

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
Розроблення системи комп'ютерного зору
для малогабаритного мобільного робота
(тема)

Виконала:
здобувачка 2 року навчання,
групи КТРСМ-23-1
Німець К.С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна чи освітньо-наукова)

Освітня програма «Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Максимова С.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Невлюдов І.Ш.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачці Німець Катерина Сергіївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи комп'ютерного зору для малогабаритного мобільного робота

затверджена наказом університету від 25 листопада 2024 р. № 1239Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 27 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Мова програмування: Python

3.2 Модулі: ESP-32 Cam, UNO R3

3.4 Ходова частина: акрилові пластини, колеса, мотори

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ _____

4.2 Теоретичні основи комп'ютерного зору _____

4.3 Аналіз та підбір технічних засобів для реалізації проєкту _____

4.4 Реалізація проєкту _____

4.5 Висновки _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентацій PowerPoint (*.ppt) – 20 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури по темі роботи	01.10.2024 – 01.11.2024	Виконано
2	Аналіз технічного завдання	02.11.2024 – 05.11.2024	Виконано
3	Аналіз сучасних рішень у робототехніці та теоретичних основ комп'ютерного зору	05.11.2024 – 07.11.2024	Виконано
4	Розробка апаратної частини	08.11.2024 – 01.12.2024	Виконано
5	Розробка програмного забезпечення	02.12.2024 – 20.12.2024	Виконано
6	Оформлювання пояснювальної записки	21.12.2024 – 25.12.2024	Виконано

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Максимова С.С.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студентка ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«27» грудня 2024 р.



Німець К.С.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 99 с., 1 табл., 65 рис., 4 дод., 34 джерела.

РОБОТОТЕХНІКА, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, МОБІЛЬНИЙ РОБОТ,
РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ, НАВІГАЦІЯ РОБОТА, СЕНСОРИ.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності роботи малогабаритного робота за рахунок розробки системи комп'ютерного зору на базі модуля ESP32-CAM.

Об'єкт дослідження – процес обробки візуальної інформації.

Предмет дослідження – система комп'ютерного зору.

Методи дослідження – використання мови Python з бібліотекою OpenCV для обробки зображень та нейромережі YOLOv8 для розпізнавання об'єктів.

У кваліфікаційній роботі розроблено систему комп'ютерного зору для малогабаритного мобільного робота на базі колісної платформи з чотирма колесами, проведено аналіз вимог, підбрано обладнання та створено програмний модуль для інтеграції нейромережі. Експерименти підтвердили здатність системи ідентифікувати об'єкти в реальному часі. Результати кваліфікаційної роботи апробовані на 2 міжнародних конференціях. Також, отримані результати роботи можна віднести до ЦСР 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п. 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей».

ABSTRACT

Explanatory note: 99 p., 1 tabl., 65 pic., 4 appl., 34 sources.

ROBOTICS, COMPUTER VISION, MOBILE ROBOT, OBJECT RECOGNITION, ROBOT NAVIGATION, SENSORS.

The purpose of the qualification work is to increase the efficiency of a small-sized robot by developing a computer vision system based on the ESP32-CAM module.

The object of research is the process of visual information processing.

Subject of research – computer vision system.

Research methods – using the Python language with the OpenCV library for image processing and the Yolov8 neural network for object recognition.

The qualification work developed a computer vision system for a small-sized mobile robot based on a wheeled platform with four wheels, analyzed the requirements, selected the equipment, and created a software module for integrating the neural network. The experiments confirmed the system's ability to identify objects in real time. The results of the qualification work were tested at 2 international conferences. Also, the results of the work can be attributed to SDG 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, namely para. 4 “Promote the accelerated development of high- and medium-tech manufacturing sectors, which are formed through the use of education-science-manufacturing chains and a cluster approach in the following areas: development of an innovation ecosystem; development of information and telecommunication technologies (ICT); application of ICT in agriculture, energy, transport and industry; high-tech engineering; creation of new materials; development of pharmaceutical and bioengineering industries.”

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ.....	11
1 Сучасний стан розвитку систем комп'ютерного зору.....	13
1.1 Поняття та цілі комп'ютерного зору	13
1.2 Історичний контекст: від класичних методів до сучасних підходів	15
1.3 Завдання комп'ютерного зору	18
1.4 Застосування комп'ютерного зору в робототехніці.....	25
1.5 Апаратне та програмне забезпечення для створення комп'ютерного зору.....	33
1.5.1 Апаратне забезпечення	33
1.5.2 Програмне забезпечення.....	37
1.6 Постановка задач та мети дослідження	39
1.7 Висновки до розділу 1	40
2 Підбір засобів для розроблення системи комп'ютерного зору	41
2.1 Сучасні рішення робототехніки.....	41
2.2 Сучасні малогабаритні мобільні роботи.....	49
2.3 Обґрунтування вибору обладнання.....	53
2.4 Вибір програмного забезпечення	65
2.5 Висновки до розділу 2	68
3 Розроблення системи комп'ютерного зору	69
3.1 Розроблення апаратної частини.....	69
3.2 Розроблення програмного забезпечення.....	75
3.3 Дослідження стійкості руху робота.....	89
3.4 Висновки до розділу 3	92
4 Охорона праці	93
4.1 Вимоги до приміщення.....	93
4.2 Висновки до розділу 4	94

Висновки	95
Перелік джерел посилання	96
Додаток А Апробація результатів кваліфікаційної роботи.....	100
Додаток Б Лістинг програми системи комп'ютерного зору	108
Додаток В Лістинг коду для перепрошивки модуля камери ESP-32 CAM.....	117
Додаток Г Презентація.....	121

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- БПЛА – безпілотний літальний апарат;
- CNN – згортова нейронна мережа (англ. Convolutional Neural Network);
- CV – комп’ютерний зір (англ. Computer Vision);
- FCN – повністю згортова нейронна мережа (англ. Fully Convolutional Networks);
- FPGA – програмована користувачем вентильна матриця (англ. Field-Programmable Gate Array);
- GMM – модель гауссової суміші (англ. Gaussian Mixture Model);
- GPU – графічний процесор (англ. Graphics Processing Unit);
- ICR – інтелектуальне розпізнавання символів (англ. Intelligent Character Recognition);
- ID – ідентифікатор (англ. Identity Document);
- IFR – Міжнародна федерація робототехніки (англ. International Federation of Robotics);
- IMU – інерційний вимірювальний пристрій (англ. Inertial Measurement Unit);
- IoT – інтернет речей (англ. Internet of Things);
- IR – інфрачервоне випромінювання (англ. Infrared);
- LiDAR – лазерний локатор (англ. Light Detection and Ranging);
- MCU – мікроконтролер (англ. Micro Controller Unit);
- NPU – нейронний процесор (англ. Neural Processing Unit);
- OCR – оптичне розпізнавання символів (англ. Optical Character Recognition);
- OpenCV – бібліотека комп’ютерного зору (англ. Open Source Computer Vision Library).
- ROS – операційна система роботів (англ. Robot Operating System);
- RTOS – Операційна система реального часу (англ. Real-Time Operating System).

SIFT – масштабоінваріантне ознакове перетворення (англ. Scale-Invariant Feature Transform);

SLAM – одночасна локалізація та побудова карти (англ. Simultaneous Localization And Mapping);

SURF – прискорені стійкі ознаки (англ. Speeded Up Robust Features);

SVM – метод опорних векторів (англ. Support Vector Machine);

ToF – час прольоту (англ. Time-of-Light);

TPU – тензорний процесор (англ. Tensor Processing Unit).

ВСТУП

На сьогоднішній день комп'ютерний зір є однією з найбільш перспективних галузей, що активно розвиваються та знаходить широке застосування в робототехніці. Особливо актуальним є впровадження систем комп'ютерного зору для мобільних роботів, адже вони відіграють важливу роль у задачах автоматизації, зокрема у навігації, розпізнаванні об'єктів та виявленні перешкод у динамічному середовищі.

Застосування таких систем дозволяє значно підвищити ефективність і безпеку в різних сферах, включаючи логістику, виробництво та рятувальні операції. Комп'ютерний зір надає роботам можливість не лише «бачити», але й аналізувати властивості об'єктів, що є критично важливим для виконання завдань, які потребують високої точності, таких як ідентифікація дефектів продукції чи сортування матеріалів.

Крім того, використання технологій комп'ютерного зору сприяє вдосконаленню взаємодії роботів із людьми. Роботи отримують можливість розуміти невербальні сигнали, такі як жести чи міміка, що дозволяє зробити їхню роботу більш інтуїтивно зрозумілою та природною. У поєднанні з автономними функціями, це відкриває нові горизонти для інтеграції роботів у повсякденне життя та складні виробничі процеси.

Таким чином, метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи малогабаритного робота за рахунок розробки системи комп'ютерного зору на базі модуля ESP32-CAM.

Об'єкт дослідження – процес обробки візуальної інформації.

Предмет дослідження – система комп'ютерного зору.

Методи дослідження – використання мови Python з бібліотекою OpenCV для обробки зображень та нейромережі YOLOv8 для розпізнавання об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати особливості застосування систем комп'ютерного зору у мобільних роботах, зокрема для розпізнавання об'єктів і аналізу оточення;
- розробити конструкцію мобільного робота з використанням колісної платформи та інтегрувати модуль комп'ютерного зору на базі камери ESP32-CAM;
- адаптувати нейронну мережу YOLOv8 для роботи з обмеженими обчислювальними ресурсами, провести тестування моделі для розпізнавання об'єктів у реальному часі;
- розробити програмне забезпечення для інтеграції системи комп'ютерного зору з апаратною платформою робота, забезпечивши виконання задач аналізу оточення;
- провести експериментальні дослідження роботи розробленої системи у реальних умовах, оцінити її ефективність та визначити основні фактори, що впливають на продуктивність і точність роботи мобільного робота;
- оформити пояснювальну записку згідно з рекомендаціями [1] та вимогами ДСТУ 3008:2015 [2].

Результати дослідження доповідались на 2 міжнародних конференціях (Додаток А).

Отримані результати роботи можна віднести до ЦСР 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п. 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей».

1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

1.1 Поняття та цілі комп'ютерного зору

Комп'ютерний зір є одним із ключових напрямів у галузі штучного інтелекту та інформатики, метою якого є створення систем, здатних автоматизувати процеси сприйняття, аналізу та інтерпретації візуальної інформації [3].

Основне завдання комп'ютерного зору полягає у розробці алгоритмів, які дозволяють машинам отримувати інформацію з цифрових зображень та відео, перетворюючи цю інформацію на формат, доступний для подальшого аналізу та прийняття рішень. Цей процес, аналогічний людському зору, вимагає від комп'ютера здатності "бачити" та інтерпретувати дані у вигляді зображень, що є вкрай складним завданням з огляду на різноманітність навколишнього світу та складність сприйняття візуальної інформації.

Фундаментом комп'ютерного зору є методи та алгоритми, що базуються на математиці та статистиці, які дозволяють комп'ютерам інтерпретувати візуальні дані. На відміну від людського мозку, який може швидко розпізнавати об'єкти завдяки багаторічному досвіду та навчанню, комп'ютерні системи потребують точного математичного опису ознак об'єктів та сцени. Комп'ютерний зір використовує цифрові зображення, які є наборами пікселів, кожен із яких має числове значення, що вказує на інтенсивність кольору. Ці дані аналізуються за допомогою різних алгоритмів обробки зображень та аналізу ознак, щоб виділити ключові елементи зображення, такі як межі, текстури або форми.

Однією з основних цілей комп'ютерного зору є розпізнавання об'єктів, тобто ідентифікація та класифікація різних об'єктів у зображенні. Цей процес використовується в різних областях, включаючи системи безпеки, медичну діагностику, автономне водіння і аналіз відео. Проте розпізнавання об'єктів – лише одне із завдань, вирішуваних у межах комп'ютерного зору. Інша важлива мета – це

сегментація зображень, яка полягає в поділі зображення на кілька логічно пов'язаних сегментів, що дозволяє виділити конкретні об'єкти або області інтересу. Цей підхід є особливо корисним при аналізі складних зображень, де необхідно точно розрізнити об'єкти на тлі шуму або неструктурованої інформації.

Крім того, значним напрямком комп'ютерного зору є відстеження об'єктів у русі, що використовується у системах відеоспостереження, спортивних аналізах та робототехніці [4]. Відстеження об'єктів передбачає, що комп'ютерна система не тільки ідентифікує об'єкт, а й фіксує його переміщення в часі, що являє собою складне завдання в умовах освітленості, шуму або часткового перекриття об'єкта іншими об'єктами, що змінюється. Ще одним важливим завданням є відновлення тривимірної сцени на основі двовимірних зображень, що є актуальним для робототехніки та систем доповненої реальності. Цей процес вимагає використання складних алгоритмів геометричної реконструкції, що дозволяють створити тривимірну модель простору та об'єктів, що знаходяться у ньому.

Комп'ютерний зір також спрямовано розуміння контексту зображення, що за межі простої ідентифікації об'єктів. Розуміння контексту включає аналіз взаємодій між об'єктами на зображенні, а також інтерпретацію поведінки, дій та подій. У світі, де обсяг візуальної інформації постійно збільшується, автоматизація її аналізу стає у край важливим завданням на вирішення практичних проблем. Наприклад, системи автономного водіння вимагають високої точності у розпізнаванні дорожніх знаків, пішоходів, транспортних засобів та інших об'єктів, а також у передбаченні їхньої поведінки.

Таким чином, комп'ютерний зір є складною міждисциплінарною областю, яка поєднує інформатику, математику та штучний інтелект [5]. Розробка систем, здатних ефективно вирішувати завдання розпізнавання, сегментації, відстеження об'єктів та розуміння контексту, потребує не лише глибокого розуміння алгоритмічних основ, а й використання сучасних технологій машинного навчання, таких як нейронні мережі та глибоке навчання. В результаті, комп'ютерний зір не

тільки розширює можливості автоматизації процесів аналізу візуальних даних, а й сприяє розвитку нових технологій і додатків у різних сферах, від медицини до транспорту та промисловості.

1.2 Історичний контекст: від класичних методів до сучасних підходів

Історія розвитку комп'ютерного зору є складною та багатовекторною, відображаючи поступове зростання обчислювальних потужностей, удосконалення алгоритмів та появу нових методологічних підходів. На ранніх етапах розвитку цієї дисципліни, які припадають на середину ХХ століття, дослідники зосереджувалися переважно на задачах обробки зображень, таких як виявлення контурів, сегментація та базові методи аналізу текстури. Комп'ютери того часу мали обмежені ресурси, що значно стримувало можливості розробки складних алгоритмів, тому більшість підходів базувалися на простих математичних моделях і евристиках.

Перші спроби автоматизувати аналіз зображень і відео мали на меті розв'язання вузьких завдань, таких як розпізнавання друкованих символів, що стало основою для розвитку технологій оптичного розпізнавання символів (OCR). Експерименти почалися в 1959 році, коли нейрофізіологи показали кішці низку зображень, намагаючись співвіднести реакцію в її мозку. Вони виявили, що він спочатку реагує на жорсткі краї або лінії, і з наукової точки зору це означає, що обробка зображень починається з простих форм, таких як прямі краї [6].

У 1960-х роках почали з'являтися перші методи виявлення границь, серед яких варто відзначити оператор Собела та методи виявлення країв на основі градієнтів. Це був період, коли комп'ютерне бачення в основному сприймалося як сукупність технік обробки зображень з акцентом на виявлення ознак і контурів.

Приблизно в той же час була розроблена перша технологія комп'ютерного сканування зображень, яка дозволила комп'ютерам оцифровувати та отримувати зображення. Ще одна віха була досягнута в 1963 році, коли комп'ютери змогли

перетворити двовимірні зображення в тривимірні форми. У 1960-х роках штучний інтелект став академічною галуззю дослідження, і це також поклало початок пошукам штучного інтелекту щодо вирішення проблеми людського зору. «Перцептрон», рання штучна нейронна мережа, розроблена Френком Розенблатом, заклала основу для пізніших систем комп'ютерного зору на основі нейронних мереж.

Зі збільшенням обчислювальних можливостей у 1970-1980-х роках розпочався розвиток алгоритмів, що дозволяли вирішувати складніші завдання.

У 1974 році була запроваджена технологія оптичного розпізнавання символів, яка могла розпізнавати текст, надрукований будь-яким шрифтом або гарнітурою. Так само інтелектуальне розпізнавання символів (ICR) могло розшифрувати рукописний текст, який використовує нейронні мережі. Відтоді OCR і ICR знайшли свій шлях до обробки документів і рахунків-фактур, розпізнавання номерних знаків транспортних засобів, мобільних платежів, перетворення машин та інших розширених програм [6].

Серед таких методів особливої уваги заслуговують алгоритми виявлення ключових точок, такі як методи Кані, SIFT і SURF, які стали фундаментом для побудови систем розпізнавання об'єктів. «Детектор країв Кані» (оператор виявлення країв, який використовує багатоетапний алгоритм для виявлення широкого діапазону країв на зображеннях) і «перетворення Гафа» (метод, що використовується для виявлення простих геометричних форм на зображеннях) стали значним внеском у цієї епохи. З'явилися також перші алгоритми тривимірної реконструкції сцен на основі стерео-зображень, що дало змогу відтворювати просторові моделі на основі двовимірної інформації [7].

У 1982 році нейробіолог Девід Марр встановив, що зір працює ієрархічно, і запровадив алгоритми для машин, щоб виявляти краї, кути, криві та подібні основні форми. Паралельно комп'ютерний вчений Куніхіко Фукусіма розробив мережу клітин, які можуть розпізнавати шаблони. Мережа під назвою «Neocognitron»

включала згорткові шари в нейронну мережу. Дослідники почали досліджувати розпізнавання об'єктів і розуміння сцени за допомогою методів машинного навчання. «Моделі суміші Гауса» або «Модель гауссової суміші» (GMM) також стали популярними для кластеризації та моделювання візуальних даних [8].

1990-ті роки принесли значний прогрес у застосуванні статистичних методів і машинного навчання для вирішення завдань комп'ютерного зору. В цей час було розроблено метод опорних векторів (SVM) і перші класифікатори на основі дерев рішень, що дозволило покращити точність розпізнавання об'єктів. Фреймворк виявлення об'єктів Віоли-Джонса, який використовує AdaBoost, став широко використовуватися в розпізнаванні обличчя у реальному часі. Однак, ці методи були обмежені в здатності обробляти великі обсяги даних і складні зображення, тому більшість підходів залишалися недостатньо ефективними для широкого застосування в реальному світі.

До 2000 року основна увага приділялася розпізнаванню об'єктів; а до 2001 року з'явилися перші програми для розпізнавання обличчя в реальному часі. Стандартизація того, як набори візуальних даних позначаються тегами та анотуються, з'явилася в 2000-х роках. Революційний прорив у комп'ютерному зорі відбувся на початку XXI століття з розвитком глибокого навчання і появою згорткових нейронних мереж (CNN) [8]. Ці моделі значно підвищили точність розпізнавання зображень, оскільки здатні автоматично вивчати складні ознаки з даних, що дозволило відмовитися від ручної розробки ознак, яка була основою класичних підходів. Запуск мережі AlexNet у 2012 році на змаганні ImageNet став знаковою подією, продемонструвавши переваги глибоких нейронних мереж у порівнянні з традиційними алгоритмами. AlexNet значно знизилася частота помилок при розпізнаванні зображень. Після цього прориву рівень помилок впав лише до кількох відсотків.

Сьогодні розвиток комп'ютерного зору пов'язаний із застосуванням більш складних і глибоких моделей, таких як ResNet, Inception і EfficientNet, що

дозволяють вирішувати завдання класифікації, сегментації, детекції об'єктів та навіть генерації нових зображень. У поєднанні з методами аугментації даних, трансферного навчання і безперервного навчання сучасні підходи забезпечують високу гнучкість і масштабованість у різних галузях застосування, від медичної діагностики до автономного транспорту.

Отже, еволюція комп'ютерного зору від класичних методів до сучасних підходів відображає загальний прогрес у галузі штучного інтелекту, з акцентом на розвиток потужних обчислювальних засобів і більш ефективних алгоритмів, які змінюють уявлення про можливості автоматизованого аналізу візуальної інформації.

1.3 Завдання комп'ютерного зору

Комп'ютерний зір як науковий напрямок досліджує теорію та методи створення штучних систем, здатних отримувати інформацію у вигляді зображень. Відеоінформація може бути представлена у різних форматах, включаючи відеопотоки, зображення з декількох камер або тривимірні дані, отримані, наприклад, з медичних сканерів. Як інженерна галузь, комп'ютерний зір прагне застосувати ці теоретичні основи та моделі для розробки систем з автоматичною обробкою візуальної інформації. Прикладами таких систем є [9]:

- системи управління процесами (промислові роботи, автономні транспортні засоби);
- системи відеоспостереження;
- системи організації інформації (наприклад, індексація баз даних зображень);
- системи моделювання об'єктів або навколишнього середовища (аналіз медичних зображень, топографічне моделювання);

– системи взаємодії (пристрої введення для систем людино-машинної взаємодії).

Комп'ютерний зір можна розглядати як доповнення, а не протиставлення біологічному зору. У біології досліджується зорове сприйняття людей і різних тварин, з подальшим моделюванням роботи цих систем через фізіологічні процеси. У той же час комп'ютерний зір аналізує та описує апаратні чи програмні системи, призначені для обробки візуальної інформації. Співпраця між біологічним і комп'ютерним зором виявилася продуктивною для обох наукових дисциплін.

