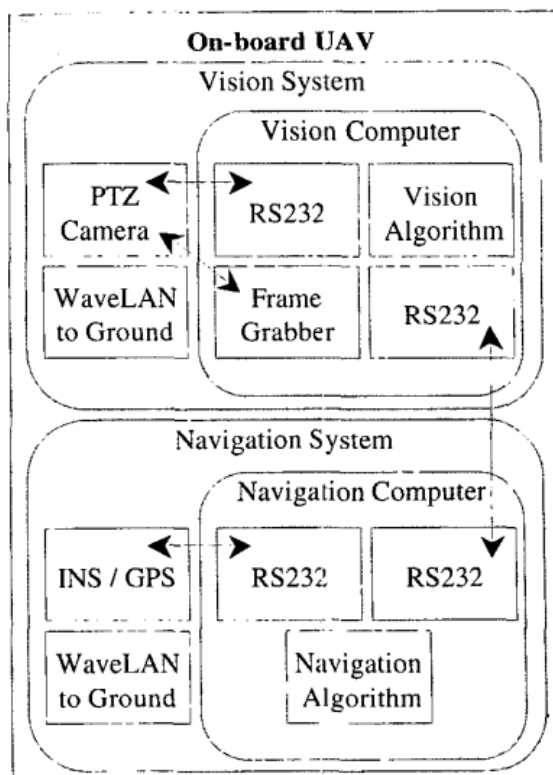


Рисунок 1.9 – Організація апаратури на БПЛА



умов освітлення та погоди. Система також може регулювати положення та орієнтацію БПЛА під час посадки, що забезпечує безпечну та контрольовану посадку.

#### 1.4 Висновки.

У даному розділі проведений детальний огляд та аналіз систем керування посадкою квадрокоптера на основі СТЗ. Можна зробити висновок, що системи керування посадкою квадрокоптера на основі СТЗ є досить ефективним інструментом, який дозволяє точно та швидко керувати рухом квадрокоптера під час посадки.

Описані системи керування рухом та посадкою квадрокоптера забезпечують високу точність та стабільність руху, що є особливо важливим у випадку автономних польотів.

Наведені приклади демонструють як система керування посадкою квадрокоптера на базі СТЗ, дозволяє точно керувати процесом посадки та забезпечує високу стійкість квадрокоптера.

Загальним недоліком існуючих робіт є відсутність цілісного вирішення задачі щодо пошуку місця посадки, руху в його напрямку та зниження з контролем висоти.

Слід зазначити, що в більшості випадків для СТЗ квадрокоптерів застосовується одна камера, що закріплена на гіростабілізованому підвісі. При цьому виникають питання щодо визначення напрямку дії камери та алгоритмів її руху, ризики відмови підвісу в складних погодних умовах та пошкодження самої камери при аварійній посадці. Тому пропонується варіант використання двох камер, що нерухомо розміщені в конструкції квадрокоптера: одна з яких (відеокамера 1, курсова) використовується для пошуку місця посадки, а друга (відеокамера 2) – для наведення на посадковий знак.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		27

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.

### 2.1 Розробка структурної схеми.

Наявна структурна схема показує взаємозв'язки між елементами системи керування.

Основними блоками у структурній схемі є: мікроконтролер польотного контролера (МкПК), барометричний висотомір (БВ), тривісний блок акселерометрів (ТБА), тривісний блок гіроскопів (ТБГ), GPS модуль, модуль радіозв'язку, блок регуляторів обертів (БРО), система технічного зору (СТЗ), відеокамера 1, відеокамера 2, мікроконтролер СТЗ, ультразвуковий висотомір (УЗ), первинний перетворювач (ПП), аналогово цифровий перетворювач (АЦП), блок регуляторів обертів, виконавчі пристрої (двигуни). Блоки показані на Рисунок 2.1.

Розуміння взаємодії цих компонентів дозволяє оптимізувати та покращити ефективність системи керування.

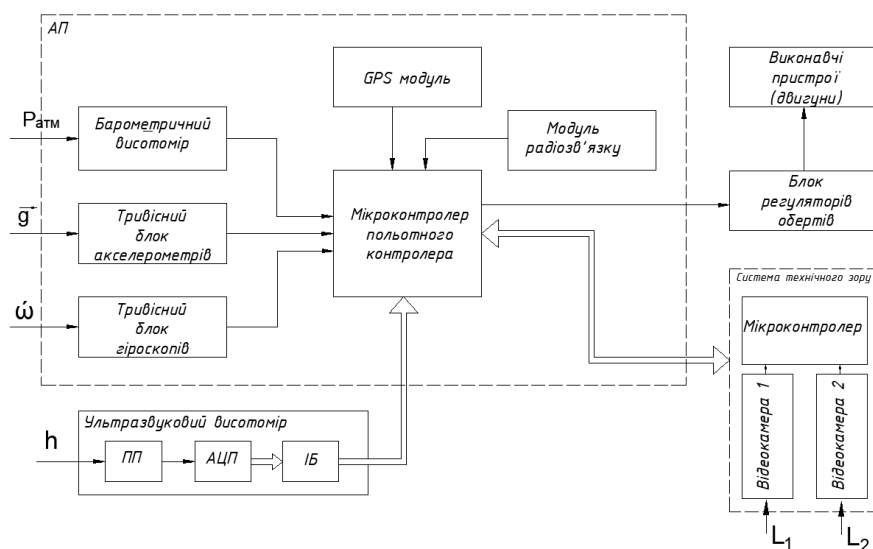


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата

БВ призначений для визначення висоти певного об'єкта або місцезнаходження на основі атмосферного тиску. Зміна атмосферного тиску залежить від висоти над рівнем моря: при зростанні висоти тиск знижується, а при спуску - збільшується.

Метою ТБА є вимірювання прискорення безпілотного літального апарату (БПЛА) та визначення його швидкості шляхом інтегрування в МкПК. Крім того, його можна використовувати для розрахунку пройденої відстані шляхом багаторазового інтегрування швидкості. Однак використання акселерометрів бюджетного класу вносить значні похибки, які перешкоджають реалізації цієї функціональності. Дані вимірювань з ТВА передаються у вигляді інформаційних пакетів через шину даних до МкПК.

ТБГ призначений для вимірювання кутових швидкостей БПЛА та розрахунку кутів його орієнтації в просторі шляхом інтегрування в МкПК. Зв'язок між ТБГ і МкПК відбувається шляхом передачі пакетів даних по шині.

МкПК, БВ, ТБА та ТБГ входять до складу польотного контролера.

GPS модуль у квадрокоптері використовується для отримання інформації про географічні координати (широту, довготу, висоту) і час, заснованих на сигналах, що надходять від супутників.

Модуль радіозв'язку у квадрокоптері використовується для забезпечення бездротового зв'язку між квадрокоптером і пультом керування.

БРО призначений для перетворення команд від МкПК, зазвичай у вигляді ШІМ, у сигнали керування виконавчими пристроями, двигунами різного виду або серводвигунами. У даному випадку він перетворює постійну напругу блоку акумуляторів у трифазний сигнал для обмоток електродвигуна, швидкість обертання якого пропорційна заповненню імпульсів ШІМ.

Основне призначення УЗ висотоміра полягає в вимірюванні висоти, відстані до об'єктів на основі відбитих ультразвукових хвиль.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		29

Передбачається, що на точність вимірювання висоти впливає температура, оскільки швидкість звуку змінюється з температурою. Тому розрахуємо похибку УЗ висотоміра, враховуючи режим роботи системи, в температурі 0..30° градусів Цельсія.

При температурі 0..30° маємо діапазон зміни швидкості звуку від 330 до 350 м/с (Рисунок 2.2).

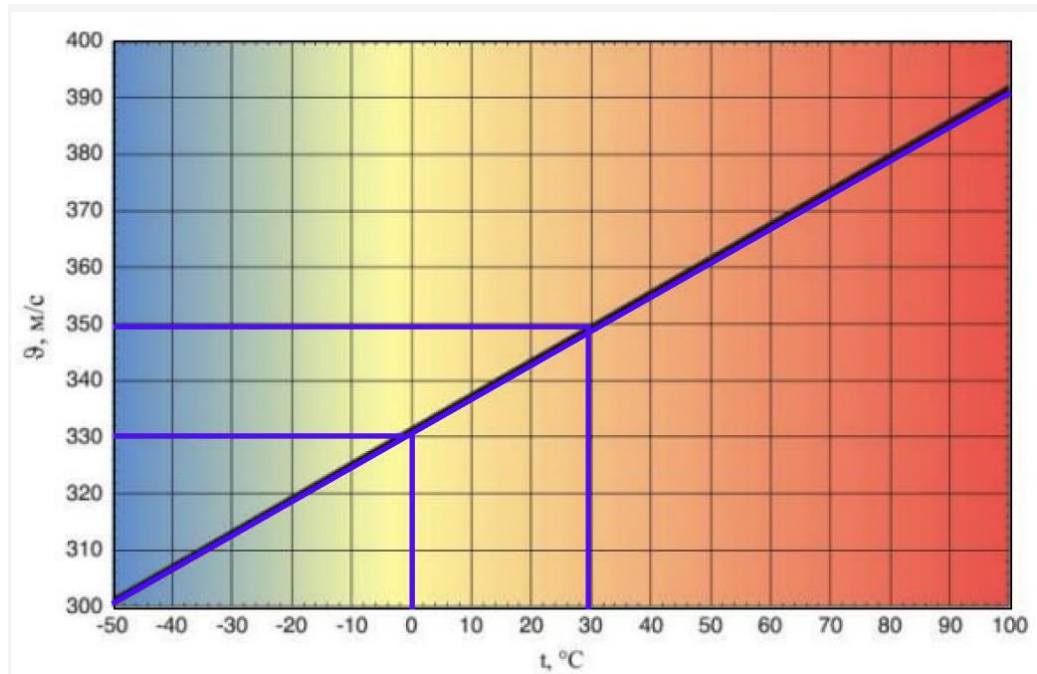


Рисунок 2.2 – Графік залежності швидкості звуку від температури.

