

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Розроблення мобільного робота для розпізнавання складних  
конфігурацій деталей приладобудівного виробництва  
(тема)

Виконала:  
здобувачка 2 року навчання,  
групи КІТПВМ-23-2

Рудакова Г.В.  
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані  
технологічні процеси та виробництва  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Бронніков А.І.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І.Ш.  
(прізвище, ініціали)

Харків 2025

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологійКафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехнікиРівень 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'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« 25 » листопада 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачі Рудаковій Ганні Валеріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення мобільного робота для розпізнавання складних конфігурацій деталей приладобудівного виробництвазатверджена наказом університету від 22.11.2024 р. № 1231СТ2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 31.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Raspberry Pi ZERO W3.2 Blender3.3 Python3.4 OpenCV3.5 CirkitDesigner3.6 Webots

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Обґрунтування актуальності розробки мобільного робота з комп'ютерним зором.4.2 Аналіз сучасних технологій у галузі робототехніки та комп'ютерного зору.4.3 Огляд існуючих рішень для розпізнавання та маніпуляції з об'єктами.4.4 Розробка конструкції мобільного робота та вибір компонентів.4.5 Обґрунтування вибору апаратних і програмних рішень.4.6 Реалізація алгоритмів для розпізнавання об'єктів і визначення їхніх характеристик.4.7 Розробка алгоритмів для переміщення та маніпуляції деталями.4.8 Тестування роботи алгоритмів та оцінка їхньої точності.4.9 Проведення аналізу експериментальних даних.4.10 Оцінка переваг і недоліків запропонованого рішення.4.11 Висновки та рекомендації щодо подальшого розвитку роботи.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(\*.ppt) формату А4 –10 сторінок.

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 та узагальнення вимог до дипломної роботи	25.11.2024 – 01.12.2024	виконано
2	Вивчення літератури та існуючих рішень	02.12.2024 – 08.12.2024	виконано
3	Розробка конструкції мобільного робота	09.12.2024 – 15.12.2024	виконано
4	Вибір компонентів та обґрунтування їх використання	16.12.2024 – 22.12.2024	виконано
5	Розробка алгоритмів для роботи мобільного робота	23.12.2024 – 29.12.2024	виконано
6	Реалізація алгоритмів	30.12.2024 – 05.01.2025	виконано
7	Проведення експериментів та тестування	06.01.2025 – 10.01.2025	виконано
8	Аналіз отриманих результатів	11.01.2025 – 13.01.2025	виконано
9	Підготовка тексту дипломної роботи	14.01.2025 – 16.01.2025	виконано
10	Передача дипломної роботи на перевірку	16.01.2025	виконано

Дата видачі завдання 25.11.2024 р.

Здобувачка \_\_\_\_\_  
(підпис)

Рудакова Г.В. \_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Бронніков А.І. \_\_\_\_\_  
(посада, прізвище, ініціали)

Я, як здобувачка вищої освіти 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.

«3» січня 2025 р.



Рудакова Г.В.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 84 с., 3 табл., 27 рис., 30 джерел, 4 додатки.

### МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ, СКЛАДНІ КОНФІГУРАЦІЇ, ПРИЛАДОБУДІВНЕ ВИРОБНИЦТВО.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка мобільного робота для розпізнавання складних конфігурацій деталей у приладобудівному виробництві, що дозволить автоматизувати процеси ідентифікації та обробки об'єктів, підвищуючи точність і ефективність роботи.

Об'єкт дослідження – процеси розпізнавання складних конфігурацій деталей у виробничих умовах.

Предмет дослідження – алгоритми та методи комп'ютерного зору для розпізнавання та локалізації об'єктів.

У роботі розглянуто сучасні підходи до автоматизації виробничих процесів із використанням мобільних роботів, зокрема, технології комп'ютерного зору та алгоритми глибокого навчання. Описано методи, що дозволяють точно ідентифікувати складні конфігурації деталей у тривимірному просторі. Розроблено та протестовано прототип мобільного робота, який здатний адаптуватися до динамічних умов виробництва, виконуючи розпізнавання та обробку деталей з високою точністю.

## ABSTRACT

Explanatory note: 84 pages, 3 tables, 27 figures, 30 references, 4 appendices.

MOBILE ROBOT, COMPUTER VISION, OBJECT RECOGNITION,  
COMPLEX CONFIGURATIONS, INSTRUMENT MANUFACTURING.

The purpose of the qualification work is to develop a mobile robot for recognizing complex configurations of parts in instrument manufacturing, which will enable automation of identification and processing processes, thereby improving accuracy and efficiency.

The object of the study is the processes of recognizing complex configurations of parts in industrial conditions.

The subject of the study is algorithms and methods of computer vision for the recognition and localization of objects.

The report examines modern approaches to the automation of production processes using mobile robots, particularly computer vision technologies and deep learning algorithms. Methods that allow precise identification of complex part configurations in three-dimensional space are described. A prototype of a mobile robot capable of adapting to dynamic production conditions, performing recognition, and processing parts with high accuracy, has been developed and tested.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	9
Вступ .....	10
1 Сучасний стан розвитку мобільних роботів, що використовуються на виробництві .....	12
1.1 Аналіз області дослідження .....	12
1.1.1 Основні аспекти мобільної робототехніки .....	14
1.1.2 Особливості розпізнавання складних конфігурацій деталей .....	17
1.1.3 Аналіз сучасних технологій у приладобудівництві .....	20
1.2 Огляд існуючих розробок .....	22
1.2.1 Аналіз програмного забезпечення для комп'ютерного зору .....	23
1.2.2 Використання сенсорів і датчиків у мобільних роботах .....	25
1.3 Висновки до теоретичної частини .....	28
2 Розрахункова частина .....	31
2.1 Розрахунок продуктивності роботи системи .....	31
2.2 Оцінка енерговитрат мобільного робота .....	32
2.3 Розрахунок точності розпізнавання складних деталей .....	34
2.4 Теорія автоматичного управління .....	36
2.5 Висновки до розрахункової частини .....	39
3 Експериментальна частина .....	31
3.1 Опис створеної моделі мобільного робота .....	41
3.1.1 Конструкція та компоненти робота (3D-модель) .....	41
3.1.2 Порівняння компонентів з аналогами та обґрунтування вибору ....	48
3.1.3 Вбудовані сенсори та їх застосування .....	51
3.2 Опис алгоритму роботи робота .....	53
3.2.1 Розпізнавання об'єктів за допомогою OpenCV .....	55
3.2.2 Етапи розробки програмного забезпечення .....	55
3.2.3 Визначення відстані до об'єктів і площі в пікселях .....	58

3.2.4 Переміщення та маніпуляції з деталями .....	60
3.3 Проведення експериментів .....	60
3.3.1 Аналіз точності розпізнавання та переміщення деталей .....	61
3.4 Висновки до експериментальної частини .....	62
4 Охорона праці .....	64
4.1 Організація безпеки під час використання мобільного робота .....	64
Висновки.....	65
Перелік джерел посилання .....	67
Додаток А Код реалізації основної програми .....	71
Додаток Б Сертифікат.....	73
Додаток В Публікація матеріалів .....	75
Додаток Г Демонстраційний графічний матеріал .....	83

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AGV – Automated Guided Vehicle, автоматизований транспортний засіб.