Найпоширеніші завдання комп'ютерного зору можна розділити на 3 групи. Кожна група має набір завдань, які дотримуються певної парадигми. Наприклад, будь-яке завдання на класифікацію означає присвоєння певного ярлика певному об'єкту (це може бути ціле зображення, об'єкт на малюнку тощо). Ось такі групи і відповідні їм конкретні завдання [10]:

- класифікація – присвоєння певної мітки певному об'єкту: класифікація зображень, тегування зображень, прогнозування атрибутів;
- виявлення – виявлення та класифікація певного об'єкта;
- сегментація – поділ зображення на окремі частини або ділянки: семантична сегментація, сегментація екземплярів, паноптична сегментація.

Розпізнавання образів полягає у класифікації вхідних даних шляхом виокремлення ключових ознак, які відрізняють ці дані від несуттєвих елементів. При постановці задач розпізнавання прагнуть використовувати математичний апарат, що дозволяє замінити експериментальні підходи, які є характерними для теорії штучних нейронних мереж, на логічні міркування та математичні докази. Задача ідентифікації полягає у виборі конкретного об'єкта з-поміж схожих йому об'єктів.

Оцінка пози є завданням візуального штучного інтелекту, що полягає у визначенні просторового положення та орієнтації об'єктів або людських тіл на основі візуальних даних. Цей процес включає оцінювання положення і орієнтації

певних ключових точок на об'єкті або тілі людини. На рисунку 1.1 наведено приклад оцінки пози [11].



Рисунок 1.1 – Оцінка пози на основі реальних даних

Відстеження об'єктів – це безперервне завдання комп'ютерного зору, метою якого є відстеження певного об'єкта або кількох об'єктів у послідовності кадрів, наприклад, на відеоплівці. Кінцевою метою будь-якого алгоритму відстеження об'єктів є виявлення необхідних об'єктів і стеження за ними, коли вони рухаються та зазнають змін зовнішнього вигляду чи пози. На рисунку 1.2 наведено приклад відстеження об'єктів [12].



Рисунок 1.2 – Відстеження об'єктів у реальному часі

Розпізнавання облич є завданням комп'ютерного зору, спрямованим на ідентифікацію або верифікацію особи на основі характерних ознак її обличчя. Це досягається шляхом виділення ключових рис обличчя та їх порівняння з базою даних відомих осіб. Технологія розпізнавання облич широко застосовується для цілей ідентифікації та автентифікації. Одним із найвідоміших прикладів цієї технології є система Face ID від компанії Apple. Технологія розпізнавання облич базується на алгоритмах машинного навчання і глибокого навчання, які аналізують обличчя, визначаючи ключові ознаки, такі як відстань між очима, форма носа та рота, контури обличчя тощо. Ці ознаки потім порівнюються з базами даних для ідентифікації або верифікації особи. Приклад застосування даної технології [13] наведено на рисунку 1.3.

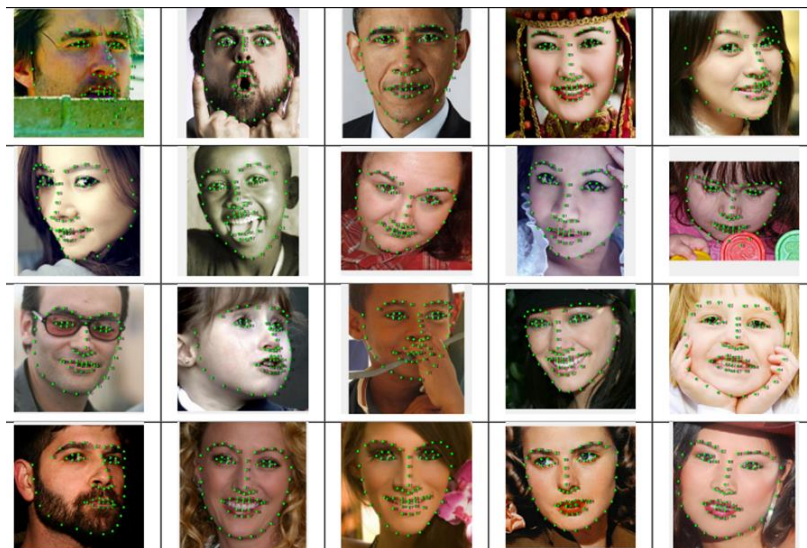


Рисунок 1.3 – Розпізнавання облич

Класифікація полягає у віднесенні об'єкта до певного класу. Це може включати завдання, такі як розпізнавання літер або визначення наявності дефектів у технічних деталях. Класифікація використовується для розпізнавання об'єктів, облич, жестів, тексту на зображеннях і відео. Наприклад, системи автоматичного розпізнавання номерних знаків, розпізнавання обличчя для автентифікації або

класифікація пошкоджень у промисловій дефектоскопії. Віднесення об'єкта до певного класу відображає найтипівішу проблему класифікації, і, коли говорять про розпізнавання образів, найчастіше мають на увазі саме цю проблему. На рисунку 1.4 наведено приклад класифікації [14].

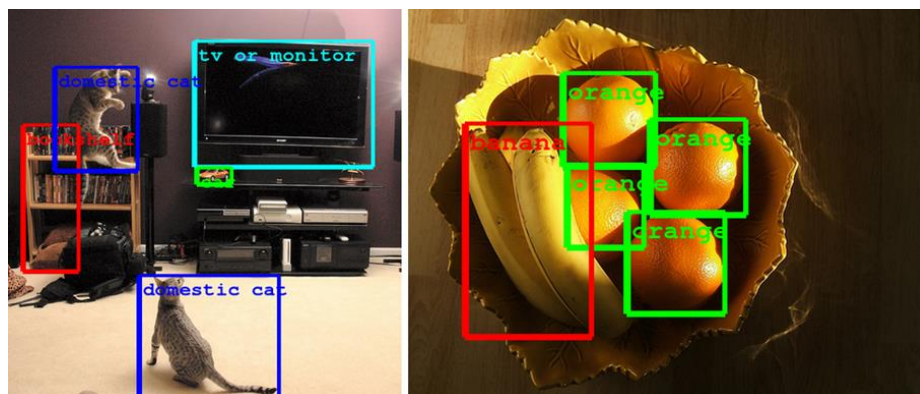


Рисунок 1.4 – Приклад класифікації об'єктів

Сегментація зображень є процесом поділу цифрового зображення на окремі частини або сегменти, які часто називають суперпікселями [15]. Основною метою сегментації є спрощення структури зображення або його перетворення в більш зручну форму для подальшого аналізу або передачі. Сегментацію широко використовують для виділення об'єктів або їх меж, таких як лінії або контури. У процесі сегментації кожному пікселю надається мітка, що відповідає певним характеристикам, які можуть бути спільними для групи пікселів, наприклад колір, яскравість або текстура. Як результат, формується набір сегментів, що охоплюють усе зображення, або контури, які його описують. Кожен сегмент містить пікселі, схожі між собою за визначеними характеристиками, тоді як сусідні сегменти істотно відрізняються за цими ознаками, створюючи чіткий поділ між різними частинами зображення. Приклад сегментації наведено на рисунку 1.5. Замість обробки всього зображення, сегментація дозволяє працювати лише з релевантними частинами, що підвищує ефективність обчислювальних процесів і зменшує

кількість необхідної інформації для аналізу. Сегментація дозволяє спростити зображення, зменшуючи кількість даних для обробки, шляхом об'єднання пікселів у більші області на основі схожих характеристик, таких як колір, текстура чи яскравість. Для багатьох автоматизованих систем, таких як автономні транспортні засоби, сегментація є ключовим етапом для ідентифікації об'єктів (машин, пішоходів, дорожніх знаків) і прийняття рішень у реальному часі.



Рисунок 1.5 – Приклад сегментації зображення

Відновлення сцени полягає у реконструкції тривимірної моделі на основі кількох зображень або відеоданих сцени. Це завдання передбачає відтворення просторової структури сцени у тривимірному вигляді. У найпростішому варіанті відновлення може обмежуватися набором точок у тривимірному просторі, які представляють ключові елементи сцени. Більш складні методи дозволяють створювати повноцінні тривимірні моделі сцени, включаючи точні форми та текстури об'єктів. Такі моделі мають широке застосування, зокрема в робототехніці, комп'ютерній графіці та віртуальній реальності.

Завдання відновлення зображень полягає у видаленні шумів, що виникають через різні фактори, такі як шум давачів або розмитість через рух об'єктів [16].

Найпростішим підходом до вирішення цієї задачі є застосування фільтрів, зокрема фільтрів низьких або середніх частот, що зменшують інтенсивність шумів, зберігаючи основні деталі зображення. Однак складніші методи базуються на моделюванні очікуваного вигляду окремих ділянок зображення, що дозволяє відновлювати інформацію більш точно. Для досягнення кращого результату, ці методи можуть використовувати попередній аналіз зображень або відео для виявлення важливих структур, таких як лінії чи межі. Цей підхід дозволяє більш точно керувати процесом фільтрації, застосовуючи його до відповідних частин зображення, що в результаті підвищує якість видалення шумів і збереження деталей. Етапи процесу відновлення зображень: попередня обробка даних, навчання моделі, відновлення, післяобробка (за необхідності застосовуються додаткові методи, наприклад, згладжування або підсилення кольорів). Типовим прикладом відновлення зображень є відновлення старих фотографій і відео, таких як історичні або сімейні архіви. Приклад відновлення зображення наведено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Приклад відновлення зображення

1.4 Застосування комп'ютерного зору в робототехніці

Комп'ютерний зір у робототехніці – це технологія, яка дозволяє роботам та автоматизованим системам "бачити" і сприймати навколишнє середовище через камери та сенсори, обробляючи отримані зображення або відео для подальшого використання в алгоритмах [17]. Це важлива частина сучасних роботизованих систем, яка дає роботам здатність до навігації, розпізнавання об'єктів і ухвалення рішень в реальному часі.

Існують різні типи систем комп'ютерного зору, від одномірних до тривимірних. Хоча їхні принципи роботи відрізняються, спільна мета залишається незмінною: сприймати, розпізнавати та, що важливіше, інтерпретувати інформацію. Результати роботи таких систем можуть застосовуватись для широкого кола завдань, таких як управління роботами, ідентифікація об'єктів для перевірки, підрахунок і вимірювання деталей, а також моніторинг і контроль виробничих процесів. Типова система комп'ютерного зору складається з камери для збору візуальних даних, низки алгоритмів і методів аналізу (які можуть варіюватися в залежності від використання 1D, 2D або 3D технологій), а також здатності витягувати й аналізувати інформацію з цифрових зображень або відео. Отримані дані використовуються для управління процесами та прийняття рішень.

У виробничій промисловості комп'ютерний зір широко використовується для автоматизації завдань, таких як завантаження контейнерів роботами, відбір і розміщення об'єктів у логістиці або перевірка якості та вимірювання деталей. Зосередимо увагу на двомірних і тривимірних системах, оскільки одномірні є менш цікавими для сучасних виробничих завдань.

2D-бачення є широко застосовуваною технологією у виробничих процесах і зазвичай не викликає серйозних складнощів. Системи двовимірного зору вже багато років використовуються в індустрії для інспекції, вимірювання та контролю якості. Вони працюють на основі відносно простих алгоритмів штучного інтелекту,

які аналізують зображення та розпізнають об'єкти за їхніми фізичними характеристиками, такими як форма, розмір та контури. Оскільки 2D-системи обробляють лише плоске двовимірне зображення, вони не можуть визначати висоту або глибину об'єкта. Це робить їх менш ефективними для додатків, де критично важливо знати форму в трьох вимірах, але вони чудово підходять для завдань, як-от перевірка характеристик, вимірювання розмірів, зчитування штрих-кодів, розпізнавання символів, перевірка етикеток, моніторинг і відстеження об'єктів, а також виявлення їхньої присутності.

2D-бачення має ряд специфічних особливостей, які роблять його ефективним у певних додатках, але також створюють певні обмеження [18]. Ключові характеристики:

- плоске сприйняття (системи 2D-бачення працюють з двовимірними зображеннями, що означає, що вони можуть визначати тільки такі характеристики, як форма, контури та розмір об'єктів, але не мають інформації про глибину чи висоту);
- залежність від текстури (2D-бачення найкраще працює з текстурованими об'єктами, де візуальні відмінності добре виражені, що дозволяє алгоритмам легше ідентифікувати об'єкти за їхніми зовнішніми ознаками);
- освітлення та контраст (ці системи дуже чутливі до умов освітлення, якість зображення та точність аналізу залежать від контрасту і тіней, зміни в освітленні можуть негативно вплинути на роботу системи);
- простота обробки (алгоритми 2D-бачення порівняно простіші та менш вимогливі до обчислювальних ресурсів, ніж 3D-алгоритми – це дозволяє швидше обробляти дані на менш потужному обладнанні, особливо для базових завдань);
- швидке застосування (завдяки своїй простоті, 2D-системи легко інтегруються в існуючі процеси та широко використовуються у виробництві для таких завдань, як контроль якості, перевірка розмірів, зчитування штрих-кодів, розпізнавання символів і виявлення присутності об'єктів);

– обмеження у складних завданнях (2D-системи мають обмежені можливості для аналізу складних об'єктів, особливо тих, де важлива інформація про об'єм або тривимірну форму, вони менш ефективні для завдань, які потребують точного розуміння просторових взаємозв'язків);

– калібрування (для точності роботи необхідне ретельне калібрування камери та обладнання, навіть невеликі зміщення можуть призвести до помилок в аналізі зображень).

Ці особливості роблять 2D-бачення ідеальним для відносно простих і плоских об'єктів, проте його можливості обмежені, коли потрібна детальна тривимірна інформація.

Алгоритми 2D-бачення добре підходять для базових оглядових завдань, проте мають обмеження при виконанні складних завдань, що потребують глибшого розуміння об'єктів у трьох вимірах. Технічно, 2D-системи можуть наближатися до 3D-бачення за допомогою спеціальних методів, таких як використання кількох камер або лазерів. Однак навіть у таких випадках точність визначення глибини залежить від точного розташування та орієнтації камер.

2D-бачення має кілька обмежень, особливо коли справа стосується відстеження об'єктів у середовищах з чутливим освітленням. Найкраще воно працює з текстурованими об'єктами, оскільки такі об'єкти легше розпізнавати за їхніми візуальними характеристиками. Однак, для ефективної роботи системи необхідне точне калібрування, оскільки будь-які відхилення можуть вплинути на точність сприйняття. Крім того, для досягнення прийнятної частоти кадрів і швидкості обробки 2D-бачення потребує потужної апаратної платформи, що може ускладнювати його використання в реальному часі в деяких виробничих процесах.

3D-бачення є більш просунутим підходом у порівнянні з 2D-баченням, оскільки дозволяє роботам і системам розуміти не лише площинні характеристики об'єктів, але й їхню глибину, форму та просторові взаємозв'язки. Це відкриває

можливості для вирішення складніших завдань, які потребують точної інформації про тривимірні характеристики об'єктів, таких як висота, об'єм і структура.

Основні особливості та переваги 3D-бачення:

– глибина і структура (3D-системи можуть визначати форму і розмір об'єктів, що дозволяє роботам точніше взаємодіяти з навколишнім середовищем, особливо під час складних маніпуляцій з об'єктами різної форми);

– стереозір та інші методи (для отримання 3D-зображень можуть використовуватися різні методи, як-от стереозір – використання двох або більше камер для створення тривимірної карти сцени, лазерні сканери або час прольоту світла, які вимірюють відстань на основі відбитого світла);

– менше залежності від освітлення (3D-системи менш чутливі до змін у освітленні, оскільки вони використовують не лише візуальні ознаки, а й інформацію про глибину, що дозволяє їм краще працювати в умовах з нестабільним або слабким освітленням);

– точність при складних завданнях (у таких застосуваннях, як маніпуляція з предметами нестандартної форми, збірка, або навігація в складному середовищі, 3D-системи значно перевершують 2D за рахунок своєї здатності точніше визначати форму та просторові відносини між об'єктами);

– промислове застосування (3D-бачення широко застосовується для автоматизації складних виробничих процесів, таких як роботизоване складання, контроль якості виробів зі складними формами, палетизація (укладання вантажів), відстеження руху і безпілотні транспортні засоби).

Однак 3D-бачення також має певні виклики. Системи потребують більшої обчислювальної потужності для обробки тривимірних даних і, як правило, є дорогими у впровадженні через складні апаратні та програмні вимоги. Але їхні переваги в точності і функціональності роблять їх незамінними для багатьох інноваційних технологій.

І 2D, і 3D алгоритми є складними, однак 3D-дані легше використовувати, коли вони базуються на тривимірних моделях для аналізу. Це робить процеси, як-от 3D-сканування, контроль якості та відстеження на основі моделей, значно ефективнішими, якщо вхідними даними є 3D-дані. У результаті система технічного зору стає швидшою і точнішою, що допомагає оптимізувати виробничі процеси, покращити контроль якості та досягти кращих результатів у різних галузях, особливо в автоматизації.

Системи 3D-бачення аналізують і інтерпретують тривимірні дані, як-от хмари точок, 3D-моделі або стереозображення. Вони використовують різноманітні алгоритми комп'ютерного зору для вилучення корисної інформації з 3D-даних [19]. Створення таких даних може здійснюватися різними методами.

Лазерна тріангуляція – це один з найпоширеніших методів 3D-бачення, який широко використовується для отримання точних тривимірних зображень об'єктів [20]. Цей метод використовує активне джерело світла (зазвичай лазер) і камеру, встановлену під певним кутом до лазера. Працює наступним чином:

- лазер проектує тонку лінію світла (часто у вигляді поперечної лінії) на поверхню об'єкта;
- коли лазерний промінь взаємодіє з поверхнею об'єкта, він відхиляється, змінюючи свою траєкторію відповідно до форми об'єкта;
- камера, розташована під кутом до лазера, фіксує це відхилення – завдяки цьому зображення профілю об'єкта змінюється, що дозволяє камері збирати інформацію про тривимірну структуру об'єкта;
- позиція відбитого променя на зображенні, зафіксованому камерою, дає змогу алгоритмам розрахувати точний тривимірний профіль об'єкта.

Використовуючи ці дані, система формує детальну 3D-модель об'єкта.

Цей метод дозволяє отримувати високоточні дані про форму і поверхню об'єктів, що робить його популярним у таких застосуваннях, як:

- точне вимірювання форм і виявлення дефектів;

- створення 3D-моделей існуючих об'єктів;
- виявлення та обробка складних форм у виробничих процесах.

Лазерна триангуляція є надійним і високоточним методом для отримання тривимірної інформації, особливо в середовищах, де необхідна висока точність. На рисунку 1.7 представлена схема роботи лазерної триангуляції.

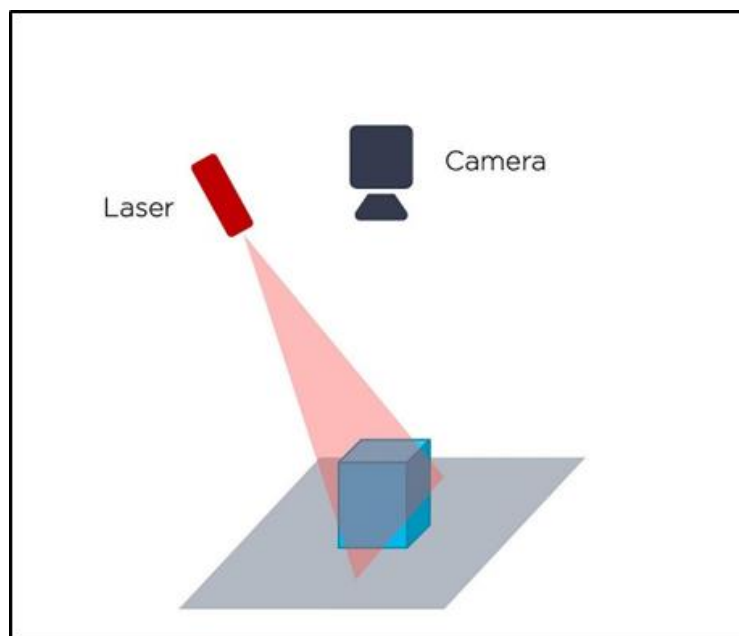


Рисунок 1.7 – Лазерна триангуляція

Стереобачення є ще одним методом машинного 3D-бачення, що базується на використанні двох камер, розташованих у різних точках, для захоплення зображень одного і того ж об'єкта [21]. Порівнюючи отримані зображення, система машинного зору здатна визначити глибину та форму об'єкта. Цей підхід часто застосовується для виявлення перешкод, автономної навігації та управління роботизованими системами. Існує також варіант стереобачення, відомий як темпоральне стерео, при якому використовується одна рухома камера, яка робить два послідовні знімки з різних позицій, імітуючи ефект стерео, подібно до того, як це роблять дві лінзи. На рисунку 1.8 представлено принцип роботи стереобачення.