Час досягання Землі з висоти  $h$  дорівнює:

$$t = h/V_{\text{звуку}}$$

Підставляючи максимальне значення висоти розрахуємо час вимірювання висоти для різних значень швидкості звуку:

$$t_1 = \frac{h_{\text{max}}}{330 \text{ м/с}} = \frac{6\text{м}}{330 \text{ м/с}} = 0.018\text{с}$$

$$t_2 = \frac{6\text{м}}{350 \text{ м/с}} = 0.017\text{с}$$

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата

Абсолютна похибка:

$$\Delta = t_1 - t_2 = 0.018 - 0.017 = 0.001\text{с} \quad (2.1)$$

Відносна:

$$\gamma = \frac{\Delta}{h_{max}} * 100\% = \frac{0.001}{6} * 100\% = 0.01\% \quad (2.2)$$

Враховуючи похибку АЦП УЗ висотоміра, яка додається до похибки його первинного перетворювача сумарна похибка УЗ висотоміра складе 0,2%.

СТЗ представляє собою систему, що складається з двох камер та обчислювача (мікроконтролера). Структурна схема СТЗ представлена на рисунку 2.2.

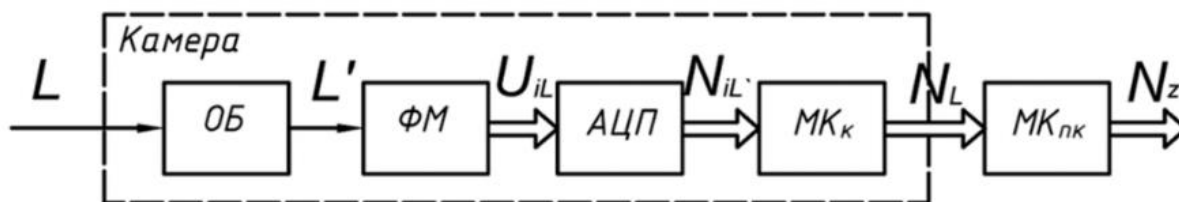


Рисунок 2.2 – Структурна схема СТЗ

До складу СТЗ входить ОБ - оптичний блок, ФМ - фотоматриця, АЦП - аналогово цифровий перетворювач, МКк – мікроконтролер СТЗ.

Рівняння перетворення СТЗ має такий вигляд:

$$N_z = L * K_{OB} * K_{ФМ} * K_{АЦП} * K_{МК1} * K_{МК2}, \quad (2.3)$$

де  $K_{об}$  – коефіцієнт перетворення ОБ;

$K_{фм}$  - коефіцієнт перетворення ФМ;

$K_{ацп}$  - коефіцієнт перетворення АЦП;

$K_{мк1}$  - коефіцієнт перетворення мікроконтролера МК1;

$K_{мк2}$  - коефіцієнт перетворення мікроконтролера МК2;

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата

Рівняння перетворення для обох камер:

$$\begin{aligned} N_{L_1} &= L_1 * K_{OB} * K_{\Phi M} * K_{AЦП} * K_{MK1} \\ N_{L_2} &= L_2 * K_{OB} * K_{\Phi M} * K_{AЦП} * K_{MK1} \end{aligned} \quad (2.4)$$

З мультиплікативною похибкою:

$$\begin{aligned} N_{L_1} (1 + \delta_L) &= L_1 * K_{OB} (1 + \delta_{OB}) * K_{\Phi M} (1 + \delta_{\Phi M}) * K_{AЦП} (1 + \delta_{AЦП}) * K_{MK1} (1 + \delta_{MK1}) \\ N_{L_2} (1 + \delta_L) &= L_2 * K_{OB} (1 + \delta_{OB}) * K_{\Phi M} (1 + \delta_{\Phi M}) * K_{AЦП} (1 + \delta_{AЦП}) * K_{MK1} (1 + \delta_{MK1}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

З адитивною похибкою:

$$\begin{aligned} N_{L_1} &= (((((L_1 + \Delta_{OB}) * K_{OB} + \Delta_{\Phi M}) * K_{\Phi M} + \Delta_{AЦП}) * K_{AЦП} + \Delta_{MK1}) * K_{MK1} \\ N_{L_2} &= (((((L_2 + \Delta_{OB}) * K_{OB} + \Delta_{\Phi M}) * K_{\Phi M} + \Delta_{AЦП}) * K_{AЦП} + \Delta_{MK1}) * K_{MK1} \end{aligned} \quad (2.6)$$

На основі (2.3) запишемо рівняння похибок для системи технічного зору:

$$\gamma_L = \gamma_{OB} + \gamma_{\Phi M} + \gamma_{AЦП} + \gamma_{MK1} + \gamma_{MK2}, \quad (2.7)$$

де  $\gamma_{OB}$  – похибка оптичного блоку;

$\gamma_{\Phi M}$  – похибка фотоматриці;

$\gamma_{AЦП}$  – похибка аналогового цифрового перетворювача;

$\gamma_{MK1}$  – похибка мікроконтролера камери;

$\gamma_{MK2}$  – похибка зовнішнього мікроконтролера.

За умовою похибка визначення напрямку руху в точку посадки за даними системи технічного зору (СТЗ) - не більше 5 %, тобто  $\gamma_L = 5\%$ , також у ці 5% входить похибка ультразвукового висотоміра яка складає 0,2% оскільки для наведення на ПО нам необхідно визначати висоту над об'єктом, тоді нехай

$$\begin{aligned} \gamma_{OB} &= 1.3\% \\ \gamma_{\Phi M} &= 2.5\% \\ \gamma_{AЦП} &= 0.2\% \\ \gamma_{MK1} &= 0.4\% \\ \gamma_{MK2} &= 0.4\% \end{aligned} \quad (2.8)$$

Проведемо структурний аналізу кожного з блоків системи технічного зору.  
Почнемо з оптичного блока СТЗ (Рисунок 2.3).

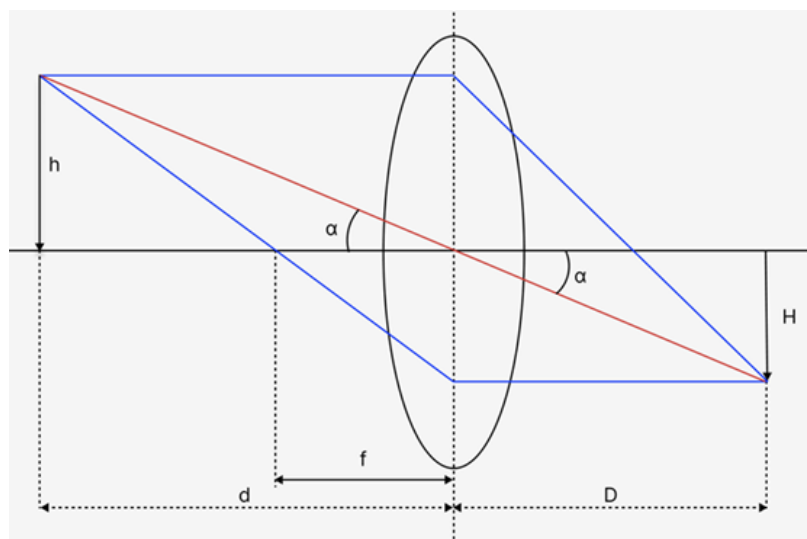


Рисунок 2.3 – Схема оптичного блоку

$f$  – фокусна відстань,  $h$  – лінійний розмір об'єкту зйомки,  $d$  – відстань від лінзи до об'єкту,  $D$  – відстань від лінзи до зображення об'єкту,  $H$  – розмір зображення об'єкту.

Оптичний блок відповідає за захоплення та обробку оптичної інформації. Він відіграє вирішальну роль у отриманні візуальних даних із навколишнього середовища та перетворенні їх у форму, придатну для подальшого аналізу чи інтерпретації машиною чи людиною-спостерігачем.

Технічні характеристики оптичного блоку в системі технічного зору можуть змінюватися в залежності від конкретного застосування та вимог. Однак основною характеристикою, яка зазвичай враховується при оцінці продуктивності та можливостей оптичного блоку це роздільна здатність.

Роздільна здатність означає рівень деталізації, який може зафіксувати оптичний блок. Зазвичай вона визначається як кількість пікселів (пк) (Рисунок 4.3) або просторова роздільна здатність у рядках на міліметр ( $lp/mm$ ) (Рисунок 4.4). Вища роздільна здатність дозволяє захоплювати дрібніші деталі зображення.

