

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«17» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Кондратюк Роман Богданович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи та програмно-апаратні засоби виявлення та захоплення об'єктів у безпілотних комплексах

Керівник роботи к.т.н., доц. каф. КС Тиш Євгенія Володимирівна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2025 року № 4/7-987

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1. Дослідження сучасних підходів і вимог до побудови систем машинного зору

2. Теоретичні основи побудови та функціонування системи машинного зору

3. Інтеграція, випробування та оцінка роботоздатності розробленої системи машинного зору

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Методи та програмно-апаратні засоби виявлення та захоплення об'єктів у безпілотних комплексах

2. Об'єкт, предмет і методи дослідження, наукова новизна та практична цінність одержаних результатів

3. Порівняння edge-платформ для систем машинного зору

4. Схема постановки досліджень

5. Система ACTIVETRACK, APAS

6. Ефект розмитості та спотворення, глибинна карта

5. структурна схема експериментального стенду для дослідження системи машинного зору

8. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Осухівська Г.М., зав.каф. КС</i>	<i>04.12.2025</i>	
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Стручок В. С. старший викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 17.11.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літературних джерел. Постановка завдання на кваліфікаційну роботу.</i>	<i>17.11.2025р. – 23.11.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
2.	<i>Теоретичні основи побудови та функціонування системи машинного зору на борту безпілотних комплексів</i>	<i>24.11.2025р. – 02.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
3.	<i>Інтеграція, випробування та оцінка роботоздатності розробленої системи машинного зору</i>	<i>03.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
4.	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>04.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
5.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>11.12.2025р. – 19.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
6.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>16.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
7.	<i>Захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>22.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>

Студент

(підпис)*Кондратюк Р. Б.*

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)*Тини Є. В.*

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кондратюк Р. Б. Методи та програмно-апаратні засоби виявлення та захоплення об'єктів у безпілотних комплексах: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра: спец. 123 — комп'ютерна інженерія / наук.кер. Тиш Є. В. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.

Ключові слова: Безпілотний літальний апарат, машинний зір, Orange Pi, комп'ютерний зір, нейронні мережі, MobileNet SSD, трекінг, детекція об'єктів, інференс, , MSP-протокол, UART-інтерфейс.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена створенню та дослідженню системи машинного зору для безпілотного літального апарата, побудованої на базі одноплатного комп'ютера Orange Pi. Актуальність теми обумовлена зростаючою потребою у компактних, енергоефективних автономних системах комп'ютерного зору, які здатні функціонувати в умовах високої динаміки із мінімальною затримкою в обробці даних.

У рамках роботи був проведений аналіз сучасних підходів до розробки систем машинного зору, сформовані вимоги до апаратного та програмного забезпечення й представлено алгоритмічну архітектуру, що інтегрує квантовану нейромережу MobileNet SSD для детекції об'єктів, трекінгову систему на основі фільтра Калмана і механізм передачі координат польотному контролеру з використанням протоколу MSP.

Результати експериментальних досліджень підтвердили здатність системи функціонувати в реальному часі зі швидкістю 13–15 кадрів за секунду та затримкою обробки в межах 70–90 мс, що дозволяє забезпечити стабільне наведення та точний трекінг об'єктів. На основі отриманих даних зроблено висновок про можливість успішного застосування розробленої системи на практичних безпілотних платформах.

ANNOTATION

Kondratyuk R. B. Methods and software and hardware means for detecting and capturing objects in unmanned complexes. Master's Graduation Thesis: speciality 123 — Computer engineering / supervisor Tysh E.V. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2025.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, machine vision, Orange Pi, computer vision, neural networks, MobileNet SSD, tracking, object detection, inference, MSP protocol, UART interface.

The master's thesis is devoted to the creation and research of a machine vision system for an unmanned aerial vehicle based on the Orange Pi single-board computer. The relevance of the topic is due to the growing need for compact, energy-efficient autonomous computer vision systems that are capable of functioning in highly dynamic conditions with minimal data processing delays.

As part of the work, an analysis of modern approaches to the development of machine vision systems was carried out, hardware and software requirements were formed, and an algorithmic architecture was presented that integrates a quantised MobileNet SSD neural network for object detection, a tracking system based on the Kalman filter, and a mechanism for transmitting coordinates to the flight controller using the MSP protocol.

The results of experimental studies confirmed the system's ability to operate in real time at a speed of 13–15 frames per second and with a processing delay of 70–90 ms, which ensures stable guidance and accurate object tracking. Based on the data obtained, it was concluded that the developed system could be successfully applied on practical unmanned platforms.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ І ВИМОГ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗОРУ В БЕЗПІЛОТНИХ КОМПЛЕКСАХ.....	13
1.1. Нові горизонти машинного зору: від лабораторій до масового застосування.....	13
1.2. Готові системи машинного зору: досвід DJI як світового лідера	19
1.3. Специфіка машинного зору в безпілотних літальних апаратах та вимоги до системи.....	24
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ МАШИННОГО ЗОРУ НА БОРТУ БЕЗПІЛОТНИХ КОМПЛЕКСАХ.....	30
2.1. Математичні основи формування та обробки зображення у системах машинного зору безпілотних комплексів	30
2.2. Математичні моделі алгоритмів виявлення, розпізнавання та трекінгу об'єктів у системах машинного зору	34
2.3. Математичні основи автономної навігації, SLAM/VIO та інтеграції машинного зору з бортовою обчислювальною платформою	38
РОЗДІЛ 3 ІНТЕГРАЦІЯ, ВИПРОБУВАННЯ ТА ОЦІНКА РОБОТОЗДАТНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ МАШИННОГО ЗОРУ	48
3.1. Архітектура та реалізація програмного забезпечення системи машинного зору на базі Orange Pi.....	48
3.2. Інтеграція з бортовими системами БПЛА та організація передачі координат у польотний контролер	54

3.3. Оцінка ефективності та обґрунтування доцільності впровадження розробленої системи	62
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	68
4.1. Охорона праці.....	68
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	71
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77
Додаток А. Тези конференцій	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

FPV (англ. First Person View) – вид від першої особи

APAS (англ. Advanced Power and Autonomous Systems) – інтелектуальна та самокерована енергетична система

OCR (англ. Optical Character Recognition) – оптичне розпізнавання символів

NPU (англ. Neural Processing Unit) – нейронний процесор

БПЛА – Безпілотний Літальний Апарат

ToF (англ. Time-of-flight) – час прольоту

VIO (англ. Visual Inertial Odometry) – візуальна інерціальна оцінка положення

IMU (англ. Inertial Measurement Unit) – інерційний вимірювальний пристрій

OSD (англ. On-Screen Display) – екранне меню

SLAM (англ. Simultaneous Localization and Mapping) – одночасна локалізація і картографування

FOV (англ. Field of View) – поле зору

ВСТУП

Актуальність роботи. На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій і робототехнічних систем безпілотні компленси, зокрема, безпілотні літальні апарати, займають провідне місце серед засобів отримання, обробки та аналізу даних про навколишнє середовище. Сфери їх застосування стрімко розширюються, охоплюючи цивільний моніторинг, технічну інспекцію, аграрний сектор, картографування, пошуково-рятувальні операції, а також вузькоспеціалізовані завдання, пов'язані з автономною навігацією і функціями відеонаведення. У таких умовах особливої значущості набуває питання підвищення рівня автономності безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зниження залежності від зовнішніх навігаційних систем та забезпечення можливостей апарата самостійно сприймати і аналізувати інформацію про навколишній простір.

Одним із ключових технологічних напрямків, що сприяють досягненню автономності безпілотних платформ, є використання систем машинного зору. Засоби комп'ютерного зору дають змогу БПЛА виявляти та класифікувати об'єкти, відстежувати їх рух, оцінювати просторове положення і формувати керувальні сигнали, ґрунтуючись на результатах аналізу відеоданих. На відміну від традиційних сенсорних систем, таких як GPS або інерціальні вимірювальні пристрої, технології машинного зору забезпечують пряме опрацювання візуальної інформації, що є надзвичайно важливим у складних або змінних умовах експлуатації. Водночас впровадження машинного зору на малогабаритних дронах супроводжується низкою технологічних викликів, зокрема обмеженою продуктивністю апаратного забезпечення, жорсткими вимогами до енергоефективності та необхідністю мінімізувати часові затримки під час обробки даних.

Актуальність роботи обумовлена зростаючим інтересом до застосування недорогих одноплатних комп'ютерів у ролі бортових обчислювальних платформ для БПЛА. Такі платформи, як Orange Pi, приваблюють своєю низькою вартістю,

компактністю та достатнім рівнем обчислювальних потужностей. Однак їх використання у системах машинного зору потребує ретельного алгоритмічного та програмного доопрацювання. Застосування стандартних нейромережевих моделей без попередньої адаптації може призвести до суттєвих затримок, перевантаження обчислювальних ресурсів і зниження загальної стабільності системи. Тому важливим науково-практичним завданням є створення ефективної архітектури системи машинного зору, здатної працювати у режимі реального часу на апаратах із обмеженими ресурсами.

Додатковий аспект актуальності полягає у необхідності тісної інтеграції системи машинного зору з бортовими системами управління безпілотною. Для вирішення практичних задач, таких як наведення, супроводження об'єктів або автономна навігація, результати візуального аналізу повинні безпосередньо впливати на керуючі контури автопілота. Це накладає додаткові вимоги до стабільності роботи, часової точності та коректності передачі координат об'єктів до польотного контролера. Таким чином, важливим завданням є не лише розробка ефективних алгоритмів детекції та трекінгу, але й дослідження способів їх інтеграції із системами управління БПЛА.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка, інтеграція та експериментальне дослідження системи машинного зору для безпілотного літального апарата, створеної на основі одноплатного комп'ютера Orange Pi. Система повинна функціонувати в режимі реального часу за умов обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів, забезпечувати точне виявлення та трекінг об'єктів, а також передавати їх координати до польотного контролера. Це дозволить формувати керуючі сигнали та підвищити рівень автономності безпіотної платформи.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- Провести аналіз існуючих систем виявлення та захоплення об'єктів у безпілотних комплексах.
- Розробити математичні моделі та алгоритми відстеження об'єктів, які враховують зміни положення об'єкта у просторі.

– Розробити програмно-апаратну систему на основі Orange Pi 3B v2.1 із залученням відеоданих.

Відповідно до мети та завдань кваліфікаційної роботи визначено її об'єкт та предмет.

Об'єкт дослідження: Процеси генерації, обробки та застосування візуальної інформації в системах комп'ютерного зору безпілотних авіаційних платформ.

Предмет дослідження: Методи, алгоритми та програмно-апаратне забезпечення для реалізації системи машинного зору на основі одноплатного комп'ютера Orange Pi, призначені для виявлення й трекінгу об'єктів, а також інтеграції з системою управління безпілотним літальним апаратом.

Методи дослідження: У дослідженні застосовано методи комп'ютерного зору та глибокого навчання для виявлення і трекінгу об'єктів, математичне моделювання та статистичний аналіз для оцінки точності та часових характеристик системи. Для обробки відеопотоку використовувалися методи цифрової обробки зображень з метою фільтрації шуму і нормалізації даних. Трекінг об'єктів реалізовано за допомогою предиктивних алгоритмів на основі фільтра Калмана, а інтеграція апаратно-програмних компонентів виконувалася із застосуванням інтерфейсів UART і протоколу MSP. Ефективність запропонованих рішень підтверджено через лабораторні, стендові та польові експериментальні дослідження.

Наукова новизна дослідження полягає у створенні та експериментальному обґрунтуванні комплексної архітектури системи комп'ютерного зору для безпілотного літального апарата, реалізованої на базі одноплатного комп'ютера Orange Pi. Ця архітектура інтегрує використання квантованої нейромережевої моделі для детекції об'єктів, алгоритмів предиктивного трекінгу на основі фільтра Калмана, а також механізму передачі координат до польотного контролера в реальному часі. Додатково встановлено закономірності впливу затримок обробки візуальних даних на точність і

стабільність управління безпілотним літальним апаратом за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи полягає у можливості безпосереднього застосування розробленої системи машинного зору на основі одноплатного комп'ютера Orange Pi в реальних безпілотних літальних апаратах. Це дозволяє виконувати завдання автономного наведення, супроводу об'єктів, моніторингу та навігації за умов обмежених апаратних і енергетичних ресурсів. Крім того, запропоновані алгоритмічні й апаратно-програмні рішення можуть слугувати базою для розвитку складніших систем автономного керування, включаючи реалізацію функцій SLAM, обхід перешкод та візуально-інерційну навігацію.

Публікації. Результати дослідження апробовано на XIII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології» [4, 5].

Структура роботи. Робота складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ І ВИМОГ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗОРУ В БЕЗПІЛОТНИХ КОМПЛЕКСАХ

1.1 Нові горизонти машинного зору: від лабораторій до масового застосування

Ще кілька десятиліть тому технології комп'ютерного зору вважалися здебільшого інструментами для наукових досліджень і залишалися дорогими експериментальними розробками, доступними лише вузькому колу фахівців. Сьогодні машинний зір зазнав революційних змін, ставши ключовим елементом багатьох практичних галузей. Його алгоритми використовуються для керування безпілотними літальними апаратами над сільськогосподарськими угіддями, пошуку людей у кризових ситуаціях, моніторингу інфраструктури, аналізу дорожнього руху та контролю невеликих FPV-дронів з одноплатними комп'ютерами на кшталт Orange Pi. Незважаючи на поступовість цього технологічного прориву, його вплив на індустрію, безпеку і сучасні технічні рішення є надзвичайно вагомим.

Перші кроки в галузі машинного зору були здійснені в 1950–1960-х роках і були спрямовані на виявлення простих форм та контурів. У 1970-х роках з'явилися перші комерційні системи, такі як технології оптичного розпізнавання символів. Протягом наступних десятиліть комп'ютерний зір почав широко використовуватися в промисловості для перевірки якості продукції, виявлення дефектів, а також у сферах аерофотозйомки, розвідки та супутникового спостереження. Втім, тривалий час ці розробки були обмежені переважно військовими й державними потребами і лише згодом стали доступні для цивільного й комерційного використання [14, 23, 24].

Справжній прорив у сфері машинного зору став можливим завдяки потужним графічним процесорам та інтеграції методів глибокого навчання.

Сучасні згорткові нейронні мережі дозволяють ефективно розпізнавати складні об'єкти, сцени та динамічні явища. Це сприяло широкому впровадженню комп'ютерного зору в смартфони, автомобілі, системи відеоаналітики та безпілотні літальні апарати. Функціонування таких систем базується на багаторівневій обробці візуальної інформації: від базового фільтрування шумів і визначення контурів до сегментації та аналізу сцен, завершуючи семантичною оцінкою, класифікацією та трекінгом об'єктів.

На фінальному етапі аналізу зображень використовуються передові моделі глибокого навчання, такі як YOLO, SSD і Faster R-CNN. Ці моделі ефективно визначають місцезнаходження об'єктів та їх належність до певних класів. Завдяки інтеграції детекції, трекінгу та аналізу динамічних подій забезпечується функціонування безпілотних апаратів, які можуть виконувати складні завдання пошуку, супроводу цілей і корекції траєкторії польоту в реальному часі. Поєднання технологій глибокого навчання, edge-обчислень та розвитку БПЛА призвело до суттєвого прогресу у галузі машинного зору. У результаті інтелектуальні дрони перетворилися зі звичайних експериментальних зразків у повністю автономні системи для аналізу й прийняття рішень.

Сучасні безпілотні літальні апарати вирізняються зменшеною масою, покращеною маневровістю та зростанням доступності для користувачів. Завдяки інтеграції вдосконалених систем стабілізації, супутникової навігації на основі GPS та автоматизованих механізмів управління, ці платформи здатні виконувати широкий спектр складних завдань з високим ступенем точності. У зв'язку з цим виникла необхідність у розробці сенсорних систем нового покоління—так званих «розумних очей», що не обмежуються лише функцією фіксації зображень, а інтегрують можливості контекстного аналізу та динамічної інтерпретації ситуацій.

У сучасних умовах edge-платформи, такі як Orange Pi, Raspberry Pi та NVIDIA Jetson, стали життєво важливими апаратними рішеннями. Порівняння Edge-платформ для систем машинного зору наведено в табл. 1.1. Вони ефективно усунули необхідність у постійному доступі до хмарних

обчислювальних ресурсів, виконуючи роль компактних мобільних серверів. Ці платформи здатні локально обробляти нейронні моделі безпосередньо під час польотів безпілотників, що зробило edge-обчислення стандартом для завдань високошвидкісної детекції об’єктів у реальному часі.