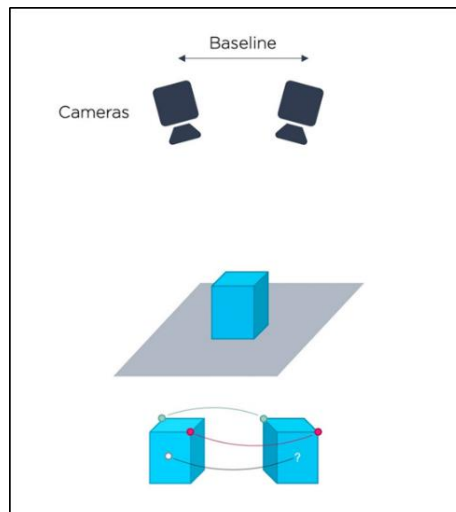


Рисунок 1.8 – Стереобачення

Метод часу польоту (Time-of-Flight, ToF) заснований на вимірюванні тривалості, за яку світло проходить від системи машинного зору до об'єкта і назад [22]. У цьому методі використовується світло, а не радіохвилі. Вимірюючи час, необхідний для прольоту, система машинного зору здатна обчислити відстань до об'єкта, що дозволяє формувати тривимірні зображення. Цей підхід часто застосовується в сферах, де необхідні висока точність і точність, зокрема в автомобільній промисловості для систем запобігання зіткненням. На рисунку 1.9 представлено принцип роботи даного методу.

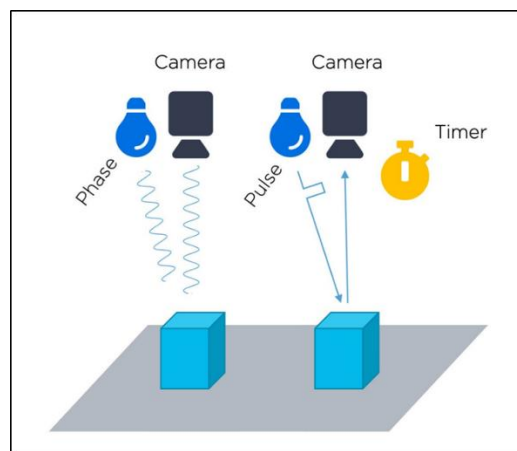


Рисунок 1.9 – Метод часу польоту

Технологія структурованого світла передбачає проектування специфічного світлового шаблону на об'єкт, що аналізується [23]. Це аналогічно лазерній тріангуляції, однак, на відміну від використання єдиного лазерного променя, у цьому випадку застосовується ціле поле світла. Камера фіксує спотворене зображення, яке підлягає подальшому аналізу. Завдяки цьому процесу система машинного зору може визначити форму та глибину об'єкта, виявляючи геометричні спотворення, які виникають внаслідок взаємодії проекції з поверхнею об'єкта. Структуроване світло забезпечує високу швидкість отримання даних, оскільки одночасно захоплює інформацію з великої площі. Цей метод також дозволяє досягати високої точності вимірювань, що робить його популярним у промислових застосуваннях. Принцип роботи цього методу представлено на рисунку 1.10.

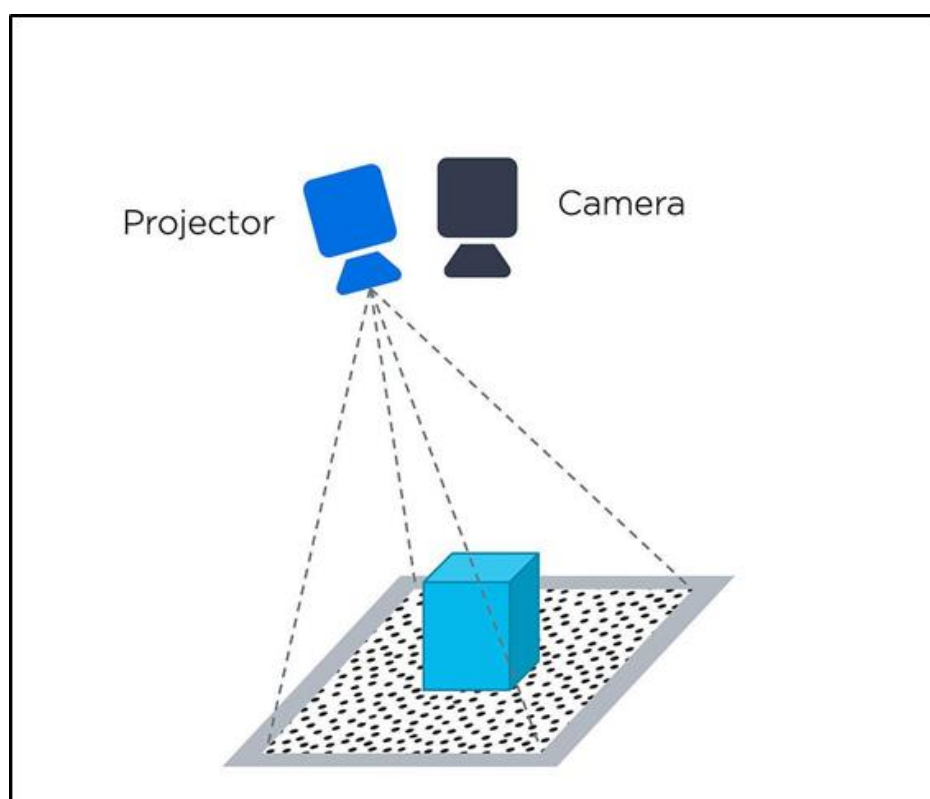


Рисунок 1.10 – Метод структурованого світла

1.5 Апаратне та програмне забезпечення для створення комп'ютерного зору

1.5.1 Апаратне забезпечення

У створенні систем комп'ютерного зору для роботів використовуються різні сенсори і пристрої, які забезпечують захоплення і обробку візуальної інформації. Камери є основним сенсором для захоплення зображень і відео, які потім обробляються алгоритмами комп'ютерного зору. Приклади використовуваних типів камер:

- RGB-камери (звичайні камери, які знімають у кольорі та забезпечують інформацію про текстуру і форму об'єктів);
- стереокамери (використовуються для отримання глибинних даних, ґрунтуються на захопленні зображень із двох камер для обчислення відстаней до об'єктів);
- інфрачервоні камери (забезпечують можливість сприйняття об'єктів в умовах низької освітленості або повної відсутності видимого світла);
- Time-of-Flight (ToF) камери (вимірюють час, за який світло відбивається від об'єкта і повертається до камери, створюючи точну карту глибини).

Для обробки зображень і роботи алгоритмів комп'ютерного зору малогабаритні мобільні роботи використовують спеціалізовані обчислювальні пристрої:

- мікроконтролери (MCU) – це малопотужні процесори з обмеженими ресурсами. Вони підходять для простих завдань, таких як обробка базових зображень або виконання простих алгоритмів. Приклади: STM32, ESP32 (рис. 1.11);



Рисунок 1.11 – Плата розробки ESP-WROOM-32

– одноплатні комп'ютери – комп'ютери, всі основні компоненти яких розміщуються на одній платі. Наприклад, Raspberry Pi (рис. 1.12), NVIDIA Jetson Nano (рис. 1.13). Ці пристрої надають потужніші обчислювальні ресурси для виконання складних алгоритмів комп'ютерного зору, як-от розпізнавання об'єктів і класифікація;



Рисунок 1.12 – Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 5 Model B



Рисунок 1.13 – Модуль NVIDIA Jetson Nano Developer Kit

– польові програмовані вентильні матриці (FPGA) – використовуються для прискорення обробки даних і виконання паралельних обчислень. Вони можуть бути корисними для спеціалізованих завдань, таких як обробка зображень у реальному часі з низьким енергоспоживанням.

Крім того, широко використовуються лідари (LiDAR), які застосовують лазери для вимірювання відстаней до об'єктів і створення високоточних 3D-карт довкілля, що особливо актуально для автономних транспортних засобів і мобільних роботів. Ультразвукові датчики, які вимірюють відстань до об'єктів за допомогою звукових хвиль, часто використовуються в системах виявлення перешкод і навігації. Зовнішній вигляд лідару для робота-пилососа представлено на рисунку 1.14.



Рисунок 1.14 – Лідар для робота-пилососа від компанії Хіаомі

Інерціальні вимірювальні пристрої (IMU) слугують для вимірювання кутових і лінійних прискорень, що дає змогу роботу відстежувати своє положення й орієнтацію в просторі. Ці пристрої часто комбінуються з камерами для підвищення точності навігації та сприйняття. Сенсори глибини, такі як Kinect, використовують структуроване світлове проектування для захоплення тривимірної інформації про сцену, що дає змогу аналізувати відстані до об'єктів і розпізнавати жести. Приклад пристрою представлено на рисунку 1.15.



Рисунок 1.15 – Пристрій Pmod NAV (10-DOF Inertial Measurement Unit)

Додатково, датчики кольору та освітленості допомагають аналізувати колірні характеристики об'єктів і керувати освітленням у сцені, що може поліпшити якість захоплених зображень. Спеціальні датчики для машинного зору можуть працювати з ультрафіолетовим або інфрачервоним світлом для специфічних застосувань, як-от аналіз матеріалів або моніторинг стану здоров'я.

Для опрацювання візуальної інформації застосовуються графічні процесори (GPU) і спеціалізовані чипи, які забезпечують швидке опрацювання зображень і виконання складних алгоритмів глибокого навчання. Важливо зазначити, що моделі машинного навчання, навчені на великих наборах даних, також відіграють ключову роль, даючи змогу розпізнавати об'єкти, класифікувати їх і обробляти зображення. Ці пристрої та сенсори є основними компонентами систем комп'ютерного зору для роботів, що дає їм змогу ефективно сприймати та взаємодіяти з навколишнім середовищем. Прикладом використання GPU в робототехніці є застосування платформи NVIDIA Jetson. Це серія високопродуктивних одноплатних комп'ютерів, розроблених спеціально для роботи з обчислювально важкими задачами, такими як комп'ютерний зір, машинне навчання та обробка відео в режимі реального часу.

1.5.2 Програмне забезпечення

Комп'ютерний зір потребує потужного програмного забезпечення для опрацювання даних з камер та інших сенсорів. Для роботи з апаратною частиною і керування процесами комп'ютерного зору використовуються спеціальні операційні системи та фреймворки:

– ROS (Robot Operating System). Це один із найпопулярніших фреймворків для розроблення мобільних роботів, що підтримує різні сенсори та алгоритми. ROS включає модулі для обробки зображень, навігації, планування маршрутів і взаємодії з апаратними компонентами;

– RTOS (Real-Time Operating System). Якщо потрібен жорсткий контроль за часом виконання завдань, такі операційні системи надають можливість виконання процесів у реальному часі, що важливо для високошвидкісних алгоритмів обробки зображень.

Для реалізації комп'ютерного зору розробники використовують спеціалізовані бібліотеки:

– OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Одна з найпопулярніших бібліотек для обробки зображень і відео, що містить безліч алгоритмів для аналізу зображень, розпізнавання об'єктів, фільтрації та трансформації зображень;

– TensorFlow і PyTorch. Ці бібліотеки використовуються для розроблення та навчання нейронних мереж, які застосовуються в задачах класифікації та розпізнавання об'єктів. Вони також підтримують апаратне прискорення за допомогою GPU і TPU;

– YOLO (You Only Look Once). Це один із відомих алгоритмів для детекції об'єктів у реальному часі, який знаходить застосування в мобільних роботах завдяки своїй високій швидкості та точності.

Різні алгоритми комп'ютерного зору можуть бути реалізовані в малогабаритних роботах для вирішення таких завдань:

– виявлення об'єктів. З використанням конволюційних нейронних мереж і спеціалізованих моделей, таких як YOLO, SSD;

– сегментація зображень. Методи поділу об'єктів на зображенні на основі їхньої форми, кольору та інших ознак, наприклад, метод FCN;

– оптичний потік. Метод, що дає змогу оцінити рух об'єктів або самого робота за послідовністю кадрів;

– SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). Алгоритм, що дає змогу роботу одночасно будувати мапу довкілля і визначати своє місце розташування.

Для прискорення обробки даних на малогабаритних пристроях застосовують такі технології:

- GPU. Можуть бути інтегровані в одноплатні комп'ютери, як-от NVIDIA Jetson, для паралельного оброблення зображень;
- TPU. Пристрої, спеціально розроблені для прискорення роботи нейронних мереж;
- NPU. Це спеціалізовані чипи, які оптимізовані для виконання операцій з нейронними мережами.

Таким чином, розробка системи комп'ютерного зору для малогабаритного мобільного робота вимагає збалансованого підходу до вибору апаратних і програмних компонентів. Використання потужних камер і сенсорів для збору даних, ефективних обчислювальних модулів для опрацювання та сучасних алгоритмів для аналізу зображень і прийняття рішень забезпечує успішну роботу робота в реальних умовах. Для оптимізації ресурсів важливо вибрати пристрої з підтримкою апаратного прискорення і добре оптимізоване програмне забезпечення.

1.6 Постановка задач та мети дослідження

Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи малогабаритного робота за рахунок розробки системи комп'ютерного зору на базі модуля ESP32-CAM. Система повинна виявляти об'єкти в полі зору, класифікувати їх та передавати інформацію для подальшого використання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- проведення аналізу сучасних підходів до реалізації систем комп'ютерного зору у мобільних роботах, визначення переваг та недоліків існуючих рішень;
- вибір та обґрунтування апаратної платформи для створення мобільного робота, зокрема, підбір камери, обчислювальних модулів та сенсорів;
- розробка програмного забезпечення для обробки зображень та розпізнавання об'єктів на основі бібліотек OpenCV та нейромережі YOLOv8;

– проведення експериментальних досліджень роботи мобільного робота у реальних умовах з метою перевірки працездатності системи.

1.7 Висновки до розділу 1

У першому розділі даної роботи були розглянуті ключові поняття комп'ютерного зору, його цілі та сфери застосування. Аналіз історичного розвитку показав перехід від класичних методів обробки зображень до сучасних підходів на основі глибокого навчання. Комп'ютерний зір є невід'ємною складовою сучасних робототехнічних систем, забезпечуючи можливість автоматичного аналізу візуальної інформації та підвищення рівня автономності роботів.

2 ПІДБІР ЗАСОБІВ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

2.1 Сучасні рішення робототехніки

Згідно з визначенням в ISO 8373:2012, робот – це механізм, який запрограмований у двох або більше осях та має певну ступінь автономності, і рухається у своєму середовищі з метою виконання призначених йому задач [24]. Він функціонує у своєму робочому середовищі та виконує поставлені завдання. Це автоматизований пристрій, який за рахунок вбудованого програмного забезпечення може замінювати людину у виконанні фізичних або когнітивних завдань.

Робототехніка як наука пройшла кілька ключових етапів розвитку, кожен із яких характеризується різним рівнем інтелектуальних та технічних можливостей роботів. Історія створення роботів умовно ділиться на три покоління.

Перше покоління роботів (1960-ті роки). Роботи цього періоду були максимально простими за своєю функціональністю. Вони діяли за чітко прописаною програмою, що не допускала жодних змін у процесі роботи. Основною сферою їхнього використання була автоматизація простих виробничих процесів, таких як зварювання, фарбування або транспортування матеріалів. Їхня ефективність залежала від стабільності середовища, оскільки вони не могли адаптуватися до змін.

Друге покоління роботів. У цьому поколінні з'явилися гнучкі програмні алгоритми. Роботи стали здатними виконувати складні завдання, такі як точна збірка деталей або маніпуляція об'єктами з урахуванням особливостей середовища. Основна відмінність полягала у здатності самостійно обирати оптимальний алгоритм дій, базуючись на даних, отриманих від датчиків. Ці роботи вже могли працювати в умовах, де середовище змінювалося, але їхня здатність до адаптації була обмеженою попередньо запрограмованими сценаріями.

Третє покоління роботів. Сучасні роботи третього покоління є результатом інтеграції передових технологій штучного інтелекту та машинного навчання. Вони можуть самостійно навчатися, вдосконалювати свої алгоритми та адаптуватися до змін середовища без втручання людини. Такі роботи не просто виконують команди, а аналізують навколишнє середовище, прогнозують ситуації та приймають оптимальні рішення. Це дозволяє їм використовуватися в складних, небезпечних або непередбачуваних умовах, таких як космічні дослідження чи рятувальні операції.

Сучасні роботи оснащені складними сенсорними системами, що дозволяють їм аналізувати навколишнє середовище, приймати самостійні рішення та адаптуватися до змін умов. Завдяки використанню алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту, роботи здатні будувати моделі поведінки, що забезпечує виконання навіть нестандартних завдань.

Основні характеристики, що відрізняють роботів від інших інтелектуальних пристроїв:

- sense (сприйняття). Робот здатний отримувати дані про навколишнє середовище завдяки сенсорам, таким як мікрофони, камери, інфрачервоні, електромагнітні або електромеханічні датчики;

- think (обробка). Робот аналізує зібрану інформацію, моделює навколишнє середовище та приймає рішення для досягнення поставленої мети. Це можливе завдяки алгоритмам, які дозволяють оцінювати ситуацію і коригувати дії в реальному часі;

- act (дія). Робот впливає на зовнішнє середовище за допомогою виконавчих механізмів, таких як маніпулятори, приводи чи мобільні платформи.

Для структуризації підходів до розробки та застосування роботів використовуються загальновизнані класифікації, зокрема, відповідно до міжнародних стандартів та досліджень галузевих організацій.

Класифікація за міжнародним стандартом ISO 8373:2012:

– промислові роботи. Це маніпулятори, створені для автоматизації технологічних процесів у виробництві. Вони зазвичай базуються у виробничих цехах і виконують такі функції, як складання, зварювання, фарбування, транспортування деталей. Основна мета — підвищення продуктивності, точності та зменшення людського втручання у важкі або небезпечні процеси. Приклад промислового роботу наведено на рисунку 2.1;



Рисунок 2.1 – Ковальсько-пресовий промисловий робот

– сервісні роботи. Роботи, які розроблені для заміни або доповнення людини у вирішенні рутинних завдань у сферах, що не пов'язані з виробництвом. Їх використання спрямоване на поліпшення комфорту, ефективності та безпеки у сфері послуг, домашньому господарстві, медицині тощо.

Класифікація за Міжнародною федерацією робототехніки (IFR):

– особисті роботи. Роботи, що використовуються для повсякденного життя, покликані полегшити виконання побутових чи інших завдань. Приклади: кухонні

роботи (автоматизовані системи для приготування їжі), роботи-прибиральники (пристрої, такі як пилососи (рис. 2.2) або газонокосарки, здатні працювати автономно), роботи-доглядальниці (допомагають у догляді за людьми похилого віку або дітьми), роботи-партнери (включають інтерактивні іграшки або вихованці, такі як роботи-собаки);



Рисунок 2.2 – Сервісний робот-пилосос

– професійні роботи. Роботи, що використовуються для отримання доходу або надання комерційних послуг. Приклади: роботи-консультанти (автоматизовані системи для взаємодії з клієнтами в магазинах або банках), роботи-адміністратори (пристрої, що виконують офісні функції, такі як організація зустрічей чи сортування документів), роботи-гідди (навігація у музеях, виставкових центрах чи туристичних локаціях), роботи-кур'єри (використовуються для доставки товарів та поштових відправлень), роботи-діагности (автономні медичні пристрої для проведення діагностики та моніторингу стану пацієнтів [25]). Приклад робота-діагноста наведено на рисунку 2.3;



Рисунок 2.3 – Робот-хірург Da Vinci

– роботи для безпеки. Їхні можливості дозволяють виконувати завдання в умовах, небезпечних для людини, збирати та аналізувати дані, а також надавати оперативну допомогу. Безпілотні літальні апарати використовуються для аерофотозйомки, моніторингу великих територій, пошуку постраждалих та оцінки масштабів руйнувань. Наземні роботи здатні проникати в зони, недоступні для людей, передавати відео та інші дані в режимі реального часу. Підводні роботи використовуються для пошуку людей у воді, обстеження затонулих суден та інших об'єктів. Роботи для пошуку в завалах здатні проникати в вузькі проміжки та виявляти ознаки життя під завалами. Роботи-сапери використовуються для знешкодження вибухових пристроїв та інших небезпечних предметів;

– військові роботи. Багатофункціональні машини, яких можна задіяти в різних бойових операціях. Як і війська, роботів тут поділяють на наступні групи: сухопутні (самохідні танки і бронетранспортери, роботи-сапери і універсальні роботизовані бойові комплекси), морські (надводні, так і підводні пристрої для супроводу, патрулювання або виявлення мін), повітряні (роботи-безпілотники для

розвідки, спостереження і навіть нанесення артилерійських ударів) [26]. Приклад військового робота наведено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – БПЛА Ghost 4 від Anduril Industries

Одним із ключових підходів є класифікація за способом управління. Роботи можуть бути жорсткопрограмованими, перепрограмованими та гнучкопрограмованими. Жорсткопрограмовані роботи працюють за фіксованими алгоритмами, які не змінюються під час виконання завдання. Вони підходять для стабільних середовищ, де завдання не змінюються з часом. Перепрограмовані роботи, навпаки, здатні навчатися у процесі роботи. Під час першого циклу оператор задає алгоритм, а надалі робот самостійно адаптується до умов, коригуючи свої дії. Гнучкопрограмовані роботи є найбільш інноваційними: вони створюють власні програми дій залежно від мети завдання, зібраної інформації та змін у середовищі.