AI – Artificial Intelligence, штучний інтелект.

API – Application Programming Interface, інтерфейс програмування додатків.

CV – Computer Vision, комп'ютерний зір.

ERP – Enterprise Resource Planning, система планування ресурсів підприємства.

GUI – Graphical User Interface, графічний інтерфейс користувача.

HSV – Hue, Saturation, Value – кольорова модель.

ML – Machine Learning, машинне навчання.

OpenCV – Open Source Computer Vision, відкрита бібліотека для комп'ютерного зору.

PIL – Python Imaging Library, бібліотека для роботи із зображеннями.

RGB – Red, Green, Blue.

SQL – Structured Query Language, мова структурованих запитів для роботи з базами даних.

STL – Standard Tessellation Language, стандартний формат файлу.

## ВСТУП

Сучасний розвиток промислових технологій вимагає впровадження автоматизованих рішень для оптимізації виробничих процесів та забезпечення високої якості продукції. Особливо актуальним є використання мобільних роботів у приладобудуванні, де необхідно працювати з деталями складних геометричних конфігурацій. Такі завдання потребують високої точності й адаптивності на кожному етапі виробництва. Використання традиційних методів обробки й контролю може бути недостатньо ефективним, що підкреслює потребу у впровадженні роботизованих систем, здатних до автоматизованого розпізнавання й обробки деталей.

Технології комп'ютерного зору та машинного навчання надають можливість створювати роботизовані системи, які здатні аналізувати складні конфігурації деталей, обчислювати їх розміри та розташування у реальному часі. Завдяки використанню сенсорних систем, таких як інфрачервоні датчики та високоточні камери, мобільні роботи можуть забезпечити автономність і точність виконання виробничих завдань. Їх впровадження дозволяє скоротити виробничі витрати, зменшити вплив людського фактору та підвищити безпеку робочого середовища.

Актуальність роботи зумовлена зростаючими вимогами до автоматизації виробничих процесів у контексті Індустрії 5.0. Впровадження мобільних роботів із сенсорними системами для розпізнавання об'єктів забезпечує новий рівень ефективності та адаптивності виробничих ліній.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка мобільного робота для розпізнавання складних конфігурацій деталей у приладобудівному виробництві, що дозволить автоматизувати процеси ідентифікації та обробки об'єктів, підвищуючи точність і ефективність роботи.

Об'єкт дослідження – процеси розпізнавання деталей за допомогою мобільних роботів.

Предмет дослідження – параметри налаштування сенсорної системи мобільного робота.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану систем автоматизації та їх впровадження у контексті Індустрії 5.0;
- дослідити можливості сучасних сенсорних систем та їх інтеграції у мобільних роботах;
- створити 3D-модель мобільного робота, адаптовану до виконання завдань із розпізнавання складних конфігурацій об'єктів;
- розробити програмне забезпечення для роботи робота з використанням комп'ютерного зору.

Робота виконана згідно з державними стандартами України [1] та методичними вказівками щодо виконання кваліфікаційних робіт [2]. Основні результати дослідження апробовані та опубліковані у *Analysis of mobile robots for recognizing complex configurations of parts in instrumentation production* [3]. У додатках представлені матеріали апробації результатів, а також сертифікати, що підтверджують практичне використання розробки.

Важливо зазначити, що дана робота відповідає цілям сталого розвитку, зокрема Цілі №9 «Індустрія, інновації та інфраструктура», що спрямована на впровадження інноваційних рішень у виробничі процеси для підвищення ефективності та стійкості. Створення мобільного робота з розпізнавання складних конфігурацій деталей сприяє автоматизації виробництва, зменшенню впливу людського фактора та впровадженню новітніх технологій для забезпечення сталого розвитку промисловості.

# 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ НА ВИРОБНИЦТВІ

## 1.1 Аналіз області дослідження

Аналіз області дослідження починається з усвідомлення важливості мобільної робототехніки у сучасному виробничому середовищі. У зв'язку з постійним зростанням вимог до ефективності, точності та продуктивності промислових процесів, мобільні роботи стають незамінними компонентами автоматизованих систем. Вони забезпечують гнучкість у виконанні завдань, можливість адаптації до умов середовища та високу точність операцій. У контексті приладобудівної галузі, яка характеризується виготовленням деталей зі складною геометрією, ці роботи виконують критично важливі функції, як-от транспортування, маніпуляції та розпізнавання об'єктів (рис. 1.1).

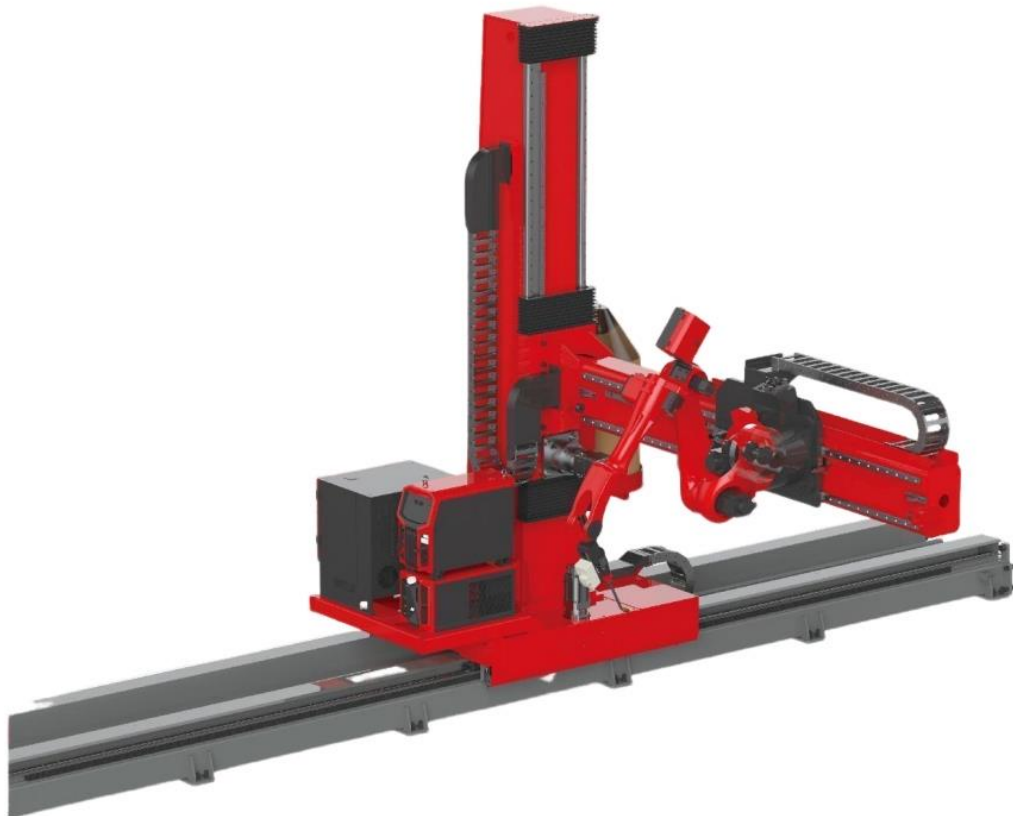


Рисунок 1.1 – Мобільний робот на виробничій платформі

Виробництво складних конфігурацій деталей ставить перед інженерами виклики, які потребують розробки інноваційних рішень. Зокрема, використання мобільних роботів з інтегрованими сенсорами та алгоритмами комп'ютерного зору дозволяє виконувати завдання розпізнавання об'єктів з надзвичайною точністю. Технології комп'ютерного зору, такі як аналіз кольору, текстури, форми та просторового розташування об'єктів, стали доступними завдяки досягненням у галузі машинного навчання. Ці технології дозволяють ідентифікувати об'єкти навіть у складних умовах, таких як змінне освітлення чи наявність часткових перекриттів. Використання таких рішень є важливим для забезпечення безперебійного виробничого процесу та уникнення затримок через ручну перевірку якості.