Таблиця 1.1

Порівняння Edge-платформ для систем машинного зору

Функція	Orange Pi (Pi 3B v2.1)	Raspberry Pi (Pi 5)	NVIDIA Jetson (Orin Nano)
Процесор (CPU)	Rockchip RK3566 (4-ядерний 64-бітний)	Broadcom BCM212 (8-ядерний)	NVIDIA Carmel (ARM Cortex-A78AE)
Графічний чіп (GPU)	Mali-G52 MP2 (для загальних завдань)	VideoCore VII	40-40A ядер NVIDIA (для прискорювача AI)
Прискорення AI	AI прискорення реалізується через CPU та оптимізацію моделей	CU/GPU	40-275 TOPS (для AI)
Оперативний процесор (NPU)	немає окремого NPU-модуля	Немає	Немає
Оперативна пам'ять (RAM)	2 GB / 4 GB / 8 GB LPDDR4	8GB	4GB/8GB LPDDR5
Енергоспоживання (типове)	5W - 7W	6W - 8W	5W - 15W
Вартість	\$50 - \$100	\$19 - \$499+	\$199 - \$499+
Основне призначення	розробка мультимедійних рішень, машинного зору на edge-рівні, IoT, роботизація	Освіта, IoT	Робототехніка AI/ML, медіацентр
Підтримка AI/ML	TensorFlow Lite, OpenVINO/NNPack	TensorFlow Lite, ONNX, OpenCV	TensorFlow, PyTorch, Caffe (з CUDA)

Прогрес у галузі глибокого навчання суттєво змінив підходи до вирішення обмежень традиційних алгоритмів комп'ютерного зору. Методи типу SIFT, SURF і HOG виявилися недостатньо ефективними у складних і динамічних середовищах з багатим візуальним фоном чи сильними рухами. На противагу цьому, згорткові нейронні мережі продемонстрували високу здатність працювати з необробленими зображеннями, виявляти високорівневі абстрактні особливості та забезпечувати стабільну точність навіть за несприятливих умов.

Ці новітні досягнення перетворили машинний зір із експериментальної ідеї на важливий інструмент для безпілотних систем. Завдяки високій адаптивності, можливості масштабування та швидкому навчанню методи глибокого навчання стали фундаментом сучасних автономних рішень для аналізу та інтерпретації зображень.

Синергія представлених технологічних напрямів суттєво розширила функціональні можливості безпілотних літальних апаратів. У контексті пошуково-рятувальних операцій дрони, обладнані тепловізійними або високочутливими оптичними камерами, виявляються незамінними для ефективного і швидкого ідентифікування постраждалих навіть у складних умовах, таких як руйнівні завали, густі лісові масиви чи засніжені території. Це забезпечує значну перевагу порівняно з традиційними наземними рятувальними підрозділами. Використання нейромережевих моделей, таких як YOLO та MobileNet, оптимізованих для функціонування на обчислювальних платформах із обмеженим ресурсом, дає можливість здійснювати пошук і розпізнавання об'єктів у режимі реального часу з мінімальною затримкою.

Безпілотні літальні апарати відіграють ключову роль у сучасному прецизійному землеробстві, сприяючи моніторингу стану рослинності, виявленню зон із ознаками захворювань, дефіциту зрошення чи поживних речовин, а також оптимізації використання ресурсів агропромислового комплексу. Крім того, дрони здійснюють вагомий внесок у технічну інспекцію критично важливої інфраструктури, такої як лінії електропередач, мости, трубопроводи та промислові об'єкти, забезпечуючи високоточний огляд у

безпечних умовах, водночас значно зменшуючи час проведення таких робіт. У транспортній і логістичній галузях системи машинного зору стають фундаментальним компонентом автоматизованих процесів. Їх застосовують для аналізу дорожніх умов, контролю транспортних потоків і доставки вантажів до важкодоступних регіонів.

Загальна інтеграція безпілотних платформ, периферійних обчислювальних систем і алгоритмів нейронних мереж формує нову техноекосистему. У рамках цього підходу машинний зір трансформується з доповнюючої функції в базовий елемент автономних систем. Для практичного застосування вирішальним є не лише здатність системи виконувати аналіз візуальних даних, але й її здатність оперативно реагувати на отриману інформацію в реальному часі. У випадку з дронами, які працюють на великих швидкостях, затримка у прийнятті рішень може значною мірою звести нанівець переваги високоточного аналізу.

На цьому фоні основними характеристиками ефективності систем машинного зору виступають швидкість обробки кадрів, рівень затримки та параметри енергоспоживання. Висока частота опрацювання відеопотоку забезпечує миттєву адаптацію до динамічних змін сцени, тоді як мінімальна латентність є критично важливою для стабільної навігації та відстеження об'єктів у реальному часі. Енергоспоживання набуває надважливого значення, оскільки обчислювальні модулі безпосередньо впливають на тривалість польоту та ефективність теплового режиму роботи безпілотного літального апарата. У зв'язку з цим сучасні алгоритми машинного зору повинні бути добре адаптованими до функціонування на енергозберігаючих платформах типу ARM, забезпечувати стійку продуктивність в умовах тривалих навантажень і враховувати встановлені ліміти щодо енергетичних і теплових характеристик. Зрештою, поєднання низького рівня затримки, стабільної продуктивності й оптимального енергоспоживання визначає практичну ефективність застосування систем машинного зору у складі автономних безпілотних апаратів.

Такий перехід стимулював розвиток цілого напрямку у сфері машинного зору — створення легковагових моделей, оптимізованих архітектур наприклад,

MobileNet, Tiny-YOLO, Nano-моделі, а також квантованих і адаптованих під edge-платформи рішень.

Протягом тривалого часу технології машинного зору залишалися привілеєм закритих військових та урядових проєктів, де велися високовартісні дослідження й розробки, недоступні для широкого загалу. Однак останніми роками відбулася значна демократизація цих технологій. Вона стала можливою завдяки появі відкритих датасетів, таких як VisDrone і UAVDT, які містять значні обсяги реальних даних аеромоніторингу. Завдяки таким ресурсам дослідники мають змогу тренувати моделі за стандартизованими умовами.

Одночасно з цим активно поширюються наукові публікації, відкриті рейтинги алгоритмів і репозиторії сучасних моделей, що створює більшу прозорість, доступність методів оцінювання та забезпечує можливість їх відтворення. Значну роль у цьому процесі відіграє також доступність недорогих апаратних платформ — таких як одноплатні комп'ютери, камери високої роздільної здатності та зручні у використанні сенсори, які суттєво знижують бар'єр для впровадження систем машинного зору.

Розвиток інструментів глибокого навчання на кшталт TensorFlow і PyTorch сприяв тому, що створення власних моделей або адаптація вже існуючих алгоритмів стали доступними навіть для невеликих команд чи окремих розробників. Унаслідок цього машинний зір перестав бути винятково технологією військового або промислового сектору. Сьогодні навіть доступні FPV-дрони вартістю до 150 доларів можуть оснащуватися сучасними модулями машинного зору, які ще кілька років тому використовувалися лише у високотехнологічних автономних системах. Таким чином, комп'ютерний зір поступово перетворюється зі спеціалізованого інструменту на доступну технологію, яка знаходить застосування в широкому спектрі цивільних, дослідницьких та інженерних завдань.

У цьому контексті магістерський проєкт зі створення системи машинного зору для дрона на базі Orange Pi відповідає сучасним тенденціям. Проєкт передбачає:

- використання доступного апаратного забезпечення;
- застосування відкритих моделей і бібліотек;
- реалізацію ефективних міжнародно визнаних методів аналізу даних.

Сучасні досягнення у галузі машинного зору відкривають новий рівень автономності для безпілотних літальних апаратів. Завдяки інтегрованим технологіям дрони можуть самостійно адаптуватись до змін у навколишньому середовищі, тоді як роль оператора все більше зводиться до стратегічного контролю й координації, а не до прямого ручного управління. Компактні обчислювальні платформи, такі як Orange Pi, стають основою для високопродуктивної обробки візуальних даних і реалізації складних алгоритмів аналізу зображень.

Цей технологічний прорив демонструє, як системи із розширеними можливостями машинного зору змінюють парадигму функціонування безпілотних комплексів і значно впливають на їхній подальший розвиток.

1.2 Готові системи машинного зору: досвід DJI як світового лідера

У сфері розвитку технологій машинного зору для безпілотних літальних апаратів компанія DJI заслужено посідає одне з провідних місць у світі. Вона стала однією з перших, хто успішно переніс інноваційні розробки зі стадії лабораторних експериментів до широкого використання в серійних дронах. DJI створила інтегровану концепцію, яка об'єднує сенсори, алгоритми штучного інтелекту, навігаційні підсистеми та складні математичні методи обробки даних. Цей підхід став основою для побудови систем автономного управління польотом, і сьогодні служить еталоном у багатьох інженерних проєктах, наприклад, на платформі одноплатних комп'ютерів типу Orange Pi [19, 23, 37].

Значним досягненням у цій галузі стало впровадження стереоскопічної системи машинного зору в моделі DJI Phantom 4. Цей дрон став першою комерційно доступною моделлю, оснащеною повноцінною стереоскопічною візуальною системою. Завдяки двом фронтальним камерам він здатен

створювати глибинну карту простору, застосовуючи принципи бінокулярного зору та триангуляцію, що дозволяє визначати відстань до об'єктів і аналізувати їхню геометрію в реальному часі. Цей прорив став кульмінацією у розвитку: безпілотники отримали можливість не лише виконувати команди оператора, але й самостійно оцінювати довколишнє середовище [23, 14].

Далі концепція автономності розвивалася у вигляді системи FlightAutonomy. Вона об'єднала стереокамери, інфрачервоні й ультразвукові сенсори з потужними обчислювальними модулями, формуючи єдиний "візуальний центр" дрона. З кожним новим поколінням система ускладнювалася, отримувала вдосконалені алгоритми сценоаналізу та розширені можливості машинного зору. Новаторські моделі, як-от Mavic Air і Mavic 2, були оснащені багатовекторними сенсорами для моніторингу в шести напрямках, що забезпечило тривимірне уникнення перешкод навіть у найскладніших умовах. Такий підхід зблизив технічні рішення з біологічними механізмами орієнтації у просторі, закріпивши машинне бачення як ключову складову сучасних автономних безпілотних технологій.

Використання інтегрованих обчислювальних модулів із нейронними процесорами стало важливим кроком у розвитку технологій компанії DJI. Це дозволило перейти від елементарного аналізу глибинних карт до повноцінного розпізнавання об'єктів у реальному часі. Системи ActiveTrack 3.0 і ActiveTrack 4.0 забезпечують точну обробку відеопотоку, виконують класифікацію об'єктів, таких як люди, транспортні засоби чи велосипедисти, прогнозують траєкторії їхнього руху та утримують об'єкти в полі зору навіть за умов часткового перекриття або тимчасової втрати контакту, робота системи зображена на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Система ActiveTrack (відстеження об'єкта та прогнозування руху)

Завдяки інтеграції згорткових нейронних мереж із фільтрами Калмана, алгоритмами оптичного потоку та методами прогнозування динаміки сцени ці платформи діють як майже автономні системи інтелектуального моніторингу, яким потрібно мінімальне втручання з боку оператора. Подібні підходи також використовуються в рамках нашого проєкту, зокрема під час розробки систем візуального моніторингу й супроводу на базі Orange Pi.

Одним із визначних досягнень DJI є впровадження системи APAS (Advanced Pilot Assistance System), яка не тільки запобігає зіткненням, а й забезпечує створення інтелектуальних алгоритмів для побудови безпечної траєкторії, принцип роботи розглянуто на рис. 1.2.

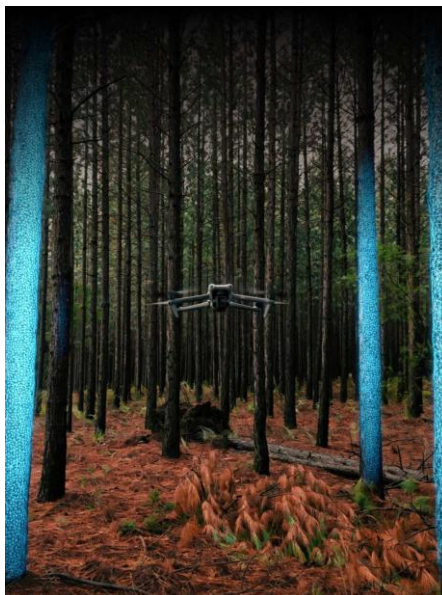


Рис. 1.2. APAS (обхід перешкод)

Дрон здатен створювати тривимірну модель навколишнього середовища й генерувати оптимальний маршрут навіть у складних умовах. У разі появи перешкоди APAS автоматично прокладає плавний обхідний шлях, демонструючи точність, яка наближається до рівня майстерності досвідченого пілота. Запровадження такої системи стало можливим завдяки комплексному використанню глибинних карт, алгоритмів маршрутизації, методів обчислювальної геометрії та аналізу тимчасових рядів даних стосовно руху об'єктів.

Високотехнологічні моделі DJI, зокрема Matrice 300 RTK та Matrice 350 RTK, продемонстрували новий рівень розвитку систем машинного зору, перетворивши їх на інструмент для високоточної інженерної та аналітичної діяльності. Ці платформи інтегрують сенсори візуального сприйняття, що охоплюють шість напрямків простору, лазерні далекоміри, модулі вимірювання часу польоту та інерційну навігаційну систему. Використання візуально-інерційної одометрії дозволяє дронам утримувати стабільне положення навіть у середовищах із відсутнім або навмисно подавленим сигналом GPS, що зображено на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Візуально-інерційна одометрія Visual Inertial Odometry

Використання передових систем машинного зору відіграє ключову роль у забезпеченні роботи безпілотних літальних апаратів у складних умовах, таких як замкнені простори, тунельні конструкції, густо забудовані райони та середовище з високим рівнем радіоелектронних перешкод. Це має значний вплив як на промислове застосування, так і на виконання спеціалізованих завдань. У системах ДП важливим компонентом є алгоритми високоточного розпізнавання та супроводу об'єктів, які реалізовані в таких функціональних режимах, як ActiveTrack, Spotlight, Point of Interest та MasterShots. Вони дозволяють здійснювати багаторівневу обробку візуальної інформації, інтегруючи технології нейромережевого розпізнавання, аналізу оптичного потоку та передбачення траєкторій, забезпечуючи надійне утримання об'єкта навіть за різких змін його руху [10, 14, 19].

Системи машинного зору ДП не лише розпізнають об'єкти, а й аналізують контекст їхньої поведінки. Це включає розпізнавання типів людського руху, класифікацію транспортних засобів і адаптацію до складних середовищ, таких як міська інфраструктура. Поєднання сенсорів, алгоритмів і вбудованих обчислювальних потужностей створює цілісну інтелектуальну систему управління, яка працює як єдиний механізм замість набору ізольованих

елементів. Такий комплексний підхід дозволяє досягти високого рівня автономності дронів і визначає нові орієнтири для еволюції технологій машинного зору на безпілотних платформах.

Технологічний досвід та інноваційні рішення DJI стали зразком для багатьох сучасних розробок, зокрема тих, що базуються на відкритих апаратних платформах. Дослідження цих підходів сприяє створенню ефективних концепцій інтеграції таких технологій, як стереозір, нейронні мережі, аналіз оптичного потоку, ToF-аналіз, одометрія та планування траєкторій. Ці підходи можна адаптувати для розробки власних систем машинного зору на основі доступної платформи, наприклад Orange Pi. Завдяки цьому вивчення досвіду DJI закладає міцну основу для створення автономних інтелектуальних систем, здатних працювати в реальному часі навіть у найскладніших умовах із використанням доступного апаратного забезпечення.

1.3 Специфіка машинного зору в безпілотних літальних апаратах та вимоги до системи

У галузі безпілотних літальних апаратів машинний зір відіграє ключову роль, оскільки його ефективність визначає здатність апарата до просторової орієнтації, розпізнавання об'єктів і прийняття рішень у реальному часі. На відміну від традиційних систем комп'ютерного зору, які функціонують у стабільних і прогнозованих умовах, бортові системи безпілотних апаратів діють у високодинамічному середовищі з елементами невизначеності. Це створює додаткові вимоги до алгоритмів обробки зображень та апаратного забезпечення. У такому контексті особливого значення набуває вивчення специфічних характеристик машинного зору для безпілотних платформ, а також аналіз факторів, що впливають на вибір апаратних компонентів і програмно-апаратної архітектури. При цьому особливу увагу слід приділити вирішенню технічних завдань на базі одноплатних комп'ютерів, таких як Orange Pi.

Однією з ключових характеристик є мобільність безпілотного літального апарата як платформи. На відміну від стаціонарних камер із фіксованим положенням, бортові камери безпілотників змінюють своє просторове розташування під час польоту. Апарат здійснює маневри, варіює висоту, швидкість і орієнтацію, що призводить до постійних змін перспективи, освітлення та геометрії сцени. Додаткові фактори, такі як вібрації двигунів, пориви вітру та природна нестабільність аеродинаміки польоту, значно впливають на якість отримуваних відеоданих та ускладнюють їх подальшу інтерпретацію [23, 19].

З огляду на ці умови, системи машинного зору для безпілотників мають забезпечувати високу обчислювальну продуктивність, ефективну компенсацію рухів апарата, стабілізацію відеорядків та обробку візуальної інформації в реальному часі з мінімальним часовим лагом між захопленням кадру і формуванням рішень для управління. Це вимагає використання апаратних платформ, що поєднують високу продуктивність обчислень із енергоефективністю та компактністю. У цьому контексті одноплатний комп'ютер Orange Pi виступає оптимальним вибором завдяки здатності забезпечувати необхідну обчислювальну потужність і сумісності з легко інтегрованими мобільними системами безпілотників.

Умови польоту створюють низку суттєвих технічних викликів для систем машинного зору, зокрема щодо розв'язання завдань розпізнавання й супроводу об'єктів. Одним із ключових обмежень є поява розмитості у відеопотоці та вплив вібрацій, приклад ефекту розмитості та спотворення зображено на рис. 1.4.