Ще одним важливим критерієм є матеріали, з яких виготовлений робот. За цією ознакою роботи поділяють на жорсткі, м'які та гібридні. Жорсткі роботи виготовляються з металу або інших твердих матеріалів, що забезпечує високу точність і міцність конструкції. Вони застосовуються у виробничих процесах і для завдань, де потрібна велика сила. М'які роботи, навпаки, використовують еластичні матеріали, схожі на тканини живих організмів. Такі пристрої можуть змінювати

форму, що робить їх ідеальними для роботи у вузьких просторах або біомедичних дослідженнях. Гібридні роботи поєднують жорсткі й еластичні елементи, що дозволяє їм виконувати завдання, які вимагають одночасно сили та гнучкості.

Рівень автономності також є важливим аспектом класифікації. Роботи можуть бути автономними, напівавтономними або керованими. Автономні роботи не потребують втручання людини та самостійно приймають рішення на основі зібраних даних. Вони широко застосовуються у складних і небезпечних умовах, таких як дослідження глибоководних регіонів чи космічний моніторинг. Напівавтономні роботи виконують завдання за заздалегідь прописаними алгоритмами, але періодично потребують перевірки з боку оператора. Керовані роботи повністю залежать від управління людиною. Вони використовуються там, де потрібна висока точність або контроль, наприклад, у знешкодженні вибухонебезпечних пристроїв.

За способом пересування роботи поділяють на кілька категорій. Найпростішими є колісні роботи, які пересуваються по рівних поверхнях. Це найпоширеніший тип серед логістичних роботів, таких як пристрої, що працюють на складах Amazon. Гусеничні роботи мають кращу прохідність, що дозволяє їм працювати на пересіченій місцевості. Крокуючі роботи імітують ходьбу людини або тварин, що робить їх ідеальними для роботи у складних умовах, наприклад, у рятувальних операціях. Літаючі роботи включають дрони та безпілотні літальні апарати, які застосовуються для моніторингу або доставки. Плаваючі роботи призначені для роботи на воді чи під водою, а гексаподи, які мають шість ніг, здатні пересуватися навіть найскладнішими поверхнями.

Ці класифікації дають змогу чітко розмежувати функції роботів та визначити їхню сферу застосування, що є важливим у процесі розробки нових пристроїв та технологій. Роботи, що працюють у складних умовах, як-от космічні дослідницькі апарати або роботи для аварійно-рятувальних операцій, додатково використовують спеціалізовані технології навігації, такі як SLAM (одномоментна локалізація та

картографування), та оптимізовані енергозберігаючі алгоритми. Крім того, завдяки інтеграції інтернету речей (IoT), роботи можуть взаємодіяти з іншими пристроями, створюючи розподілені системи управління та моніторингу. Такий підхід відкриває нові горизонти для використання роботів у смарт-містах, логістиці, медицині та освіті.

Отже, робототехніка, як галузь, що стрімко розвивається, постійно збагачується новими технологіями (рис. 2.5). Сучасні роботи – це складні інженерні системи, які поєднують в собі досягнення різних галузей науки та техніки. Робот є не просто механізмом, а складною багатофункціональною системою, здатною адаптуватися до зовнішніх умов та виконувати завдання, які раніше вимагали людського втручання.



Рисунок 2.5 – Людиноподібній робот-андроїд ТОРІО 2.0, який може грати в настільний теніс з людьми

2.2 Сучасні малогабаритні мобільні роботи

Сучасні малогабаритні мобільні роботи є однією з найперспективніших галузей робототехніки. Вони застосовуються у різних сферах: від побуту до наукових досліджень, а їхня популярність обумовлена компактністю, високою маневреністю та доступністю технологій. Ці роботи характеризуються використанням різноманітних технічних засобів і матеріалів, які забезпечують їхню функціональність.

Колісні роботи – це різновид роботів, які використовують колеса для пересування. Вони відрізняються високою маневреністю, швидкістю пересування та простотою конструкції. Основні компоненти колісного робота:

- корпус – служить основою для всіх інших компонентів. Виготовляється з різних матеріалів (пластик, метал) і може мати різноманітну форму;
- колеса – забезпечують рух робота. Можуть бути різного діаметра, мати різний малюнок протектора і бути виготовленими з різних матеріалів;
- двигуни – перетворюють електричну енергію на механічну, приводячи в рух колеса;
- мікроконтролер – компонент робота, який керує всіма його функціями.
- сенсори – дозволяють роботу орієнтуватися в просторі, уникати перешкод, визначати відстань до об'єктів. Найбільш поширені датчики: ультразвукові, інфрачервоні, лазерні, лідар;
- акумулятори – забезпечують роботу електроніки робота;
- драйвери – керують роботою двигунів.

Колісні роботи, оснащені камерами, є надзвичайно популярними завдяки їхній ефективності у виконанні завдань, пов'язаних із комп'ютерним зором, автономною навігацією та взаємодією з навколишнім середовищем. Такі роботи використовуються в наукових дослідженнях, навчанні, логістиці, побуті та інших сферах.

Одним із відомих прикладів таких роботів є модель TurtleBot 4 – універсальна платформа для розробників, що активно використовується у сфері досліджень і навчання [27]. TurtleBot 4 є універсальною платформою для навчання та досліджень. Його технічні характеристики включають базову конструкцію на двох провідних колесах із додатковою опорою для стабільності, лазерний далекомір для картографування простору та сенсори зіткнення. TurtleBot 4 (рис. 2.6) оснащується камерою, лазерним далекоміром або ультразвуковими сенсорами для навігації. Ця платформа базується на популярній операційній системі ROS, що забезпечує гнучкість у програмуванні. TurtleBot 4 виготовляється із пластику та легких металів, що дозволяє йому залишатися малогабаритним і легким для транспортування.



Рисунок 2.6 – Робот TurtleBot

Іншим прикладом є JetBot (рис. 2.7), розроблений компанією NVIDIA. Цей робот створений для задач, пов'язаних зі штучним інтелектом, та оснащений одноплатним комп'ютером NVIDIA Jetson Nano. JetBot використовує камеру для комп'ютерного зору, що дозволяє виконувати задачі, пов'язані із розпізнаванням об'єктів, аналізом руху та побудовою маршруту [28]. Він підтримує роботу з

нейронними мережами, такими як YOLO, і часто застосовується для досліджень у сфері машинного навчання. Корпус робота виготовлений із акрилу, а колісна платформа забезпечує стабільний і маневрений рух.



Рисунок 2.7 – Модель AI Robot Kits від NVIDIA JetBot Partners

MiR100 – це один з найпопулярніших комерційних мобільних роботів, призначений для автоматизації внутрішніх логістичних процесів на виробництвах, складах, лікарнях та інших підприємствах [29]. Створений датською компанією Mobile Industrial Robots (MiR), він відрізняється високою маневреністю, простотою використання та гнучкістю у налаштуванні. Роботи серії MiR (рис. 2.8) оснащуються базовою камерою для розпізнавання об'єктів у робочому середовищі, хоча їхній основний функціонал орієнтований на промислові задачі. Завдяки малій висоті конструкції та компактності вони можуть слугувати джерелом натхнення для створення мобільних платформ із можливостями комп'ютерного зору.



Рисунок 2.8 – Робот MiR100

DJI RoboMaster S1 – це інноваційний освітній робот, який поєднує в собі елементи інженерії, програмування та штучного інтелекту [30]. Створений компанією DJI, відомою своїми безпілотними літальними апаратами, S1 (рис. 2.9) став популярним інструментом для вивчення робототехніки серед широкого кола користувачів – від дітей до професіоналів. Робот оснащений потужним процесором, різноманітними датчиками (камерами, ультразвуковими датчиками, гіроскопами), а також механізмами для руху, стрільби гелевими кульками та маніпуляцій. Завдяки модульній конструкції, S1 може бути легко налаштований та доповнений новими функціями.



Рисунок 2.9 – Робот DJI RoboMaster S1

Отже, описані прототипи надають широкий спектр технічних рішень, які можна адаптувати для розробки колісного робота з камерою. Вони демонструють, як сучасні технології комп'ютерного зору та сенсорні системи дозволяють створювати компактні й ефективні мобільні платформи.

Для створення малогабаритних мобільних роботів використовуються різні технічні засоби. Камери (RGB, стереокамери або інфрачервоні) є одним із основних елементів, які забезпечують здатність до зорового аналізу середовища. Лазерні

далекоміри (LiDAR) використовуються для точного вимірювання відстані та побудови карт місцевості, що є важливим для автономної навігації. Ультразвукові сенсори забезпечують роботу на коротких відстанях і використовуються для виявлення перешкод у реальному часі.

Іншою важливою складовою є модулі для інерційних вимірювань (IMU), які включають акселерометри та гіроскопи. Вони допомагають роботам підтримувати баланс, оцінювати швидкість руху та зміну положення у просторі. У деяких випадках роботи оснащуються тепловізійними сенсорами для роботи у темряві або в складних погодних умовах.

Матеріали для малогабаритних роботів також підбираються з урахуванням завдань. Зазвичай використовуються легкі та міцні сплави, такі як алюміній або магній, для конструктивних елементів. Для корпусу застосовуються високоміцні пластики, що забезпечують захист внутрішніх компонентів від пошкоджень, але при цьому зменшують загальну вагу пристрою.

Таким чином, сучасні малогабаритні мобільні роботи є багатофункціональними пристроями, оснащеними найсучаснішими сенсорами та виконаними з інноваційних матеріалів. Їхні технічні можливості дозволяють виконувати завдання в широкому спектрі застосувань: від побуту до складних наукових експериментів.

2.3 Обґрунтування вибору обладнання

Розроблення системи комп'ютерного зору для малогабаритного мобільного робота вимагає ретельного вибору технічних засобів, які забезпечують виконання поставлених задач. Вибір обладнання обумовлений вимогами до точності, швидкодії, компактності, енергоефективності та здатності працювати в реальних умовах експлуатації. Система комп'ютерного зору має забезпечувати розпізнавання об'єктів у реальному часі, визначення їх розташування та формування відповідних

команд для керування мобільним роботом. Ці вимоги обумовлюють необхідність застосування камер з високою роздільною здатністю, ефективних алгоритмів обробки зображень та достатньо продуктивних обчислювальних модулів.

Основними критеріями вибору компонентів є:

- розмір і вага. Обладнання має бути легким і компактним для встановлення на мобільний робот;
- споживання енергії. Для автономного функціонування потрібні компоненти з мінімальним енергоспоживанням;
- сумісність. Всі компоненти повинні бути інтегрованими в єдину систему;
- надійність. Пристрої повинні функціонувати в різних умовах, зокрема в умовах обмеженого освітлення або за наявності шумів у сигналах;
- ціна. Розробка передбачає створення недорогого пристрою, який може бути відтворено в умовах обмеженого бюджету.

Був проведений порівняльний аналіз початкових комплектів, на основі якого можна зібрати власний проєкт (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз аналогів

Характеристика	Smart Robot Car Kit (Elegoo)	Makeblock mBot	Freenove 4WD Smart Car Kit	SunFounder PiCar-X
1	2	3	4	5
Ціна	Доступна, нижча за більшість аналогів (~\$50-80)	Висока (~\$150-200)	Висока (~\$150-200, плюс Raspberry Pi)	Висока (~\$170-300, плюс Raspberry Pi)
Контролер	Elegoo Uno R3	Makeblock mCore	Raspberry Pi,	Raspberry Pi,
Програмування	Arduino IDE, Scratch	Середовище графічного програмування mBlock, Arduino IDE	Python, підтримка OpenCV	Python, підтримка OpenCV і ROS

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
Модульність	Висока: можливість додавання додаткових датчиків, підключення Raspberry Pi для поліпшення обробки	Обмежена: додавання складних модулів ускладнене	Висока: підтримує безліч сенсорів і камер	Висока: можливість інтеграції з LiDAR, камерами та іншими модулями
Підтримка комп'ютерного зору	ESP32-CAM: підтримка базових завдань комп'ютерного зору, таких як розпізнавання об'єктів	Відсутня	Вбудована підтримка під час під'єднання Raspberry Pi, гарний для завдань із машинним зором	Підтримка складних алгоритмів через Raspberry Pi
Шасі та конструкція	Акрил, легке і міцне; 4 колеса	Метал і пластик	Металеві елементи, висока міцність	Метал і пластик, оптимально для навантажень і складних умов
Двигуни	DC-мотори з редукторами, забезпечують маневреність і стабільність	Два двигуни, достатні для простих завдань	Потужні двигуни, адаптовані для роботи з великими навантаженнями	Потужні двигуни, висока якість виконання завдань
Сенсори	ESP32-CAM, HC-SR04, інфрачервоні датчики для стеження за лінією	Датчик світла, інфрачервоний приймач, ультразвуковий датчик відстані	Ультразвукові, підтримка LiDAR	Ультразвуковий, підтримка камер і LiDAR

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
Простота використання	Підходить для початківців і досвідчених користувачів	Ідеальний для новачків і дітей, простий інтерфейс	Складніше налаштування, потрібне знання Python	Підходить для складних завдань, вимагає знань Python
Основне застосування	Навчання, прототипування, дослідження комп'ютерного зору, автономна навігація	Навчання основ робототехніки	Розроблення складних проєктів, включно із завданнями ШІ	Навчання, дослідницькі проєкти, що потребують потужних обчислень
Переваги	Наявність вбудованої ESP32-CAM, низька ціна, гнучкість налаштування, можливість масштабування	Доброзичливий інтерфейс для дітей і початківців	Підтримка складних сенсорів і потужних контролерів	Висока продуктивність, підтримка OpenCV і складних систем управління
Недоліки	Обмежена продуктивність ESP32-CAM для складних завдань, потрібне додаткове програмування	Обмежені можливості розширення, відсутність підтримки комп'ютерного зору	Висока ціна, складність налаштування	Висока ціна, складність роботи для початківців

Для прототипу колісного робота було вирішено використовувати платформу Elegoo Smart Robot Car Kit, яка включає базове шасі, електродвигуни, контролери та датчики. Ця платформа є економічно вигідним рішенням, яке дозволяє швидко зібрати базову модель із можливістю її розширення. Smart Robot Car Kit є кращий серед аналогів, за наступних причин:

- вбудована камера ESP32-CAM. Це значно спрощує реалізацію комп'ютерного зору без необхідності придбання додаткового обладнання, що робить цей набір унікальним для свого цінового сегмента;

- гнучкість. Можливість розширення завдяки підключенню додаткових сенсорів або використанню Raspberry Pi робить його придатним як для простих проєктів, так і для складніших досліджень;

- ціна. Поєднання ESP32-CAM і доступної вартості (~\$50-80) забезпечує найкраще співвідношення ціни та функціональності;

- простота налаштування. Модель Smart Robot Car Kit з ESP32-CAM залишається простою у збірці та використанні, але водночас дає змогу опанувати передові технології, як-от комп'ютерний зір і нейромережі.

Таким чином, цей набір є оптимальним рішенням для освітніх, дослідницьких і аматорських проєктів, пропонуючи функціонал, який часто недоступний в аналогах за таку ж ціну.

Smart Robot Car Kit від компанії Elegoo – це популярний набір для створення колісного робота, який ідеально підходить для освітніх, навчальних і дослідницьких цілей. Завдяки своїй простоті, доступній ціні та можливості розширення функціональності, цей набір використовується як у навчальних закладах для вивчення основ робототехніки, так і розробниками-ентузіастами для побудови власних проєктів.

Основою конструкції робота є шасі (рис. 2.10), що забезпечує каркасу стійкість і служить платформою для всіх інших компонентів. Шасі робота виготовлене з акрилу – легкого та міцного матеріалу, який забезпечує стійкість конструкції й водночас не додає зайвої ваги. Розміри конструкції дозволяють розмістити необхідне обладнання, таке як датчики, камера, плати управління й акумулятори. Характеристики шасі:

- матеріал – акрил (товщина 5 мм);
- форма – прямокутна з отворами для двигунів і плати UNO R3;

- розміри – 200 мм x 150 мм (приблизно);
- кріплення – гвинти та стійки з комплекту.



Рисунок 2.10 – Шасі робота

Приводи та колеса (рис. 2.11) забезпечують рух. У комплекті поставляються чотири двигуни постійного струму з редукторами, які забезпечують достатню потужність для руху робота. Ці двигуни дозволяють досягти оптимального співвідношення між швидкістю й маневреністю. Колеса покриті гумовими накладками, що підвищують зчеплення з різними поверхнями та запобігають ковзанню. Основні характеристики DC-двигунів:

- тип – мотор з редуктором;
- напруга роботи – 3-6 В;
- номінальна швидкість – 200-300 об/хв (при 6 В);
- крутний момент – 0,8-1,2 кг/см;
- струм навантаження – 150-300 мА;
- діаметр коліс – 65 мм;
- тип кріплення – гвинтове кріплення до шасі робота.

Основні характеристики колес:

- кількість – 4 штуки;

- діаметр – 65 мм;
- матеріал – гумові накладки для кращого зчеплення;
- кріплення – прямо на вісь моторів через адаптери.

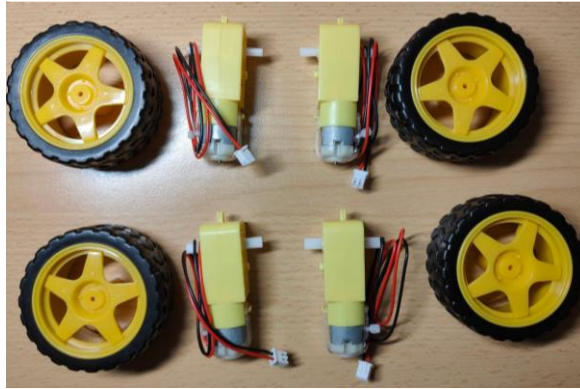


Рисунок 2.11 – Мотори та колеса робота

Характеристики сервоприводу Servo SG90 (рис. 2.12):

- крутний момент – 1,2-1,5 кг/см (при 5 В);
- кут обертання – 180°;
- напруга живлення – 4,8 В - 6 В;
- вага – 9 г;
- час відгуку – 0,12 с/60°.

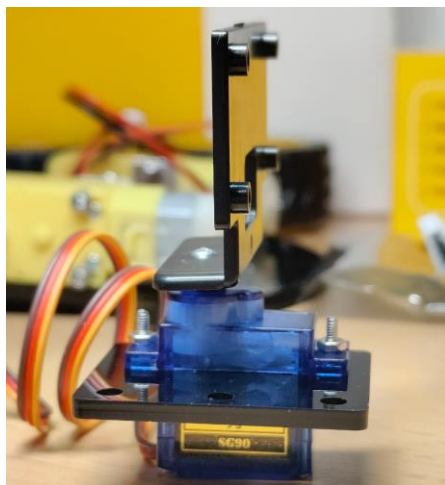


Рисунок 2.12 – Сервопривод SG90

Елементом керування системи є мікроконтролер Uno R3 (рис. 2.13), який відповідає за управління всіма компонентами робота. Uno R3 легко програмується завдяки підтримці великої кількості бібліотек. Для управління моторами використовується драйвер двигунів L298N, який дозволяє змінювати швидкість і напрямок обертання коліс. Драйвер забезпечує стабільну роботу двигунів навіть при змінних навантаженнях. Основні характеристики плати управління UNO R3 (Arduino-сумісна):

- процесор – ATmega328P;
- тактова частота – 16 МГц;
- пам'ять – 32 КБ флеш-пам'яті (з яких 0,5 КБ використовується для завантажувача);
- оперативна пам'ять – 2 КБ;
- вхідна напруга – 7-12 В;
- напруга роботи – 5 В;
- цифрові входи/виходи – 14;
- аналогові входи – 6;
- максимальний струм на вихід – 40 мА.

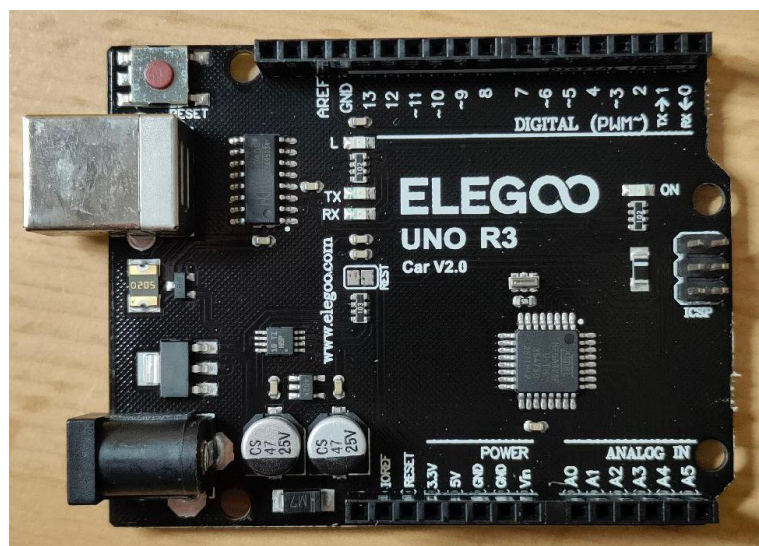


Рисунок 2.13 – Плата UNO R3

Розширювальна плата наведена на рисунку 2.14.