Автоматизація процесів розпізнавання деталей також має на меті підвищити продуктивність праці. Традиційні методи, засновані на жорстких програмних сценаріях, поступаються місцем адаптивним рішенням, які здатні приймати рішення в реальному часі. Наприклад, камери з високою роздільною здатністю забезпечують зчитування деталей з високою точністю, а інфрачервоні датчики дозволяють ідентифікувати об'єкти навіть за умов слабкого освітлення. Сучасні лазерні сканери, своєю чергою, забезпечують створення тривимірних моделей об'єктів для подальшого аналізу.

Розвиток приладобудування вимагає постійної адаптації до нових матеріалів, технік обробки та умов експлуатації. Мобільні роботи дозволяють скоротити час на виконання рутинних завдань, зменшити помилки, спричинені людським фактором, а також забезпечити високий рівень безпеки на виробництві. Використання роботизованих систем у виробничому середовищі також сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств, дозволяючи їм швидше впроваджувати інновації.

Окрім приладобудування, мобільні роботи знаходять своє застосування і в інших галузях. Наприклад, у логістиці вони використовуються для сортування вантажів та їх автоматичного транспортування, у сільському господарстві – для моніторингу стану посівів, а в медицині – для доставки ліків та обладнання.

Таким чином, мобільні роботи не лише забезпечують автоматизацію рутинних процесів, але й створюють нові можливості для розширення функціоналу виробничих систем.

Таким чином, аналіз області дослідження демонструє, що мобільні роботи є не лише технологічно актуальними, але й економічно вигідними рішеннями для промисловості. Їхнє впровадження дозволяє підвищити точність, ефективність та гнучкість виробничих процесів, забезпечуючи при цьому конкурентні переваги для підприємств. У контексті приладобудування мобільні роботи відкривають нові горизонти для автоматизації, дозволяючи інтегрувати сучасні технології в існуючі процеси для досягнення найвищих стандартів якості.

#### 1.1.1 Основні аспекти мобільної робототехніки

Мобільна робототехніка є однією з найважливіших галузей сучасної інженерії, яка інтегрує досягнення механіки, електроніки, інформатики та штучного інтелекту. Основні аспекти мобільної робототехніки охоплюють різноманітні компоненти, які визначають функціональність, надійність та адаптивність мобільних роботів. Ці аспекти включають конструкцію, інтеграцію сенсорів, алгоритми навігації, програмне забезпечення та взаємодію із зовнішнім середовищем.

Конструкція мобільних роботів має бути оптимізованою для забезпечення стабільності, маневреності та здатності виконувати завдання у різних середовищах. Основою конструкції є шасі, яке включає несучі елементи, двигуни, колеса чи гусениці. Дизайн робота залежить від його завдань. Наприклад, роботи для складських приміщень можуть мати модульну конструкцію для перевезення вантажів, тоді як роботи для виробничих ліній орієнтовані на виконання складних маніпуляцій. Особливістю конструкції є баланс між компактністю та здатністю витримувати навантаження, що часто зустрічається у виробничих умовах. На рисунку 1.2 показано приклад конструкції промислового робота.

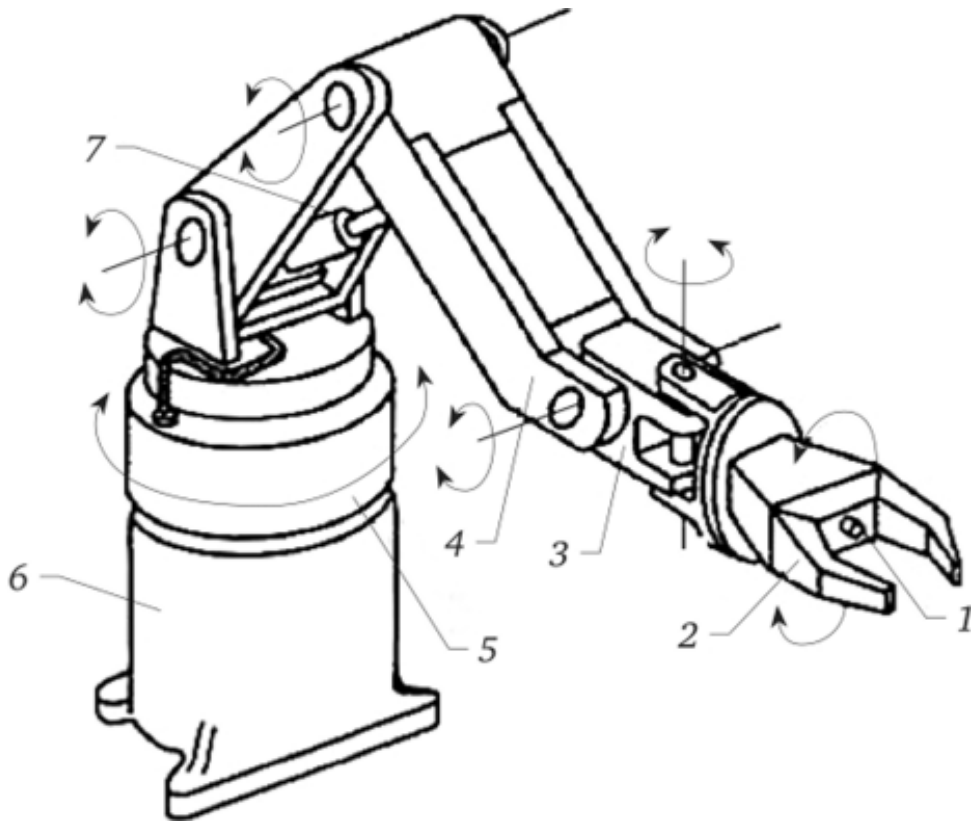


Рисунок 1.2 – Базова конструкція промислового робота

На рис. 1.2 прийняті наступні позначення:

- 1 – датчик зворотного зв'язку;
- 2 – захватний пристрій;
- 3 – кисть;
- 4 – рука маніпулятора;
- 5 – колона;
- 6 – несуча конструкція (основа);
- 7 – привід руки.