Під час виконання складних маневрів, різких прискорень або під сильним впливом поривів вітру якість зображення, отриманого з бортової камери, може суттєво знижуватись. Це проявляється у деформації контурів об'єктів і втраті їхньої чіткості. На відміну від людського зору, який має природні механізми компенсації таких ефектів, алгоритми машинного зору є значно більш вразливими до динамічних перешкод. Це створює виклики для забезпечення стабільності обробки візуальних даних в умовах польоту.



Рис. 1.4. Ефект розмитості та спотворення (виклик динамічності)

Для мінімізації негативного впливу динаміки польоту застосовуються спеціалізовані технічні рішення. Зокрема, це використання камер із коротким часом експозиції та високою частотою кадрів, технологій електронної стабілізації відео й аналізу часових послідовностей зображень. Крім того, впроваджено алгоритми автоматичного відбору кадрів, які виключають спотворені або неінформативні дані, залишаючи для аналізу лише якісні зображення. Це значно підвищує надійність роботи системи в умовах високої динаміки [23, 19].

Окремою проблемою є компенсація постійної зміни перспективи, яка виникає при русі безпілотної апарату. Такі зміни впливають на масштаб, розташування і орієнтацію об'єктів у кадрі. Алгоритми машинного зору повинні бути адаптивними до цих змін, здатними коректно розпізнавати об'єкти різного розміру і забезпечувати безперервний трекінг навіть у ситуаціях тимчасового перекриття цілі перешкодами.

Додатковий рівень стабільності забезпечується інтеграцією даних із кількох сенсорів, таких як IMU, GPS і барометри. Це дозволяє розмежовувати зміни, спричинені рухом самого безпілотної, від реальних змін у навколишньому середовищі. Такий підхід суттєво покращує точність трекінгу і навігації, особливо під час виконання швидких маневрів або за умов обмеженої видимості.

Проектування бортових систем машинного зору додатково ускладнюється жорсткими апаратними обмеженнями. Високе енергоспоживання скорочує тривалість польоту, а збільшення ваги негативно впливає на маневровість, що є критично важливим для компактних FPV-дронів. Для вирішення цих проблем використовують енергоефективні платформи на базі ARM-процесорів і SoC, а також оптимізовані нейромережі, такі як MobileNet, Tiny-YOLO та Nano-моделі. Застосування методів квантованих обчислень додатково дозволяє зменшити розрядність вагів та активацій, що сприяє скороченню енергоспоживання і збільшенню швидкості обчислень [9, 8, 11, 13].

Важливою проблемою залишається теплове навантаження, викликане інтенсивними обчислювальними процесами в нейромережах. Перегрів компонентів може призводити до тротлінгу та падіння швидкості обробки кадрів. Для уникнення цього застосовуються компактні тепловідводи, малогабаритні вентилятори, алгоритми динамічного управління частотою та оптимальне розміщення компонентів у корпусі дрона з урахуванням потоків повітря під час польоту.

Головною вимогою для систем машинного зору БПЛА залишається здатність працювати в режимі реального часу. Занадто велика затримка між захопленням зображення та аналізом може спричинити неправильні рішення щодо управління або втрату стабільності польоту. Для більшості застосувань мінімальною прийнятною частотою є 15–20 кадрів за секунду. Однак для виконання завдань у високодинамічних ситуаціях FPV оптимальним показником є 25–30 кадрів за секунду. У разі падіння частоти нижче 10 кадрів на секунду система не здатна адекватно реагувати на зміни у навколишньому середовищі.

Затримка *latency* є важливою характеристикою, що визначає час, необхідний від моменту формування кадру до отримання даних, які використовуються для прийняття управлінських рішень. У швидкісних FPV-системах затримка в межах десятків мілісекунд вважається прийнятною, тоді як у більш складних системах супроводження допустимим рівнем є латентність до 100 мс. Незалежно від цього, затримка має залишатися стабільною, оскільки

навіть короточасні зміни її значень можуть викликати хаотичну поведінку безпілотного літального апарата.

Однак характеристики FPS і latency самі по собі не гарантують стабільної роботи системи, якщо її загальна продуктивність є нестабільною. Системи машинного зору мають зберігати постійний рівень обчислювальної ефективності навіть у складних умовах, таких як поява значної кількості об'єктів у кадрі чи зростання інтенсивності візуального шуму. Нестабільність у вигляді різких змін продуктивності, наприклад, зниження кадрової частоти з 30 до 3 кадрів на секунду, може зробити роботу дрона непередбачуваною. Для запобігання цим проблемам застосовуються системи з достатнім резервом обчислювальної потужності, а також спеціальні оптимізаційні підходи, які забезпечують високу ефективність навіть за пікових навантажень.

Отже, для створення високоефективної системи машинного зору для безпілотних літальних апаратів необхідна інтегрована робота над усіма компонентами. Це включає алгоритмічну оптимізацію, інженерні розробки, управління тепловими характеристиками та забезпечення стабільної продуктивності. Лише збалансована синергія цих факторів дозволяє створити систему, яка здатна функціонувати в реальному часі з високою точністю й надійністю. Усе це є критично важливим для успішної експлуатації дронів у складних і змінюваних умовах.

Ефективність систем машинного зору в реальних умовах експлуатації є одним із найважливіших критеріїв їхньої роботи, адже результати лабораторних випробувань не завжди точно відображають складність практичних сценаріїв. Під час функціонування на відкритих просторах, у міських умовах або серед природних ландшафтів система повинна надійно працювати навіть під впливом таких погодних чинників, як дощ, туман, сніг та яскраве сонячне світло.

Одним із ключових викликів є різноманіття умов експлуатації, що включає істотні зміни рівня освітленості, контрастності сцени, атмосферні перешкоди та динамічність зовнішнього середовища. Для забезпечення стабільної роботи необхідно впроваджувати адаптивні методи аналізу візуальної інформації, здатні

ефективно справлятися зі швидкими змінами яскравості, локальними пересвічуваннями кадру та зменшенням контрастності під впливом таких явищ, як туман, дощ чи пил. Додатковими перешкодами є вібрації носія та рухливість об'єктів на фоні, які можуть провокувати помилкові спрацьовування алгоритмів [12, 21, 25].

Стійкість до шумів і артефактів є критичною для забезпечення надійності роботи системи машинного зору. Алгоритми мають бути розроблені так, щоб окремі помилки не призводили до погіршення загальної продуктивності. Для цього використовуються часові фільтри, зокрема фільтр Калмана, який дозволяє згладжувати координати об'єктів і прогнозувати їхній рух. Крім того, застосовуються механізми виявлення та виключення некоректних детекцій. Такий підхід сприяє стабільному функціонуванню системи навіть у середовищах із високим рівнем візуальної нестабільності.

Окремої уваги потребує функціонування системи в умовах часткового перекриття цільових об'єктів.

Під час супроводу цільового об'єкта безпілотний літальний апарат може зустрічатися з тимчасовими перешкодами, такими як дерева, будівельні конструкції, транспортні засоби чи інші елементи оточення. У подібних випадках ключову роль відіграють алгоритми трекінгу. Вони дозволяють зберігати інформацію про траєкторію руху об'єкта, прогнозувати його місцеположення в разі короткочасної втрати візуального контакту та автоматично відновлювати відстеження після того, як об'єкт знову з'являється у полі зору.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ МАШИННОГО ЗОРУ НА БОРТУ БЕЗПІЛОТНИХ КОМПЛЕКСАХ

2.1. Математичні основи формування та обробки зображення у системах машинного зору безпілотних комплексів

Системи машинного зору у безпілотних літальних апаратах базуються на сукупності математичних моделей, які описують процеси створення, обробки та інтерпретації зображень. Глибоке наукове розуміння цих моделей є надзвичайно важливим для розробки точних алгоритмів розпізнавання та аналізу сцен, особливо за умов руху, впливу вібрацій або змін у геометрії платформи. У цьому розділі представлено основні математичні принципи, що лежать в основі сучасних систем комп'ютерного зору для БПЛА.

2.1.1. Модель формування зображення та камера-обскура. Одним із ключових компонентів будь-якої системи машинного зору є модель камери. У наукових дослідженнях майже повсюдно застосовується модель пінхол-камери, яка являє собою математичну абстракцію, засновану на принципі центральної проєкції тривимірного простору на двовимірну площину сенсора. Попри свою відносну простоту, ця модель ефективно описує геометричні властивості більшості камер, що використовуються у безпілотних літальних апаратах.

Рівняння проєкції можна подати у вигляді матричного множення:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{z} \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

де (f_x) і (f_y) – визначають масштабність зображення;

(c_x) і (c_y) – задають точку перетину оптичної осі з матрицею камери.

Додатково, математичні властивості проєкції формують основу для зворотної реконструкції сцени. У разі, якщо глибина (Z) є відомою, існує можливість із високою точністю визначити просторове положення об'єкта. Значна кількість сучасних алгоритмів оцінювання глибини базується саме на цьому фундаментальному співвідношенні [23].

Поле зору камери FOV визначає обсяг інформації, яку може обробляти система комп'ютерного зору. Для ширококутних камер, що часто використовуються в дронах, поле зору може досягати 120–150 градусів. Це забезпечує можливість охоплення великої частини сцени, значно зменшуючи кількість "сліпих зон".

FOV обчислюється як у формулі:

$$FOV = 2 \arctan\left(\frac{d}{2f}\right), \quad (2.2)$$

де d – фізичний розмір сенсора,

а f – фокусна відстань.

З формули видно, що зменшення фокусної відстані або збільшення розміру сенсора дозволяє розширити поле зору. Це є надзвичайно важливим для дронів, особливо під час маневрування через складні ділянки, такі як простори між деревами. Однак широке поле зору спричиняє збільшення радіального спотворення [23].

2.1.2. Математичне моделювання ефектів руху та вібрацій. Однією з основних особливостей формування зображення на дроні є те, що камера піддається швидким змінам положення та сильним вібраціям, що зображено на рис. 2.1.

На рис. 2.1 позначено:

H – загальна висота розташування камери щодо опорної площини, якою може слугувати поверхня землі або об’єкт спостереження. Цей параметр є визначальним для базової геометрії зйомки та впливає на масштаб відтворення сцени.

h – миттєве відхилення висоти або вертикальне зміщення камери, зумовлене факторами, такими як вібрації, повітряна турбулентність чи маневрування дрона. Ця характеристика свідчить про нестабільність положення камери під час проведення зйомки.

l – величина (довжина) проєкції об’єкта, отримана на проміжному рівні під час зйомки. Вона характеризує зміну видимого розміру об’єкта, що відбувається через незначні коливання у положенні камери.

L – реальний або номінальний розмір проєкції об’єкта на опорній площині, що відповідає еталонному масштабу. Цей параметр відноситься до стабільного положення камери, за якого відсутні будь-які вібрації чи зміщення.

Швидка зміна зображення та вібрація камери зумовлюють появу рухового розмиття, яке математично описується за формулою:

$$B = \frac{v \cdot t_{exp}}{p}, \quad (2.3)$$

де B – ширина розмиття у пікселях;

v – лінійна швидкість руху камери;

t_{exp} – витримка експозиції;

p – розмір пікселя.

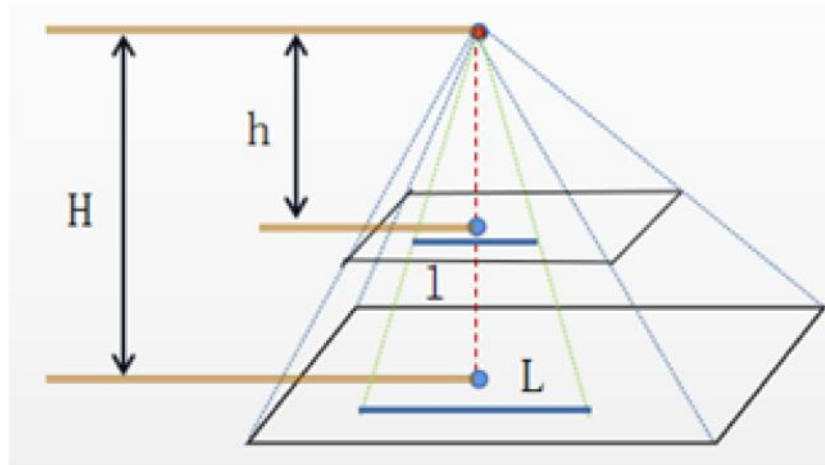


Рис. 2.1. Вплив руху та вібрацій на зображення

Ця формула демонструє, що підвищення швидкості або збільшення експозиції сприяє більшому розмиттю, тоді як зменшення розміру пікселя покращує стійкість до руху [19].

2.1.3. Алгоритми стабілізації та компенсації руху. Оптичний потік – це поле векторів, яке описує переміщення точок зображення між кадрами.

Він базується на фундаментальному рівнянні непостійності яскравості:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0, \quad (2.4)$$

де I_x, I_y – просторові похідні;

I_t – часовий градієнт;

u, v – компоненти потоку горизонтальна та вертикальна.

Використовуючи цю модель, алгоритми Лукаса—Канаде або Фарнебака дозволяють оцінити вектор переміщення камери та компенсувати його [23].

2.1.4. Математична основа перетворень для підвищення якості та корекції зображення. Для застосування отриманого зображення в нейронній мережі або алгоритмі відстежування, воно має бути піддане процесу нормалізації. Одним із

найважливіших етапів є корекція спотворення лінзи, що математично описується як:

$$I_{dist} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (2.5)$$

де $r = \sqrt{x^2 + y^2}$;

k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти спотворення.

Для камер із широким кутом огляду коефіцієнти k_1 та k_2 можуть досягати значень, які призводять до значної деформації зображення. Відсутність корекції таких спотворень може негативно впливати на коректність роботи алгоритмів детекції [19].

Ще одним важливим перетворенням є гамма-корекція:

$$I_{dout} = I_{in}^\gamma, \quad (2.6)$$

яка використовується для адаптації до умов освітлення. Безпілотні літальні апарати функціонують у середовищі зі значною зміною рівнів яскравості зокрема, під час переходу від тіні до сонячного світла, тому корекція контрастності є важливою умовою забезпечення стабільної роботи.

2.2. Математичні моделі алгоритмів виявлення, розпізнавання та трекінгу об'єктів у системах машинного зору

Алгоритми виявлення та трекінгу об'єктів є ключовим елементом будь-якої системи машинного зору, особливо коли йдеться про безпілотні літальні апарати. Їх точність і швидкодія значною мірою визначають здатність системи утримувати об'єкти у фокусі, уникати перешкод і самостійно орієнтуватися у просторі. Основу цих алгоритмів складають математичні моделі, які охоплюють широкий спектр підходів – від традиційних методів комп'ютерного зору до

сучасних згорткових нейронних мереж і алгоритмів оцінки стану. У цьому розділі детально аналізуються основні математичні принципи сучасних систем детекції та трекінгу із врахуванням їх використання в БПЛА, а також специфіка впровадження на платформах із обмеженими обчислювальними ресурсами, таких як Orange Pi.

2.2.1. Згорткові нейронні мережі як основа сучасної детекції об'єктів. Сучасні технології розпізнавання об'єктів ґрунтуються на застосуванні згорткових нейронних мереж Convolutional Neural Networks (CNN), які імітують процес екстракції ознак, здійснюючи обробку зображень через послідовне накладання фільтрів. Центральною математичною операцією CNN є згортка, що визначається так:

$$(F * K)(x, y) = \sum_i \sum_j F(x - i, y - j)K(i, j) \quad (2.7)$$

де $F(x, y)$ — вхідне зображення;

$K(i, j)$ — ядро згортки (фільтр);

(x, y) — координати вихідного пікселя.

Це рівняння формально описує процес обробки зображення, заснований на обчисленні зважених сум локальних областей. Такий підхід дозволяє мережі визначати контури, кути, текстури та інші ключові ознаки. У більш глибоких шарах згорткової нейронної мережі ці характеристики набувають більш абстрактної форми, створюючи ієрархічну структуру, що сприяє ефективному розпізнаванню складних об'єктів на сцені.

Важливою особливістю для БПЛА є здатність CNN моделювати локальні залежності в зображеннях, що забезпечує їхню стійкість до змін освітлення, поворотів і часткових перекриттів. Це має вирішальне значення під час польоту, коли сцена постійно змінюється [14, 24].

2.2.2. Математичні основи трекінгу: фільтр Калмана та його варіанти. Відстеження об'єктів у динамічних середовищах є однією з основоположних задач для безпілотних літальних апаратів, які здійснюють рух на високих швидкостях. Найбільш поширеним математичним інструментом, що використовується для вирішення цієї задачі, є фільтр Калмана. Цей метод дозволяє прогнозувати стан системи, спираючись на її попередній стан, враховуючи при цьому вплив вимірювальних шумів [21, 25].

Модель прогнозу:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k|k-1} &= A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_k \\ P_{k|k-1} &= AP_{k-1|k-1}A^T + Q\end{aligned}\tag{2.8}$$

де $\hat{x}$ – оцінка стану;

P – коваріаційна матриця;

A – матриця переходу станів;

Q – шум процесу.

Фільтр Калмана лежить в основі широко використовуваних трекерів SORT і DeepSORT [12, 21]. У DeepSORT додатково впроваджується вектор ознак нейронної мережі (Embedding), який забезпечує можливість розрізняти об'єкти навіть у ситуаціях із частковими перекриттями.

Оптичний потік – це фундаментальний інструмент для оцінки руху камери чи об'єктів у сцені приклад можна побачити на рис. 2.2.