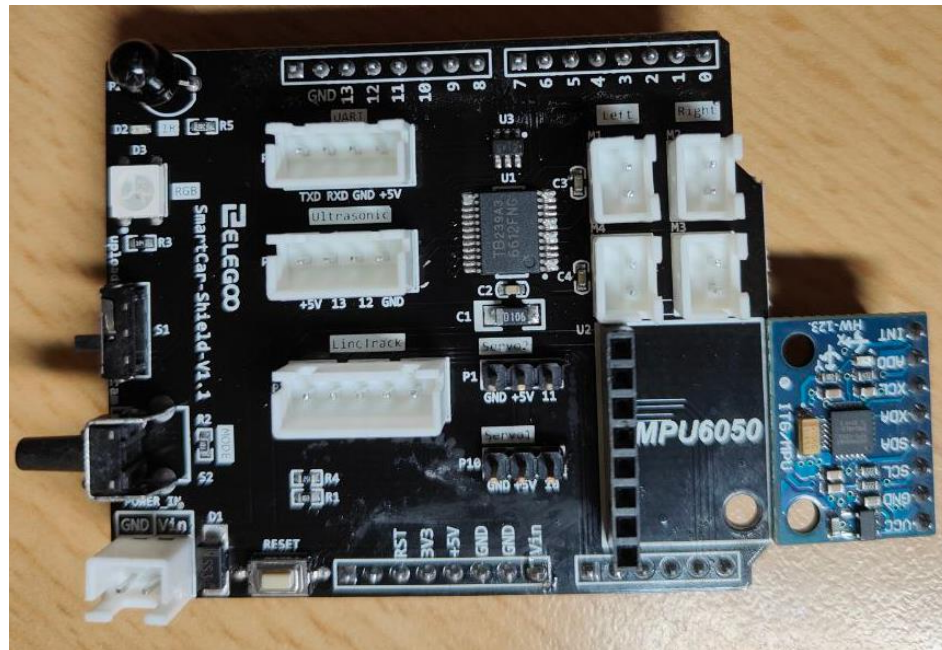


Рисунок 2.14 – Розширювальна плата та модуль GY-521

Набір містить ультразвуковий сенсор HC-SR04 для визначення відстані до об'єктів. Цей сенсор є базовим засобом навігації, що дозволяє роботу уникати зіткнень із перешкодами. Його принцип дії базується на випромінюванні ультразвукових хвиль і вимірюванні часу їхнього відбиття від об'єкта. Також у комплект входять інфрачервоні датчики лінії, які дозволяють роботу орієнтуватися за наміченим маршрутом, наприклад, слідувати лінії на підлозі. Це корисно для створення задач із автоматизованим пересуванням по заданому треку. Основні характеристики ультразвукового сенсору (рис. 2.15) для визначення відстані:

- діапазон вимірювання – 2 см - 400 см;
- точність ± 3 мм;
- напруга роботи – 5 В;
- кут огляду – 15° ;
- час відгуку – менше 15 мс.



Рисунок 2.15 – Ультразвуковий датчик для вимірювання відстані

Характеристики модуля відстеження лінії (рис. 2.16):

- кількість датчиків – 3 ІЧ-датчики (ліва, середня, права сторона);
- робоча напруга – 3,3 В - 5 В;
- вихідний сигнал – цифровий (0 або 1);
- відстань виявлення – 1-2 см;
- принцип роботи – виявлення чорної лінії на світлому фоні за допомогою відбиття інфрачервоного світла.

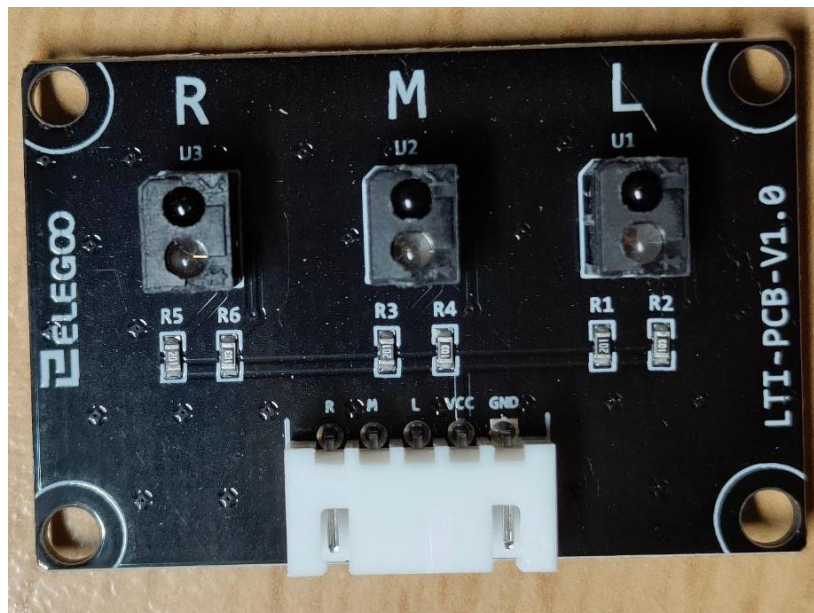


Рисунок 2.16 – Модуль відстеження лінії

Робот живиться від акумуляторної батареї на 7,4 В (Li-ion), яка забезпечує достатню тривалість роботи (2 години). Схему блоку живлення наведено на рисунку 2.17.



Рисунок 2.17 – Схема блоку живлення робота

Smart Robot Car Kit підтримує встановлення додаткових модулів, таких як ESP32-CAM. Камера ESP32-CAM може використовуватися для реалізації функцій комп'ютерного зору, наприклад, розпізнавання об'єктів за допомогою нейронних мереж (YOLOv8). Камера дозволяє знімати відео в реальному часі та передавати його на зовнішній сервер для обробки. Характеристики камери (рис. 2.18):

- процесор – ESP32-D0WD (240 МГц, 2 ядра);
- оперативна пам'ять – 520 КБ SRAM;
- флеш-пам'ять – 4 МБ;
- камера – OV2640 (2 Мп);
- роздільна здатність – до 1600x1200 (UXGA);
- інтерфейси – UART, SPI, I2C;

- підтримка microSD до 4 ГБ;
- бездротовий зв'язок – Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2;
- напруга живлення – 5 В;
- програмування через Arduino IDE або ESP-IDF.

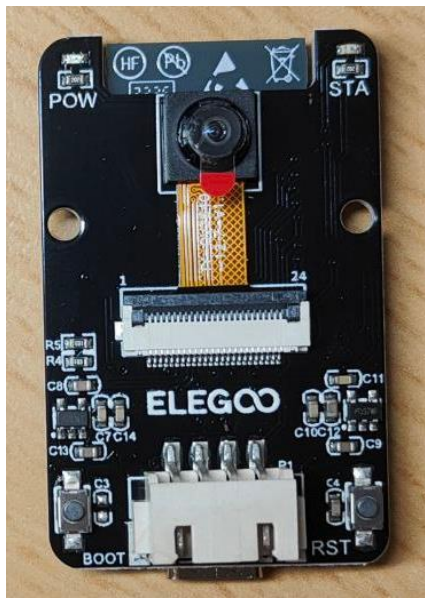


Рисунок 2.18 – Модуль камери ESP-32 Cam

Управління роботом здійснюється через код, написаний на Arduino IDE, який підтримує безліч бібліотек для роботи з сенсорами, двигунами та іншими компонентами. Програма може бути налаштована на виконання різноманітних задач: слідування за лінією, уникнення перешкод, дистанційне керування через Bluetooth або Wi-Fi.

Основні характеристики моделі Smart Robot Car Kit:

- розміри – 250 мм × 150 мм × 80 мм;
- живлення – батарея на 7,4 В;
- контролер – Uno R3;
- сенсори – ESP-32 Cam, ультразвуковий HC-SR04, інфрачервоні датчики лінії;

- швидкість руху – до 0,4 м/с;
- матеріал конструкції – акрил і металеві кріплення;
- програмування – Arduino IDE, підтримка додаткових бібліотек для комп'ютерного зору.

Переваги обраної моделі:

- простота збирання та використання, підходить навіть для новачків;
- доступна ціна у порівнянні з аналогами;
- гнучкість у налаштуванні та можливість розширення.

Недоліки обраної моделі:

- обмежена потужність контролера Elegoo Uno R3 для складних обчислювальних задач;
- обмежена продуктивність ESP32-CAM для складних завдань.

2.4 Вибір програмного забезпечення

У процесі розроблення прототипу мобільного колісного робота з функціями комп'ютерного зору було використано такі програмні інструменти та операційну систему: Windows 11, Arduino IDE, Python, OpenCV і YOLOv8. Вибір кожного з них був обумовлений їхніми технічними перевагами, зручністю роботи та сумісністю з обладнанням.

Для керування апаратною частиною робота було використано Arduino IDE, яка є сумісним з мікроконтролерами Elegoo Uno R3. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і доступні приклади коду дали змогу ефективно програмувати керування двигунами, сенсорами та іншими модулями робота. Програмне забезпечення повністю сумісне з Arduino Uno і ESP32-CAM, що дало змогу інтегрувати керування рухом і збір даних з камери в єдину систему. Можливість роботи як на Windows, так і на інших операційних системах (Linux, macOS) робить Arduino IDE універсальним інструментом. Arduino IDE було обрано як оптимальне рішення для

написання програмного забезпечення нижнього рівня, що забезпечує керування основними функціями робота.

Для реалізації алгоритмів опрацювання даних, керування комп'ютерним зором і взаємодії з ESP32-CAM використовувалася мова програмування Python. Python підтримує безліч бібліотек для обробки зображень і аналізу даних, включно з OpenCV, PyTorch і TensorFlow. Мова підходить як для написання скриптів швидкого прототипування, так і для розробки складних систем. Python легко інтегрується з іншими компонентами проєкту, такими як YOLOv8, OpenCV і зовнішні пристрої. Завдяки простому синтаксису і великій екосистемі Python забезпечив прискорення розробки, тестування і налагодження алгоритмів. Python став основною мовою розробки для завдань, пов'язаних з аналізом даних і реалізацією комп'ютерного зору, завдяки своїй універсальності та підтримці сучасних технологій.

Для опрацювання зображень з камери ESP32-CAM у реальному часі було обрано бібліотеку OpenCV. OpenCV надає інструменти для виконання таких завдань, як фільтрація зображень, розпізнавання об'єктів і трекінг. Бібліотека легко інтегрується в Python-код, що дало змогу швидко налаштувати обробку відео з камери. OpenCV підтримує роботу з різними форматами зображень і відео. Використання OpenCV забезпечило точну обробку зображень для реалізації комп'ютерного зору, а також дозволило інтегрувати дані з YOLOv8.

Неймережу YOLOv8 (You Only Look Once, версія 8) було обрано для реалізації функцій комп'ютерного зору в проєкті через її перевагу над іншими алгоритмами та архітектурами нейронних мереж. Порівняно з конкурентами, такими як SSD (Single Shot Multibox Detector), Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) і попередні версії YOLO, YOLOv8 демонструє баланс між швидкістю, точністю та простотою інтеграції. Крім того, YOLOv8 демонструє чудові результати в умовах реального світу, як-от погане освітлення, складне тло або щільне розташування об'єктів, завдяки вдосконаленим алгоритмам оброблення

і вибору областей інтересу. Вона універсальна і підтримує завдання розпізнавання, класифікації та сегментації, що робить її придатною для широкого спектра завдань. Мережа легко інтегрується з бібліотеками Python, такими як OpenCV, і може бути оптимізована для роботи на малопотужних пристроях, включно з ESP32-CAM. Можливість донавчання на користувацьких даних дає змогу адаптувати YOLOv8 для специфічних завдань. Порівняно з іншими рішеннями, такими як SSD або Faster R-CNN, YOLOv8 перевершує їх за швидкістю, простотою інтеграції та універсальністю, що робить її найкращим вибором для реалізації комп'ютерного зору в цьому проєкті.

Отже, у цьому розділі проведено детальний аналіз сучасних технологій і обладнання для розробки мобільного колісного робота з використанням комп'ютерного зору. Розглянуто аналоги та прототипи роботів, проаналізовано їхні технічні характеристики, програмне забезпечення та можливості інтеграції. На основі цього обґрунтовано вибір платформи Smart Robot Car Kit як основи для створення прототипу завдяки її доступності, гнучкості та можливості модернізації.

Вибір обладнання, такого як камера ESP32-CAM, ультразвукові сенсори, контролер Elegoo Uno R3, та програмного забезпечення, зокрема Arduino IDE, Python, OpenCV і YOLOv8, дозволив створити функціональний і технологічний прототип. Камера ESP32-CAM забезпечила реалізацію базових задач комп'ютерного зору, а YOLOv8 стала основою для точного й швидкого розпізнавання об'єктів у реальному часі.

Система поєднує апаратну ефективність із простотою програмування та середньою точністю виконання поставлених завдань. Завдяки використанню сучасних інструментів і алгоритмів прототип мобільного робота відповідає вимогам до автономності, функціональності й адаптивності в умовах динамічного середовища. Це відкриває перспективи для подальшого вдосконалення і впровадження у реальні проєкти.

2.5 Висновки до розділу 2

У другому розділі даної роботи проведено детальний огляд сучасних рішень у сфері мобільних роботів та систем комп'ютерного зору. Виконано аналіз обладнання та обґрунтовано вибір компонентів для розробки системи комп'ютерного зору, таких як модуль ESP32-CAM та інші апаратні частини. Вибір програмного забезпечення, зокрема бібліотек Python (OpenCV, YOLOv8), дозволив створити ефективну платформу для обробки зображень та розпізнавання об'єктів у реальному часі.

3 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

3.1 Розроблення апаратної частини

Для реалізації малогабаритного мобільного робота важливо детально розглянути апаратні компоненти, що використовуються, і процес їх складання. У цьому розділі представлено ключові елементи конструкції робота, а також покрокову інструкцію з його створення, що дасть змогу забезпечити надійність і функціональність пристрою.

Elegoo Robot Car Kit являє собою універсальний набір для складання мобільного робота, що містить основні апаратні компоненти, які забезпечують його функціональність.

Основою робота є дві акрилові пластини (рис. 3.1), з позначками «А» і «В» – Top Plate (верхня пластина) і Bottom Plate (нижня пластина) відповідно. Відрізнути їх доволі легко – верхня пластина А має додатковий отвір для сервоприводу SG90.

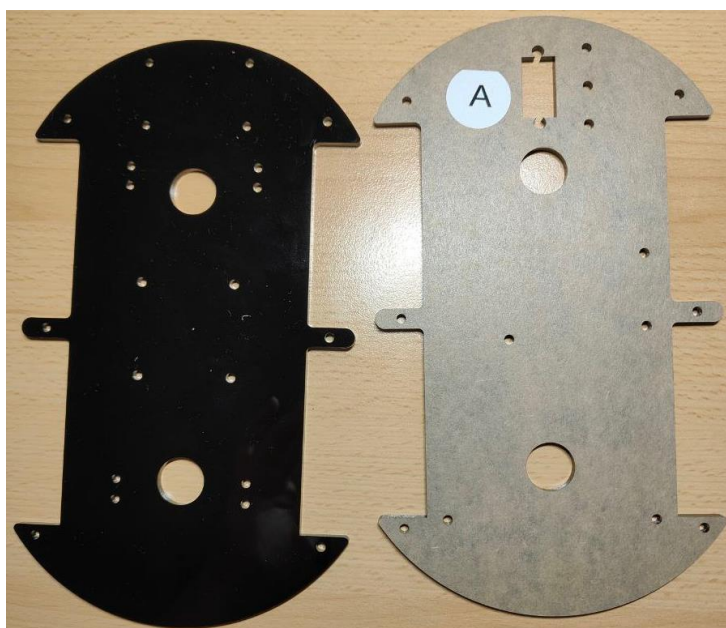


Рисунок 3.1 – Акрилові пластини робота

Після зняття захисної плівки, необхідно зібрати чотири мотори, та встановити їх на нижню пластину (рис. 3.2).

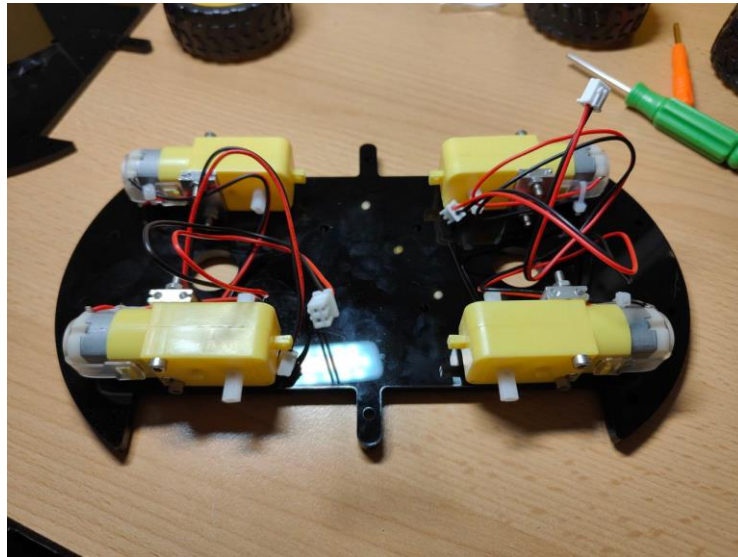


Рисунок 3.2 – Встановлення моторів на пластину

Далі необхідно встановити на нижню пластину модуль слідування по лінії. Датчик складається з трьох інфрачервоних датчиків (рис. 3.3), які дають змогу роботу слідувати за чорною лінією на світлому тлі, забезпечуючи функцію стеження за лінією.

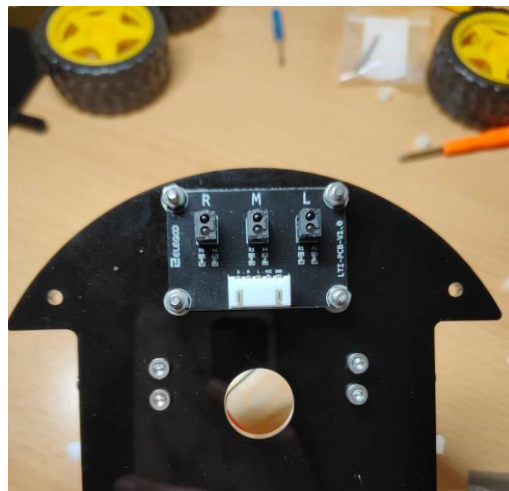


Рисунок 3.3 – Модуль слідування по лінії

Встановлюємо модуль GY-521 на плату розширення. GY-521 – це модуль акселерометра і гіроскопа на базі MPU-6050, який дає змогу вимірювати прискорення і кутову швидкість, забезпечуючи дані про нахил і рух робота. Розширювальна плата OI (V5.0 Expansion Board) слугує для зручного під'єднання різноманітних модулів і датчиків до плати UNO R3, спрощуючи процес складання та запобігаючи помилкам під час під'єднання. З'єднані елементи наведено на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Модуль GY-521 та розширювальна плата

Встановлюємо плату UNO R3 (рис. 3.5) на верхню пластину і приєднуємо до неї розширювальну плату з модулем GY-521 (рис. 3.6). UNO R3 – це мікроконтролерна плата на базі ATmega328P, сумісна з Arduino. Вона забезпечує керування всіма модулями робота і програмується через Arduino IDE.



Рисунок 3.5 – Встановлена плата UNO R3

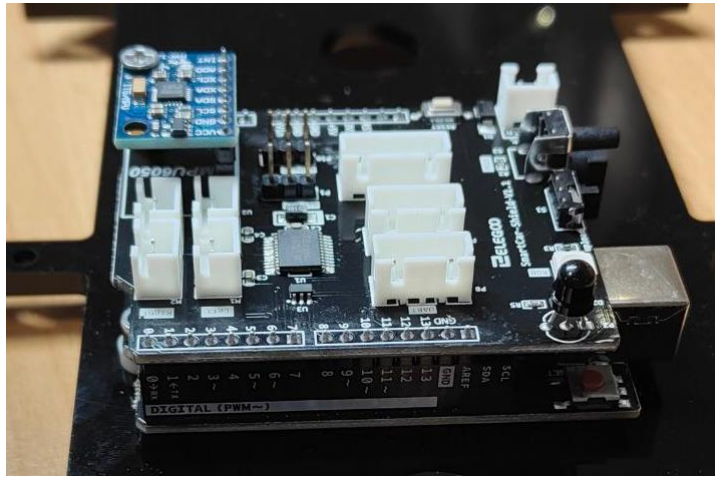


Рисунок 3.6 – Підключення модулів до плати

Для створення системи комп'ютерного зору та сприйняття роботом інформації ззовні необхідно встановити на нерухому платформу такі модулі як: модуль камери ESP-32 Cam, модуль ультразвукового датчика та мікросервопривод Servo SG90.

ESP32-CAM – це модуль із камерою OV2640, побудований на базі мікроконтролера ESP32. Він має можливості Wi-Fi і Bluetooth, що робить його правильним вибором для проєктів відеоспостереження, розпізнавання обличчя і роботи з IoT.

HC-SR04 – ультразвуковий датчик відстані, який використовується для виявлення перешкод на шляху робота. Він вимірює відстань до об'єктів і допомагає уникнути зіткнень.

Мікросервопривод SG90 використовується для повороту ультразвукового датчика, забезпечуючи роботу можливість сканувати простір перед собою і виявляти перешкоди під різними кутами.

Після зборки встановлюємо елементи на верхню пластину (рис. 3.7), попередньо закріпивши на неї батарейний відсік з літєвою батареєю, який забезпечує живлення та роботу робота протягом приблизно 2 годин у режимі відстеження лінії.