Інтеграція сенсорів є важливим елементом мобільної робототехніки, оскільки саме сенсори дозволяють роботам орієнтуватися у просторі та виконувати складні завдання. Камери забезпечують візуальну обробку, дозволяючи ідентифікувати об'єкти та їх характеристики. Інфрачервоні датчики вимірюють відстані з високою точністю, тоді як ультразвукові сенсори використовуються для виявлення перешкод у складних середовищах. Лідари є незамінними для створення тривимірних карт та забезпечення точного

позиціювання робота. Комбінація цих сенсорів дозволяє створювати адаптивні системи, здатні реагувати на змінні умови роботи.

Навігація є однією з найбільш критичних задач мобільної робототехніки. Алгоритми навігації забезпечують пересування робота у просторі, уникнення перешкод та досягнення заданих цілей. Сучасні методи включають локалізацію, планування траєкторій та побудову карт (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping). Наприклад, роботи використовують сенсорні дані для створення карти середовища, яка допомагає знаходити оптимальні маршрути навіть у динамічних умовах [4].

Програмне забезпечення є серцем будь-якого мобільного робота. Воно відповідає за обробку даних із сенсорів, управління двигунами, планування дій та обробку зображень. Використання платформ, таких як ROS (Robot Operating System), дозволяє розробникам інтегрувати різні компоненти системи у єдину функціональну екосистему. Програми реального часу забезпечують миттєве реагування на зміни у середовищі, що є критично важливим для роботів, які працюють у виробничих умовах [5].

Мобільні роботи повинні бути здатні адаптуватися до змін у середовищі, у якому вони працюють. Це включає врахування таких факторів, як нерівності підлоги, зміни освітлення або присутність динамічних об'єктів. Для роботи у виробничих умовах вони повинні інтегруватися із заводськими лініями, обладнанням або іншими роботами. Наприклад, роботи у логістиці можуть взаємодіяти з автоматизованими системами сортування вантажів, забезпечуючи безперервність процесів.

Таким чином, основні аспекти мобільної робототехніки створюють платформу для розробки ефективних, адаптивних та високопродуктивних роботів, які відповідають сучасним вимогам виробничих та інших середовищ.

На рисунку 1.3 зображено приклад, як робот визначає геометричні форми складних об'єктів за допомогою камери. Цей підхід підкреслює важливість технологій обробки даних і їх вплив на якість виробничих процесів.



Рисунок 1.3 – Робот із використанням камери ідентифікує складні об'єкти на виробничій лінії

### 1.1.2 Особливості розпізнавання складних конфігурацій деталей

Розпізнавання складних конфігурацій деталей є однією з ключових задач, які постають перед сучасними роботизованими системами, особливо у таких галузях, як приладобудування, автомобілебудування та мікроелектроніка. Ця задача передбачає точну ідентифікацію об'єктів із урахуванням їхньої геометрії, текстури, кольору, просторового розташування та інших характеристик. Саме складність форм деталей і мінливість зовнішніх умов створюють значні виклики, які потребують інноваційних рішень.

Основною проблемою під час розпізнавання складних конфігурацій деталей є геометрична неоднорідність об'єктів. Деталі можуть мати складні криволінійні поверхні, гострі краї, отвори, виступи та інші елементи, які ускладнюють задачу ідентифікації. Традиційні методи аналізу контурів, які базуються на жорстко запрограмованих правилах, не завжди можуть ефективно розв'язати цю задачу. Сучасні підходи, які використовують методи комп'ютерного

зору, дозволяють долати ці обмеження завдяки алгоритмам, що здатні аналізувати великі обсяги даних у реальному часі.

Одним із найбільш ефективних методів є сегментація зображень, яка дозволяє виділяти області, що відповідають різним частинам об'єкта. Наприклад, алгоритми порогового поділу або кластеризації можуть бути використані для визначення основних контурів деталей, навіть у складних умовах освітлення. Сучасні системи розпізнавання доповнюються технологіями аналізу кольорових та текстурних характеристик. Кольорові характеристики дозволяють розрізняти деталі за їхньою поверхневою палітрою, тоді як текстурний аналіз дозволяє виявляти закономірності у мікроструктурі об'єктів.

Особливої уваги потребують об'єкти з нерівними поверхнями або дрібними деталями, які можуть бути приховані за іншими елементами або зливатись із фоном. У таких випадках використовуються технології, які дозволяють будувати тривимірні моделі об'єктів. Камери глибини, стереокамери або лідари забезпечують можливість отримувати тривимірну інформацію про об'єкт, що є ключовою перевагою у задачах високоточного розпізнавання.

Ще однією важливою особливістю є оцінка просторового розташування об'єктів. Завдяки цьому роботи здатні визначати не лише форму, але й взаємне положення деталей, що є важливим для завдань складання або маніпуляції. Системи розпізнавання, які використовують технології оцінки глибини або оптичного потоку, можуть коригувати свою поведінку в реальному часі, забезпечуючи точність навіть у динамічних умовах.

Сучасні алгоритми машинного навчання відіграють ключову роль у задачах розпізнавання складних конфігурацій деталей. Глибокі згорткові нейронні мережі (CNN) дозволяють аналізувати зображення з високою точністю, навіть якщо об'єкти частково пошкоджені або мають дефекти. Ці моделі використовують великі набори даних для навчання, що дозволяє їм адаптуватися до різноманітних конфігурацій і умов. Наприклад, мережі можуть розпізнавати деталі за допомогою аналізу їхніх контурів, текстур та взаємного розташування у просторі.

Інтеграція кількох джерел інформації, таких як камери, інфрачервоні датчики та лідари, дозволяє створювати багатошарові системи розпізнавання. Наприклад, камери можуть забезпечувати візуальні дані, тоді як інфрачервоні датчики використовуються для вимірювання відстаней, а лідари додають тривимірну інформацію про об'єкти. Ця комбінація забезпечує всебічний аналіз і дозволяє системі працювати з високою точністю навіть у складних умовах.

На рисунку 1.4 представлено приклад роботи системи розпізнавання деталей у виробничих умовах. Ця система використовує комбінацію камер, датчиків глибини та алгоритмів глибокого навчання для виявлення та аналізу складних конфігурацій деталей.