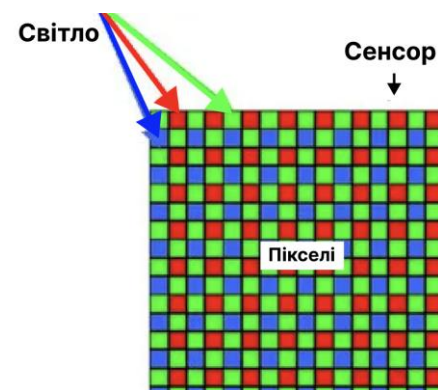


Рисунок 2.4 – Кількість пікселів

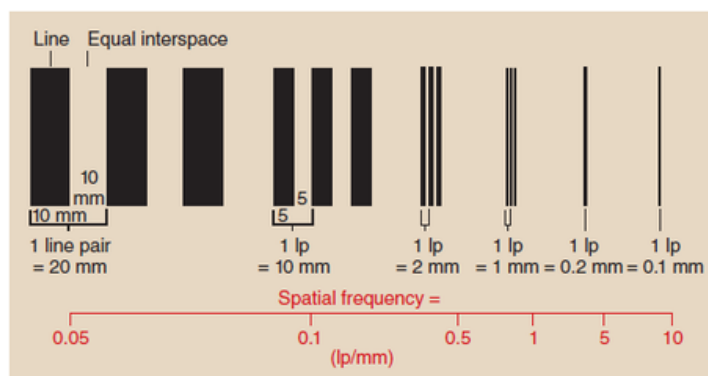


Рисунок 2.5 – Просторова роздільна здатність виражається парами ліній

Мультиплікативна складова похибки оптичного блоку:

$$\gamma_{об} = 1.5\% \quad (2.9)$$

Розрахуємо фокусну відстань для відеокамери 1, за умови коли в нас відомий кут огляду.

Приймемо, що при посадці квадрокоптера відеокамера 1 працює на відстані  $L_{max}$ ,  $d_{max}$ ,  $h_{max}$  (Рисунок 2.6).

Нехай значеннями  $L_{max}$ ,  $d_{max}$ ,  $h_{max}$  будуть:

$$L_{max} = 560\text{м}$$

$$d_{max} = 500\text{м}$$

$$h_{max} = 250\text{м}$$

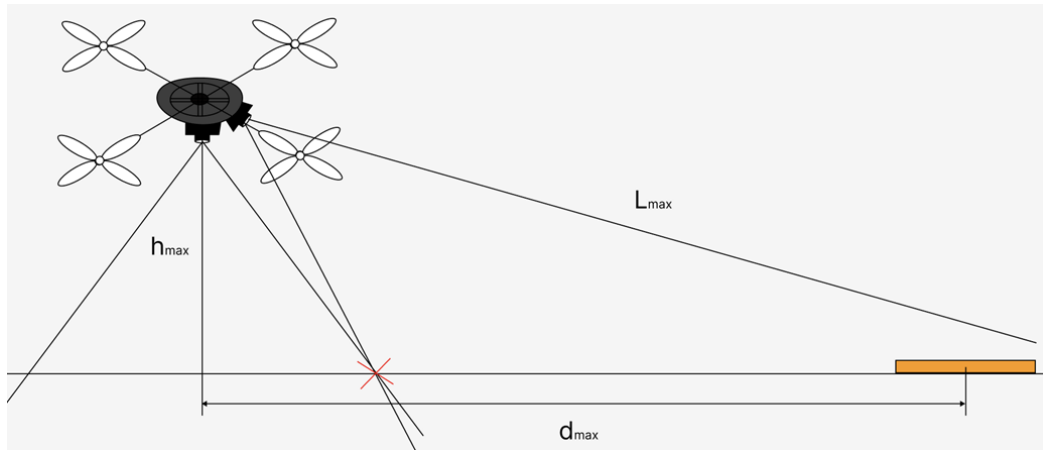


Рисунок 2.6 – Графічні позначення  $L_{max}$ ,  $h_{max}$ ,  $d_{max}$

$$f = C * \frac{L_{max}}{W}, \text{ де}$$

$C$  – ширина ПЗЗ(прилад із зарядним зв'язком)-матриці у мм,  $L_{max}$  – відстань від камери до об'єкту у метрах,  $W$  – ширина області видимості у метрах,  $f$  – фокусна відстань об'єктиву у мм.

Нехай кут огляду для курсової камери 1 буде  $80^\circ$ , тоді скористаємось формулою для обчислення області видимості:

$$W = 2 * tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) * L_{max}, \text{ де}$$

$\alpha$  – кут огляду камери у градусах,  $W$  – область видимості у метрах,  $L_{max}$  – відстань від камери до об'єкту у метрах.

$$W = 2 * tg\left(\frac{80^\circ}{2}\right) * 560\text{м} = 940\text{м} \quad (2.10)$$

Для зручності оберемо  $C$  - ширина матриці  $1/3'' = 4.8$  мм,

$$f = C * \frac{L_{max}}{W} = 4,8\text{мм} * \frac{560\text{м}}{940\text{м}} = 2,9\text{мм} \quad (2.11)$$

Тепер розрахуємо фокусну відстань для відеокамери 2 (рисунок 2.7) , за умови коли в нас відомий кут огляду.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		35

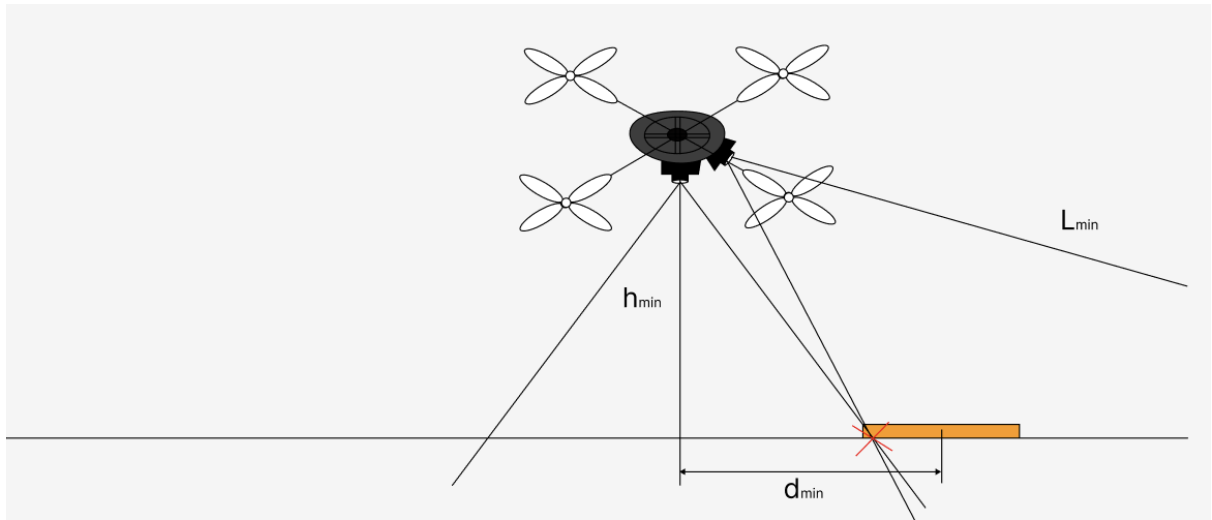


Рисунок 2.7 – Графічні позначення  $L_{min}$ ,  $h_{min}$ ,  $d_{min}$

$$f = C * \frac{L_{max}}{W}, \text{ де}$$

$C$  – ширина ПЗЗ(прилад із зарядним зв'язком)-матриці у мм,  $L_{max}$  – відстань від камери до об'єкту у метрах,  $W$  – ширина області видимості у метрах,  $f$  – фокусна відстань об'єктиву у мм.

Нехай кут огляду для камери 2 буде  $120^\circ$ , тоді скористаємось формулою для обчислення області видимості:

$$W = 2 * tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) * L_{max}, \text{ де}$$

$\alpha$  – кут огляду камери у градусах,  $W$  – область видимості у метрах,  $L_{max}$  – відстань від камери до об'єкту у метрах.

$$W = 2 * tg\left(\frac{120^\circ}{2}\right) * 560\text{м} = 1940\text{м} \quad (2.12)$$

Для зручності оберемо  $C$  - ширина матриці  $1/3'' = 4.8$  мм,

$$f = C * \frac{L_{max}}{W} = 4,8\text{мм} * \frac{560\text{м}}{940\text{м}} = 1,3\text{мм} \quad (2.13)$$

Наступним розглянемо АЦП СТЗ:

Сумарна похибка АЦП включає у себе похибку  $\gamma_{КВ}$  та  $\delta_{нел}$ :

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		36

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \gamma_{\text{КВ}} + \delta_{\text{нел}}$$

Найчастіше похибка нелінійності дорівнює 0.5-2 одиниці молодшого значущого розряду АЦП. За попередніми розрахунками будемо вважати:

$$\gamma_{\text{КВ}} \approx \delta_{\text{нел}}$$

Тоді,

$$\gamma_{\text{КВ}} \approx \frac{\gamma_{\text{АЦП}}}{2}$$

Отже номінальне значення числа рівнів квантування буде дорівнювати:

$$N_H = \frac{1}{\gamma_{\text{КВ}}} = \frac{100}{\gamma_{\text{КВ}}, \%}$$

За вищенаведеним розподілом похибок:

$$\gamma_{\text{АЦП}} = 0,2 \text{ то: } \gamma_{\text{КВ}} = 0,1\%, \text{ то}$$

$$N_H = 1000$$

$$n \geq \log_2 N_H$$

Потрібна розрядність АЦП дорівнює:

$$n \geq \log_2 1000 \approx 10$$

Номінальне значення:

$$N_n = 2^n = 1024$$

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		37

### 3 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ПОБУДОВИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОСАДКОЮ КВАДРОКОПТЕРА ЗА СИГНАЛАМИ СТЗ

#### 3.1 Вибір відеокамери 1 – курсової та відеокамери 2 – для наведення на ПО.

Так як у цій роботі використовується дві відеокамери, необхідно було провести пошук саме тих, які будуть відповідати розрахункам проведеним у розділі 2. На рисунку 3.1 можна побачити зображення прикладу квадрокоптера з використанням двох камер у реальному житті та графічно відповідно.