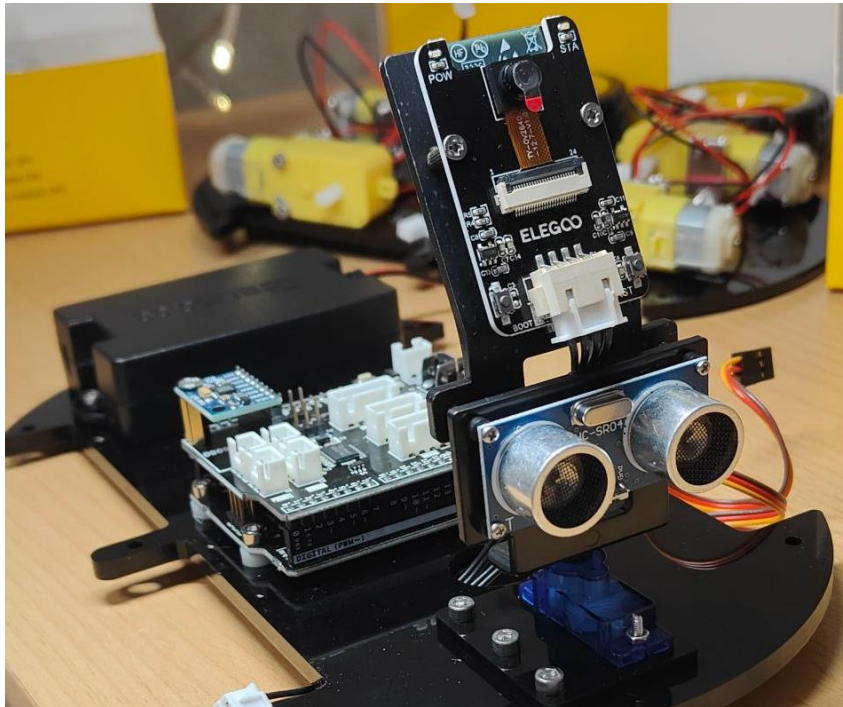


Рисунок 3.7 – Встановлені модулі на верхній пластині

Далі збираємо весь корпус робота, під'єднуємо мотори та всі елементи до плати UNO R3, та прикріплюємо колеса до моторів (рис. 3.8).

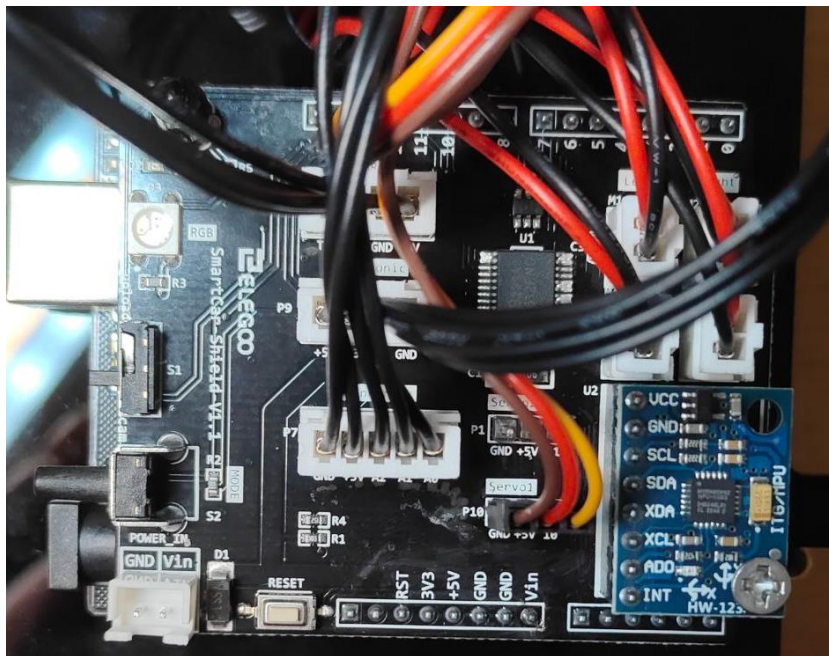


Рисунок 3.8 – Підключення модулів до плати UNO R3

Вигляд отриманої моделі робота наведено на рисунку 3.9.

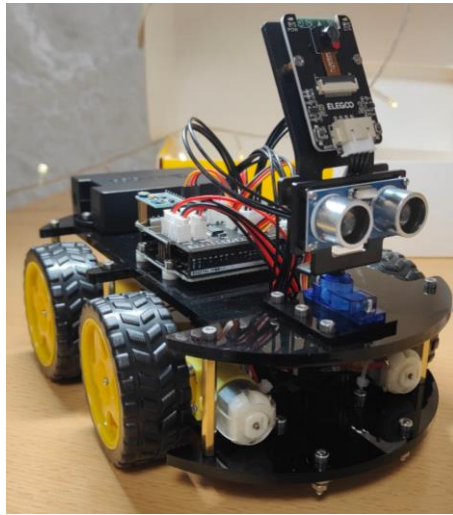


Рисунок 3.9 – Загальний вигляд малогабаритного мобільного робота

Схему підключення всіх елементів наведено на рисунку 3.10.

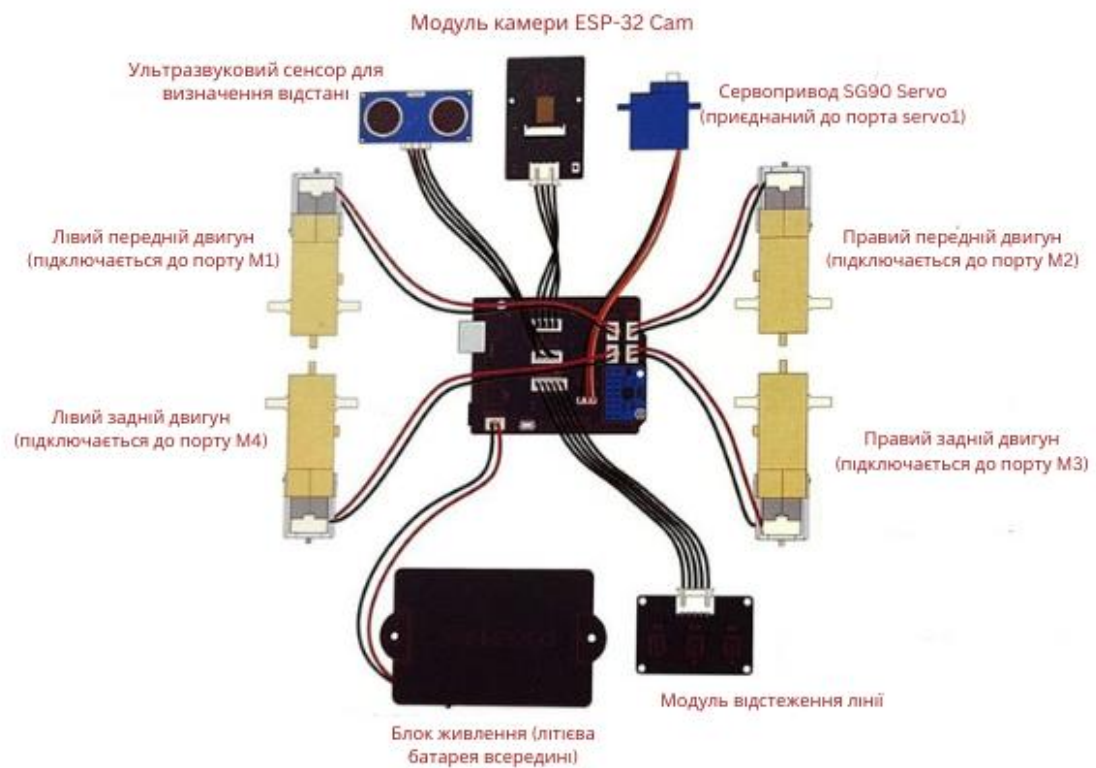


Рисунок 3.10 – Загальна схема підключення модулів

3.2 Розроблення програмного забезпечення

Програмна складова робота є критично важливою для його автономного руху та виконання поставлених завдань. У рамках роботи над проектом було перепрошиито модуль ESP32-CAM (рис. 3.11) для організації бездротового передавання відеопотоку. Пристрій було налаштовано на підключення до точки доступу Wi-Fi (рис. 3.12), що дало змогу забезпечити стабільний канал зв'язку для потокового передавання відео в реальному часі. Основним завданням було адаптувати прошивку під параметри мережі та оптимізувати роботу камери для отримання якісного зображення з мінімальною затримкою. Під час роботи використовувалися інструменти Arduino IDE і бібліотека ESP32, що дало змогу реалізувати функціонал передавання даних за протоколом HTTP. Даний етап є важливою частиною проекту зі створення системи комп'ютерного зору, так як дозволяє використовувати ESP32-CAM як бюджетне і ефективне рішення для потокового відеоспостереження.

Для перевірки працездатності камери ESP32-CAM та її базових функціональних можливостей було виконано первинне налаштування вбудованого веб-сервера. Після успішної прошивки пристрій став доступним у локальній мережі, а відеопотік трансливався за вказаною IP-адресою через браузер. Це дало змогу переконатися в коректності передачі даних, стабільності відеопотоку і якості зображення.

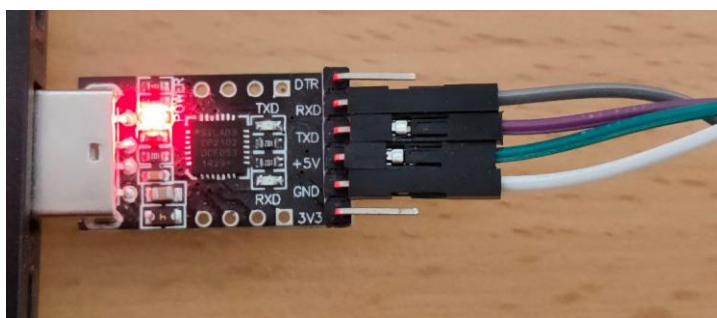
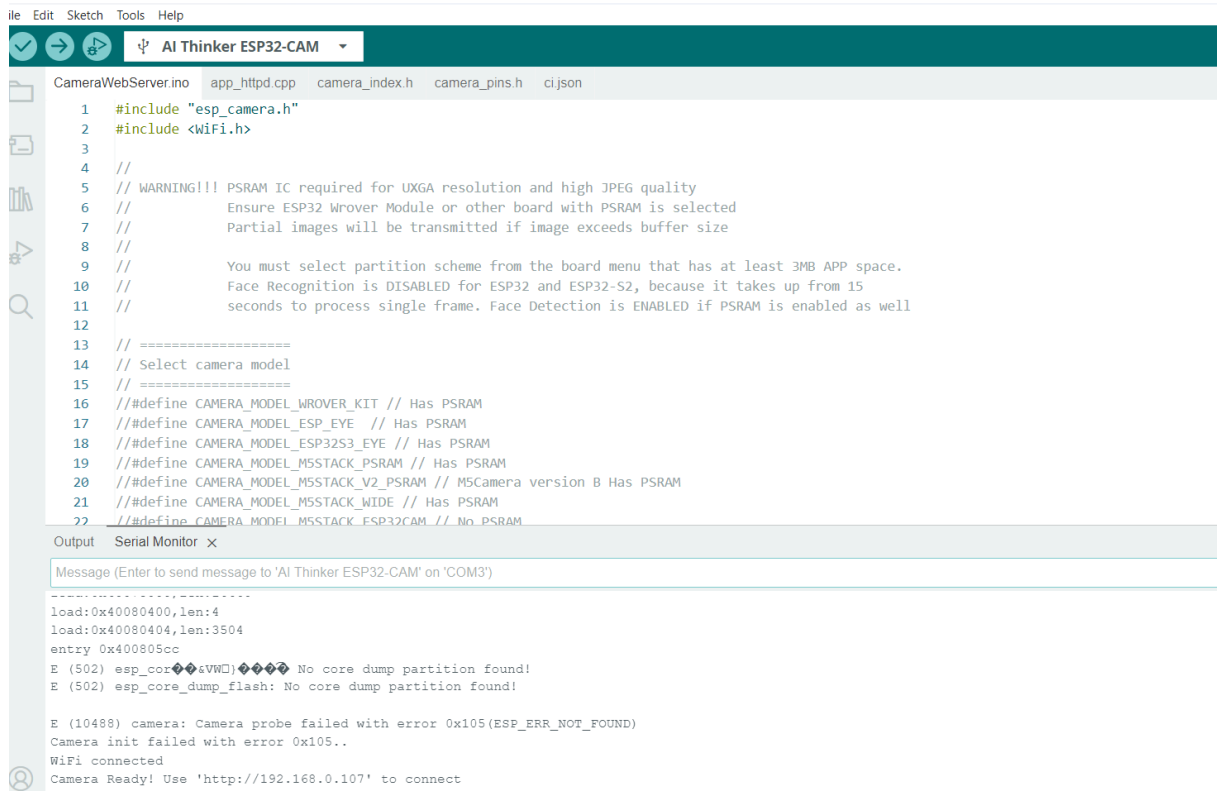


Рисунок 3.11 – Підключення ESP-32 Cam до комп'ютера



```

1 #include "esp_camera.h"
2 #include <WiFi.h>
3
4 //
5 // WARNING!!! PSRAM IC required for UXGA resolution and high JPEG quality
6 // Ensure ESP32 Wrover Module or other board with PSRAM is selected
7 // Partial images will be transmitted if image exceeds buffer size
8 //
9 // You must select partition scheme from the board menu that has at least 3MB APP space.
10 // Face Recognition is DISABLED for ESP32 and ESP32-S2, because it takes up from 15
11 // seconds to process single frame. Face Detection is ENABLED if PSRAM is enabled as well
12 //
13 // =====
14 // Select camera model
15 // =====
16 //#define CAMERA_MODEL_WROVER_KIT // Has PSRAM
17 //#define CAMERA_MODEL_ESP_EYE // Has PSRAM
18 //#define CAMERA_MODEL_ESP32S3_EYE // Has PSRAM
19 //#define CAMERA_MODEL_M5STACK_PSRAM // Has PSRAM
20 //#define CAMERA_MODEL_M5STACK_V2_PSRAM // M5Camera version B Has PSRAM
21 //#define CAMERA_MODEL_M5STACK_WIDE // Has PSRAM
22 //#define CAMERA_MODEL_M5STACK_ESP32CAM // No PSRAM

```

Output Serial Monitor x

```

Message (Enter to send message to 'AI Thinker ESP32-CAM' on 'COM3')
-----
load:0x40080400,len:4
load:0x40080404,len:3504
entry 0x400805cc
E (502) esp_cor[❖❖❖❖❖❖❖❖❖❖] No core dump partition found!
E (502) esp_core_dump_flash: No core dump partition found!

E (10488) camera: Camera probe failed with error 0x105(ESP_ERR_NOT_FOUND)
Camera init failed with error 0x105..
WiFi connected
Camera Ready! Use 'http://192.168.0.107' to connect

```

Рисунок 3.12 – Під'єднання камери до точки Wi-Fi

Успішний результат перепрошивки камери наведено на рисунку 3.13.

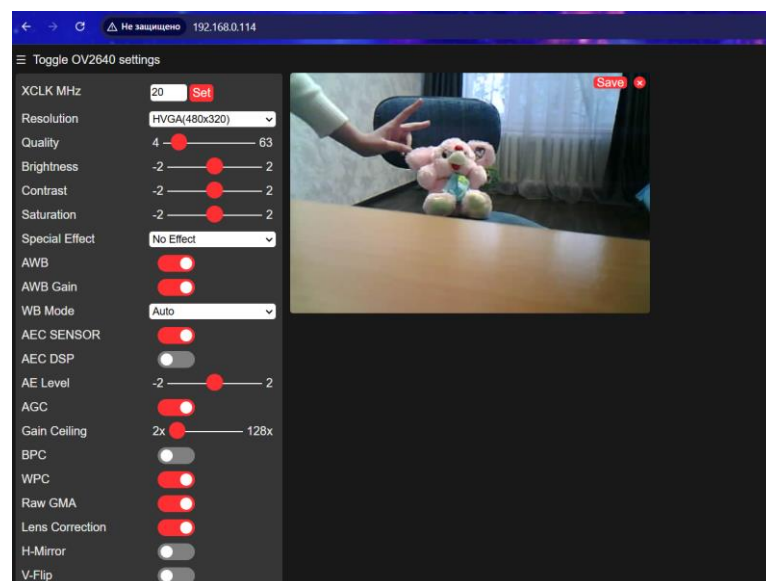


Рисунок 3.13 – Отримання відеопотоку з камери у браузері

Слід зазначити, що підвищення якості відеопотоку, який отримується з модуля ESP32-CAM, призводить до зростання навантаження на обчислювальні ресурси пристрою та пропускну здатність каналу зв'язку. Унаслідок цього спостерігається зниження стабільності стрімінгу, що може проявлятися у вигляді затримок, падіння частоти кадрів або переривання відеопотоку.

Це явище обумовлене обмеженими апаратними можливостями ESP32 та його мережевими характеристиками, оскільки обробка високоякісного відео в реальному часі вимагає значних ресурсів процесора та оперативної пам'яті. Важливим фактором також є обмежена ширина смуги Wi-Fi-з'єднання, яка стає критичною при передачі відео з високою роздільною здатністю та частотою кадрів.

Для успішної перепрошивки камери ESP32-CAM з використанням моделі YOLOv8 потрібне попереднє встановлення та налаштування низки інструментів. Насамперед необхідно встановити Python, оскільки він є основою для роботи з YOLOv8 і взаємодії з камерою. Також обов'язковим етапом є встановлення бібліотеки OpenCV – одного з ключових інструментів для обробки та аналізу зображень (рис. 3.14).

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) – це програмна бібліотека з відкритим вихідним кодом, призначена для розроблення застосунків у галузі комп'ютерного зору та обробки зображень [31]. Бібліотека надає широкий набір інструментів і алгоритмів для аналізу, трансформації та інтерпретації візуальних даних, що робить її незамінною в завданнях автоматизації, машинного навчання та робототехніки.

OpenCV дає змогу інтегрувати алгоритми комп'ютерного зору, оптимізувати потокове відео та коректно працювати з даними, що надходять із камери ESP32-CAM. Таким чином, налаштування Python і OpenCV створює базу для подальшої роботи з YOLOv8, забезпечуючи стабільну прошивку і якісну обробку відеопотоку в реальному часі.

```

C:\Users\Acer>pip install opencv-python
Collecting opencv-python
  Using cached opencv_python-4.10.0.84-cp37-abi3-win_amd64.whl.metadata (20 kB)
Collecting numpy>=1.21.2 (from opencv-python)
  Downloading numpy-2.2.1-cp311-cp311-win_amd64.whl.metadata (60 kB)
Using cached opencv_python-4.10.0.84-cp37-abi3-win_amd64.whl (38.8 MB)
Downloading numpy-2.2.1-cp311-cp311-win_amd64.whl (12.9 MB)
----- 12.9/12.9 MB 10.4 MB/s eta 0:00:00
Installing collected packages: numpy, opencv-python
Successfully installed numpy-2.2.1 opencv-python-4.10.0.84

```

Рисунок 3.14 – Встановлення OpenCV

Для забезпечення можливості роботи камери ESP32-CAM з мовою програмування Python було виконано перепрошивку пристрою (рис. 3.15). У результаті камера отримала нову прошивку, що підтримує передачу даних у форматі, який легко інтегрується з бібліотеками комп'ютерного зору, такими як OpenCV. Це дало змогу обробляти відеопотік безпосередньо в програмній частині системи. Код наведено у Додатку В.

```

CAMERA OK
http://192.168.0.107
/cam-lo.jpg
/cam-hi.jpg
/cam-mid.jpg

```

Рисунок 3.15 – Тестування камери для роботи з Python

Після перепрошивки камери ESP32-CAM для роботи з Python було створено первинний скрипт, який давав змогу під'єднатися до пристрою, обробити потік даних і відобразити відеопотік у режимі реального часу. Тестування скрипта (рис. 3.16) показало, що камера успішно транслює зображення і передає його у форматі, придатному для подальшої обробки засобами Python.

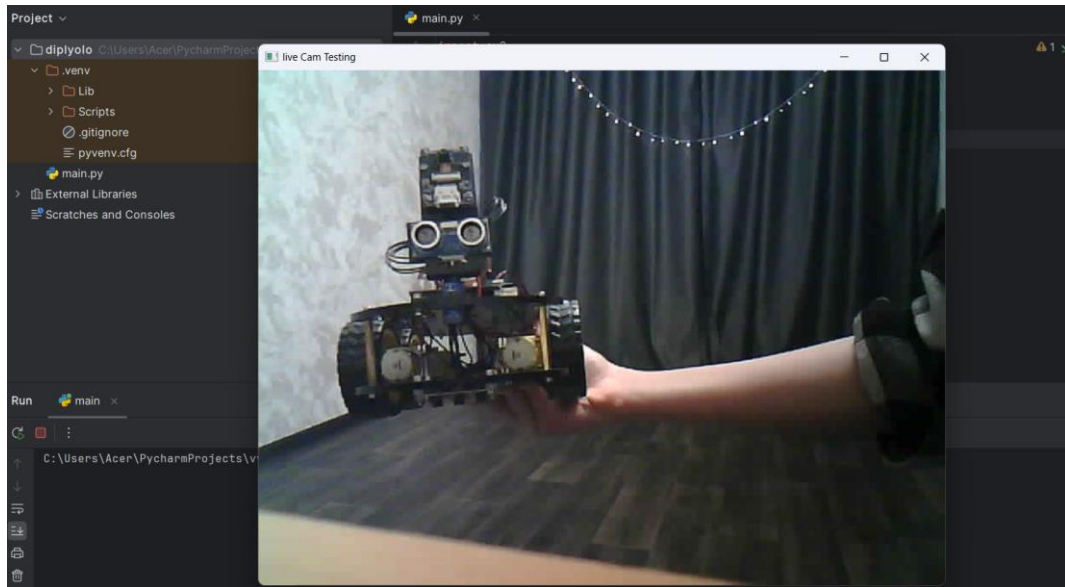


Рисунок 3.16 – Отримання зображення з камери через середовище PyCharm

Для перевірки можливостей неймережі YOLOv8 [32] був розроблений і протестований базовий скрипт на Python. Скрипт дав змогу підключити модель для розпізнавання об'єктів і виконувати аналіз відеопотоку з камери ESP32-CAM у реальному часі. Під час тестування переконалися в коректній роботі моделі, її здатності визначати та класифікувати об'єкти. Результати розпізнавання роботом об'єктів реального світу наведено на рисунках 3.17 - 3.19.