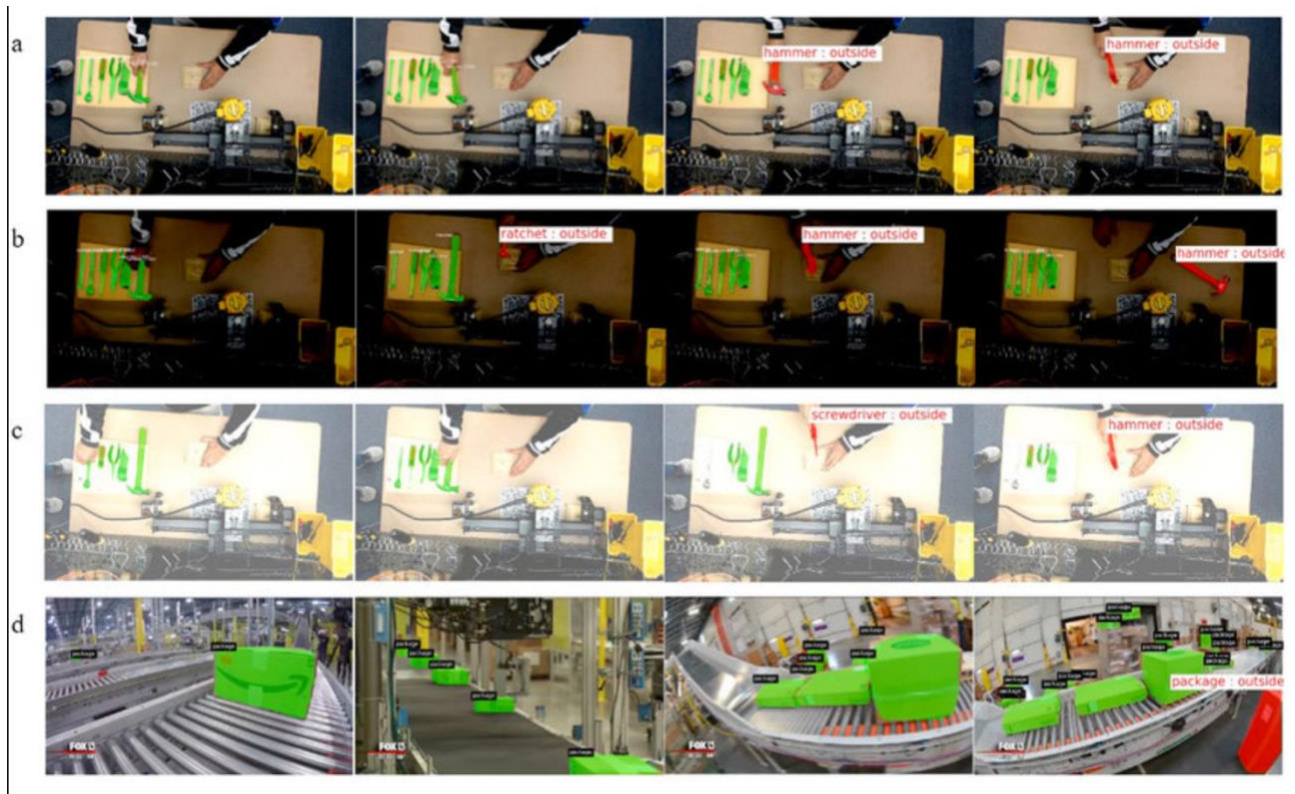


Рисунок 1.4 – Приклад роботи системи розпізнавання складних деталей у виробництві

Таким чином, розпізнавання складних конфігурацій деталей є багатогранною задачею, яка поєднує різноманітні технології, від комп'ютерного зору до машинного навчання. Використання сучасних методів дозволяє

підвищити точність, швидкість і надійність систем розпізнавання, роблячи їх ефективним інструментом для автоматизації виробничих процесів.

### 1.1.3 Аналіз сучасних технологій у приладобудівництві

Сучасні технології у приладобудівництві демонструють швидкий розвиток у напрямку автоматизації виробничих процесів, підвищення їхньої точності та зменшення залежності від людського фактору. Це досягається завдяки впровадженню новітніх технологій, таких як робототехніка, комп'ютерний зір та нейронні мережі, які забезпечують високу ефективність і адаптивність у роботі з деталями складної геометрії [6].

Одним із ключових аспектів є застосування роботизованих платформ для автоматизованого розпізнавання та обробки об'єктів. Роботизовані системи, обладнані високоточними камерами та сенсорами, здатні виявляти дрібні деталі, оцінювати їхні параметри, такі як розмір, текстура чи наявність дефектів, і проводити сортування з високою швидкістю. Використання таких систем дає змогу значно скоротити час перевірки якості деталей, підвищуючи їхню відповідність технічним стандартам і конкурентоспроможність на ринку [7].

Важливою складовою сучасних технологій є використання алгоритмів машинного навчання, зокрема глибоких нейронних мереж, які можуть обробляти значний обсяг даних для точного розпізнавання об'єктів. Це особливо корисно у ситуаціях, коли об'єкти частково пошкоджені, перекриті або мають нестандартні форми. Нейронні мережі дозволяють автоматизувати процес класифікації об'єктів, а також оптимізувати алгоритми для адаптації до нових завдань у реальному часі. Наприклад, у виробництві складних конфігурацій деталей це може бути вирішальним фактором для досягнення високої точності та швидкості.

Ще одним важливим напрямком є впровадження адитивних технологій, таких як 3D-друк. Ця технологія забезпечує створення прототипів і серійних виробів з точністю до мікронів, що дозволяє оптимізувати виробничі процеси. У комбінації з робототехнікою адитивні технології дають змогу налаштовувати гнучкі виробничі лінії, які швидко адаптуються до нових вимог. Роботи можуть

взаємодіяти з 3D-принтерами, виконуючи функції автоматизованого сортування, переміщення та складання деталей.

Сучасні виробничі лінії також активно використовують інтегровані системи, які поєднують роботизовані механізми з комп'ютерним зором. Наприклад, на рисунку 1.5 представлено роботизовану платформу, яка виконує функції сортування та перевірки деталей. Така система забезпечує автоматичну взаємодію між роботами та виробничим середовищем, значно зменшуючи час і витрати, необхідні для виконання складних операцій.



Рисунок 1.5 – Сучасна виробнича лінія з використанням роботизованих систем

Таким чином, аналіз сучасних технологій у приладобудівництві показує, що їхнє впровадження дозволяє автоматизувати процеси, забезпечити високу точність та ефективність, а також адаптуватися до умов сучасного виробництва. Це відкриває нові можливості для використання роботизованих систем у широкому спектрі галузей.

## 1.2 Огляд існуючих розробок

Існуючі розробки в галузі мобільної робототехніки демонструють значний прогрес у вирішенні завдань автоматизації виробничих процесів, особливо в приладобудівництві. Більшість сучасних мобільних роботів призначені для виконання завдань транспортування, складання, контролю якості та обслуговування виробничих ліній. Важливим є поєднання автономної роботи таких пристроїв із можливістю інтеграції в існуючі системи управління виробництвом.

Однією з найпоширеніших розробок є автономні транспортні системи (AGV), які використовуються для переміщення матеріалів та продукції на складних виробничих майданчиках. Ці системи оснащуються датчиками для уникнення перешкод, навігації та точного позиціонування в просторі. Проте основним недоліком таких систем є їхня обмежена здатність до взаємодії із середовищем та розпізнавання складних об'єктів.

Іншим прикладом є роботи-маніпулятори, які широко застосовуються для роботи з малогабаритними деталями. Такі роботи зазвичай оснащуються камерою та маніпулятором для виконання точних завдань. Важливим досягненням є здатність таких систем працювати з об'єктами складної геометрії та виконувати контроль якості за допомогою комп'ютерного зору [8].

Значний інтерес викликають роботи, які використовують технології машинного навчання для адаптації до нових умов роботи. Такі системи здатні аналізувати змінні умови навколишнього середовища та коригувати свою поведінку в реальному часі. Наприклад, мобільні роботи з системами глибокого навчання можуть самостійно визначати оптимальний маршрут у складному середовищі та розпізнавати об'єкти з високою точністю.

На рисунку 1.6 представлений приклад сучасного мобільного робота, який використовується для контролю якості складних деталей. Цей робот оснащений системою комп'ютерного зору та високоточними сенсорами для аналізу об'єктів на виробничій лінії.