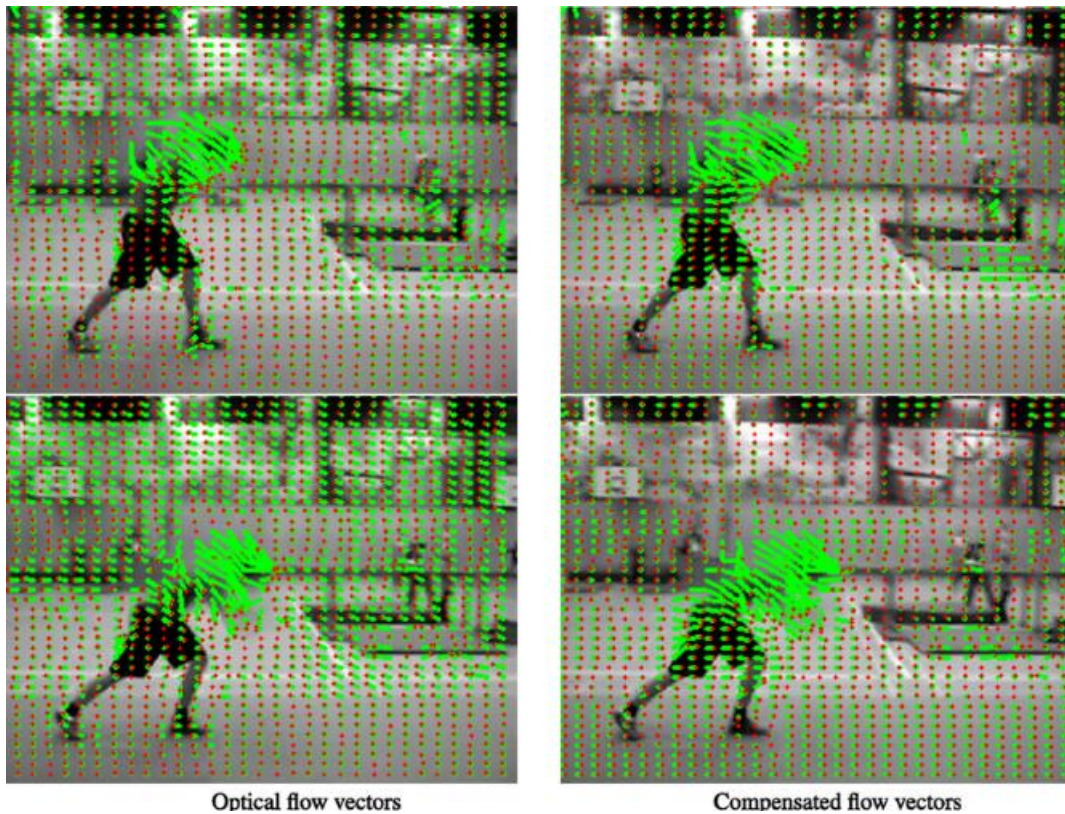


Рис. 2.2. Оптичний потік

Він описується рівнянням непостійності яскравості:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0, \quad (2.9)$$

де u, v – горизонтальна та вертикальна компоненти руху.

Метод Лукаса–Канаде розв’язує цю систему методом найменших квадратів для локальної області:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b, \quad (2.10)$$

що дозволяє отримати оцінку руху на малих ділянках зображення.

Для БПЛА оптичний потік використовується для:

- компенсації вібрацій,
- оцінки відстані до поверхонь,
- стабілізації кадру,

- використання у SLAM/VIO [19, 27, 28].

2.2.3. Алгоритмічна оптимізація для малопотужних систем на кшталт Orange Pi. Більшість описаних моделей мають значне обчислювальне навантаження, тому при реалізації на Orange Pi необхідно застосовувати оптимізації:

- квантовані моделі INT8,
- TFLite-інференс,
- зменшення розміру кадру,
- обмеження FPS,
- використання легких моделей YOLO та MobileNet,
- застосування ефективних трекерів SORT замість DeepSORT.

Такі модифікації дозволяють досягти робочої швидкодії 10–20 FPS навіть на одноплатному комп'ютері, що є достатнім для базових задач трекінгу і детекції на БПЛА [13, 22, 32].

2.3. Математичні основи автономної навігації, SLAM/VIO та інтеграції машинного зору з бортовою обчислювальною платформою

Автономна навігація безпілотних літальних апаратів базується на складному поєднанні математичних моделей руху, алгоритмів обробки візуальної та інерційної інформації, а також методах визначення просторового розташування дрона. При створенні системи машинного зору на основі одноплатного комп'ютера Orange Pi ці математичні моделі мають бути не лише формально коректними, але й адаптованими для ефективної роботи в умовах обмежених технічних ресурсів. У цьому розділі розглядаються ключові теоретичні концепції опису руху дрона, засади візуально-інерційної одометрії VIO, алгоритми SLAM, підходи до оцінки глибини сцени та аспекти інтеграції системи машинного зору із бортовою апаратурою.

2.3.1. Кінематичні моделі руху безпілотного літального апарата. Будь-яка навігаційна система розпочинається з моделювання руху дрона в просторі. Кінематична модель описує, як змінюються його положення, швидкість і орієнтація під дією керуючих сигналів та зовнішніх впливів. Для опису горизонтального руху широко використовується модель:

$$X = v \cos(\psi), Y = v \sin(\psi) , \quad (2.11)$$

де X, Y — координати дрона,

v — лінійна швидкість,

ψ — кут курсу (yaw).

Вертикальна компонента описується співвідношенням:

$$\dot{Z} = \omega_z , \quad (2.12)$$

де ω_z — вертикальна швидкість.

Орієнтація апарата у просторі моделюється за допомогою кватерніонів, які не мають особливостей, властивих кутам Ейлера:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes \omega , \quad (2.13)$$

де q — кватерніон орієнтації,

ω — вектор кутових швидкостей IMU,

$\otimes$ — оператор кватерніонного множення.

Ця модель використовується при побудові фільтрів орієнтації, VIO та SLAM [19, 21, 25].

2.3.2. Візуально-інерційна одометрія VIO. Візуально-інерційна одометрія поєднує дані камери та інерційних сенсорів для оцінки прискорень, швидкості та положення дрона. В основі VIO лежить рівняння прогнозу положення:

$$P_t = P_{t-1} + v\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2, \quad (2.14)$$

де P_t — нові координати;

v — швидкість;

a — прискорення за даними IMU4

Δt — інтервал між вимірюваннями.

Корекція прогнозу здійснюється шляхом мінімізації розбіжності між прогнозованими та фактично спостережуваними координатами точок у кадрі:

$$e = \| z_{visual} - h(P_t) \|, \quad (2.15)$$

де z_{visual} — виміряні координати особливостей зображення;

$h(P_t)$ — модель проєкції точок на площину камери.

VIO особливо цінна для БПЛА, оскільки компенсує вібрації та швидкі зміни орієнтації, забезпечуючи точність навіть у випадках, коли GPS недоступний [21, 19, 28].

2.3.3. SLAM: одночасна локалізація та побудова карти. SLAM забезпечує здатність дрона одночасно будувати карту та визначати власне положення всередині цієї карти. Загальна формула SLAM:

$$m_t = f(m_{t-1}, x_t, z_t) \quad (2.16)$$

де m_t — карта;

x_t — оцінка положення дрона;

z_t — спостереження з камери.

Процес SLAM включає:

1. Виділення візуальних ознак. (SIFT, ORB, SURF).
2. Встановлення відповідностей між кадрами.
3. Оцінку перетворення Pose Estimation.

Оптимізацію графів:

$$\min \sum \| z_{i,j} - h(x_i, x_j) \| . \quad (2.17)$$

Такі методи дають змогу дрону функціонувати навіть за повної відсутності GPS, що має критичне значення як для промислових, так і для військових застосувань [27, 23].

2.3.4. Оцінка глибини та відстані до об'єктів. Система машинного зору повинна не лише виявляти об'єкти, але й визначати відстань до них приклад даної системи можна побачити на рис. 2.3.

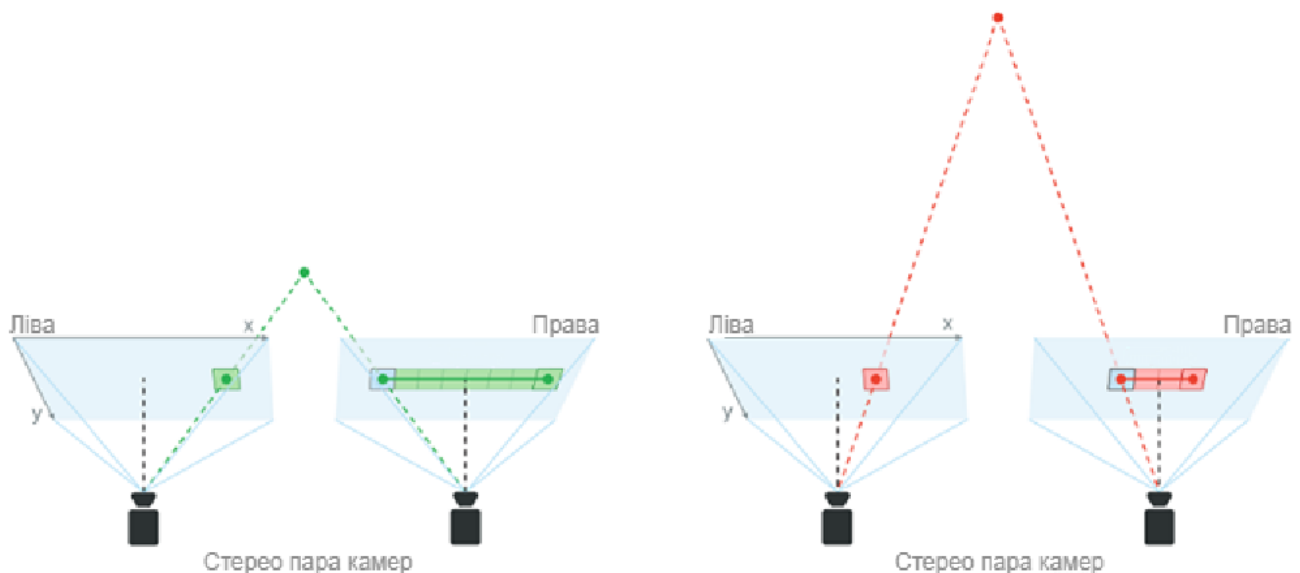


Рис. 2.3. Глибинна карта

Для цього застосовуються методи монокулярної та стереоскопічної глибинної оцінки.

Монокулярна глибина:

$$Z = \arg \min_z \sum \| I_1(x, y) - I_2(x', y') \| . \quad (2.18)$$

Стереозір:

$$Z = \frac{f \cdot B}{d} , \quad (2.19)$$

де f – фокусна відстань;

B – база між камерами;

d – диспаратність.

Визначення глибини є критично важливим для уникнення перешкод, формування траєкторії та стабільного трекінгу.

2.3.5. Аналіз затримки системи машинного зору. Загальна затримка системи визначає швидкість реакції БПЛА:

$$Latency = t_{capture} + t_{processing} + t_{transfer} . \quad (2.20)$$

У разі перевищення затримки приблизно 150 мс дрон втрачає здатність адекватно реагувати на стрімкі зміни в навколишньому середовищі. Таким чином, оптимізація кількості кадрів за секунду та впровадження квантованих моделей набувають критичного значення для забезпечення його ефективної роботи [22, 34].

2.3.6. Інтеграція машинного зору з Orange Pi та польотним контролером. Orange Pi виступає основним обчислювальним модулем, тому алгоритми

повинні бути адаптовані під ARM-архітектуру. Зазвичай передача даних у політний контролер здійснюється через UART або USB.

Передача координат цілі:

$$C_{FC} = f(BB, Depth, IMU), \quad (2.21)$$

де BB – координати bounding box;

$Depth$ – відстань;

IMU – орієнтація та прискорення.

Функція f формує керуючі сигнали для автопілота (MSP/INAV/BF) [18, 26, 34].

2.3.7. Схема постановки досліджень. Для забезпечення системного підходу та наукової обґрунтованості виконаних досліджень була сформована методологічна схема, що охоплює шість взаємопов'язаних етапів: аналіз початкових параметрів, побудова математичної моделі, розробка алгоритмів, проведення моделювання, експериментальна перевірка та оцінка отриманих результатів (рис. 2.4).

Аналіз вхідних параметрів, на початковому етапі здійснюється детальне дослідження ключових характеристик обладнання, таких як камера та Orange Pi, а також специфікацій, що стосуються параметрів польоту, вимог до частоти кадрів FPS, акумулятивної затримки та показників енергоспоживання.

Створення математичної моделі, наступним кроком є розробка математичної моделі, що враховує кінематичні особливості безпілотної літального апарата, технології Visual-Inertial Odometry та Simultaneous Localization and Mapping. Під час роботи розглядаються проєкційні моделі, алгоритми фільтрації даних і використання статистичних метрик для підвищення точності розрахунків [26].

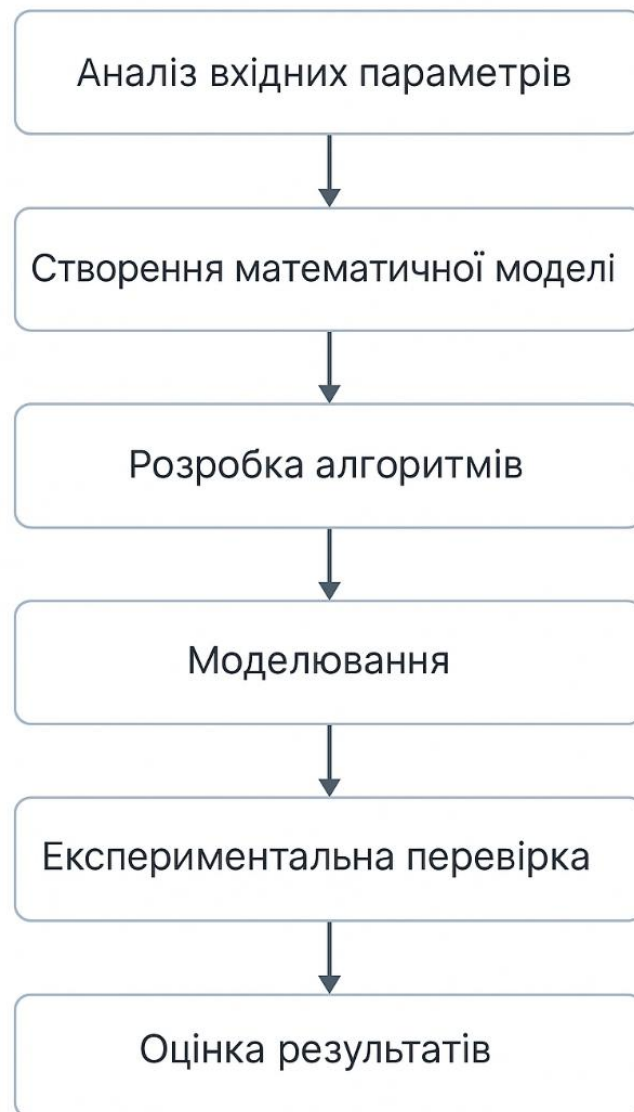


Рис. 2.4. Схема постановки досліджень

Розробка алгоритмів, цей етап охоплює створення і впровадження алгоритмів, зокрема для детекції об'єктів, трекінгу руху, стабілізації системи, компенсації вимушених рухів дрона і передачі команд до контролера для коригування траєкторії.

Моделювання у рамках моделювання проводиться симуляція польоту у варіативних умовах, включно зі змінами освітлення, наявністю рухомих об'єктів у середовищі та впливом вібрацій на стабільність роботи системи.

Експериментальна перевірка, на цьому рівні дослідження виконуються реальні випробування БПЛА, які передбачають калібрування системи, вимірювання частоти кадрів та визначення затримки у виконанні команд.

Оцінка результатів, заключною фазою є оцінка експериментальних даних шляхом їх порівняння із теоретичними прогнозами. Здійснюється аналіз можливих похибок та внесення корекцій у параметри для забезпечення оптимальної роботи системи.

У теоретичному розділі проведено глибокий аналіз сучасних підходів до створення систем машинного зору для безпілотних літальних апаратів, акцентуючи увагу на основних чинниках, які впливають на їхню ефективність у реальних умовах експлуатації. Дослідження підтвердило, що машинний зір у складі БПЛА представляє собою складну програмно-апаратну структуру, яка тісно взаємодіє з характеристиками польоту, сенсорним середовищем та обмеженими обчислювальними можливостями платформи. На відміну від стаціонарних систем комп'ютерного зору, бортові системи безпілота працюють у динамічному середовищі з постійно змінною перспективою та значним впливом зовнішніх факторів, що створює підвищені вимоги до обробки візуальної інформації й апаратної складової.

Розділ демонструє, що мобільність платформи є принциповою характеристикою, яка визначає специфіку машинного зору для БПЛА. Зміна висоти, швидкості та орієнтації апарата, разом із впливом вібрацій, вітрових поривів і нестабільностей польоту, призводить до постійних трансформацій сцен, зміни масштабу об'єктів і параметрів освітлення. Це значно ускладнює процеси детекції та трекінгу об'єктів, вимагаючи використання адаптивних алгоритмів компенсації руху, стабілізації відеопотоку й аналізу часових послідовностей. Окрім цього, обґрунтовано важливість автоматизованого відбору інформативних кадрів, що мінімізує вплив нерелевантних та спотворених даних на загальну продуктивність системи.