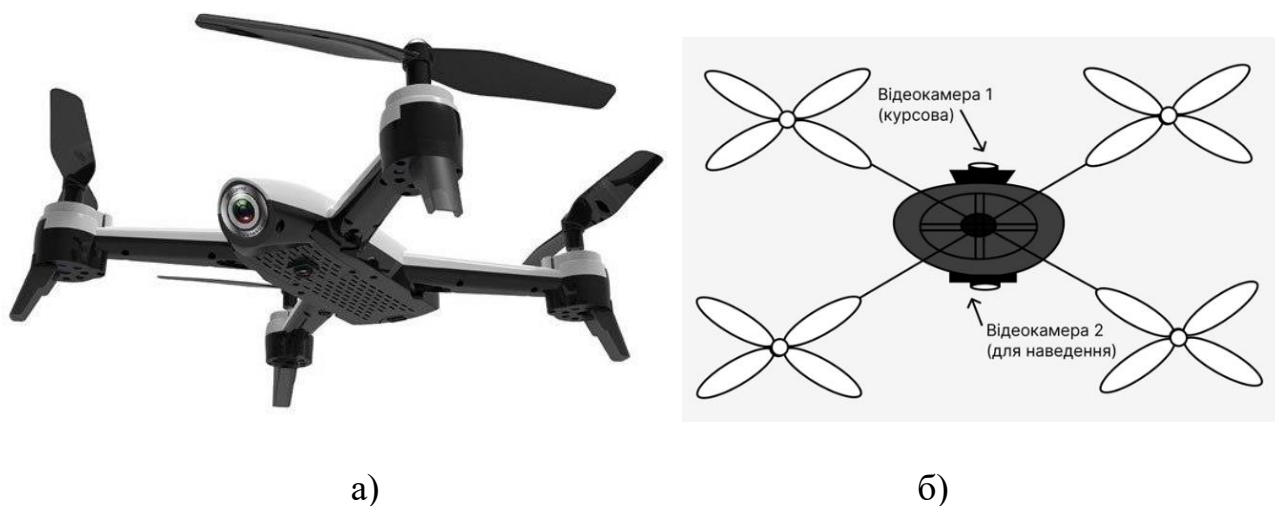


Рисунок 3.1 – а) приклад квадрокоптера з використанням двох камер, б) графічне зображення квадрокоптера з використанням двох камер.

Нижче у таблиці 1 наведені основні характеристики декількох підібраних відеокамер, для використання їх на місці курсової камери:

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		38

Таблиця 1. Відеокамера 1

Характеристики	Caddx Turbo Micro 2	Foxeer Arrow Micro Pro	Runcam Swift Mini 2
Оптичний пристрій (об'єктив) і кут огляду	2.1mm Lens + 80°	1.8mm Lens + 80°	2.1mm Lens + 80°
Роздільна здатність	1200TVL	1000TVL	600TVL
Вага	5.5гр	5.5гр	5.6гр
Джерело живлення:	DC 4.5-40V	DC 5-40V	DC 5-36V
Розмір рамки та розміри камери	19 x 19mm 19 x 19 x 16	19 x 18.5mm 18.7 x 19 x 19	19 x 19mm 22.3 x 21.8 x 21.8

Вирішено використовувати відеокамеру Foxeer Arrow Micro Pro.

У таблиці 2 наведені основні характеристики декількох підібраних відеокамер, для використання їх на місці камери для наведення:

Таблиця 2. Відеокамера 2

Характеристики	Foxeer Falkor	Caddx Ratel	Runcam Phoenix 2
Оптичний пристрій (об'єктив) і кут огляду	2.5mm Lens + 120°	2.1mm Lens + 120°	2.1mm Lens + 120°
Роздільна здатність	1200TVL	1200TVL	1000TVL
Вага	12гр	8гр	9гр
Джерело живлення:	5-40V	5-40V	5-36V
Розмір рамки та розміри камери	28.4 x 21.8mm 28 x 21.8 x 21.8	19 x 19mm 19 x 19 x 20	19 x 19mm 19 x 19 x 17

Вирішено використовувати відеокамеру Foxeer Falkor.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		39

### 3.2 Вибір ультразвукового (УЗ) висотоміра.

Ультразвукові висотоміри можуть забезпечити точні вимірювання висоти, що є вирішальним для безпечного та точного керування посадкою. На ультразвукові висотоміри не впливають зовнішні фактори, такі як освітленість, пил або туман, що робить їх придатними для різних умов навколишнього середовища.

УЗ висотомір дозволяє квадрокоптеру приземлятися точніше, ефективніше та безпечніше, особливо в складних умовах навколишнього середовища та складних місцях посадки. У таблиці 3 наведені приклади УЗ висотомірів.

Таблиця 3. Ультразвукові висотоміри

Характеристики	MICROSONAR UTP-2114	MICROFLEX-C	LV-MAXSONAR-EZ1
Напруга живлення:	10,8 .. 30V DC	12-30В пост. струму	2.8 V ~ 5.5 V
Точність:	0,22 мм	< 1м +/-5мм > 1м +/-0,5% від діапаз.	-
Діапазон вимірювання:	2 діапазони вимірювання (1 або 6м)	0,3-8 м	0 - 6,45 м
Температура навколишнього середовища:	-20 .. +70°C	від -20 до +70°C	-40°C ~ 65°C

### 3.3 Вибір мікроконтролера системи технічного зору.

Щоб обрати мікроконтролер СТЗ який буде відповідати нашим потребам, було проведено відповідний пошук.

Raspberry Pi є популярним вибором завдяки своїй обчислювальній потужності та універсальності. Він пропонує ряд моделей із різними можливостями, наприклад Raspberry Pi 4 або Raspberry Pi Zero. Він має спеціальний інтерфейс камери,

що робить його придатним для підключення та обробки даних зображення від системи технічного зору.

Orange Pi 4 пропонує потужну обчислювальну платформу з хорошими можливостями підключення та розширюваністю, що робить його придатним для ряду додатків. Однак варто зазначити, що програмне забезпечення та підтримка спільноти серії Orange Pi можуть бути відносно обмеженими порівняно з більш популярними мікроконтролерами, такими як Raspberry Pi.

Серія вбудованих платформ NVIDIA Jetson, наприклад Jetson Nano або Jetson Xavier, розроблена спеціально для додатків ШІ та комп'ютерного бачення. Вони пропонують високопродуктивні обчислювальні можливості та виділене прискорення графічного процесора, що робить їх придатними для обробки складних алгоритмів зору та аналізу зображень у реальному часі в системі керування посадкою квадрокоптера. У таблиці 4 представлені приклади мікроконтролерів для СТЗ.

Таблиця 4. Мікроконтролери СТЗ.

Характеристики	Raspberry Pi	Orange Pi 4 LTS 4/16 Gb	NVIDIA Jetson
ОЗП	8 ГБ		4 GB
Кількість ядер процесора	4	4	4
Бездротові можливості	Bluetooth	Bluetooth	-
Частота процесора	1.5 ГГц	1.5 ГГц	1.4 ГГц
Мережеві можливості	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ethernet 10/100/1000</li> <li>Wi-Fi 2.4G/5.8G 300 Мбіт/с</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ethernet 10/100/1000</li> <li>Wi-Fi 802.11ac</li> </ul>	Ethernet 10/100/1000
Кількість USB-портів	4	-	-

### 3.4 Вибір автопілота.

Вибір автопілота залежить від таких факторів, як обчислювальна потужність, легкість інтеграції та сумісність із конкретними вимогами. Було розглянуто приклади автопілотів та наведено їх характеристики у Таб.3.

**Pixhawk Autopilot:** Pixhawk — це популярна платформа автопілота з відкритим кодом, яка використовується в багатьох дронах. Він пропонує широкий вибір контролерів польоту, які можна використовувати з системою технічного зору. Наприклад, Pixhawk 4 — це високопродуктивний автопілот, який підтримує різні датчики зору, включаючи камери та LiDAR. Він має достатню обчислювальну потужність і підтримує програмне забезпечення для керування польотом ArduPilot, яке має широкі можливості навігації.

**ArduPilot із комп'ютером-супутником:** ArduPilot — це стек програмного забезпечення для автопілота з відкритим кодом, який підтримує широкий спектр контролерів польоту. Поєднавши ArduPilot із комп'ютером-супутником, таким як серія Raspberry Pi або NVIDIA Jetson, ви можете використовувати обчислювальну потужність комп'ютера-супутника для завдань на основі системи технічного зору. Комп'ютер-супутник спілкується з контролером польоту, дозволяючи квадрокоптеру приймати рішення на основі вхідних даних.

**Auterion:** Auterion — це програмна платформа з відкритим кодом для автономних систем. Він надає повний набір інструментів і бібліотек для створення автономних дронів. За допомогою Auterion ви можете інтегрувати систему технічного зору у свій квадрокоптер і використовувати розширені функції автономності платформи. Він підтримує різні датчики зору та пропонує широкі можливості розробки програмного забезпечення для створення власних додатків на основі зору.

У таблиці 5 наведені приклади автопілотів, для використання.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		42

Таблиця 5. Автопілоти

Характеристики	Pixhawk Autopilot	ArduPilot	Auterion
Операційна система	NuttX/Linux	NuttX/Linux	Linux
Мікропроцесор	ARM Cortex-M4	ARM Cortex-M4	ARM Cortex-A53
Частота процесора	Зазвичай 168 МГц	Зазвичай 168 МГц	Зазвичай 1,4 ГГц
Пам'ять	2 МБ Flash	2 МБ Flash	Внутрішня та SD
GPS	Вбудований	Вбудований	Вбудований
Вбудований компас	Так	Так	Так
Вбудований барометр	Так	Так	Так
Радіо-передавач	Підтримується	Підтримується	Підтримується

### 3.5 Висновки

У даному розділі було розглянуто основні характеристики відеокамер 1 та 2, ультразвукових висотомірів, мікроконтролерів СТЗ та автопілотів. Отже на сьогоднішній день ринок дає змогу обирати велику кількість різноманітних технічних засобів.