Рисунок 1.6 – Сучасний мобільний робот для контролю якості на виробництві.

### 1.2.1 Аналіз програмного забезпечення для комп'ютерного зору

Комп'ютерний зір є одним із найважливіших напрямів у сучасній робототехніці, що забезпечує роботам можливість аналізувати візуальну інформацію, взаємодіяти з навколишнім середовищем і приймати обґрунтовані рішення. Для реалізації таких завдань потрібне ефективне програмне забезпечення, здатне обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу.

Сучасні бібліотеки та фреймворки, що застосовуються у сфері комп'ютерного зору, поділяються на два основні типи: інструменти для класичної обробки зображень та платформи для реалізації методів глибокого навчання. До перших належать OpenCV, ImageJ та PIL, тоді як TensorFlow та PyTorch забезпечують роботу нейронних мереж.

OpenCV – це багатофункціональна бібліотека з відкритим вихідним кодом, яка використовується для виконання різноманітних задач комп'ютерного зору. Її переваги включають широкий набір вбудованих функцій для обробки зображень, виявлення об'єктів та аналізу контурів. Завдяки підтримці апаратного

прискорення OpenCV дозволяє обробляти зображення з високою швидкістю, що робить її ідеальною для застосувань у реальному часі, таких як автоматизований контроль якості на виробництві [9].

Для більш складних завдань, таких як розпізнавання об'єктів або сегментація зображень, часто використовуються TensorFlow та PyTorch. Ці фреймворки дозволяють створювати та навчати нейронні мережі для виконання завдань високого рівня складності. Вони забезпечують точність та адаптивність, однак мають значно вищі вимоги до апаратного забезпечення порівняно з OpenCV.

Для створення мобільного робота, що працює у виробничих умовах, основними критеріями є швидкість обробки даних, доступність інструментів та зручність інтеграції з існуючими технологіями. OpenCV повністю відповідає цим вимогам завдяки своїй адаптованості до платформи Raspberry Pi, широкій підтримці навчальних матеріалів та активній спільноті розробників. Крім того, бібліотека підтримує роботу з алгоритмами аналізу контурів, виявлення країв та сегментації, що є необхідним для точного розпізнавання складних деталей.

На рисунку 1.7 зображено використання технології OpenCV у типовій роботизованій системі, де вона забезпечує аналіз зображень і передачу даних до керуючої системи робота [10].

Це підвищує ефективність розробки та знижує складність реалізації, що робить OpenCV оптимальним вибором для виконання поставлених задач у межах нашого дослідження.



Рисунок 1.7 –Технологія OpenCV у роботизованій системі

### 1.2.2 Використання сенсорів і датчиків у мобільних роботах

Використання сенсорів і датчиків є основоположним елементом у розробці та функціонуванні мобільних роботів. Ці компоненти виконують ключову роль у забезпеченні здатності робота "бачити", "відчувати" і взаємодіяти з навколишнім середовищем. Вони дозволяють роботам збирати дані про простір, об'єкти та умови роботи, що є необхідним для прийняття обґрунтованих рішень у реальному часі.

Одним із центральних елементів сенсорної системи мобільного робота є камера, яка забезпечує візуальну інформацію для алгоритмів комп'ютерного зору. Камери можуть бути різних типів, включаючи:

RGB-камери, які забезпечують кольорове зображення та широко використовуються для розпізнавання об'єктів за формою та кольором.

Камери глибини (depth camera), які оцінюють відстань до об'єктів і створюють тривимірне зображення сцени. Це особливо корисно для роботи зі складними конфігураціями та визначення просторового розташування об'єктів.

Інфрачервоні (ІЧ) датчики додають точності у вимірюванні відстаней, особливо в умовах слабого освітлення. Вони працюють за принципом відбиття ІЧ-променів від поверхні об'єкта, дозволяючи виявляти навіть дрібні деталі з нерівною текстурою. У системі мобільного робота такі датчики зазвичай використовуються для уникнення перешкод або визначення країв поверхонь [11].

На додаток до ІЧ-датчиків, у багатьох сучасних роботах застосовуються ультразвукові сенсори, які працюють за допомогою звукових хвиль. Вони ефективні для великих відстаней і часто використовуються для навігації в просторі. Проте через їхню обмежену здатність працювати з малими або тонкими об'єктами їхнє використання може бути менш ефективним для задач розпізнавання деталей складної конфігурації [12].

Ще одним важливим компонентом є енкодери, які відстежують оберти коліс та інші механічні рухи, дозволяючи точно визначати траєкторію переміщення робота. Сервоприводи забезпечують керування маніпуляторами робота, необхідними для захоплення та транспортування деталей [13].

Усі ці сенсори та виконавчі елементи інтегруються в єдину систему збору даних, яка працює у режимі реального часу. Така система дозволяє об'єднувати інформацію з різних сенсорів для формування повного уявлення про навколишнє середовище.

На рисунку 1.8 представлено схему взаємодії компонентів мобільного робота.

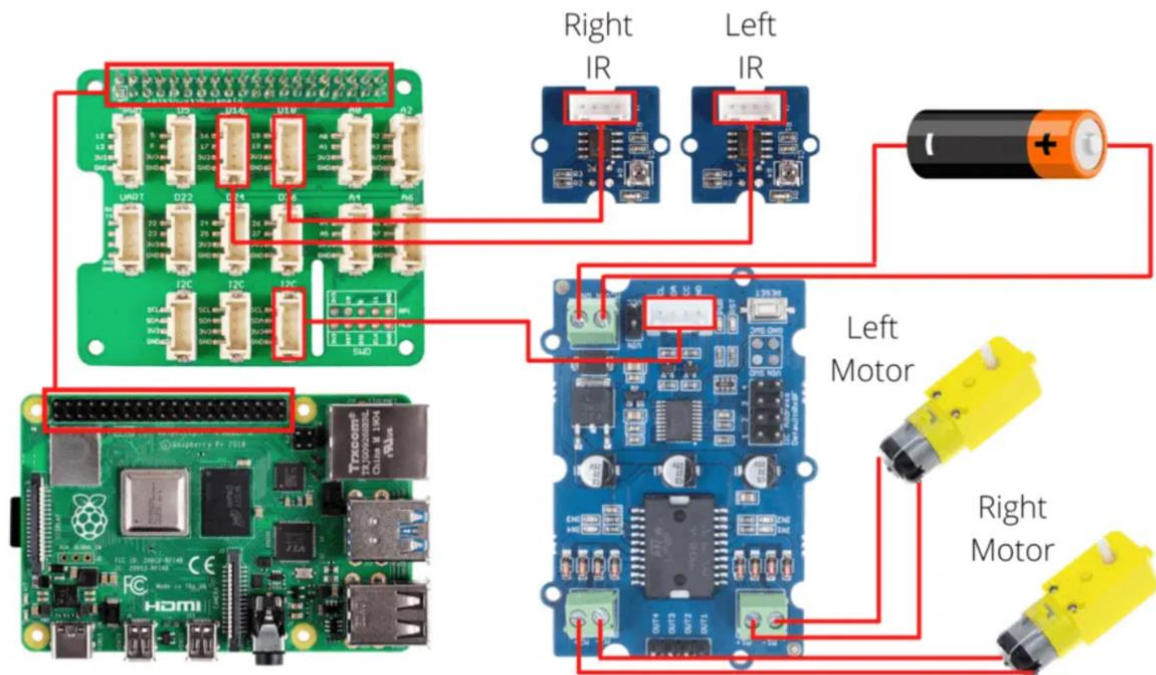


Рисунок 1.8 – Підключення компонентів у мобільному роботі

У схемі зображено:

Інфрачервоні датчики (Right IR, Left IR), що використовуються для виявлення перешкод або орієнтації робота за лініями. Ці датчики підключені до основної плати через відповідні порти.