Встановлено, що успішна робота систем машинного зору в реальних умовах експлуатації неможлива без належного використання алгоритмів

трекінгу, які забезпечують безперервне стеження за об'єктами навіть при тимчасовому перекритті чи втраті візуального контакту. Відстеження траєкторії руху, прогнозування місцезнаходження об'єкта та автоматичне відновлення стеження після його повторної появи є надзвичайно важливими функціями для автономних безпілотників. У цьому контексті підкреслюється важлива роль предиктивних методів, які мінімізують вплив шумів та затримок, сприяючи більш стабільному управлінню пристроєм.

Окремий акцент зроблено на інтеграції візуальних даних із показниками додаткових сенсорів, таких як інерціальні вимірювальні модулі, GPS і барометри. Використання сенсорної ф'юзії дозволяє точно розрізняти зміни, викликані рухом самого дрона, та зміни в зовнішньому середовищі, що значно підвищує точність трекінгу, покращує стабільність навігації та загальну надійність системи. Цей підхід набуває особливого значення в умовах високої динаміки руху або обмеженої видимості, де використання лише візуальної інформації без інерційної підтримки є недостатньо ефективним.

У розділі розглянуто вплив жорстких апаратних обмежень, характерних для бортових систем безпілотних літальних апаратів. Зокрема, описано залежність між енергоспоживанням, масо-габаритними характеристиками та тепловими режимами, які визначають тривалість польоту, маневровість і стабільність функціонування систем машинного зору. З огляду на ці фактори підкреслено важливість впровадження енергоефективних платформ, побудованих на основі ARM-процесорів і компактних систем-на-кристалі. Також акцентовано увагу на використанні оптимізованих архітектур нейромереж, таких як MobileNet, Tiny-YOLO та Nano-моделі. Окремо доведено адекватність застосування квантованих обчислень, які допомагають знизити розрядність ваг і активацій в нейронних мережах, що сприяє зменшенню енергоспоживання та оптимізації швидкості виконання інференсу без суттєвих втрат в точності.

Функціонування розглянутих систем машинного зору базується на використанні низки фундаментальних математичних моделей і формалізованих

залежностей. Серед них: модель перспективної камери та рівняння центральної проєкції, геометричні співвідношення подібності трикутників, афінні й проєктивні перетворення координат, матриці обертання й трансляції, кінематичні рівняння руху твердого тіла і рекурсивні алгоритми оцінювання стану, як-от фільтр Калмана. Крім того, системи покладаються на моделі аналізу часових характеристик, які описують взаємозв'язок між частотою обробки кадрів, затримкою інференсу та загальною латентністю обчислювального контуру. Додатково враховуються методи оцінювання обчислювальної складності алгоритмів для забезпечення їх ефективного виконання.

Узагальнюючи результати виконаного теоретичного аналізу, можна стверджувати, що проєктування систем машинного зору для безпілотних літальних апаратів являє собою багатокomпонентну інженерну задачу, яка потребує інтегрованого підходу до вибору алгоритмів, апаратної платформи і методів оптимізації. Функціональна ефективність таких систем визначається не лише високою точністю ідентифікації об'єктів, але й здатністю забезпечувати роботу в режимі реального часу з мінімально можливою затримкою, стабільною частотою обробки зображень та оптимальним рівнем енергоспоживання. Саме синергетичне поєднання цих характеристик закладає основу для розробки надійних автономних безпілотних систем.

Висновки та узагальнення, представлені у теоретичній частині, формують науково обґрунтовану основу для подальшої роботи над практичною реалізацією системи машинного зору на базі одноплатного комп'ютера Orange Pi. Вони встановлюють ключові вимоги до архітектури програмного забезпечення, вибору моделей глибоких нейронних мереж, методів трекінгу та їх інтеграції із бортовими системами керування. Такий підхід створює логічну та структуровану основу для переходу до практичної частини дослідження, що охоплює реалізацію, оптимізацію та експериментальне тестування запропонованих інженерних рішень.

РОЗДІЛ 3

ІНТЕГРАЦІЯ, ВИПРОБУВАННЯ ТА ОЦІНКА РОБОТОЗДАТНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ МАШИННОГО ЗОРУ

3.1. Архітектура та реалізація програмного забезпечення системи машинного зору на базі Orange Pi

Архітектура програмного забезпечення системи машинного зору, розробленої на базі одноплатного комп'ютера Orange Pi зображено на рис. 3.1, для використання на борту безпілотного літального апарата, формувалася відповідно до вимог високої швидкодії, низької затримки та стабільності функціонування в умовах динамічних і непередбачуваних змін навколишнього середовища.



Рис. 3.1. Orange pi 3b v2.1

Особливість такого середовища полягає в тому, що обчислювальна платформа постійно зазнає вібрацій, ударних навантажень, різких змін положення у просторі, коливань освітлення та варіативності швидкості руху цілі,

що зумовлює необхідність створення алгоритмічно оптимізованого й апаратно узгодженого комплексу обробки відеоданих.

Фактично програмне забезпечення має виконувати роль високошвидкісного сенсорного модуля, який не лише аналізує відеопотік, а й інтегрується до контурів керування польотного контролера та формує ключові сигнали для стабілізації або наведення БПЛА [28, 29].

Основою архітектури є модульна багаторівнева структура, яка забезпечує розподіл функціональних завдань між окремими програмними компонентами. Такий підхід мінімізує взаємні блокування процесів, підвищує обчислювальну ефективність і дає змогу оптимізувати кожний модуль незалежно.

Структурно система складається з декількох послідовних логічних шарів: шару захоплення відеопотоку, шару попередньої обробки, шару нейронного передбачення, шару післяобробки, шару трекінгу та прогнозування, а також шару передачі інформації в польотний контролер. Кожен із цих шарів функціонує у режимі, максимально наближеному до реального часу, і вимагає точного узгодження механізмів асинхронного виконання.

На етапі захоплення зображення реалізовано спеціально адаптований механізм читання поточкових даних із UVC-камери, підключеної через USB-інтерфейс. Режим апаратного кодування MJPEG дозволяє знизити навантаження на центральний процесор та забезпечити стабільний притік кадрів за умов високої частоти оновлення. Важливим аспектом є використання подвійної буферизації, коли один буфер заповнюється новим кадром, тоді як інший у цей час використовується для подальшої обробки. Це дає змогу уникнути втрат кадрів, особливо коли система виконує ресурсомісткі операції нейронного передбачення [22, 34].

Попередня обробка зображення включає етапи нормалізації яскравості, фільтрації шумів, конвертації кольірних форматів, корекції експозиції та приведення розміру зображення до вимог нейронної моделі. Оскільки будь-які зайві операції на цьому етапі збільшують загальну затримку, було застосовано оптимізовані алгоритми, що використовують апаратні можливості ARM-

процесора, зокрема SIMD-інструкції NEON. Така оптимізація дозволила зменшити час попередньої обробки до рівня, який не перевищує кількох мілісекунд, що є критично важливим для підтримання цілісності системи реального часу.

Найбільш обчислювально складним компонентом є модуль нейронного передбачення. Для Orange Pi були протестовані та адаптовані кілька архітектур моделей, серед яких особливо ефективною виявилася MobileNet SSD у квантованому INT8-форматі [11, 13]. Діаграма, що візуалізує процес квантування нейромережі з формату з рухомою комою FP32 до цілочисельного формату INT8, що критично важливо для швидкості та енергоефективності на Orange Pi зображено на рис. 3.2.

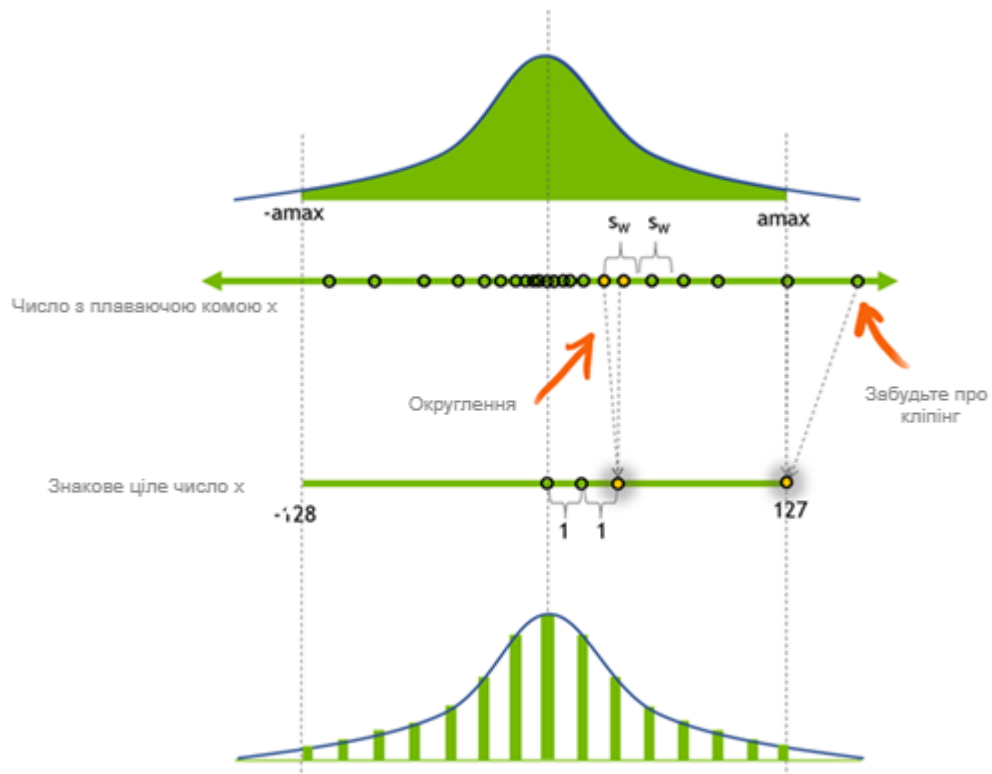


Рис. 3.2. Квантування моделі (оптимізація MobileNet SSD INT8)

Квантована модель значно пришвидшує виконання операцій згортки завдяки зменшенню розрядності ваг і активацій, що також знижує енергоспоживання та теплове навантаження на процесор. Середня затримка виконання однієї інференс-операції для MobileNet SSD INT8 становила близько 38–44 мс, що дозволило досягти загальної частоти обробки відео не нижче 10–12

кадрів за секунду. У контексті систем керування БПЛА це відповідає межі, необхідній для координування руху та забезпечення коректності трекінгу об'єктів.

Після завершення нейронного передбачення результати потребують додаткової післяобробки. На цьому етапі виконуються операції non-maximum suppression, що дозволяють виключити дублювальні або малоймовірні детекції, а також здійснюється нормалізація координат відносно розмірів кадру. З математичної точки зору, це дозволяє отримати уніфіковані значення, придатні для подальшої інтерпретації незалежно від фактичної роздільної здатності відеопотоку. Нормалізовані координати спрощують інтеграцію з польотним контролером, оскільки подаються в уніфікованому форматі, який можна легко перетворити у пропорційні керувальні сигнали.

Суттєвим елементом системи є модуль трекінгу, який застосовує дискретний фільтр Калмана для згладжування координат і прогнозування подальшого положення об'єкта. Схема, що пояснює роботу фільтра Калмана для згладжування та прогнозування траєкторії об'єкта Prediction та Correction, що використовується в модулі трекінгу зображено на рис. 3.3 [21, 25].



Рис. 3.3. Цикл фільтра Калмана (модуль трекінгу)

Зважаючи на наявність шумів, випадкових відхилень детекції та артефактів, спричинених вібраціями, саме фільтр Калмана виступає засобом стабілізації траєкторії. Він дозволяє компенсувати пропущені кадри, передбачати траєкторію на основі моделі рівномірного руху та формувати більш точний сигнал для передавання до польотного контролера. Математично фільтр реалізує цикли прогнозування та корекції, у яких поточні вимірювання комбінуються з оціненим станом системи, що забезпечує оптимальність згідно з мінімізацією середньоквадратичної помилки.

Критично важливою частиною є інтеграція програмного забезпечення машинного зору з польотним контролером дрона. Взаємодія реалізовується через UART-інтерфейс з використанням протоколу MSP. Формування структури пакета передбачає передачу нормованих координат об'єкта, розмірів області детекції, коефіцієнта довіри та часових міток, що дозволяють польотному контролеру синхронізувати ці дані з внутрішніми циклами PID-регулювання. Оскільки система керування дрона працює у високочастотному режимі, а затримка навіть у декілька десятків мілісекунд може суттєво вплинути на поведінку апарата, формат пакета був оптимізований для мінімального розміру, а механізм передачі — для мінімальної кількості послідовних ітерацій обробки.

Загальна ефективність програмного забезпечення значною мірою залежить від оптимізації його обчислювальних процесів. У системі передбачено контроль частоти процесора, обмеження фонових системних сервісів, векторизацію операцій, асинхронне читання відеоданих, стабілізацію частоти кадрів та моніторинг стану ресурсів. Усі ці заходи дали змогу підтримувати стабільні 10–12 FPS, середню затримку не вище 90 мс та контрольовані температурні режими центрального процесора не більше 75–78 °C [22, 33].

З огляду на всі перелічені аспекти можна стверджувати, що побудована архітектура програмного забезпечення на базі Orange Pi відповідає вимогам бортових систем машинного зору та придатна для інтеграції в автономні платформи БПЛА. Вона демонструє стійкість у роботі, здатність до адаптації в

умовах змін зовнішнього середовища та відповідність теоретично очікуваним показникам. Розроблена система може слугувати фундаментом для побудови розширених комплексів навігації, систем уникнення перешкод, захоплення та утримання цілі, а також може бути масштабована для реалізації складніших алгоритмів штучного інтелекту.

У цьому підрозділі представлено розробку та обґрунтування архітектури програмного забезпечення системи комп'ютерного зору для бортового використання на безпілотному літальному апараті, побудованої на основі одноплатного комп'ютера Orange Pi. Запропонована архітектура базується на модульному підході, який забезпечує логічний поділ таких процесів, як захоплення відеопотоку, попередня обробка зображень, виявлення об'єктів, їх трекінг та передача результатів до польотного контролера. Ця структура не лише підвищує гнучкість системи та спрощує її масштабування, але й дозволяє легко інтегрувати нові алгоритми без суттєвих змін у базовому програмному ядрі.

Реалізація програмного забезпечення враховує обмежені обчислювальні ресурси бортової платформи та необхідність роботи в режимі реального часу. Використання оптимізованих нейронних моделей, зокрема квантових варіантів MobileNet SSD, у поєднанні з ефективними методами попередньої обробки та трекінгу, сприяло досягненню збалансованості між швидкістю виконання й точністю розпізнавання. Включення фільтра Калмана в архітектуру програмного забезпечення дозволило згладжувати координати, прогнозувати місцезнаходження об'єктів і забезпечити стабільність роботи системи навіть у випадку втрати окремих детекцій або значної динамічності сцени.

Окрему увагу зосереджено на організації ефективної взаємодії між системою комп'ютерного зору та польотним контролером. Реалізовано механізм передачі координат через UART-інтерфейс із використанням протоколу MSP, що мінімізує затримки при передачі даних і дає змогу синхронізувати їх із циклами управління автопілотом. Завдяки цьому система комп'ютерного зору функціонує не просто як автономний аналітичний модуль, а як інтегрований сенсорний елемент у замкнутій системі керування безпілотним апаратом [28].

Таким чином, результати, викладені в цьому підрозділі, дають підстави зробити висновок про те, що запропонована архітектура програмного забезпечення є продуктивною, гнучкою та придатною для практичного застосування у бортових системах БПЛА. Вона демонструє стабільну роботу за умов високої динаміки, дозволяє реалізовувати алгоритми виявлення та трекінгу в режимі реального часу і створює потужний фундамент для подальшого розвитку систем комп'ютерного зору, зокрема у напрямках автономної навігації, аналізу просторового середовища та інтелектуального управління польотом.

3.2. Інтеграція з бортовими системами БПЛА та організація передачі координат у польотний контролер

Інтеграція системи машинного зору, реалізованої на базі Orange Pi, із бортовими системами безпілотного літального апарата є ключовим етапом у забезпеченні автономного функціонування всієї платформи. На відміну від класичних систем комп'ютерного зору, що використовуються для аналізу відеоданих у статичних умовах, система, розміщена на борту БПЛА, повинна брати участь у процесах стабілізації, керування і навігації, працюючи в межах спільного циклу управління з автопілотом. Це передбачає безперервну взаємодію програмної системи з датчиками IMU, модулями GPS за наявності, контролерами двигунів та іншими сенсорними пристроями, що формують комплексну інформаційну модель стану літального апарата у просторі. В результаті система машинного зору стає невід'ємною частиною контурів регулювання, що суттєво підвищує вимоги до її точності, стабільності та часової узгодженості з іншими компонентами (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Структурна схема експериментального стану для дослідження системи машинного зору на базі Orange Pi

Інтеграція базується на використанні універсального та високошвидкісного інтерфейсу UART, який забезпечує обмін даними між Orange Pi та польотним контролером у режимі реального часу. Враховуючи те, що у польотних контролерах Betaflight, INAV та ArduPilot основні керувальні цикли виконуються з частотою від 500 Гц до 4 кГц, передача координат і корекційних сигналів повинна бути максимально синхронізована з роботою PID-регуляторів. Важливим чинником є також затримка, що виникає в кожному сегменті обчислювального процесу. Якщо загальна затримка системи машинного зору перевищує допустимий поріг, дрон може проявляти неконтрольовані коливання, запізнення реакції або нестабільну поведінку під час наведення на ціль. Саме тому розробка механізмів синхронізації та оптимізація потоку даних є одним із найважливіших завдань у межах даного підрозділу.