## 4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОСАДКОЮ КВАДРОКОПТЕРА ЗА СИГНАЛАМИ СТЗ

### 4.1 Загальний алгоритм пошуку ПО.

Відповідно до технічного завдання розглядаємо варіант посадки квадрокоптера за допомогою СТЗ, визначаючи посадкову площадку.

Квадрокоптер летить за допомогою автопілота. Після того як СТЗ через метод ключових точок, зафіксувала відеокамерою 1 посадковий орієнтир, отримується інформація від барометричного висотоміра (БВ) та починається формування керуючих команд курсу на нього. Після потрапляння ПО у зону видимості відеокамери 2, починається процес вирівнювання положення квадрокоптера над ПО, коли ПО знаходиться у центрі кадру, розпочинається етап зниження та вимірювання висоти за допомогою УЗ висотоміра.

Приймемо, що у момент фіксації відеокамерою 1 ПО квадрокоптер знаходиться на відстані 500м відносно горизонту, та на висоті 250м. Тобто:

$$d_{max} = 500\text{м}$$

$$h_{max} = 250\text{м}$$

А у момент фіксації відеокамерою 2 ПО квадрокоптер знаходиться на відстані 20м відносно горизонту, та на висоті 6м.

$$d_{min} = 20\text{м}$$

$$h_{min} = 6\text{м}$$

Нижче приведений загальний алгоритм пошуку ПО (рисунок 4.1).

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		44

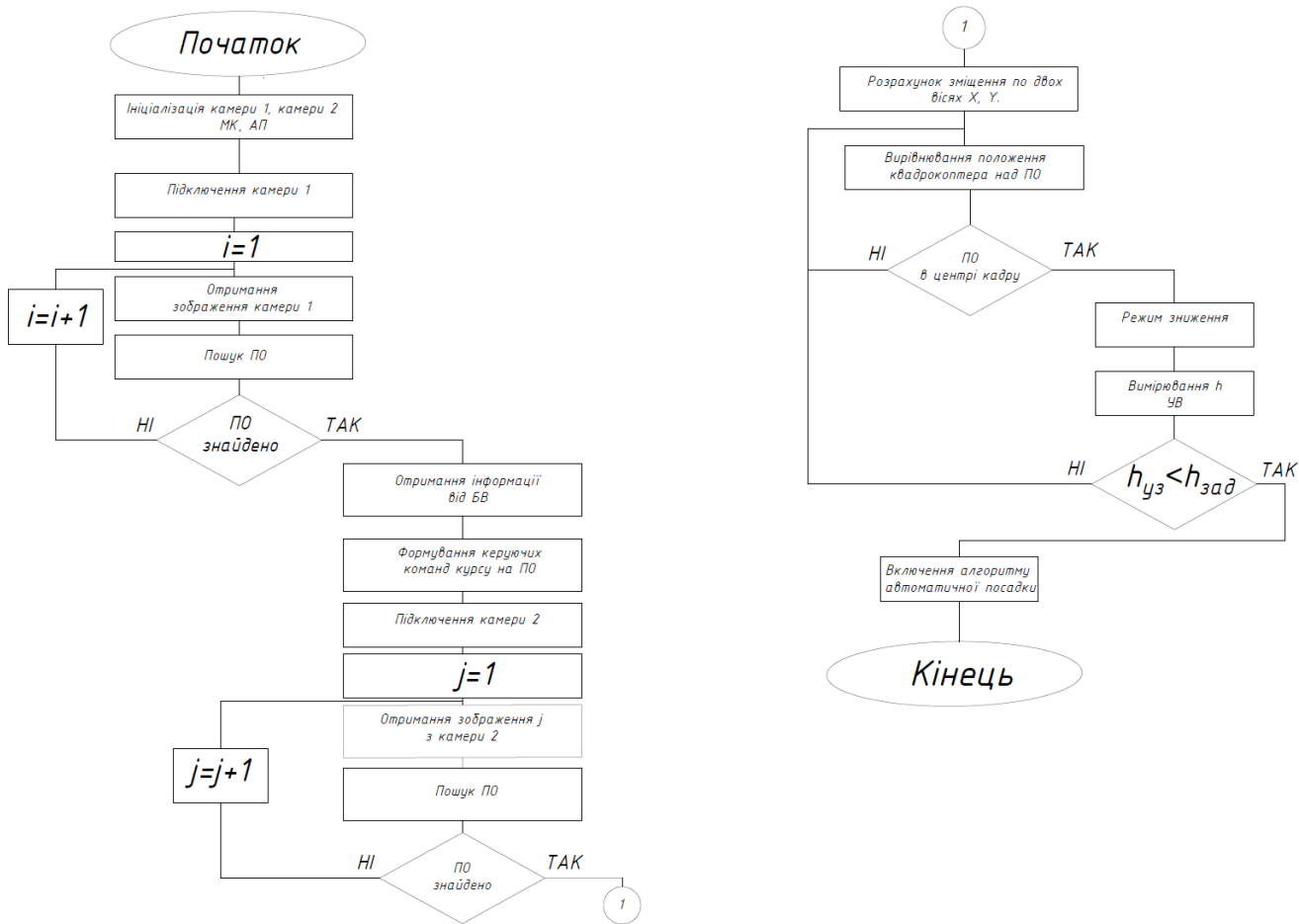


Рисунок 4.1 – Загальний алгоритм пошуку ПО.

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата

## 4.2 Алгоритм визначення кута рискання для відеокамери 1.

Після отримання зображення з відеокамери 1, знаходження ПО необхідно сформувати керуючі команди курсу у сторону ПО. Нижче наведено алгоритм (рисунок 4.2).

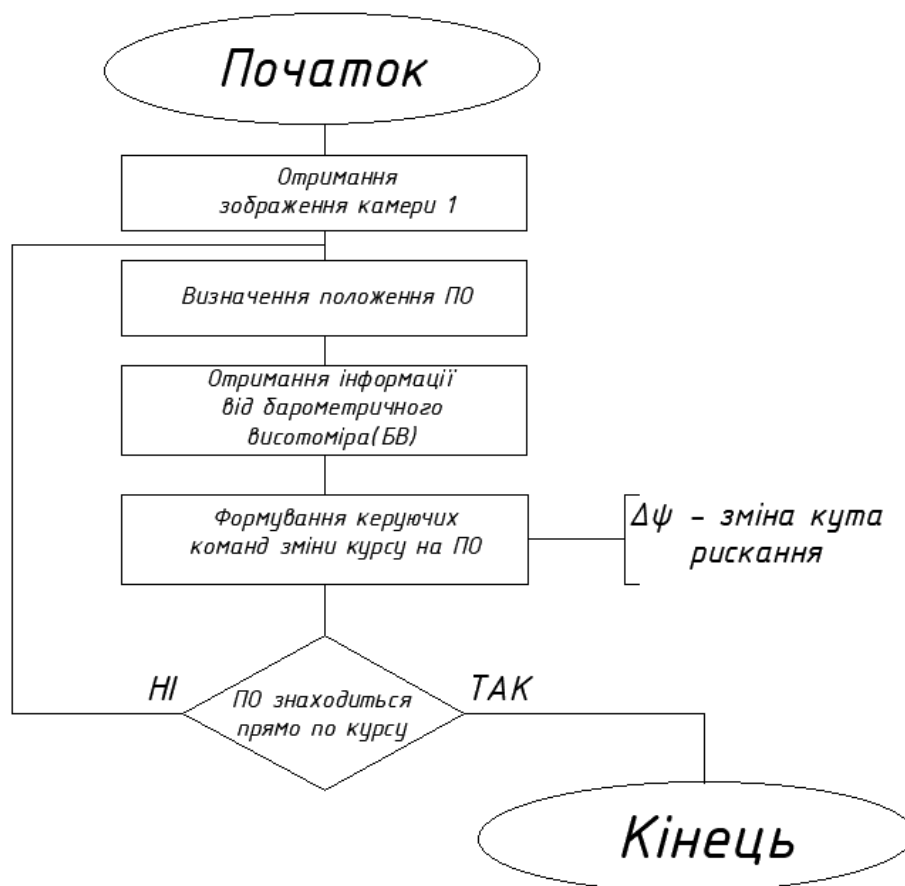


Рисунок 4.2 – Алгоритм визначення кута рискання для відеокамери 1

Після отримання зображення з відеокамери 1, знаходження ПО необхідно сформувати керуючі команди курсу у сторону ПО.