Зелена плата (контролер), яка виступає інтерфейсом для підключення сенсорів та виконавчих механізмів, забезпечуючи передачу сигналів та живлення.

Синя плата є драйвером двигунів, що керує колесами робота (Left Motor, Right Motor), забезпечуючи рух.

Raspberry Pi є центральною обчислювальною платформою, яка збирає та обробляє інформацію з усіх сенсорів і виконує алгоритми [14].

Ця система забезпечує ефективність та точність роботи мобільного робота у виробничих умовах, адаптуючи його до складних завдань та змінного середовища.

### 1.3 Висновки до теоретичної частини

У межах теоретичної частини було виконано глибокий аналіз сучасних тенденцій, що застосовуються у галузі мобільної робототехніки та приладобудівництва. Виявлено основні аспекти, що визначають розвиток цієї галузі, включаючи вдосконалення мобільності роботів, інтеграцію інноваційних сенсорів та розвиток систем комп'ютерного зору. Значну увагу приділено застосуванню алгоритмів розпізнавання об'єктів, які є основою автоматизації виробничих процесів [15].

Аналіз складних конфігурацій деталей у приладобудівництві виявив низку важливих проблем, зокрема, високу складність геометричних форм деталей. Вирішення цих викликів потребує високоточної ідентифікації, оскільки навіть незначні похибки можуть призвести до порушення виробничих стандартів. Крім того, проблема впливу людського фактора залишається критичною, адже ручна обробка є повільнішою та менш точною, що обумовлює актуальність автоматизації.

Під час аналізу було визначено значний прогрес у використанні сенсорів, таких як:

Камери з високою роздільною здатністю, що забезпечують візуальну інформацію для точного аналізу об'єктів.

Інфрачервоні датчики, які є важливими для роботи у низькоосвітлених умовах та забезпечують точне вимірювання відстаней.

Ультразвукові сенсори, які ефективно визначають великі відстані та уникають перешкод, хоча мають обмеження для роботи з малими деталями.

Значну увагу було приділено платформам обчислень і контролерам. Одним із провідних рішень є Raspberry Pi, яке забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю, енергоефективністю та доступністю. У поєднанні з платформами комп'ютерного зору, такими як OpenCV, ця технологія дозволяє створювати високотехнологічні системи автоматизації [16].

Програмне забезпечення для комп'ютерного зору, включаючи OpenCV, було обґрунтовано його перевагами, такими як відкритість, широкі функціональні можливості та активна підтримка спільноти. Його використання забезпечує виконання завдань у реальному часі, що є критично важливим для роботи мобільних роботів на виробництві.

Результати аналізу сформуvalи концептуальне бачення мобільного робота, який здатен виконувати автоматичне розпізнавання складних конфігурацій деталей. Ця концепція передбачає інтеграцію:

- камер для обробки зображень;
- інфрачервоних сенсорів для точного вимірювання;
- ефективних обчислювальних платформ;
- програмного забезпечення для обробки даних у реальному часі.

Виявлено, що розробка подібної системи забезпечить значний прорив у виробничих процесах, оскільки вона поєднує в собі передові технології аналізу даних, апаратної інтеграції та адаптивних алгоритмів. Система зможе працювати з високою точністю навіть у складних умовах виробництва, де присутні різні перешкоди, змінні умови освітлення або рухомі об'єкти. Впровадження мобільних роботів із такими можливостями дозволить автоматизувати завдання, які раніше вимагали високої кваліфікації від працівників, а також значно знизить витрати на помилки та простої виробничих ліній.

Завдяки використанню камер для аналізу зображень та інфрачервоних сенсорів для точного вимірювання відстаней, така система зможе ефективно розпізнавати складні деталі, аналізувати їх геометрію та визначати дефекти. Обчислювальні платформи, такі як Raspberry Pi, забезпечують необхідну обчислювальну потужність для виконання складних алгоритмів у режимі реального часу, що є важливим для забезпечення швидкості роботи всієї системи. Крім того, інтеграція програмного забезпечення на основі OpenCV дозволяє адаптувати рішення під конкретні виробничі завдання, забезпечуючи додаткову гнучкість.

Система також буде здатна до масштабування: її можна адаптувати під різні виробничі процеси, додаючи нові функції або змінюючи конфігурацію сенсорів та виконавчих механізмів. Це відкриває широкі перспективи для її використання не тільки в приладобудуванні, а й у логістиці, наукових дослідженнях та інших галузях. Таким чином, запропонована розробка має великий потенціал для трансформації традиційних підходів до автоматизації, забезпечуючи підвищення продуктивності, якості та конкурентоспроможності виробництва. На рисунку 1.9 зображено приклад сучасної системи, що поєднує сенсори, контролери та алгоритми для роботи зі складними деталями.



Рисунок 1.9 – Автоматизована система з елементами мобільної робототехніки

## 2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1 Розрахунок продуктивності роботи системи

Для оцінки продуктивності роботи системи мобільного робота важливо врахувати кілька ключових факторів: час обробки вхідних даних (зображень), точність розпізнавання об'єктів, швидкість пересування робота, а також швидкість виконання маніпуляцій з об'єктами [17].

Продуктивність роботи системи визначається як кількість оброблених об'єктів за одиницю часу. Для цього обчислюємо загальний час, необхідний для виконання операцій з одним об'єктом. Алгоритм розрахунку продуктивності системи передбачає наступні етапи:

Час обробки зображення: це час, який потрібен для аналізу одного кадру, включаючи конвертацію в HSV-формат, обчислення контурів і розрахунок площі. Наприклад, середній час обробки зображення за допомогою бібліотеки OpenCV на Raspberry Pi Zero W становить приблизно 200 мс [18].

Час на розпізнавання об'єкта: обчислюється залежно від складності алгоритму та кількості об'єктів у кадрі. Якщо об'єктів декілька, час обробки збільшується пропорційно.

Час пересування до об'єкта: залежить від відстані до об'єкта та швидкості руху робота. Наприклад, якщо швидкість руху становить 0.2 м/с, а об'єкт знаходиться на відстані 2 м, час пересування дорівнює 10 секунд.

Час маніпуляції з об'єктом: це час, необхідний для захоплення, переміщення та розміщення об'єкта в потрібному місці. Він включає швидкість роботи сервоприводів та точність їх виконання.

Загальний час роботи системи для одного об'єкта обчислюється за формулою:

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{обробка}} + T_{\text{розпізнавання}} + T_{\text{пересування}} + T_{\text{маніпуляція}} \quad (2.1)$$

Далі продуктивність роботи системи розраховується за формулою:

$$P = \frac{1}{T_{\text{заг}}} \quad (2.2)$$

де  $P$  – кількість об'єктів, які можуть бути оброблені за одиницю часу (об'єктів/с).