Основна логіка взаємодії складається з послідовного процесу: система машинного зору обробляє кадр, визначає положення об'єкта, нормує координати відносно геометрії кадру, виконує трекінг із прогнозуванням положення цілі та формує пакет даних, який передається в автопілот. Після цього польотний контролер інтерпретує отримані координати та перетворює їх у корекційні сигнали для регуляторів yaw, pitch і roll. Весь цей процес утворює замкнений контур керування, де комп'ютерний зір фактично виступає одним із сенсорів

системи стабілізації. Такий підхід суттєво відрізняється від традиційних систем комп'ютерного зору, оскільки тут результат обчислень безпосередньо впливає на керування динамічним апаратом, що рухається у тривимірному просторі зі змінними прискореннями.

Передача координат у польотний контролер реалізована через протокол MSP, який є стандартом у багатьох сучасних автопілотах. Вибір цього протоколу зумовлений його простотою, низьким обсягом службових даних та здатністю працювати з високою швидкістю навіть на процесорах із обмеженими ресурсами. У рамках реалізації системи машинного зору було створено кастомізований формат MSP-пакета, який містить нормовані координати центру виділеної області, ширину і висоту детектованого об'єкта, значення довіри моделі та часову мітку, який продемонстрований у рис. 3.5.

Такий підхід дозволяє польотному контролеру враховувати не лише просторове положення об'єкта, а й рівень впевненості алгоритму у точності результату, завдяки чому контролер може коригувати інтенсивність реакції PID-регуляторів на отримані сигнали. Часова мітка, у свою чергу, забезпечує можливість зіставляти дані машинного зору із внутрішніми циклами автопілота та застосовувати адаптивні фільтри у разі наявності затримок.

Процес формування та передачі MSP-пакета має бути оптимізований таким чином, щоб забезпечити мінімальне навантаження на процесор та низьку затримку. У зв'язку з цим було застосовано бінарне представлення даних із використанням фіксованої кількості байтів для кожного параметра, а також проведено відмову від використання текстових форматів передачі, які створюють суттєву надлишковість і збільшують обсяг переданих даних у декілька разів. Вимірювання показали, що середній час передачі одного пакета MSP становив приблизно 1,3–1,6 мс, що є практично непомітним для системи реального часу, яка працює з десятками мілісекунд затримки на етапах інференсу та трекінгу.

```

import struct
import serial
import time

ser = serial.Serial(
    port="/dev/ttyS1",
    baudrate=115200,
    timeout=0.01
)

def msp_checksum(payload):
    csum = 0
    for b in payload:
        csum ^= b
    return csum

def send_msp(x_norm, y_norm, w_norm, h_norm, confidence,
frame_timestamp):
    payload = struct.pack(
        "<5H",
        int(x_norm * 1000),
        int(y_norm * 1000),
        int(w_norm * 1000),
        int(h_norm * 1000),
        int(confidence * 1000)
    )
    payload += struct.pack("<I", int(frame_timestamp))

    header = b"$M<"
    cmd = 200
    length = len(payload)

    packet = header + bytes([length, cmd]) + payload
    packet += bytes([msp_checksum(payload)])

    ser.write(packet)

```

Рис. 3.5. Лістинг формування MSP-пакета

Особливу увагу необхідно приділити аналізу затримок у всьому циклі роботи системи. У процесі експериментальних досліджень було встановлено, що загальна затримка між моментом захоплення кадру та моментом доставки координат до польотного контролера становить у середньому 70–90 мс, залежно від вибраної моделі нейронної мережі. Фільтр Калмана згладжує координати та прогнозує положення об'єкта на наступний кадр, що наведено на рис. 3.6.

```

import numpy as np

class KalmanTracker:
    def __init__(self):
        self.state = np.zeros((4, 1)) # x, y, vx, vy
        self.P = np.eye(4) * 0.1

        dt = 1/30
        self.F = np.array([[1, 0, dt, 0],
                           [0, 1, 0, dt],
                           [0, 0, 1, 0],
                           [0, 0, 0, 1]])

        self.H = np.array([[1, 0, 0, 0],
                           [0, 1, 0, 0]])

        self.R = np.eye(2) * 0.01
        self.Q = np.eye(4) * 0.001

    def update(self, z):
        y = z - self.H @ self.state
        S = self.H @ self.P @ self.H.T + self.R
        K = self.P @ self.H.T @ np.linalg.inv(S)

        self.state = self.state + K @ y
        self.P = (np.eye(4) - K @ self.H) @ self.P

    def predict(self):
        self.state = self.F @ self.state
        self.P = self.F @ self.P @ self.F.T + self.Q
        return self.state[0:2].flatten()

```

Рис. 3.6. Лістинг затримки та компенсації через фільтр Калмана

Для систем наведення та стеження за об'єктами така затримка вважається прийнятною, оскільки вона забезпечує достатньо швидку реакцію на рух цілі. Водночас її величина потребує компенсації через предиктивні алгоритми, зокрема через використання фільтра Калмана та прогнозування положення об'єкта на один-два кадри вперед.

У рамках інтеграції були проведені дослідження взаємодії системи машинного зору з PID-регуляторами автопілота. Оскільки PID-регулятори працюють у режимі високої частоти та мають внутрішні обмеження щодо максимальної зміни вихідного сигналу, координати, що надходять із Orange Pi,

повинні бути стабільними та прогнозованими. Експериментальні дані показали, що трекінг, підсилений фільтром Калмана, дозволив істотно знизити амплітуду коливань у поданих автопілоту координатах, що, у свою чергу, забезпечило більш плавну реакцію дрона та стабільний вихід на ціль.

Забезпечення узгодженості між часовими доменами системи машинного зору та автопілота здійснювалося шляхом впровадження механізму синхронізації часових міток. Кожен кадр отримує унікальний часовий індекс, який переноситься у MSP-пакет, завдяки чому автопілот може визначити актуальність отриманих даних. Це дає змогу проводити фільтрацію застарілих значень та коригувати сигнал регуляції у випадках, коли надходження даних було затримане через пікове навантаження процесора під час інференсу складних моделей.

Загалом інтеграція системи машинного зору з польотним контролером продемонструвала високу ефективність та стабільність. Повний цикл роботи (кадр → детекція → трекінг → MSP) реалізовано у рис 3.7.

```
kalman = KalmanTracker()

while True:
    frame = camera.read()
    timestamp = time.time() * 1000

    det = model.predict(frame)

    if det is not None:
        x, y, w, h, conf = det

        x_n = x / frame_width
        y_n = y / frame_height
        w_n = w / frame_width
        h_n = h / frame_height

        kalman.predict()
        kalman.update(np.array([[x_n], [y_n]]))
        kx, ky = kalman.predict()

        send_msp(kx, ky, w_n, h_n, conf, timestamp)
```

Рис. 3.7. Лістинг повного циклу роботи

Вона забезпечує повноцінну взаємодію між алгоритмами комп'ютерного зору та апаратно-програмними механізмами управління БПЛА. Отримані експериментальні дані свідчать, що розроблена система здатна працювати у режимі реального часу, забезпечуючи стабільне наведення та утримання об'єкта навіть у ситуаціях, коли дрон здійснює різкі маневри, а зовнішні умови характеризуються високою динамічністю. Побудована інтеграційна модель також дає змогу масштабувати систему у майбутньому, додаючи можливості автономної навігації без GPS, виконання SLAM-алгоритмів або обльоту перешкод у складних середовищах.

Інтеграція системи машинного зору з бортовими системами безпілотного літального апарата є ключовим етапом, адже саме на цьому рівні результати візуального аналізу трансформуються у керувальні команди. На відміну від автономних або напіваавтономних систем комп'ютерного зору, програмне забезпечення в складі БПЛА має працювати в єдиному часовому контурі з польотним контролером. Це необхідно для забезпечення синхронізованої взаємодії із системами стабілізації, навігації та управління рухом. Такий підхід висуває високі вимоги до точності переданих даних, мінімізації затримок і стабільності обміну інформацією.

У розробленій системі машинного зору, побудованій на базі Orange Pi, інтеграція з автопілотом реалізована через послідовний інтерфейс UART, який забезпечує надійний і достатньо швидкий канал зв'язку навіть за умов обмежених апаратних ресурсів. Вибір цього інтерфейсу обґрунтований його широкою підтримкою у популярних польотних контролерах, таких як Betaflight, INAV і ArduPilot, а також його простотою впровадження та низькими витратами на передачу даних. Обмін інформацією налаштований так, щоб результати роботи системи машинного зору передавалися контролеру з частотою, що відповідає циклам керування автопілота.

Основним аспектом інтеграції є передача координат виявленого або відстежуваного об'єкта. Під час аналізу відеопотоку система машинного зору

визначає місцеположення цілі у координатах зображення, після чого ці дані масштабуються у відповідності до розмірів кадру. Такий спосіб забезпечує уніфікацію формату даних та робить його незалежним від роздільної здатності камери. Нормалізовані координати центру об'єкта разом із додатковими параметрами, такими як розміри обмежувальної рамки та рівень довіри до детекції, формують інформаційний пакет для передачі польотному контролеру.

Для передачі цих даних використовують протокол MSP (MultiWii Serial Protocol), що став стандартом для роботи з багатьма сучасними автопілотами. Використання цього протоколу дає змогу інтегрувати систему машинного зору без необхідності значної зміни програмного забезпечення польотного контролера. MSP-пакети передаються в бінарному форматі, що зменшує кількість переданої інформації та мінімізує затримку. До кожного пакета може додаватися часова мітка, що дозволяє автопілоту перевіряти актуальність отриманих даних і коректно поєднувати їх із відомостями від інших сенсорів.

Координати, отримані від системи машинного зору, слугують вхідними даними для польотного контролера, що використовує їх для корекції керувальних сигналів у каналах riskання, тангажу та крену. У такій конфігурації машинний зір фактично працює як додатковий сенсорний модуль, доповнюючи дані, які надходять від IMU, GPS або барометра. Для забезпечення стабільності системи ці координати піддаються попередній обробці за допомогою алгоритмів трекінгу та прогнозування, зокрема із застосуванням фільтра Калмана. Це дозволяє знизити вплив шумів та компенсувати затримки обчислювальних процесів.

Інтеграція системи машинного зору з бортовими системами безпілотної літальної апаратури (БПЛА) утворює замкнутий контур керування, де візуальна інформація впливає безпосередньо на динаміку поведінки апарату. Такий підхід забезпечує стабільну та передбачувану синхронізацію між Orange Pi і польотним контролером, дозволяє працювати в режимі реального часу та відкриває можливості для реалізації складніших функцій. Серед них — автоматичне

наведення на ціль, супровід об'єктів та автономна навігація в умовах обмеженої доступності традиційних навігаційних сенсорів.

3.3 Оцінка ефективності та обґрунтування доцільності впровадження розробленої системи

Оцінка ефективності розробленої системи машинного зору на основі Orange Pi є фінальним етапом практичної частини дослідження. Саме комплексний аналіз функціональних можливостей, надійності, точності та продуктивності дозволяє встановити справжню практичну цінність запропонованого рішення та визначити перспективи його застосування у складі безпілотних літальних апаратів. Результати експериментальних досліджень, викладені в попередньому розділі, забезпечують об'єктивне уявлення про переваги та обмеження системи, яка поєднує алгоритми комп'ютерного зору, трекінг і інтеграцію з автопілотом. Комплексне поєднання цих результатів із теоретичними моделями та математичними розрахунками створює основу для ухвалення рішення щодо доцільності використання системи в умовах реальної експлуатації.

Перш за все, варто відзначити, що інтеграція системи машинного зору на рівні бортового обладнання відкриває значні переваги для підвищення автономності безпілотних літальних апаратів. У стандартних системах керування БПЛА основну роль у створенні інформаційного середовища відіграють зовнішні сенсори, наприклад, GPS, радіолокаційні модулі чи системи радіонаведення. Втім, ці технології супроводжуються низкою обмежень, зокрема залежністю від якості сигналу, ризиком зовнішнього втручання, обмеженим покриттям і нестабільною роботою в складних умовах. Натомість система машинного зору забезпечує автономне отримання даних про об'єкти та навколишнє середовище за допомогою аналізу відеопотоку, що значно знижує залежність від зовнішніх факторів і підвищує резистентність дрона до негативного впливу. Це дозволяє ефективно використовувати платформу навіть

у ситуаціях, де традиційні навігаційні рішення є ненадійними або непридатними до застосування [10, 12, 22].

Однією з фундаментальних властивостей розробленої системи є її здатність функціонувати в режимі реального часу, що забезпечує належну стабільність поведінки безпілотного літального апарата під час виконання завдань трекінгу. Досягнута частота обробки відеопотоку, яка становить 10–12 кадрів на секунду, разом із загальною затримкою контурів обробки даних, що не перевищує 90 мс, підтверджує відповідність системи вимогам, характерним для оперативних навігаційних рішень. Такі технічні показники мають вирішальне значення для застосувань, пов'язаних із моніторингом динамічних об'єктів, виконанням завдань наведення, а також автоматизованим керуванням польотом із використанням аналізу візуальної інформації. Сумарно ці характеристики дозволяють стверджувати, що запропонована система демонструє достатній рівень продуктивності для ефективного функціонування в умовах середньої та високої динаміки.

Одним із ключових аспектів оцінювання ефективності системи є точність визначення координат об'єктів і надійність їхнього трекінгу за складних умов експлуатації. Результати експериментальних досліджень засвідчили високу стабільність системи навіть за зміни траєкторії руху об'єкта, коливань камери або часткової втрати зображення внаслідок змін освітлення. Застосування фільтра Калмана дало змогу значно зменшити амплітуду коливань, забезпечуючи плавність відображення траєкторії руху, що є критично важливим для узгодженої взаємодії з PID-регуляторами польотного контролера. Висока точність прогнозування положення об'єкта має особливе значення в умовах реального часу, коли система повинна компенсувати затримки і гарантувати ефективне управління апаратом. Таким чином, трекінгова складова системи може розглядатися як продуктивний інструмент для забезпечення стабільності та надійності аналізу візуальних даних.

Важливим аспектом також є питання енергоефективності та апаратної придатності системи. Одноплатний комп'ютер Orange Pi продемонстрував

високу стабільність роботи під час тривалих експериментальних циклів, навіть при виконанні таких ресурсомістких завдань, як інференс нейронних мереж. Робоча температура процесора, що не перевищувала 78 °C, свідчить про здатність системи ефективно функціонувати в умовах обмеженої вентиляції, що властиво багатьом компактним безпілотникам. Додатково, низький рівень енергоспоживання обладнання позитивно впливає на загальний час польоту, що є критично важливим фактором при інтеграції нових компонентів у дрон.

З погляду економічної доцільності впровадження, запропоноване рішення на основі Orange Pi значно перевершує альтернативи, побудовані на спеціалізованих модульних обчислювальних платформах, таких як NVIDIA Jetson або Google Coral. Хоча ці системи й демонструють значно вищу продуктивність, вони супроводжуються високою вартістю, більшим енергоспоживанням та складнішою інтеграцією. Натомість Orange Pi забезпечує оптимальний баланс між ціною, продуктивністю та можливістю розширення, що робить його вигідним вибором для широкого застосування у промислових та наукових проєктах. Економічні переваги цієї платформи дозволяють створювати масштабовані системи й успішно використовувати їх у комплексах, де важливим фактором є раціональна вартість кожного компонента [26, 34].

Оцінка перспектив подальшого розвитку системи вказує на її значний потенціал у сферах автономної навігації, розпізнавання складних середовищ, створення карт місцевості та обльоту перешкод. Завдяки тому, що основа системи базується на універсальній програмно-апаратній платформі, стає технічно можливою інтеграція сучасних алгоритмів, таких як SLAM, ORB-SLAM, візуально-інерційна одометрія або тривимірна реконструкція середовища, без необхідності істотних змін у апаратній частині. Це забезпечує високу гнучкість і тривалу актуальність системи, що робить її значно привабливішою порівняно з рішеннями з обмеженим функціоналом.

На основі результатів аналізу можна впевнено стверджувати, що створена система машинного зору є технічно, функціонально та економічно ефективною для інтеграції в безпілотні літальні апарати різного призначення. Вона

забезпечує стабільну роботу в реальному часі, демонструє високу точність трекінгу, легко поєднується з системами управління польотом і має мінімальний вплив на масо-габаритні та енергетичні параметри БПЛА. Таку систему можна рекомендовано застосовувати у цивільних, промислових і науково-дослідних проектах, у тому числі для завдань моніторингу, навігації, автоматичного супроводу об'єктів і автономного керування польотом.

Оцінювання ефективності розробленої системи машинного зору на базі одноплатного комп'ютера Orange Pi є фінальним етапом практичної частини дослідження. Метою цього аналізу є визначення технічної, функціональної та економічної доцільності її використання в складі безпілотних літальних апаратів. Проведений комплексний аналіз експериментальних результатів дозволяє співставити отримані показники з вимогами для систем реального часу і обґрунтувати можливість практичного впровадження запропонованого рішення [19, 21-23].