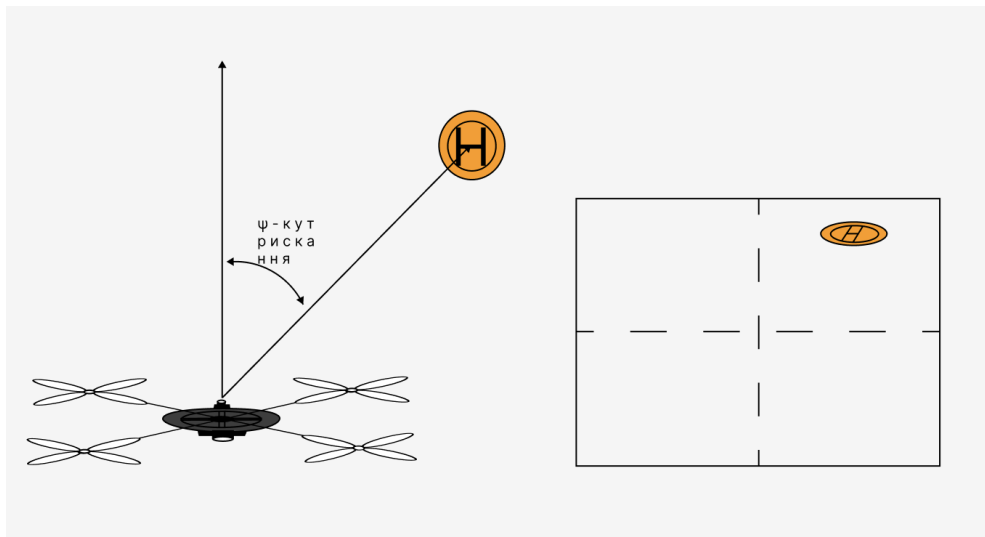


Рисунок 4.3 – Схематичний вигляд ПО з початкового положення квадрокоптера.

За зміну курсу у безпілотних літальних апаратах, у нашому випадку квадрокоптері, відповідає курс рискання  $\psi$ .

Для того, щоб зрозуміти на який кут необхідно відхилитися для взяття курсу на ПО необхідно знати відстань на якій знаходиться ПО та лінійний розмір ПО.

Лінійний розмір ПО за технічним завдання дорівнює 0.5...1.5 м. Доцільним буде у подальших розрахунках використовувати середнє значення діаметру ПО, тобто:

$$d_{\text{по}} = \frac{0,5\text{м} + 1,5\text{м}}{2} = 1\text{м}$$

$$d_{\text{по}} = 1\text{м}$$

Якщо матриця має еквівалентні розміри у пікселях 1920:1080 та кут огляду по горизонталі наприклад 120 градусів. Тоді можна вирахувати, що на один піксель приходить:

$$\psi' = 120/1920 = 0.00625^\circ.$$

Тоді розрахувати кут курсу\рискання можна наступним чином:

$$\psi = \psi' * x', (4.1)$$

де  $x'$  - різниця між координатою  $x$  центра кадру і  $x$  даної точки до якої шукається курс.

На рисунку 4.5 схематично показано напрямок польоту квадрокоптера після зміни кута ристання.

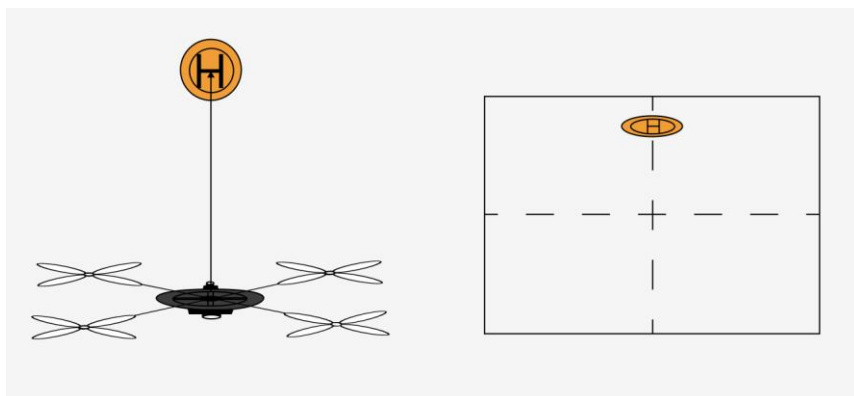


Рисунок 4.4 – Напрямок польоту квадрокоптера після зміни кута ристання.

Спосіб знаходження кута тангажу (рисунку 4.5). Якщо матриця має еквівалентні розміри у пікселях 1920:1080 та кут огляду по вертикалі наприклад 80 градусів. Тоді можна вирахувати, що на один піксель приходиться

$$\phi' = 80/1080 = 0.0740^\circ.$$

Тоді розрахувати кут курсу ристання можна наступним чином:

$$\phi = \phi' * y', \quad (4.2)$$

де  $y'$  - різниця між координатою  $y$  центра кадру і  $y$  даної точки до якої шукається тангаж.

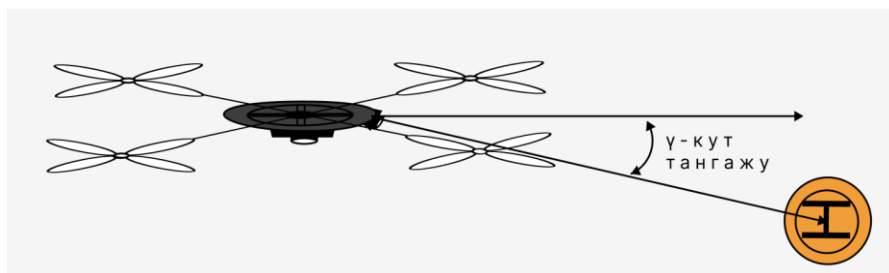


Рисунок 4.5 – Зміна кута тангажу для квадрокоптера.

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата

### 4.3 Алгоритм визначення кута рискання та тангажу для відеокамери 2.

Після того як у зоні видимості відеокамери 2 з'являється посадковий об'єкт (Рисунок 4.6), необхідно відцентрувати положення ПО таким чином, щоб ПО займав всю площу зображення (рисунок 4.7), а його фізичний центр був у центрі зображення.

Для посадки на посадковий об'єкт при переключенні на відеокамеру 2 будемо використовувати Безплатформну інерціальну навігаційну систему (БІНС) - це система, яка використовує комбінацію інерціальних сенсорів для визначення положення, швидкості і орієнтації об'єкта у просторі без зовнішнього постачання даних. У випадку посадки квадрокоптера, БІНС може використовуватися для контролю положення квадрокоптера під час процесу посадки.

На рисунку 4.8 наведений алгоритм визначення кута рискання та тангажу для відеокамери 2.

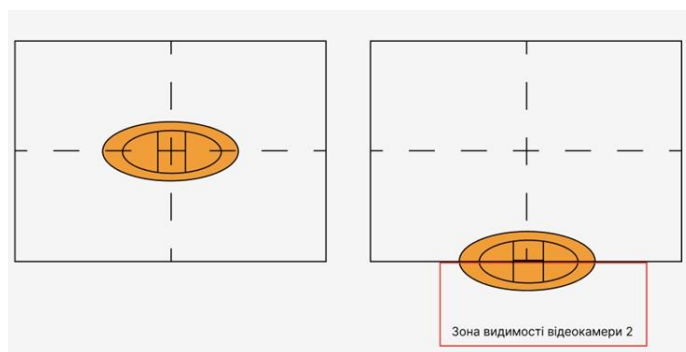


Рисунок 4.6 – Вид з відеокамери 1.

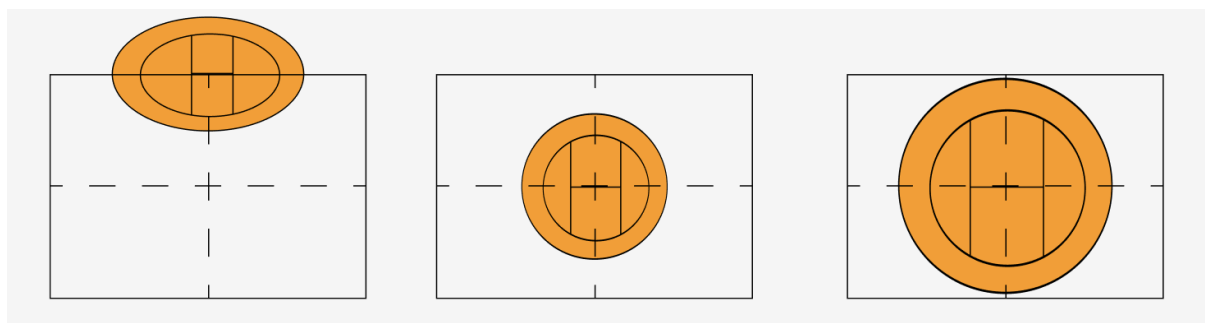


Рисунок 4.7 – Зображення з відеокамери 2.

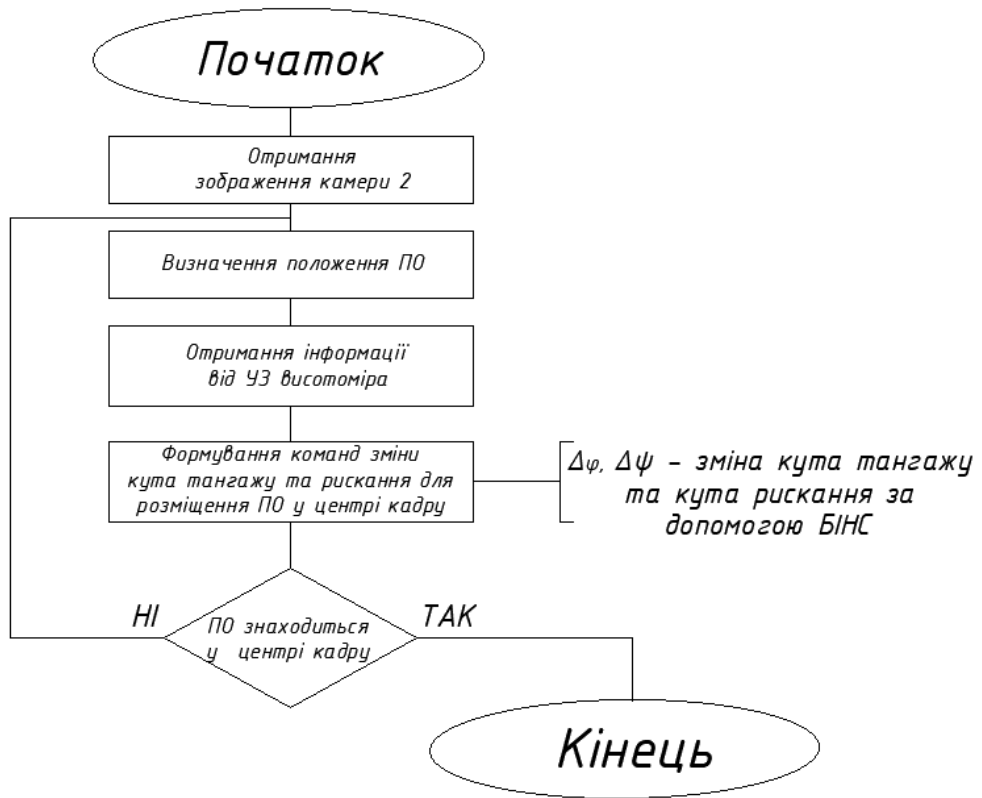


Рисунок 4.8 – Алгоритм визначення кута ристання та тангажу для відеокамери 2

## 5 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 5.1 Підпрограма пошуку ПО.

Для розробки програмного забезпечення використовувалося середовище Matlab.