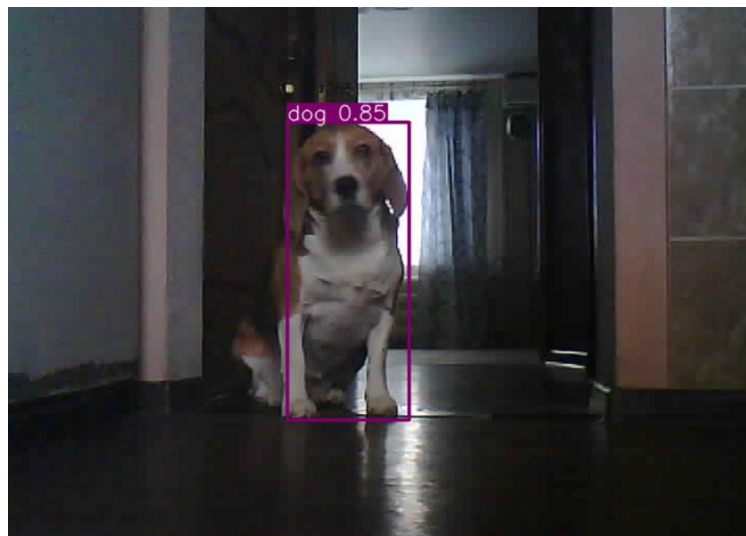


Рисунок 3.17 – Розпізнавання тварин

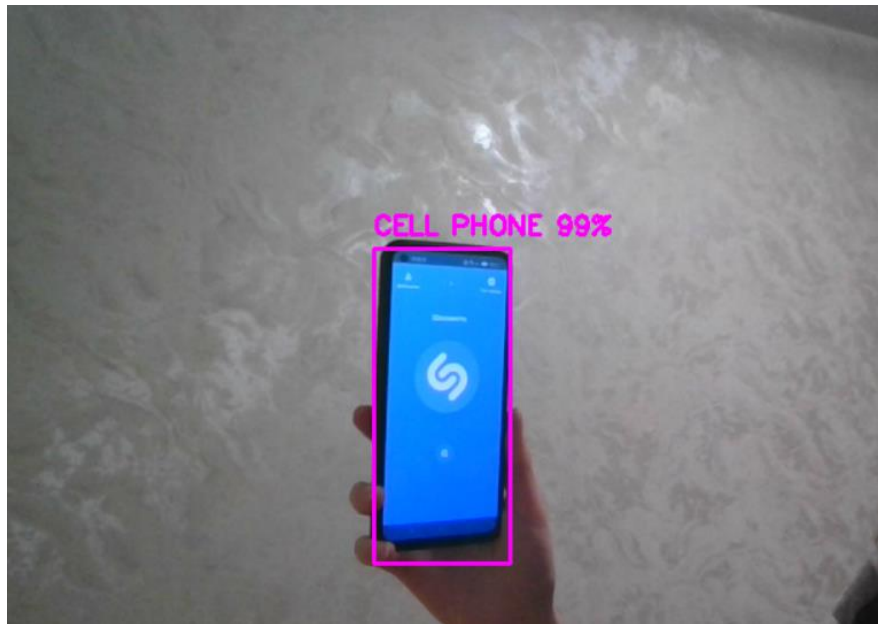


Рисунок 3.18 – Розпізнавання об'єктів

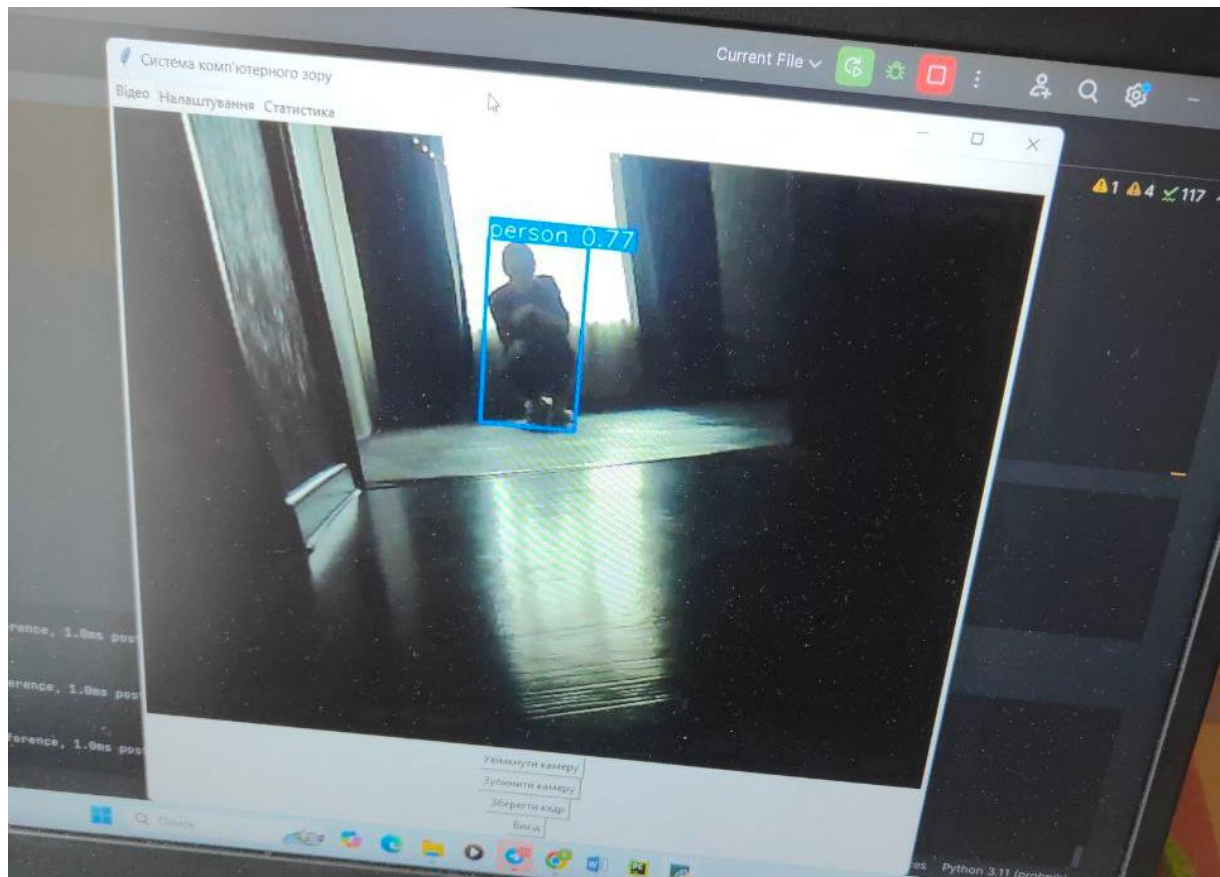


Рисунок 3.19 – Розпізнавання людей

YOLOv8 використовує сучасний підхід до розпізнавання об'єктів у зображеннях або відео. Вона базується на глибоких згорткових нейронних мережах і дозволяє швидко та точно визначати об'єкти в реальному часі. Працює наступним чином:

- розділення зображення на сітку. Зображення розбивається на сітку із фіксованою кількістю клітинок. Кожна клітинка відповідає за виявлення об'єктів, центр яких потрапляє в цю клітинку;

- прогнозування межових рамок. Для кожної клітинки модель прогнозує: координати межевої рамки об'єкта (x, y, ширина, висота) та упевненість (confidence), що рамка містить об'єкт;

- класифікація об'єктів. Модель визначає клас об'єкта (наприклад, «людина», «машина», «собака») з відповідною ймовірністю для кожної рамки;

- фільтрація результатів. Застосовується поріг упевненості (confidence threshold), щоб залишити тільки ті рамки, де ймовірність наявності об'єкта перевищує заданий поріг. Використовується Non-Maximum Suppression (NMS) для усунення дублюючих рамок;

- формування кінцевого результату. Для кожного об'єкта генерується межева рамка, ймовірність, та клас (наприклад, «car 95%»).

У рамках дипломного проєкту було створено програму, яка являє собою систему комп'ютерного зору на базі моделі YOLOv8 для розпізнавання об'єктів у реальному часі. Вона містить інтерфейс на базі Tkinter, що забезпечує інтерактивне керування процесами захоплення й аналізу відеопотоку з камери.

Основні функції програми:

- розпізнавання об'єктів у реальному часі. Програма використовує модель YOLOv8 для аналізу відеопотоку, розпізнаючи об'єкти з високою швидкістю і точністю. Розпізнані об'єкти візуалізуються на екрані з анотаціями у вигляді прямокутників і підписів;

– збереження окремих кадрів з метаданими. У будь-який момент користувач може зберегти поточний кадр з камери у вигляді зображення (JPEG). До кожного збереженого кадру автоматично додається текстовий файл, що містить список розпізнаних об'єктів і їхню кількість;

– налаштування зони інтересу (ROI). Користувач може вручну встановити прямокутну зону інтересу для фокусування на певній ділянці зображення. Це дає змогу скоротити зону аналізу та підвищити ефективність роботи системи;

– динамічне налаштування порога впевненості розпізнавання. Система дає змогу задавати мінімальний поріг впевненості моделі YOLO, нижче за який об'єкти не розпізнаватимуться. Поріг розпізнавання (confidence threshold) – це мінімальний рівень впевненості, за якого модель вважає об'єкт «виявленим». Цей показник виражається у відсотках (або значенні від 0 до 1). Якщо впевненість моделі в тому, що певний об'єкт присутній на зображенні, нижча за поріг, об'єкт ігнорується. Це дає можливість гнучко регулювати чутливість системи залежно від умов експлуатації.

Інтерфейс додатку наведено на рисунку 3.20.

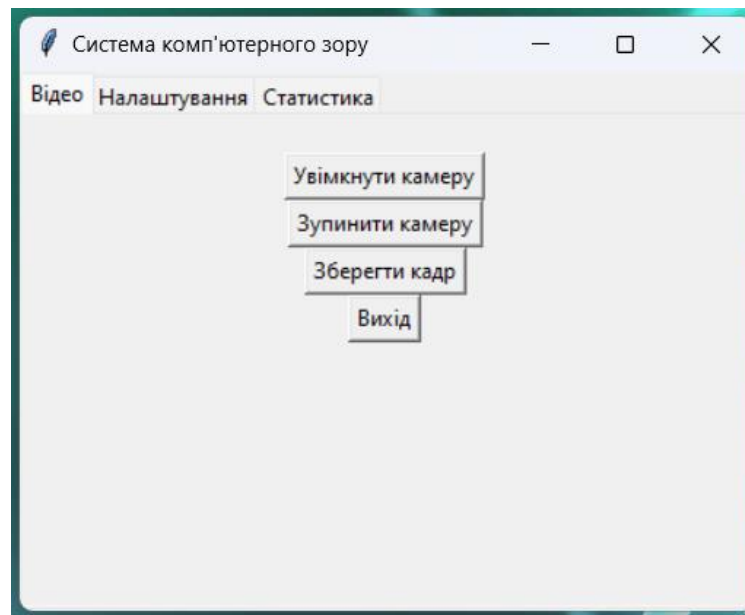


Рисунок 3.20 – Головна сторінка програми

Функції вкладки «Налаштування», які може обрати користувач, наведено на рисунку 3.21.

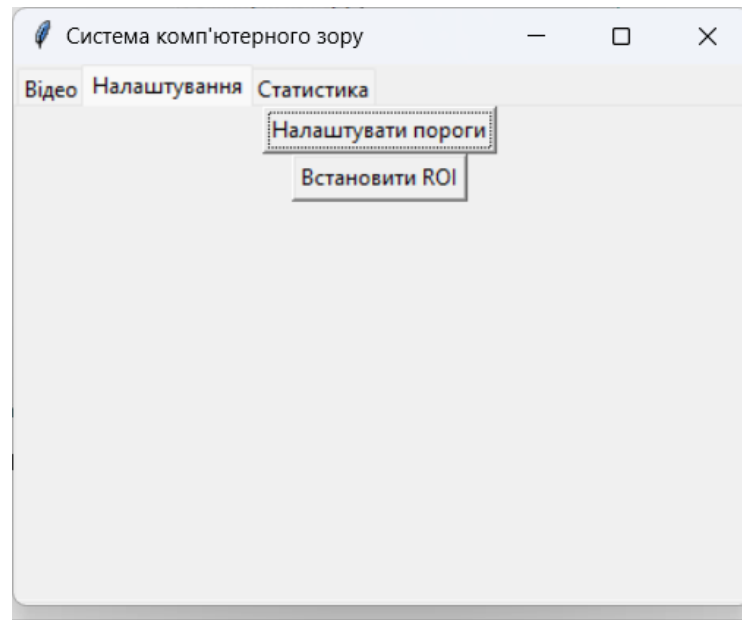


Рисунок 3.21 – Вкладка «Налаштування», де користувач може налаштувати порогови впевненості розпізнавання та встановити зону інтересу робота за координатами

Приклад встановлення зони інтересу роботу наведено на рисунку 3.22.

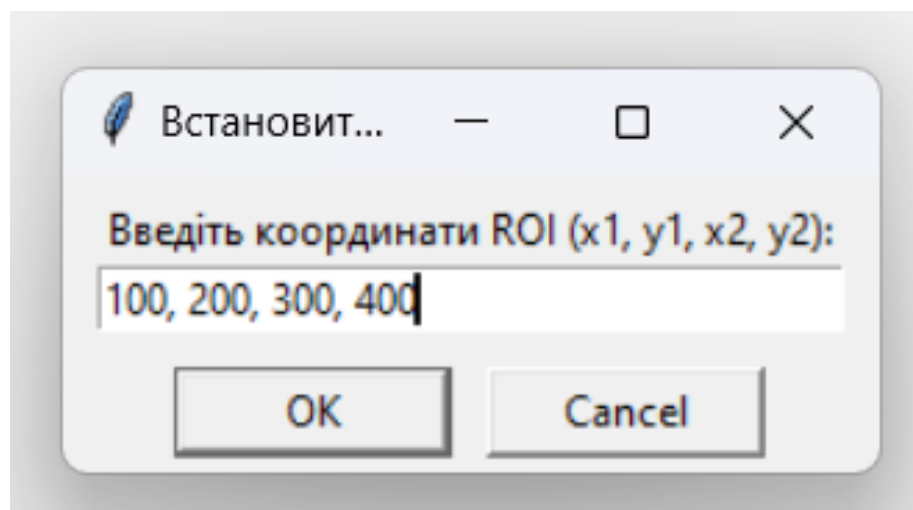


Рисунок 3.22 – Встановлення зони інтересу роботу

Приклад налаштованої зони інтересу робота наведено на рисунку 3.23.

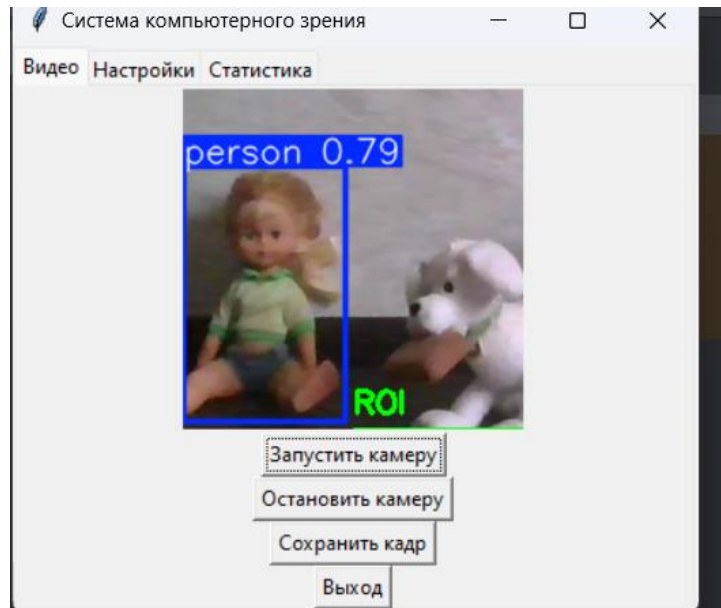


Рисунок 3.23 – Коректне відображення зони інтересів роботу

Приклад статистики об'єктів, що розпізнав робот, наведено на рисунку 3.24.

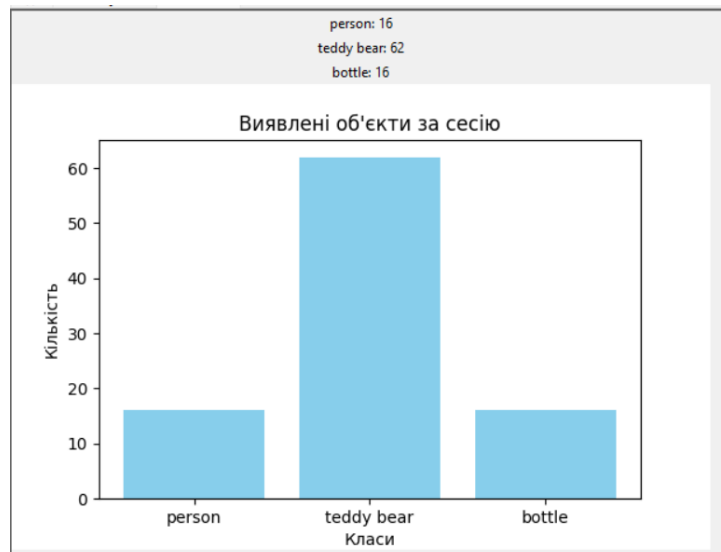


Рисунок 3.24 – Статистика за сесію

Проблема в тому, що статистика в поточному кодї оновлюється на кожному кадрі. Якщо об'єкт присутній на кількох кадрах, його враховуватимуть знову і знову. Це створює ефект «багаторазового підрахунку», через що статистика сильно завищується.

Як було зазначено вище, користувач має змогу зберігати кадри та програма автоматично створює файл з ідентифікацією об'єктів (рис. 3.25).

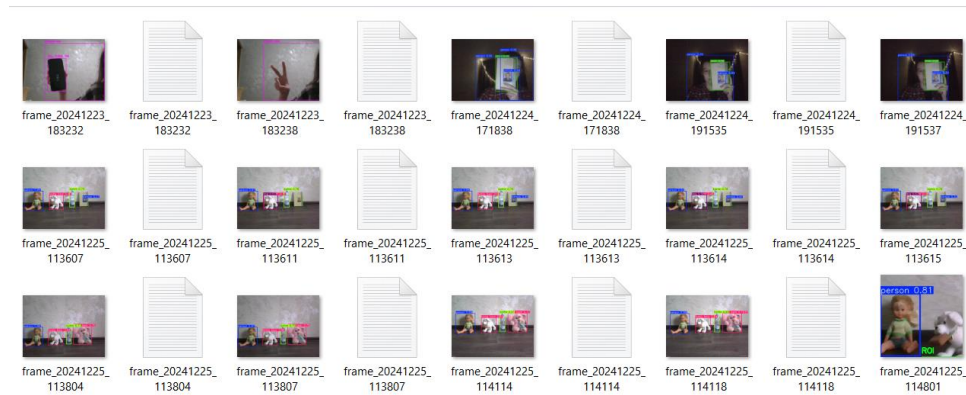


Рисунок 3.25 – Дані, які отримує користувач

Приклад файлу зі звітом розпізнаних об'єктів наведено на рисунку 3.26.