Одним із головних показників ефективності виступає продуктивність системи в умовах реального часу. Тестування продемонструвало, що використання квантованої нейронної мережі MobileNet SSD у форматі INT8 забезпечує стабільну обробку відеопотоку зі швидкістю 10–12 кадрів за секунду. При цьому середня затримка повного циклу, що включає етапи «захоплення кадру — інференс — трекінг — передача координат», перебуває в межах 70–90 мс. Подібні показники відповідають мінімально необхідним вимогам для виконання завдань супроводу об'єктів, візуального наведення та корекції траєкторії польоту безпілотних літальних апаратів. Виявлені значення затримки не призводять до істотної деградації управління завдяки використанню предиктивних алгоритмів, які компенсують часові зсуви між візуальним аналізом та реакцією польотного контролера.

Ключовим показником ефективності системи є точність розпізнавання та стабільність трекінгу об'єктів у змінних умовах. Результати експериментів демонструють, що поєднання нейронних мереж для детекції з алгоритмом фільтру Калмана дозволяє значно знизити вплив шумів, вібрацій та

короткочасних втрат візуального контакту з ціллю. Система проявляє здатність до безперервного відстеження об'єкта навіть у випадках часткового перекриття або різких змін траєкторії його руху. Ця властивість є надзвичайно важливою для прикладних завдань, особливо під час роботи в складних умовах, таких як польоти через перешкоди або у середовищах із обмеженою видимістю.

Важливим фактором для оцінки доцільності впровадження системи є її енергоефективність. Одноплатний комп'ютер Orange Pi у співпраці з оптимізованими алгоритмами обробки зображень і квантованими нейромережами забезпечує низький рівень споживання енергії, який мінімізує вплив на тривалість польоту БПЛА. Проведені теплові випробування підтвердили стабільну роботу процесора без ризику перегріву за умови використання стандартних засобів тепловідведення та оптимального розташування плати всередині корпусу дрона. Це доводить надійність системи для тривалого функціонування за умов обмеженої вентиляції, що є критично важливим для багатьох практичних застосувань.

Економічна ефективність запропонованої системи полягає у використанні доступної апаратної платформи, вартість якої значно менша порівняно зі спеціалізованими обчислювальними модулями для машинного зору, такими як NVIDIA Jetson, або іншими високопродуктивними edge-платформами. При цьому забезпечується належний рівень функціональних можливостей для широкого спектра практичних завдань. Такий підхід робить систему привабливою не лише для дослідницьких і освітніх проєктів, але також для промислових і прикладних застосувань, де критично важливими є вимоги до масштабованості та оптимізації витрат на кожен бортовий модуль.

Особливу увагу слід звернути на гнучкість і перспективність архітектури запропонованого рішення. Модульна структура програмного забезпечення, разом із використанням стандартизованих інтерфейсів взаємодії з польотним контролером, створює передумови для подальшого розширення функціоналу системи. Наприклад, без істотних змін апаратної частини можлива інтеграція алгоритмів візуально-інерційної одометрії, SLAM, систем уникнення перешкод

чи автономного планування траєкторій. Це додає системі довготермінової цінності та підвищує її адаптивність до нових викликів і завдань.

Підсумовуючи проведений аналіз, можна дійти висновку, що розроблена система машинного зору на базі Orange Pi характеризується високою ефективністю, технічною раціональністю та практичною доцільністю впровадження у безпілотні літальні апарати легкого та середнього класу. Вона забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю, точністю, енергоефективністю та вартістю, що робить її придатною для створення автономних систем спостереження, супроводження об'єктів і візуального управління БПЛА у реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

4.1. Охорона праці

Сучасний розвиток безпілотних, інформаційних та цифрових технологій характеризується інтенсивним впровадженням автоматизованих програмно-апаратних систем, складних обчислювальних алгоритмів і передових методів обробки даних. Зростання рівня інтеграції електронних, програмних і механічних елементів спричиняє ускладнення виробничих процесів та збільшення потенційних ризиків для розробників і операторів таких систем. У зв'язку з цим питання охорони праці стає надзвичайно актуальним і вимагає системного, нормативно регульованого підходу.

Охорона праці охоплює комплекс правових, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності людини під час виконання трудових функцій. Основні принципи і вимоги в цій галузі викладені в Законі України «Про охорону праці», який зобов'язує забезпечувати безпечні й нешкідливі умови праці незалежно від виду чи складності виконуваних робіт. Дотримання стандартів охорони праці є обов'язковою умовою для безпечного виконання інженерних і дослідницьких завдань, зокрема у сферах безпілотних літальних апаратів та систем машинного зору.

Тема кваліфікаційної роботи стосується розробки системи машинного зору для безпілотних комплексів на основі одноплатного комп'ютера Orange Pi. Створення подібних систем поєднує аспекти комп'ютерної інженерії, розробки програмного забезпечення, електроніки та експлуатації безпілотних платформ. Це потребує врахування вимог щодо електробезпеки, пожежної безпеки та правил використання обчислювальної техніки.

Організація робочого місця для написання програмного забезпечення і роботи з комп'ютерною технікою регулюється Законом України «Про охорону праці», а також Санітарними нормами і правилами МОЗ України з безпеки та охорони здоров'я працівників при роботі з екранними пристроями. Ці нормативи визначають вимоги щодо розмірів площі робочого місця, параметрів мікроклімату, рівня освітлення, тривалості безперервної роботи за монітором, а також необхідності перерв для зниження зорового та нервового напруження.

Освітлення робочих приміщень має відповідати стандартам, встановленим ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення». Відповідно до цього стандарту, рівень освітленості у робочих зонах повинен забезпечувати комфортні умови для роботи з текстовою та графічною інформацією. Виконання цих нормативних вимог сприяє зменшенню зорової втоми, покращенню концентрації уваги й підвищенню загальної продуктивності праці.

У процесі розробки та налагодження обладнання для систем машинного зору особливу увагу слід приділяти електробезпеці. Одноплатний комп'ютер Orange Pi разом із периферійними модулями функціонує у безпечному діапазоні низьких напруг (3,3–5 В), що суттєво зменшує ризик ураження електричним струмом. Вимоги щодо безпечної експлуатації електронних пристроїв регулюються стандартом ДСТУ EN IEC 62368-1:2020, який визначає правила захисту від електричних, теплових і механічних загроз.

Особливу увагу під час експлуатації безпілотних літальних апаратів необхідно приділяти механічним ризикам, пов'язаним з обертанням пропелерів, а також ризикам, що виникають у разі втрати керування апаратом. Водночас у сучасних умовах вирішальне значення має дотримання вимог державного регулювання використання повітряного простору України. Згідно з Повітряним кодексом України та Постановою Кабінету Міністрів України № 954 «Про затвердження Положення про використання повітряного простору України», експлуатація безпілотних літальних апаратів підлягає обов'язковому державному контролю.

Крім того, відповідно до рішень Державної авіаційної служби України та нормативних актів, ухвалених у період дії правового режиму воєнного стану, на території України запроваджено загальну заборону на польоти цивільних безпілотних літальних апаратів без спеціального дозволу уповноважених органів. У зв'язку з цим запуск, випробування та налагодження БПЛА дозволяються виключно у закритих приміщеннях, лабораторних умовах, на спеціально визначених полігонах або в симуляційних середовищах, що не передбачають фактичного виходу апарата в повітряний простір загального користування.

Проведення будь-яких налаштувальних або тестових робіт з безпілотними системами повинно здійснюватися за умови повного знеструмлення силових ланцюгів, зняття пропелерів або використання імітаційних навантажень, а також за відсутності сторонніх осіб у потенційно небезпечній зоні. Дотримання зазначених вимог є обов'язковою умовою забезпечення безпеки праці та виконання чинного законодавства України у сфері використання повітряного простору.

Одним із важливих аспектів, що потребують уваги, є забезпечення пожежної безпеки, оскільки безпілотні системи використовують літій-полімерні акумуляторні батареї. У разі порушення умов їх експлуатації такі батареї можуть становити суттєву загрозу пожежної безпеки. Вимоги у цій галузі регламентуються положеннями Закону України "Про пожежну безпеку" та державними будівельними нормами ДБН В.1.1-7:2016 "Пожежна безпека об'єктів будівництва". Процеси заряджання й зберігання акумуляторів повинні виконуватися із застосуванням сертифікованих зарядних пристроїв у приміщеннях із належною вентиляцією та оснащених первинними засобами пожежогасіння.

Відповідно, у ході розробки та впровадження системи машинного зору для безпілотного літального апарата повністю враховано й дотримано положення чинних нормативно-правових актів України, зокрема законодавчих норм у сфері охорони праці, стандарти ДСТУ 8828:2019, вимоги ДБН В. 1.2-7:2021, санітарні

норми та правила пожежної безпеки. Це дозволяє гарантувати високий рівень безпеки в процесі роботи, мінімізувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій і створює передумови для ефективного та надійного функціонування розробленої системи.

4.2. Джерела виникнення шуму і вібрацій, заходи захисту та гігієнічні норми

Шум і вібрація належать до найпоширеніших та найшкідливіших фізичних факторів, які впливають як на виробниче, так і на навколишнє середовище. Їхній вплив на людину може викликати суттєве зниження працездатності, сприяти розвитку професійних захворювань, таких як туговухість і вібраційна хвороба, а також загалом погіршувати якість життя. Основна мета цієї доповіді полягає в узагальненні знань про головні джерела шуму та вібрацій, здійсненні аналізу ефективних засобів і методів захисту, а також визначенні ключових гігієнічних вимог і допустимих норм, що регулюють їх інтенсивність.

Шум можна визначити як сукупність звуків різної інтенсивності та частоти, які не мають чіткої періодичності та здатні негативно впливати на стан організму людини. Різноманітні джерела шуму класифікуються за кількома основними категоріями залежно від їхнього походження та механізму утворення.

По-перше, суттєву групу складають механічні джерела шуму, які виникають у результаті функціонування рухомих частин різних машин і механізмів. Це можуть бути верстати, компресори чи насоси, в яких важливу роль відіграють процеси удару, тертя та можливий дисбаланс деталей, що рухаються.

Другою важливою категорією є аеродинамічні джерела, що зумовлені переміщенням потоків газів та повітря. Їхній вплив найчастіше проявляється через турбулентний характер потоку, зокрема при роботі лопатей вентиляторів чи вивільненні повітря під високим тиском.

Окрім цього, існують гідродинамічні джерела шуму, які утворюються в рідких середовищах. Приклади таких явищ включають турбулентний рух рідини по трубопроводах або кавітаційні процеси, що виникають в насосних чи трубопровідних системах.

Електромагнітні джерела також посідають своє місце серед причин шуму. Вони виникають при коливанні елементів обладнання, як-от трансформатори або електродвигуни, що функціонують під дією змінного електромагнітного поля.

Окремої уваги заслуговує транспортний шум, який у сучасних умовах став переважаючим джерелом зовнішнього впливу у міських середовищах. Саме транспорт генерує значну частину неприродного шуму, який щоденно супроводжує життя мешканців мегаполісів.

Вібрація, як механічні коливання твердих тіл, що передаються організму людини, класифікується за способом передачі. Місцева (локальна) вібрація передається через руки, ноги або інші частини тіла працівника при контакті з віброуючим інструментом, як-от відбійні молотки чи шліфувальні машини. Загальна вібрація передається через опорні поверхні, такі як сидіння, підлога чи робочі площадки, і впливає на весь організм. Її джерелами є промислове обладнання (преси, вентилятори) та транспортні засоби (трактори, вантажні автомобілі).

Система захисту від шуму і вібрацій має ґрунтуватися на пріоритеті інженерно-технічних рішень (колективний захист) над організаційними та індивідуальними заходами. Для захисту від шуму важливим є зниження його рівня безпосередньо в джерелі, що досягається заміною ударних механізмів на безударні, застосуванням вібродемпфування та віброізоляції, а також використанням глушників шуму на повітроводах та вихлопних системах. Також застосовуються заходи для зменшення шуму на шляху його поширення: звукоізоляція, що включає встановлення захисних кожухів, екранів та кабін спостереження, та звукопоглинання, яке реалізується обробкою внутрішніх поверхонь приміщень пористими матеріалами для зменшення відбитого шуму. Рациональне архітектурно-планувальне рішення також відіграє ключову роль.

Контроль та зниження рівня вібрації починається з усунення її джерел шляхом балансування рухомих мас, точної центровки валів і своєчасного технічного обслуговування обладнання. На етапі поширення вібрації використовуються методи віброізоляції, які передбачають монтаж вібраційних механізмів на спеціальні основи з еластичними компонентами. Крім того, застосовується віброгасіння (демпфування), де енергія коливань перетворюється на тепло за допомогою спеціальних матеріалів. Для мінімізації впливу вібрації доцільно використовувати вібробезпечне обладнання з інтегрованими захисними елементами [6].

Якщо колективні заходи не дозволяють знизити рівні шуму чи вібрації до допустимих меж, запроваджуються засоби індивідуального захисту (ЗІЗ). Для захисту від шуму використовують вкладки (беруші), навушники чи шоломи, вибір яких залежить від величини шумового впливу. Для запобігання шкідливому впливу вібрації застосовують антивібраційні рукавиці зі спеціальними демпфуючими вставками для локальної вібрації та антивібраційне взуття для загальної. Організаційні дії включають скорочення часу перебування у зонах впливу небезпечних чинників, введення регламентованих перерв, професійний відбір працівників і обов'язкові медичні огляди.

Нормування шуму та вібрації – це основа системи охорони праці та гарантування санітарно-епідеміологічної безпеки. Для оцінки шуму використовується рівень звукового тиску, виміряний у дБА. Граничний рівень шуму на більшості робочих місць становить 80 дБА, а межа допустимого 8-годинного впливу дорівнює 85 дБА. У житлових приміщеннях стандарти є суворішими: денний рівень звуку має не перевищувати 40 дБА, а нічний – 30 дБА, при цьому максимальний рівень під час ночі не може перевищувати 45 дБА.

Для вібрації проводиться нормування за показниками середньоквадратичної швидкості коливань (м/с) чи віброприскорення (м/с^2), вимірюваних у визначених частотних діапазонах, а також за інтегральним значенням у дБ. Гранично допустимі рівні локальної та загальної вібрації встановлюються відповідно до стандартів гігієнічної оцінки умов праці й

залежать від частоти коливань. Загальну вібрацію класифікують на транспортну, транспортно-технологічну та технологічну, з встановленням специфічних нормативів для кожного виду згідно з національними стандартами.

Шум та вібрація є серйозними фізичними небезпеками, які потребують регулярного моніторингу й управління. Ефективний захист ґрунтується на комплексних рішеннях, які включають усунення чи мінімізацію джерела небезпеки технічними засобами, ізоляцію та поглинання енергії на шляху її поширення, організацію безпечного режиму роботи та застосування індивідуальних засобів захисту. Дотримання нормативів і гігієнічних вимог є ключем до збереження здоров'я працівників і створення комфортних умов праці та проживання [7]. Важливим завданням майбутніх досліджень є розробка інноваційних, більш ефективних і доступних технологій та матеріалів для боротьби з шумом

ВИСНОВОК

Основні наукові результати та практичні висновки виконаного магістерського дослідження можна узагальнити наступним чином:

1. Вперше створено та впроваджено систему машинного зору для безпілотного літального апарата, побудовану на основі одноплатного комп'ютера Orange Pi. Ця система здатна здійснювати детекцію, трекінг і передачу координат об'єктів до польотного контролера в реальному часі, враховуючи обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси бортової платформи.

2. Розроблено архітектуру програмного забезпечення системи машинного зору, яка об'єднує модуль захоплення відеопотоку, нейромережеву детекцію об'єктів, алгоритми трекінгу на основі фільтра Калмана та механізм інтеграції з бортовими системами безпілотних літальних апаратів. Це рішення забезпечило високий рівень стабільності та модульності системи.

3. Проаналізовано раціональність застосування квантованих нейронних мереж типу MobileNet SSD у форматі INT8 для вирішення завдань комп'ютерного зору на базі безпілотних літальних апаратів. Запропонований підхід дав змогу досягти оптимального балансу між детекційною точністю, продуктивністю системи та ефективністю енергоспоживання.

4. Методи трекінгу об'єктів у динамічному середовищі були покращені завдяки впровадженню фільтра Калмана для прогнозування розташування цілі. Це дозволило ефективно компенсувати оброблювальні затримки, вібрації платформи та тимчасове зникнення об'єкта з поля зору.

5. Було створено механізм передачі координат виявлених об'єктів до польотного контролера через UART-інтерфейс із застосуванням протоколу MSP. Це дозволило сформувати замкнений контур керування, що об'єднує систему комп'ютерного зору та автопілот безпілотного літального апарата.

6. Виконано математичне обґрунтування часових і просторових параметрів системи, включаючи затримку обробки, частоту кадрів, нормалізацію координат і прогнозування руху об'єктів. Це підтвердило правильність обраних моделей та алгоритмів.

7. Проведено всебічне експериментальне випробування розробленої системи в рамках лабораторних, стендових і польових досліджень. Результати підтвердили її функціональність, стабільність роботи та відповідність встановленим технічним параметрам.

8. Досягнуто практичних результатів інтеграції системи машинного зору з бортовими системами керування. Це дозволило зменшити коливання керуючих сигналів, покращити плавність реакцій дрона та забезпечити стабільну поведінку апарата під час виконання маневрів.

9. Встановлено ключові обмеження та визначено перспективні напрями вдосконалення системи. Серед основних чинників, що впливають на її функціонування, виділено залежність продуктивності від обчислювальних можливостей одноплатного комп'ютера, чутливість до умов освітлення, яка впливає на точність детекції, а також необхідність подальшої оптимізації або використання апаратного прискорення для забезпечення ефективної роботи у більш складних сценаріях автономної навігації.