Основною задачею було розпізнавання ПО методом ключових точок.

Функція `detectORBFeatures` у MATLAB — це функція комп'ютерного бачення, яка використовується для виявлення орієнтованих ШВИДКИХ і Обернених коротких (ORB) елементів на зображенні. ORB — це надійний і ефективний алгоритм дескриптора функцій, який поєднує кроки виявлення ключової точки та опису в єдиний процес.

Функція `detectORBFeatures` виконує такі дії:

- Виявлення ключових точок: він визначає потенційні ключові точки або точки інтересу у вхідному зображенні за допомогою алгоритму Oriented FAST (Функції з прискореного сегментного тесту). Ці ключові точки є областями зображення, які демонструють сильні градієнти або кути.
- Опис функції: для кожної виявленої ключової точки обчислюється бінарний дескриптор функції під назвою Rotated BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features). Дескриптор кодує відмінності інтенсивності між парами пікселів поблизу ключової точки, враховуючи орієнтацію ключової точки.
- Вихід: функція повертає об'єкт `vision.ORBPoints`, який інкапсулює виявлені функції ORB. Об'єкт `ORBPoints` містить інформацію про розташування, масштаби та орієнтацію ключових точок, а також пов'язані з ними дескриптори.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		51

Отже для початку необхідно, щоб Matlab зчитав зображення «photo1.png» із указанного шляху до файлу, перетворює його на відтінки сірого за допомогою `im2gray` і відображає за допомогою `imshow` (рисунок 5.1).

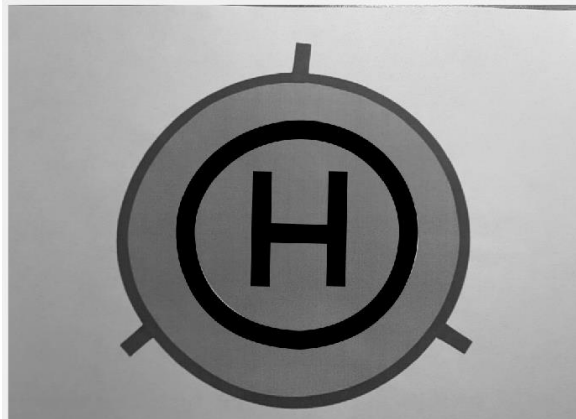


Рисунок 5.1 – Зображення 1

Далі ті самі функції виконуються з зображенням 2 і відображаються на рисунку 5.2.

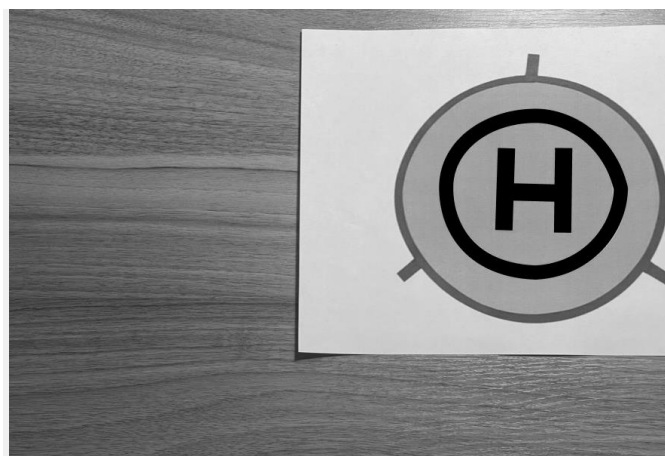


Рисунок 5.2 – Зображення 2

Виявляються ORB-функції в 'po\_image' (зображення 1) (рисунок 5.3) за допомогою detectORBFeatures, відображається 'po\_image' і накладається на нього 50 найсильніших ознак за допомогою selectStrongest і plot.:

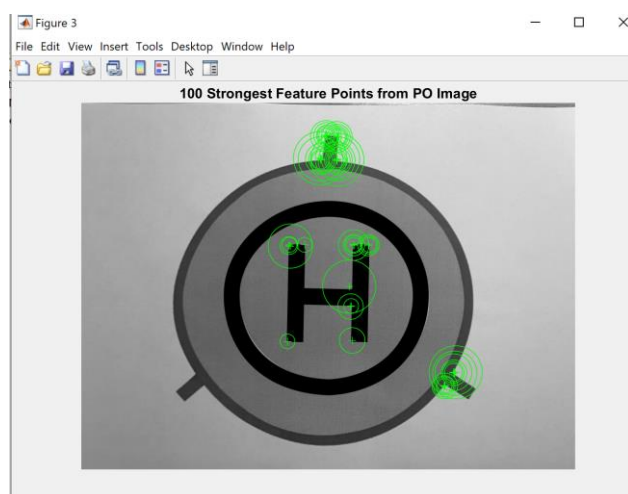


Рисунок 5.3 – Зображення 1

Виявляються особливості ORB у 'scene\_image', відображається 'scene\_image' і накладається на нього 100 найсильніших характеристик (рисунок 5.4).:

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		53

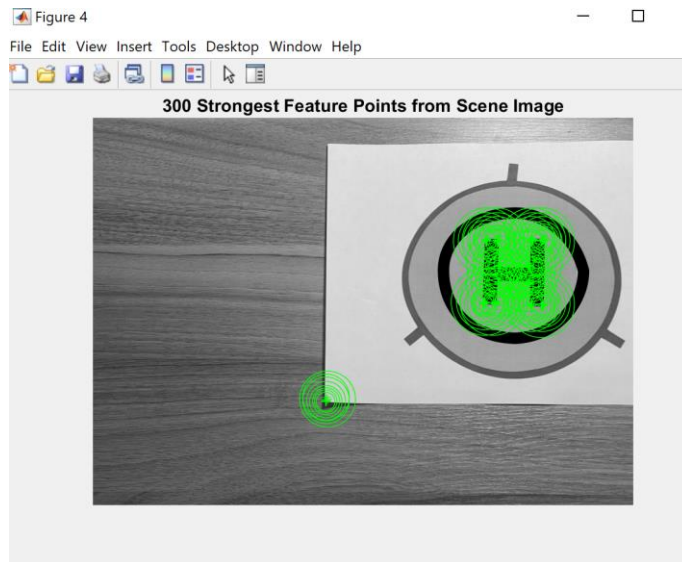


Рисунок 5.4 – Зображення 2

Витягуються дескриптори функцій для виявлених ключових точок як у 'po\_image', так і в 'scene\_image' за допомогою extractFeatures. Дескриптори зберігаються в 'poFeatures' і 'sceneFeatures' відповідно. Відповідні ключові точки зберігаються в 'poPoints' і 'scenePoints'.

Збіги формуються дескрипторами функцій між 'poFeatures' і 'sceneFeatures' за допомогою matchFeatures. Відповідні пари зберігаються в 'poPairs'. Отримує відповідні ключові точки з «poPoints» і «scenePoints» (рисунок 5.5) , використовуючи індекси, указані в «poPairs». Зібрані ключові точки зберігаються в 'matchedPOPoints' і 'matchedScenePoints'..

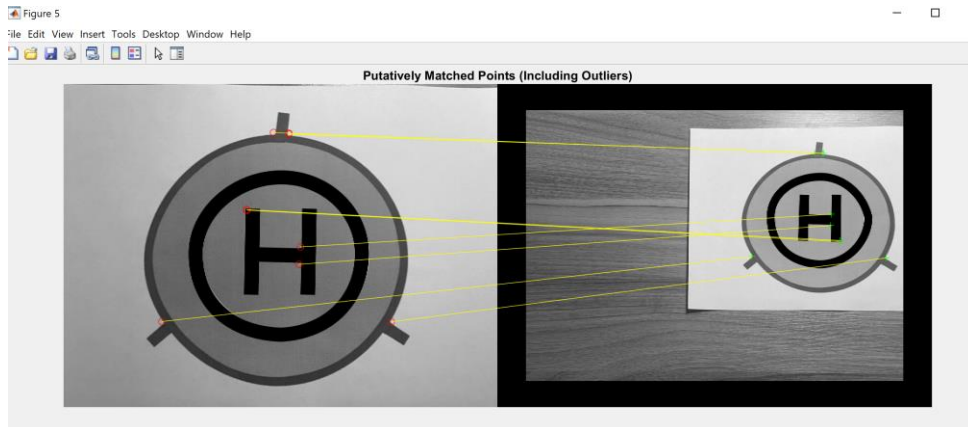


Рисунок 5.5 – Ключові точки

Оцінюється геометричне перетворення між узгодженими ключовими точками за допомогою моделі «афінного» перетворення. Перетворення зберігається в 'tform', а індекси `inlier-ів` зберігаються в 'inlierIdx'. Отримує ключові точки, які є `inlier`-ами (послідовно збігаються) на основі 'inlierIdx'. Внутрішні ключові точки (рисунок 5.6) зберігаються в «inlierBoxPoints» і «inlierScenePoints»...