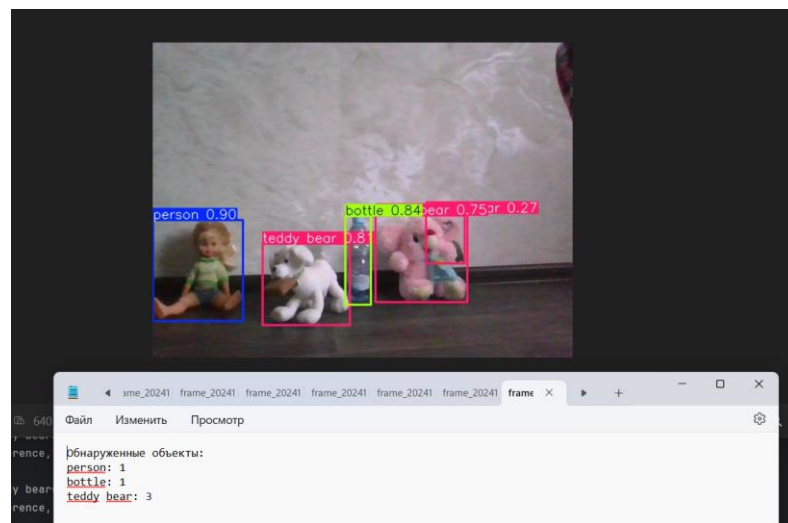


Рисунок 3.26 – Випадок, коли користувач зберіг кадр та отримує статистику з ідентифікації об'єктів на цьому кадрі

Вивід з консолі, у випадку коли користувач зберігає файл, наведено на рисунку 3.27.

```
480x640 1 person, 1 bottle, 3 teddy bears, 119.2ms  
Speed: 2.0ms preprocess, 119.2ms inference, 3.0ms postprocess per image at shape (1, 3, 480, 640)  
Сохранено] Кадр: results//frame_20241225_121630.jpg  
Сохранено] Лог: results//frame_20241225_121630.txt
```

Рисунок 3.27 – Вивід з консолі

Повідомлення, яке виводиться на консоль у разі зміні порогу розпізнавання, наведено на рисунку 3.28.

```
C:\Users\Acer\PycharmProjects\vy  
[INFO] Новый порог: 0.7
```

Рисунок 3.28 – Встановлення нового порогу розпізнавання

Розроблена система комп'ютерного зору для мобільного робота продемонструвала свою справність і можливість виконання основних завдань з розпізнавання об'єктів і обробки візуальної інформації. У процесі тестування система показала стабільну роботу в умовах стандартного освітлення, проте виявлено деякі обмеження, пов'язані з використовуваним апаратним забезпеченням та інфраструктурою зв'язку.

Система комп'ютерного зору повністю залежить від стабільного інтернет-з'єднання. Це зумовлено необхідністю передавання даних із камери на сервер для подальшого опрацювання або використання хмарних обчислювальних ресурсів. В умовах нестабільної мережі спостерігаються затримки в обробці даних, що може істотно вплинути на швидкість і точність виконання завдань, особливо в сценаріях реального часу.

Модуль ESP32-CAM, обраний для реалізації системи, має обмежені обчислювальні можливості та відносно низьку якість передачі відео. Це позначається на швидкості обробки зображень, особливо при складних сценах або в умовах швидкої зміни навколишнього оточення.

Загалом, система продемонструвала свою функціональність, проте потребує доопрацювань для підвищення надійності та усунення поточних обмежень. Ці поліпшення дадуть змогу розширити спектр її застосування та зробити її більш стійкою до зовнішніх умов експлуатації. Код програми наведено у Додатку Б.

Функцію керування роботом за допомогою інфрачервоного пульта (рис. 3.29) було реалізовано в стандартному програмному забезпеченні, що надається розробником ELEGOO для Smart Robot Cat Kit V4.0. У процесі роботи цей код було використано без змін, оскільки він відповідає вимогам і коректно виконує необхідні завдання. Ця технологія дає змогу забезпечити інтуїтивно зрозуміле і зручне керування роботом, не вимагаючи складних інтерфейсів або додаткових налаштувань. Це робить її особливо актуальною для освітніх і дослідницьких цілей, де важливими є простота використання і надійність.



Рисунок 3.29 – Інфрачервоний пульт дистанційного управління

Принцип роботи ІЧ-управління роботом з ІЧ-приймачем на платі розширення (рис. 3.30):

– надсилання сигналу з ІЧ-пульта. Під час натискання кнопки на пульті, він надсилає інфрачервоний сигнал з певною частотою (зазвичай 38 кГц). Кожна кнопка має унікальний код;

– приймання сигналу ІЧ-приймачем. ІЧ-приймач на платі розширення вловлює сигнал. ІЧ-датчик фільтрує шуми і передає закодований сигнал на плату;

– обробка сигналу UNO R3. Плата зчитує сигнал через пін, до якого під'єднано ІЧ-приймач. Програма на UNO R3 використовує бібліотеку (наприклад, IRremote), щоб декодувати сигнал і отримати числовий код;

– розпізнавання команди. UNO R3 порівнює отриманий код із таблицею команд. Якщо код збігається із заданим, виконується відповідна команда (рух уперед, назад, поворот тощо);

– виконання команди роботом. UNO R3 відправляє сигнал на драйвер моторів (через плату розширення). Мотори починають рухатися, повертати або зупинятися залежно від команди;

– очікування наступної команди. Після виконання команди UNO R3 повертається в режим очікування і готовий до прийому наступного сигналу.



Рисунок 3.30 – ІЧ-приймач

Робот в режимі роботи у реальному часі наведено на рисунку 3.31. Діод, що міститься на платі, безперервно випромінює біле світло, коли достатньо заряду для роботи, в іншому – починає блимати.

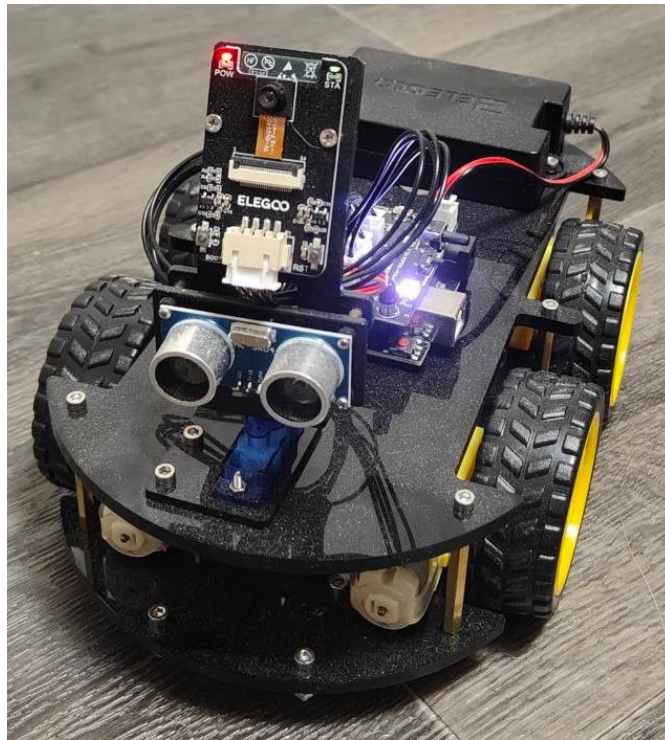


Рисунок 3.31 – Робот в режимі роботи

3.3 Дослідження стійкості руху робота

Для розрахунку стійкості руху робототехнічної системи необхідно використати методи Теорії автоматичного управління (ТАУ). Для оцінки стійкості руху мобільного робота потрібно врахувати його динамічну поведінку, траєкторію, сили та моменти, що діють на конструкцію.

Стійкість руху – це здатність робота зберігати стійкість (не перекидатись або не втрачати керування) під час прискорення, гальмування, маневрів або руху по нерівній поверхні. Під час руху центр мас повинен залишатися в межах площі опори. Додатково враховуються сили інерції.

Для оцінки стійкості руху чотириколісного мобільного робота зосередимося на перевірці, чи залишається центр мас всередині площі опори під час руху.

Горизонтальне зміщення центру мас через інерційні сили:

$$x'_c = x_c + \frac{F_x \cdot h}{m \cdot g}, \quad (3.1)$$

$$y'_c = y_c + \frac{F_y \cdot h}{m \cdot g}, \quad (3.2)$$

де F_x та F_y – сили інерції;

x_c та y_c – початкові координати центру мас (в центрі платформи);

m – маса робота, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – висота центру мас, м.

Вхідні параметри:

– розміри шасі: $a = 0,25$ м, $b = 0,15$ м;

– висота центра мас (оцінка): $h = 40$ мм = 0.04 м;

– маса робота: $m = 1$ кг (приблизна оцінка для даної моделі);

– максимальне прискорення: $a = 0,5$ м/с².

Розрахунок зміщення центру мас під дією інерції (горизонтальне зміщення):

$$\Delta x = \frac{F_x \cdot h}{m \cdot g} \quad (3.3)$$

Проведемо розрахунок:

$$\Delta x = \frac{(1 \cdot 0,5) \cdot 0,04}{1 \cdot 9,81} = 2 \text{ мм.}$$

Зміщення в межах площі опори, тому стійкість зберігається.

Побудуємо графік з наступними даними:

- площа опори: прямокутник розміру $a \times b$, тобто $0,25 \text{ м} \times 0,15 \text{ м}$;
- центр мас у стані спокою: в центрі опори ($x_c = 0, y_c = 0$);
- траєкторія зміщення: лінія в межах площі опори.

На рисунку 3.32 наведено графік.

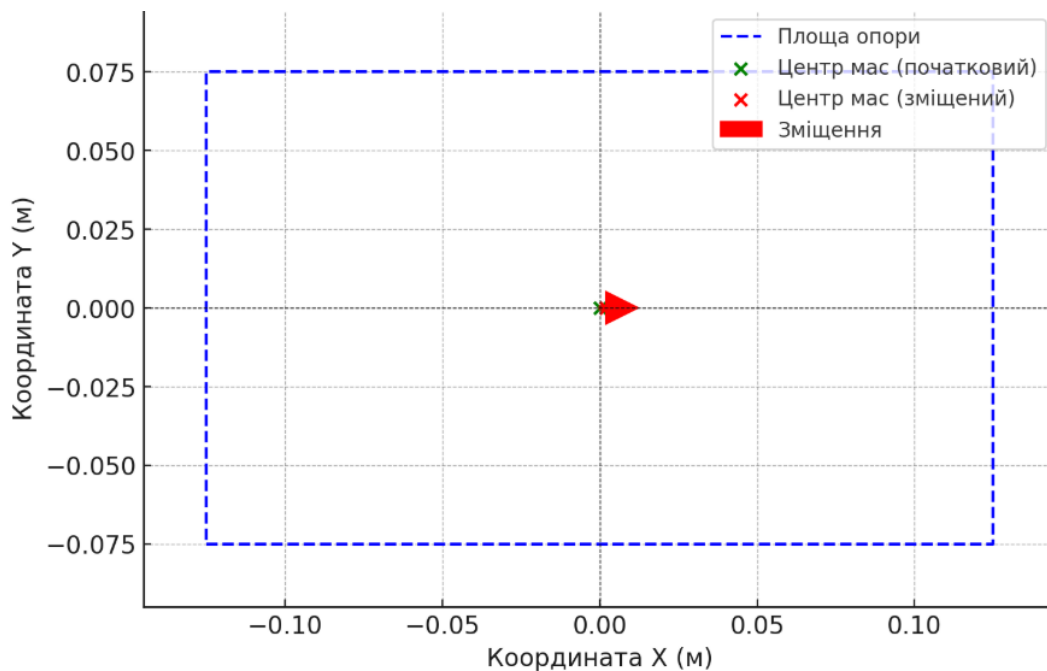


Рис. 3.32 – Стійкість руху мобільного робота

На графіку зображено:

- площа опори робота (синій пунктирний контур);
- початкове положення центру мас (зелена точка);
- зміщене положення центру мас під дією інерційної сили (червона точка та стрілка).

Як видно, центр мас навіть після зміщення залишається в межах площі опори, що вказує на стійкість конструкції під заданими умовами.

3.4 Висновки до розділу 3

Розроблено апаратну частину мобільного робота на базі колісної платформи та інтегровано модуль ESP32-CAM. Програмна складова включала застосування моделі YOLOv8 для розпізнавання об'єктів у реальному часі. Результати експериментів підтвердили працездатність системи, її здатність ефективно виконувати поставлені завдання в умовах реального середовища.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вимоги до приміщення

Охорона праці при роботі з малогабаритними мобільними роботами та системами комп'ютерного зору передбачає створення безпечних умов праці, дотримання норм електробезпеки, пожежної безпеки та ергономічності робочого місця. Врахування цих аспектів дозволяє знизити ризики травматизму та аварійних ситуацій при виконанні експериментальних робіт і тестуванні робототехнічних пристроїв.

Рівень освітленості має відповідати нормам (не менше 300–500 люкс на робочій поверхні). Обов'язковим є використання штучного освітлення (світлодіодних ламп або люмінесцентних ламп) у разі недостатнього природного освітлення.

Температура у приміщенні повинна підтримуватися в межах 18-25°C. Вологість повітря має становити 40-60% для забезпечення комфортних умов роботи обладнання.

Приміщення повинно бути обладнане системою вентиляції або кондиціонування для запобігання накопиченню пилу та забезпечення припливу свіжого повітря.

Робоче місце має бути обладнане справними електророзетками з заземленням. Використання обладнання повинно відповідати правилам безпеки, напруга в розетках не повинна перевищувати 220 В.

Перед початком роботи працівник повинен пройти інструктаж із техніки безпеки. Використання обладнання дозволяється лише за наявності відповідних знань і навичок.

Розрахуємо рівень освітленості приміщення за наступною формулою:

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (4.1)$$

де E – рівень освітленості, лк;

Φ – світловий потік, л;

S – площа робочої поверхні, м².

Загальний світловий потік в приміщенні дорівнює 5100 лм, площа робочої поверхні дорівнює 16 м².

Таким чином, рівень освітленості в приміщенні $E = 5100/16 = 319$ лк, що перевищує мінімально допустимий рівень освітленості 300 лк.

4.2 Висновки до розділу 4

У даному розділі було розглянуто вимоги охорони праці для приміщення, яке призначено для роботи з мобільними малогабаритними роботами. Дотримання вимог до охорони праці забезпечує безпеку роботи з робототехнічними системами, знижує ризики нещасних випадків і пошкодження обладнання. Раціональна організація робочого простору та використання відповідного приміщення сприяє підвищенню ефективності роботи та комфорту працівників.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи була успішно розроблена система комп'ютерного зору для малогабаритного мобільного робота на базі модуля ESP32-CAM. Основною метою дослідження стало підвищення ефективності роботизованих пристроїв шляхом створення та інтеграції системи візуальної навігації та розпізнавання об'єктів.

В результаті проведеної роботи були отримані наступні результати:

– проведено аналіз сучасних методів комп'ютерного зору та їх застосування в робототехніці, що дозволило визначити основні вимоги до систем для мобільних роботів;

– виконано підбір апаратних компонентів для створення прототипу робота, зокрема використання камери ESP32-CAM та контролера Elegoo Uno R3, що забезпечило оптимальне співвідношення продуктивності та вартості;

– розроблено програмний модуль для обробки зображень з використанням мови програмування Python, бібліотеки OpenCV та нейронної мережі YOLOv8, що забезпечило ефективне розпізнавання об'єктів у реальному часі;

– обрано конструкцію колісного мобільного робота з можливістю додаткової інтеграції датчиків та модулів для розширення функціональності;

– проведено серію експериментів, які підтвердили працездатність системи та її здатність до точної ідентифікації об'єктів в умовах реального середовища.

Результати роботи мають практичне значення для подальшої розробки автономних мобільних роботів, здатних працювати в динамічних середовищах. Вони можуть бути використані в освітніх цілях, а також для вирішення прикладних завдань автоматизації та роботизації в різних галузях промисловості.

ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

2. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.

3. Computer Vision [Електронний ресурс]. URL: <https://itwiki.dev/data-science/ml-reference/ml-glossary/computer-vision> (дата звернення: 04.10.2024).

4. Klinger N. Computer Vision in Robotics. An Autonomous Revolution [Електронний ресурс]. URL: <https://viso.ai/computer-vision/computer-vision-in-robotics/#:~:text=Robotics%20Vision,-This%20refers%20specifically&text=By%20translating%20visual%20data%20into,systems%20to%20navigate%20hazardous%20environments> (дата звернення: 04.10.2024).

5. Damiani C. Computer Vision in AI: Essential Types, Applications, and its Role in FER [Електронний ресурс]. URL: <https://www.morphcast.com/blog/computer-vision-ai-guide/> (дата звернення: 04.10.2024).

6. IBM. What is Computer Vision? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ibm.com/topics/computer-vision> (дата звернення: 05.10.2024).

7. Ambika. What is Computer Vision? (History, Applications, Challenges) [Електронний ресурс]. URL: <https://medium.com/@ambika199820/what-is-computer-vision-history-applications-challenges-13f5759b48a5> (дата звернення: 05.10.2024).

8. History Of Computer Vision - Let's Data Science [Електронний ресурс]. URL: <https://letsdatascience.com/learn/history/history-of-computer-vision/> (дата звернення: 05.10.2024).

9. Комп'ютерний зір – Вікіпедія [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Комп'ютерний_зір (дата звернення: 05.10.2024).

10. The complete glossary of the modern Computer Vision tasks [Електронний ресурс]. URL: <https://wiki.cloudfactory.com/docs/mp-wiki/model-families/the-complete-glossary-of-the-modern-computer-vision-tasks> (дата звернення: 05.10.2024).

11. Training and Optimizing a 2D Pose Estimation Model with NVIDIA TAO Toolkit, Part 1 [Електронний ресурс]. URL: <https://developer.nvidia.com/blog/training-optimizing-2d-pose-estimation-model-with-tao-toolkit-part-1/> (дата звернення: 06.10.2024).

12. Dhiman A. Object Tracking using DeepSORT in TensorFlow [Електронний ресурс]. URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/object-tracking-using-deepsort-in-tensorflow-2-ec013a2eeb4f> (дата звернення: 06.10.2024).

13. Deep Recurrent Regression for Facial Landmark Detection [Електронний ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1510.09083> (дата звернення 01.10.2024).

14. Multiple objects classification - OpenCV Q&A Forum [Електронний ресурс]. URL: <https://answers.opencv.org/question/59391/multiple-objects-classification/> (дата звернення: 06.10.2024).

15. Сегментація зображень засобами OpenCV [Електронний ресурс]. URL: <https://ai-tern.in.ua/Segmentation.html> (дата звернення: 06.10.2024).

16. Fingas J. Free AI tool restores old photos by creating slightly new loved ones [Електронний ресурс]. URL: https://www.engadget.com/free-ai-old-photo-restoration-tool-190502361.html?_fsig=_qhu0rwcncOAAVTtqZqWYQ--~A (дата звернення: 06.10.2024).

17. Computer Vision in Robotics [Електронний ресурс]. URL: <https://www.inbolt.com/resources/computer-vision-in-robotics> (дата звернення: 06.10.2024).

18. 2D vs 3D machine vision. Industrial 3D cameras for random bin picking, logistics, machine tending [Електронний ресурс]. URL: <https://www.zivid.com/2d-vs-3d-machine-vision> (дата звернення: 06.10.2024).

19. Machine Vision Technology: What Is 3D Vision? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.zebra.com/us/en/resource-library/faq/what-is-3d-vision.html#:~:text=This%20includes%20the%20object's%20shape,three-dimensional%20structure%20of%20objects> (дата звернення: 06.10.2024).

20. Триангуляція (комп'ютерний зір). Вікіпедія [Електронний ресурс]. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Триангуляція_\(комп'ютерний_зір\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Триангуляція_(комп'ютерний_зір)) (дата звернення: 06.10.2024).

21. Stereopsis. Wikipedia [Електронний ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereopsis> (дата звернення: 06.10.2024).

22. Time-of-flight камера. Вікіпедія [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_камера (дата звернення: 06.10.2024).

23. Що таке сканування структурованим світлом? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.medit.com/uk/what-is-structured-light-scanning/> (дата звернення: 06.10.2024).
uk.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_камера (дата звернення: 06.10.2024).

24. Види роботів і класифікація в робототехніці [Електронний ресурс]. URL: <https://worldbank.org.ua/3720-vidi-robotiv-i-klasifikatsiya-v-robototekhnitsi.html> (дата звернення 03.12.2024).

25. Медичні роботи, які мінюють медицину [Електронний ресурс]. URL: <https://ingeniusua.org/articles/5-medichnikh-robotiv-yaki-zminuyut-medicinu> (дата звернення 03.12.2024).

26. 10 найдосконаліших військових роботів у світі: що вони вміють і як виглядають [Електронний ресурс]. URL: <https://focus.ua/uk/digital/614551-10->

najdoskonalishih-vijskovih-robotiv-u-sviti-sho-voni-vmiyut-i-yak-viglyadayut-foto-video (дата звернення 03.12.2024).

27. What is a TurtleBot? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.turtlebot.com/> (дата звернення 03.12.2024).

28. NVIDIA Partner JetBot AI Robot Kits [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nvidia.com/en-eu/autonomous-machines/embedded-systems/jetbot-ai-robot-kit/> (дата звернення 03.12.2024).

29. MiR100. Konica Minolta [Електронний ресурс]. URL: <https://www.konicaminolta.com.au/products/discontinued-products/mir100> (дата звернення 03.12.2024).

30. Robomaster S1 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.dji.com/global/robomaster-s1> (дата звернення 03.12.2024).

31. Open CV Documentation [Електронний ресурс]. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d3/d52/tutorial_windows_install.html (дата звернення 10.12.2024).

32. YOLO: Real-Time Object Detection [Електронний ресурс]. URL: <https://pjreddie.com/darknet/yolo/> (дата звернення 10.12.2024).

33. Невлюдов, І.Ш. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навчальний посібник / І.Ш.Невлюдов, О.В.Токарєва. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 240 с.

34. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами [Текст]: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарєва. – Харків: ХНУРЕ, 2018.– 190 с.