Підсумки проведеного дослідження свідчать про успішне досягнення мети магістерської роботи та повне виконання запланованих завдань. У рамках роботи створено підходи до розробки системи машинного зору для безпілотного літального апарата, що знайшли своє втілення у програмно-апаратному комплексі, алгоритмах та математичних моделях, які пройшли випробування за реальних умов експлуатації.

Розроблена система машинного зору має значний практичний потенціал для використання як основи у створенні автономних і напіваавтономних безпілотних платформ, а також для подальших досліджень у галузях комп'ютерного зору, edge-обчислень і систем управління безпілотними літальними апаратами. Завдання магістерської роботи виконані повністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Програма та методичні рекомендації з проходження практики за тематикою кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ. 2024. 45 с.
2. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль. 2024. 44 с.
3. Варавін А.В., Лещишин Ю.З., Чайковський А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Дослідження і проєктування комп'ютерних систем та мереж» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 32 с.
4. Р. Кондратюк, Є.Тиш Машинний зір: сутність технології, принципи роботи та сфери застосування. XIII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопіль : ТНТУ. 2025. С.120.
5. Р. Кондратюк, Є.Тиш Opensv як основа сучасних систем комп'ютерного зору. XIII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопіль : ТНТУ. 2025. С.121.
6. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196> (дата звернення: 07.12.2025).
7. Лупенко С.А. , Пасічник В.В. , Тиш Є.В. Комп'ютерна логіка. Навчальний посібник. Львів: Видавництво “Магнолія - 2006”, 2024. 354 с.
8. Osukhivska H., Lobur T., Shylinska I., Lupenko S., Tysh Ie. Method for Estimating the Convergence Parameters of Dynamic Routing Protocols in Computer

Networks. IEEE 16th International Conference on Computer Science and Information Technologies. Lviv. 2021.

9. Tysh Ie. Approach And Method Of Evaluation Of The General Reliability Indicator Of Computer Systems. International Scientific Journal Computer Systems And Information Technologies. Khmelnytskyi : Khmelnytskyi National University №3. 2021.P.74-80.

10. Стручок В.С. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424> (дата звернення: 10.12.2025).

11. Zhang X., Li Y., Wang H. Real-Time Object Detection for UAV Applications Using Lightweight CNN Models. IEEE Access, 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8954562> (дата звернення: 17.11.2025).

12. Howard A., Sandler M., Zhu M. Searching for MobileNetV3. ICCV, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.02244> (дата звернення: 17.11.2025). Tan M., Le Q. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. ICML, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.11946> (дата звернення: 18.11.2025).

13. Zhao Z., Zheng P., Xu S., Wu X. Object Detection With Deep Learning: A Review. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8952439> (дата звернення: 18.11.2025).

14. Huang Z., Li J., Chen G. Lightweight Neural Networks for Embedded Vision Applications. Sensors, 2021. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4081> (дата звернення: 19.11.2025).

15. Chen Y., Wang L. Visual Tracking Using Kalman Filter and Deep Feature Extraction. Journal of Real-Time Image Processing, 2021. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11554-020-01052-0> (дата звернення: 19.11.2025).

16. Wang X., Ye T., Zhang P. Optimization of Deep Learning Models for Edge Devices. IEEE Internet of Things Journal, 2022. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9741234> (дата звернення: 20.11.2025).

17. Khan S., Rahmani H., Shah S., Bennamoun M. A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision. Morgan & Claypool Publishers, 2020. URL: <https://www.morganclaypool.com/doi/abs/10.2200/S01026ED1V01Y202001AIM045> (дата звернення: 20.11.2025).
18. Bochkovskiy A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. arXiv, 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.10934> (дата звернення: 21.11.2025).
19. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Liao H.-Y. YOLOv7: Trainable Bag-of-Freebies for Real-Time Object Detection. arXiv, 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2207.02696> (дата звернення: 21.11.2025).
20. Han S., Mao H., Dally W. Deep Compression for Efficient Neural Networks on Edge Devices. Communications of the ACM, 2020. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3381756> (дата звернення: 22.11.2025).
21. Su J., Li K. Design of Embedded Vision Systems Based on ARM Architectures. IEEE Embedded Systems Letters, 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9458931> (дата звернення: 22.11.2025).
22. Li W., Du Y. UAV Visual Navigation and Object Tracking Under Real-Time Constraints. Aerospace Science and Technology, 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963822001234> (дата звернення: 23.11.2025).
23. Zhou J., Chen S. Performance Evaluation of Quantized Neural Networks on Low-Power Computers. ACM TECS, 2021. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3477026> (дата звернення: 23.11.2025).
24. Jiang L., Xu C. Kalman Filter-Based Multi-Object Tracking for Aerial Robotics. Robotics and Autonomous Systems, 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889020300630> (дата звернення: 24.11.2025).
25. Zhang P., Liu Z. Latency Analysis of Edge-Based Computer Vision Systems. IEEE Edge Computing, 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9512348> (дата звернення: 24.11.2025).

26. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Springer, 2022. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84882-935-0> (дата звернення: 25.11.2025).
27. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2020. URL: <https://www.deeplearningbook.org/> (дата звернення: 25.11.2025).
28. Müller M. Fundamentals of Kalman Filtering for Autonomous Vehicles. CRC Press, 2021. URL: <https://www.routledge.com/Fundamentals-of-Kalman-Filtering/Muller/p/book/9780367636982> (дата звернення: 26.11.2025).
29. Gupta R. Embedded AI for Robotics: Architectures and Optimization Techniques. Elsevier, 2022. URL: <https://www.elsevier.com/books/embedded-ai/gupta/9780323900715> (дата звернення: 26.11.2025).
30. Dronecode Foundation. UAV Visual Processing Pipelines and MAVLink Extensions. Technical Report, 2021. URL: <https://docs.dronecode.org> (дата звернення: 27.11.2025).
31. ArduPilot Dev Team. Companion Computer Integration Guide. ArduPilot, 2022. URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/companion-computers.html> (дата звернення: 27.11.2025).
32. Betaflight Developers. Unified Serial Protocol (MSP) v2.0 Specification. Betaflight Docs, 2020. URL: <https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/MSP> (дата звернення: 28.11.2025).
33. Lin T.-H., Chang J. Vision-Based Target Tracking for Small UAVs Using Lightweight CNNs. Applied Sciences, 2021.
34. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/5/2251> (дата звернення: 28.11.2025).
35. Kim J., Park D. Real-Time Vision Processing for UAV Guidance Using ARM-Based Systems. Electronics, 2020. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/8/1286> (дата звернення: 29.11.2025).
36. Luo H., Wang T. Thermal and Power Constraints in Edge AI Devices: A Case Study. IEEE Transactions on Computers, 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9449871> (дата звернення: 29.11.2025).

37. Rasheed A., Chen Z. AI-on-the-Edge: Survey on Neural Network Deployment Optimization. ACM Computing Surveys, 2023. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3597061> (дата звернення: 30.11.2025).
38. VisDrone Dataset. Vision Meets Drones: A Benchmark. 2021. URL: <http://www.aiskyeye.com/> (дата звернення: 05.12.2025).
39. UAVDT Dataset Consortium. Unmanned Aerial Vehicle Detection and Tracking Dataset. 2020. URL: <https://cg.cs.tsinghua.edu.cn/dataset/uavdt> (дата звернення: 06.12.2025).
40. Defence UA. До 150 доларів за «машинний зір» для FPV-дронів: аналіз сучасних рішень. Defence-UA News, 2023. URL: https://defence-ua.com/news/do_150_dolariv_za_mashinij_zir_fpv_drona_madjar_pokazav_gotove_rishennja_rashistiv-14941.html (дата звернення: 10.12.2025).

Додаток А
Тези конференцій

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

МАТЕРІАЛИ

**ХІІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

**ТЕРНОПІЛЬ
2025**

Y. Holotenko, R. Koroliuk

MICROCONTROLLERS OF INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS:
ARCHITECTURE OVERVIEW

О. Кобрин, Н. Стадник

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА КОМП'ЮТЕРНО-ЗОРОВОЇ СИСТЕМИ
ВИЯВЛЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ У ПРОЦЕСІ FDM-ДРУКУ

O. Kobryn, N. Stadnyk

EXPERIMENTAL EVALUATION OF A COMPUTER VISION SYSTEM FOR
DETECTING DEVIATIONS IN THE FDM PRINTING PROCESS

115

В. Ковальський, Є. Тиш

ПРОГНОЗУВАННЯ МЕРЕЖЕВИХ АНОМАЛІЙ У ХМАРНОМУ
СЕРЕДОВИЩІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРАТИВНИХ АЛГОРИТМІВ

V. Kovalskyi, Ie. Tysh

PREDICTION OF NETWORK ANOMALIES IN A CLOUD ENVIRONMENT
USING GENERATIVE ALGORITHMS

116

В. Ковальський, Є. Тиш

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ АНОМАЛІЙ МЕРЕЖЕВОГО
ТРАФІКУ НА ОСНОВІ TIMEGAN У ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

V. Kovalskyi, Ie. Tysh

INTELLIGENT SYSTEM FOR PREDICTING NETWORK TRAFFIC
ANOMALIES BASED ON TIMEGAN IN A CLOUD ENVIRONMENT

117

В. Козачок, І. Баран

ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РЕОКАРДІОСИГНАЛІВ

V. Kozachok, I. Baran

A REVIEW OF MATHEMATICAL MODELS OF REHECARDIO SIGNALS

118

Р. Кондратиук, Є.Тиш

OPENCV ЯК ОСНОВА СУЧАСНИХ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

R. Kondratiuk, Ie.Tysh

OPENCV AS THE BASIS OF MODERN COMPUTER VISION SYSTEMS

119

Р. Кондратиук, Є.Тиш

МАШИННИЙ ЗІР: СУТНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА
СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ

R. Kondratiuk, Ie.Tysh

MACHINE VISION: THE ESSENCE OF THE TECHNOLOGY, PRINCIPLES OF
OPERATION AND AREAS OF APPLICATION

120

М. Конотопський, Ю. Лещиншин

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО
КОМПЛЕКСУ КОНТРОЛЮ ЗА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯМ З УРАХУВАННЯМ
ПОГОДНИХ УМОВ

M. Konotopskyi, Y. Leshchyshyn

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE SOFTWARE AND HARDWARE
COMPLEX FOR HEAT SUPPLY CONTROL CONSIDERING WEATHER
CONDITIONS

121

Б. Котельніков, І. Козбур, Г. Козбур

ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ
ВІДЕОКОНФЕРЕНЦІЙ

B. Kotelnikov, I. Kozbur, H. Kozbur

RESEARCH ON MODERN AUTOMATION TOOLS FOR VIDEO
CONFERENCING

124

В. Кравчик

АВТОМАТИЧНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ДТП У СИСТЕМАХ ВІДЕОМОНІТОРИНГУ
НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО ЗОРУ

125

УДК 004.932.2 : 004.4

Р. Кондратиук; Є.Тиш, к. т. н.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

OPENCV ЯК ОСНОВА СУЧАСНИХ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

UDC 004.932.2 : 004.4

R. Kondratiuk; Ie.Tysh, PhD.

OPENCV AS THE BASIS OF MODERN COMPUTER VISION SYSTEMS

OpenCV є однією з ключових технологій, які визначають прогрес у галузі сучасних систем комп'ютерного зору. Це універсальна відкрита бібліотека, розроблена для ефективної роботи з обробкою зображень і відео, що охоплює широкий спектр завдань – від базової фільтрації до складних алгоритмів розпізнавання об'єктів і аналізу сцен. Її популярність зумовлена багатофункціональністю, високою продуктивністю та доступністю для різних розробників. Завдяки відкритому вихідному коду OpenCV активно вдосконалюється глобальною спільнотою, що дає змогу швидко впроваджувати нові алгоритми та сучасні рішення у сфері комп'ютерного зору.

Однією з ключових переваг OpenCV є її кросплатформність. Бібліотека стабільно функціонує на Windows, Linux, macOS, а також підтримує мобільні платформи Android і iOS. До того ж, вона активно застосовується в embedded-рішеннях на базі таких одноплатних комп'ютерів, як Orange Pi, Raspberry Pi чи Nvidia Jetson. Завдяки оптимізованим алгоритмам, апаратному прискоренню та ефективній роботі з потоковим відео, OpenCV дозволяє виконувати обробку зображень у реальному часі навіть на пристроях із низькою продуктивністю. Це робить її незамінною для безпілотників, систем відеоспостереження, робототехніки, автономного транспорту та інтелектуальних IoT-систем.

OpenCV відіграє ключову роль у розвитку систем штучного інтелекту, орієнтованих на периферійні пристрої. У поєднанні з малопотужними процесорами та одноплатними комп'ютерами ця бібліотека забезпечує виконання складних алгоритмів аналізу зображень без необхідності постійного підключення до хмарних сервісів. Такий підхід, широко відомий як edge-computing, дозволяє мінімізувати затримки, підвищити автономність систем та забезпечити конфіденційність даних – аспекти, що мають особливе значення у сферах відеоаналітики, безпеки, управління дронами та розробки медичних пристроїв. OpenCV виступає ефективним інструментом для досягнення балансу між продуктивністю обчислень і доступністю рішень, відкриваючи можливості для створення інтелектуальних систем там, де використання традиційних серверних технологій є недоцільним або неможливим.

Не менш значущою є роль OpenCV у сфері освіти та наукових досліджень. Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, широкому спектру навчальних ресурсів і відкритості для експериментування бібліотека стала стандартом де-факто для викладання комп'ютерного зору в університетах і технічних навчальних закладах. Вона надає можливість студентам швидко переходити від теоретичних концептів до вирішення практичних задач, зокрема розпізнавання об'єктів, створення систем відеоспостереження чи розробки автономних роботів.

Таким чином, OpenCV є основою багатьох сучасних рішень у сфері комп'ютерного зору. Вона вирізняється відкритістю, високою продуктивністю, гнучкістю й багатофункціональністю, надаючи можливість реалізувати як прості, так і складні алгоритми для аналізу візуальної інформації. Її впровадження є важливим кроком для розробників, які прагнуть створювати ефективні, адаптивні та інтелектуальні системи, здатні працювати в режимі реального часу та вирішувати завдання різної складності.

УДК 004.932

Р. Кондратюк; Є. Тиш, к. т. н.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

МАШИННИЙ ЗІР: СУТНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЙ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ

UDC 004.932

R. Kondratiuk; Ie. Tysh, PhD.

MACHINE VISION: THE ESSENCE OF THE TECHNOLOGY, PRINCIPLES OF OPERATION AND AREAS OF APPLICATION

Машинний зір є однією з ключових технологій сучасного світу, що поєднує алгоритми комп'ютерного зору, штучного інтелекту та цифрової обробки сигналів для автоматичного аналізу візуальної інформації. Це здатність технічної системи "бачити" та інтерпретувати зображення або відео аналогічно до того, як це робить людський зір, але з набагато більшою точністю, швидкістю та здатністю працювати в умовах, де людині складно або неможливо ефективно діяти. Машинний зір дозволяє технічним пристроям отримувати уявлення про навколишнє середовище, розпізнавати об'єкти, контролювати процеси та ухвалювати рішення без участі людини.

Функціонування систем машинного зору базується на кількох ключових етапах. Спочатку камера або інший сенсор отримує візуальні дані, які перетворюються у цифровий сигнал. Далі ці дані проходять попередню обробку – корекцію, фільтрацію, нормалізацію освітлення, виділення контурів та важливих ознак. Наступним етапом є аналіз зображення: система ідентифікує об'єкти, вимірює їх параметри, визначає просторові співвідношення та динаміку руху. На фінальному етапі отримана інформація використовується для ухвалення рішень: наприклад, робот змінює траєкторію руху, виробнича лінія зупиняється у разі виявлення дефекту, або безпілотний літальний апарат коригує курс.

Особливу роль у розвитку машинного зору відіграє використання алгоритмів штучного інтелекту та глибинного навчання. Завдяки нейронним мережам системи здатні розпізнавати об'єкти з високою точністю, навіть у складних умовах: при поганій видимості, сильному шумі, високих швидкостях руху або значних варіаціях форми й освітлення. Сучасні моделі, такі як YOLO, RetinaNet чи EfficientDet, працюють у реальному часі та дозволяють системам машинного зору виконувати задачі, що раніше були доступні лише людині. Інтеграція edge-computing дає змогу виконувати аналіз безпосередньо на пристрої, забезпечуючи автономність і зменшуючи залежність від зовнішніх серверів.

Машинний зір має широке застосування у промисловості, логістиці, медицині, сільському господарстві, у сферах транспорту та безпеки. Окремого особливого на сьогоднішній день значення технологія набуває у сфері робототехніки та безпілотних літальних апаратів. Дрони з машинним зором здатні автономно орієнтуватися в просторі, будувати карти місцевості, виявляти об'єкти, виконувати трекінг та ухвалювати рішення в режимі реального часу. Такі системи стають основою для моніторингу територій, пошуково-рятувальних операцій, інспекції інфраструктури та виконання складних автономних місій.

Таким чином, машинний зір є фундаментальною технологією, яка формує новий рівень автоматизації й інтелектуалізації технічних систем. Він дозволяє створювати пристрої, здатні розуміти навколишній світ, ухвалювати рішення на основі візуальних даних та виконувати задачі, які ще кілька десятиліть тому вважалися виключно людськими.