[

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		55

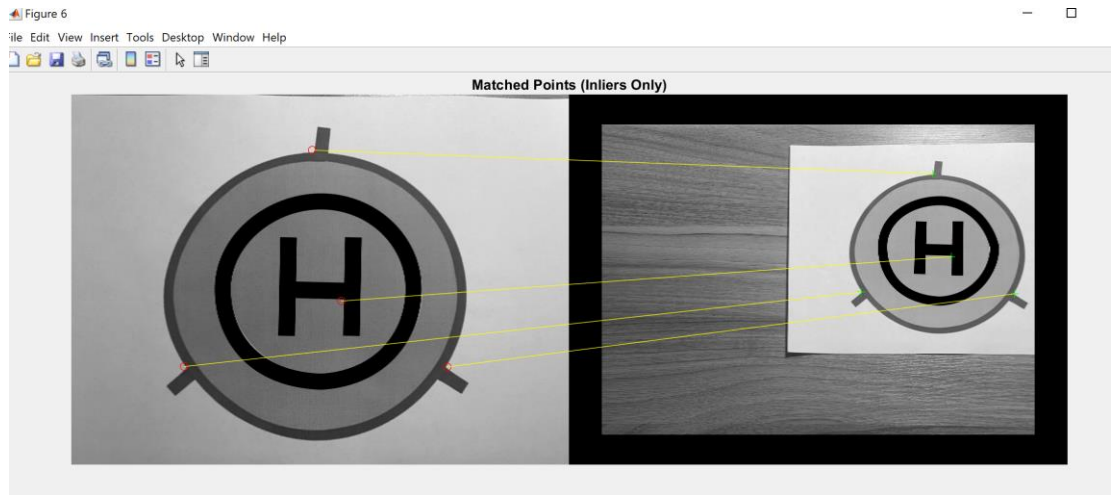


Рисунок 5.6 – Внутрішні ключові точки

Визначаються координати прямокутника в 'ro\_image' як 'boxPolygon'. Потім перетворює 'boxPolygon', використовуючи передбачуване перетворення 'tform', щоб отримати 'newBoxPolygon'. Відображає 'scene\_image', накладає на нього перетворений 'newBoxPolygon' як жовту лінію за допомогою лінії та додає назву, що вказує на виявлений блок (рисунок 5.7).

Повна підпрограма пошуку ПО представлена у додатку А.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		56

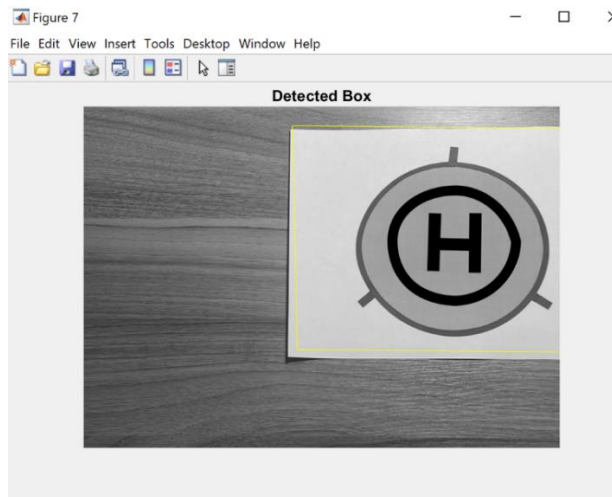


Рисунок 5.7 – Виявлений блок

## 5.2 Підпрограма розрахунку відстані та кута рискання.

Для обчислення відстані та кута рискання за допомогою зображення використовуємо додатковий код, який дописуємо в основний, та виводимо результат. (рисунок 5.8)

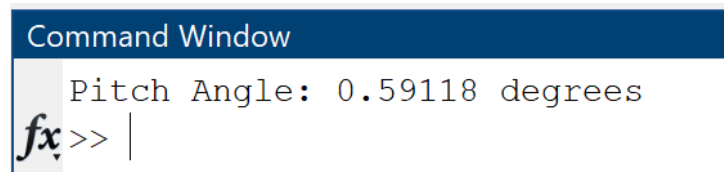
```
Command Window
Yaw Angle: 88.6868 degrees
Distance to Image: 601.1458 pixels
fx>>
```

Рисунок 5.8 – Кут рискання та відстань до зображення

Повна підпрограма розрахунку відстані та кута рискання представлена у додатку Б.

### 5.3 Підпрограма розрахунку кута тангажу.

Для обчислення кута тангажу за допомогою зображення також використаємо додатковий код, який дописуємо в основний, та виводимо результат. (рисунок 5.9)



```
Command Window
Pitch Angle: 0.59118 degrees
fx >> |
```

Рисунок 5.9 – Кут тангажу

Повна підпрограма розрахунку кута тангажу представлена у додатку В.

## ВИСНОВКИ

Виходячи з наведеного змісту, можна зробити наступні висновки для дипломного проекту на тему «Система управління посадкою квадрокоптера на основі системи технічного зору»:

1. Проект містить огляд та аналіз систем керування посадкою на базі квадрокоптерів, наголошуючи на важливості систем контролю руху та посадки. Він досліджує потенціал використання системи технічного зору (СТЗ) для керування рухом квадрокоптера.

2. Розроблено структурну схему системи керування із зазначенням компонентів та їх взаємозв'язків.

3. У проекті розглядається вибір та обґрунтування різних технічних рішень для побудови системи керування посадкою квадрокоптера за сигналами СТЗ. Це включає в себе вибір відеокамер для курсу і наведення, вибір ультразвукового висотоміра, мікроконтролера СТЗ і автопілота.

4. На основі сигналів СТЗ розроблені алгоритми системи керування посадкою квадрокоптера. Ці алгоритми визначають поведінку та дії квадрокоптера під час приземлення, забезпечуючи безпечне та точне приземлення за поданими сигналами.

5. Виконуються розрахунки для підтвердження працездатності системи. Ці розрахунки підтверджують ефективність і точність системи керування посадкою квадрокоптера, демонструючи її здатність ефективно реагувати на різні сценарії та сигнали світлофора.

6. Проводиться розробка програмного забезпечення для реалізації розроблених алгоритмів та інтеграції обраних компонентів системи керування. Це програмне забезпечення дозволяє квадрокоптеру обробляти сигнали, інтерпретувати візуальні дані та виконувати відповідні маневри при посадці.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		59

7. Результати дипломного проектування були представлені на науковій конференції «гіротехнології, навігація і керування рухомими об'єктами – 2023», та опубліковані у тезах конференції.

Загалом у дипломному проекті успішно досліджується та розробляється система керування посадкою квадрокоптера на основі системи технічного зору. Завдяки підбору відповідних компонентів, розробці алгоритмів і реалізації програмного забезпечення проект демонструє доцільність і ефективність системи безпечної та точної посадки квадрокоптера відповідно до сигналів СТЗ. Проект робить внесок у сферу систем керування квадрокоптерами та демонструє потенціал використання систем технічного зору для покращених операцій літальних апаратів.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		60

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] O. Sytnik i V. Kartashov, «Technical Vision Model of the Visual Systems for Industry Application»: в *Advances in Computational Intelligence and Robotics*, O. Sergiyenko, J. C. Rodriguez-Quiñonez, i W. Flores-Fuentes, Ред., IGI Global, 2021, с. 288–310. doi: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch010.
- [2] K. P. Valavanis i G. J. Vachtsevanos, Ред., *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. doi: 10.1007/978-90-481-9707-1.
- [3] «How to Fly a Drone: A Beginner’s Guide to Multirotor Systems», *UAV Coach*. <https://uavcoach.com/how-to-fly-a-quadcopter-guide/> (дата звернення 10, Червень 2023).
- [4] O. Amidi, «An Autonomous Vision-Guided Helicopter».
- [5] G. Tournier, M. Valenti, J. How, i E. Feron, «Estimation and Control of a Quadrotor Vehicle Using Monocular Vision and Moiré Patterns», в *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Keystone, Colorado: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Сер 2006. doi: 10.2514/6.2006-6711.
- [6] D. Mellinger, M. Shomin, i V. Kumar, «Control of Quadrotors for Robust Perching and Landing».
- [7] L. Xin, Z. Tang, W. Gai, i H. Liu, «Vision-Based Autonomous Landing for the UAV: A Review», *Aerospace*, вип. 9, вип. 11, с. 634, Жов 2022, doi: 10.3390/aerospace9110634.
- [8] S. Lange, N. Sünderhauf, i P. Protzel, «Autonomous Landing for a Multirotor UAV Using Vision», 2008.
- [9] B. Herisse, T. Hamel, R. Mahony, i F.-X. Russotto, «The landing problem of a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a moving platform using optical flow», представлена на *IEEE Transactions on Robotics*, Лис 2010, с. 1600–1605. doi: 10.1109/IROS.2010.5652633.
- [10] C. S. Sharp, O. Shakernia, i S. S. Sastry, «A vision system for landing an unmanned aerial vehicle», в *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, Seoul, South Korea: IEEE, 2001, с. 1720–1727. doi: 10.1109/ROBOT.2001.932859.

					ДП.АС92-2023.10.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата		61