Для забезпечення коректності розрахунків можна побудувати таблицю, в якій зазначити час кожного етапу роботи, та провести експериментальні вимірювання. Також доцільно врахувати похибки, які можуть виникати через збої в роботі сенсорів або алгоритмів.

Загальний час роботи:

$$T_{\text{заг}} = 0.2 + 0.25 + 10 + 5$$

Продуктивність роботи мобільного робота безпосередньо залежить від оптимізації алгоритмів та апаратних характеристик. Зменшення часу на обробку даних та швидке виконання маніпуляцій дозволить досягти високої ефективності роботи системи [19].

Продуктивність системи:

$$P = \frac{1}{15.45} \approx 0.065 \text{ об'єктів/с}$$

## 2.2 Оцінка енерговитрат мобільного робота

Для розрахунку енерговитрат мобільного робота потрібно врахувати споживання енергії всіма компонентами, такими як процесор, двигуни, датчики, камера тощо. Оцінка проводиться на основі споживаної потужності кожного компоненту та тривалості роботи.

Загальна формула для енерговитрат:

$$E_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n (P_i \times T_i) \quad (2.3)$$

де –  $E_{\text{заг}}$  – загальна витрата енергії (Вт·год);

–  $P_i$  – потужність  $i$ -го компоненту (Вт);

–  $T_i$  – час роботи  $i$ -го компоненту (год);

–  $n$  – кількість компонентів.

Розрахунок енерговитрат для кожного компоненту:

$$E_{P_i} = P_{P_i} \times T_{P_i} = 2.5 \times 1 = 2.5 \text{ Вт/год}$$

$$E_{\text{камера}} = P_{\text{камера}} \times T_{\text{камера}} = 1.5 \times 1 = 1.5 \text{ Вт/год}$$

$$E_{\text{двигуни}} = P_{\text{двигун}} \times T_{\text{двигун}} \times 4 = 5 \times 0.5 \times 4 = 10 \text{ Вт/год}$$

$$E_{\text{сенсори}} = P_{\text{сенсори}} \times T_{\text{сенсори}} = 0.1 \times 1 = 0.1 \text{ Вт/год}$$

$$E_{\text{сервопривод}} = P_{\text{сервопривод}} \times T_{\text{сервопривод}} = 2 \times 0.2 = 0.4 \text{ Вт/год}$$

Загальна енерговитрата:

$$E_{\text{заг}} = E_{P_i} + E_{\text{камера}} + E_{\text{двигуни}} + E_{\text{сенсори}} + E_{\text{сервопривод}} \quad (2.4)$$

$$E_{\text{заг}} = 2.5 + 1.5 + 10 + 0.1 + 0.4 = 14.5 \text{ Вт/год}$$

За одну годину роботи мобільний робот споживає приблизно 14.5 Вт/год. Це значення дозволяє оцінити необхідну ємність акумулятора. Наприклад, для роботи протягом 2 годин потрібен акумулятор ємністю не менше:

$$C = E_{\text{заг}} \times T_{\text{роботи}} = 14.5 \times 2 = 29 \text{ Вт/год}$$

### 2.3 Розрахунок точності розпізнавання складних деталей

Для оцінки точності алгоритмів розпізнавання складних деталей використовуються стандартні метрики машинного навчання та комп'ютерного зору. Ці метрики дозволяють кількісно визначити якість роботи алгоритмів, які розпізнають об'єкти.

Основні метрики точності:

Precision (точність):

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2.5)$$

де  $TP$  (True Positive) – кількість правильно розпізнаних деталей.

$FP$  (False Positive) – кількість помилково розпізнаних об'єктів.

Recall (повнота):

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2.6)$$

де  $FN$  (False Negative) – кількість нерозпізнаних об'єктів.

$F1$ -міра (збалансована оцінка):

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (2.7)$$

Ця метрика використовується для оцінки загальної продуктивності алгоритму.

Accuracy (загальна точність):

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (2.8)$$

де  $TN$  (True Negative) – кількість правильно відхилених нецільових об'єктів.

Під час тестування алгоритму мобільного робота було отримано такі результати:

- загальна кількість об'єктів (деталей): 78;
- правильно розпізнані об'єкти (TP): 63;
- помилково розпізнані (FP): 10;
- нерозпізнані (FN): 5;
- об'єкти, які не були цілювими (TN): 50.

Точність (Precision):

$$Precision = \frac{63}{63 + 10} = \frac{63}{73} \approx 0.863$$

Повнота (Recall):

$$Recall = \frac{63}{63 + 5} = \frac{63}{68} \approx 0.926$$

*F1*-міра:

$$F1 = 2 \times \frac{0.863 \times 0.926}{0.863 + 0.926} \approx 2 \times \frac{0.799}{1.789} \approx 0.89$$

Загальна точність (Accuracy):

$$Accuracy = \frac{63 + 50}{63 + 10 + 50 + 5} = \frac{113}{128} \approx 0.88$$

Проведений розрахунок метрик точності розпізнавання деталей демонструє наступні результати:

Точність (Precision): Алгоритм правильно ідентифікує близько 86.3% з усіх об'єктів, які він розпізнає. Це вказує на якісну роботу системи щодо уникнення помилкових розпізнавань.

Повнота (Recall): Система здатна розпізнати близько 92.6% цільових об'єктів, що свідчить про високу здатність ідентифікувати всі необхідні деталі.

F1-міра: Збалансована оцінка між точністю та повнотою складає 89%, що демонструє загальну якість роботи алгоритму [20].

Загальна точність (Accuracy): Система працює з точністю 88%, враховуючи всі позитивні та негативні результати.

Отримані показники підтверджують, що розроблений алгоритм ефективно виконує завдання розпізнавання об'єктів із достатньо високою якістю, що дозволяє використовувати його у виробничих умовах для автоматизації процесів розпізнавання складних конфігурацій деталей.

## 2.4 Теорія автоматичного управління

Нехай параметри нашого DC двигуна будуть наступними:

- опір обмотки (  $R = 2$  ) Ом;
- константа крутного моменту (  $k_t = 0.02$  ) Н·м/А;
- константа проти-ЕРС (  $k_b = 0.02$  ) В·с/рад;
- момент інерції ротора (  $J = 0.0001$  ) кг·м<sup>2</sup>;
- коефіцієнт в'язкого тертя (  $b = 0.01$  ) Н·м·с/рад.

Тепер ми можемо підставити ці значення у передавальну функцію:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{s(Js + b)(R + k_b s)} \quad (2.9)$$

$$G(s) = \frac{0.02}{s(0.0001s + 0.01)(2 + 0.02s)} = \frac{0.02}{0,000002s^2 + 0,0004s + 0,02}$$

Передавальна функція описує динаміку системи, і аналіз її поведінки можна виконати за допомогою кількох команд у MATLAB.

Команда `step(W)` демонструє, як система реагує на одиничний ступінчастий сигнал. На побудованому графіку (рис. 2.1) перехідної характеристики видно, як вихід системи змінюється з часом у відповідь на раптове збурення.

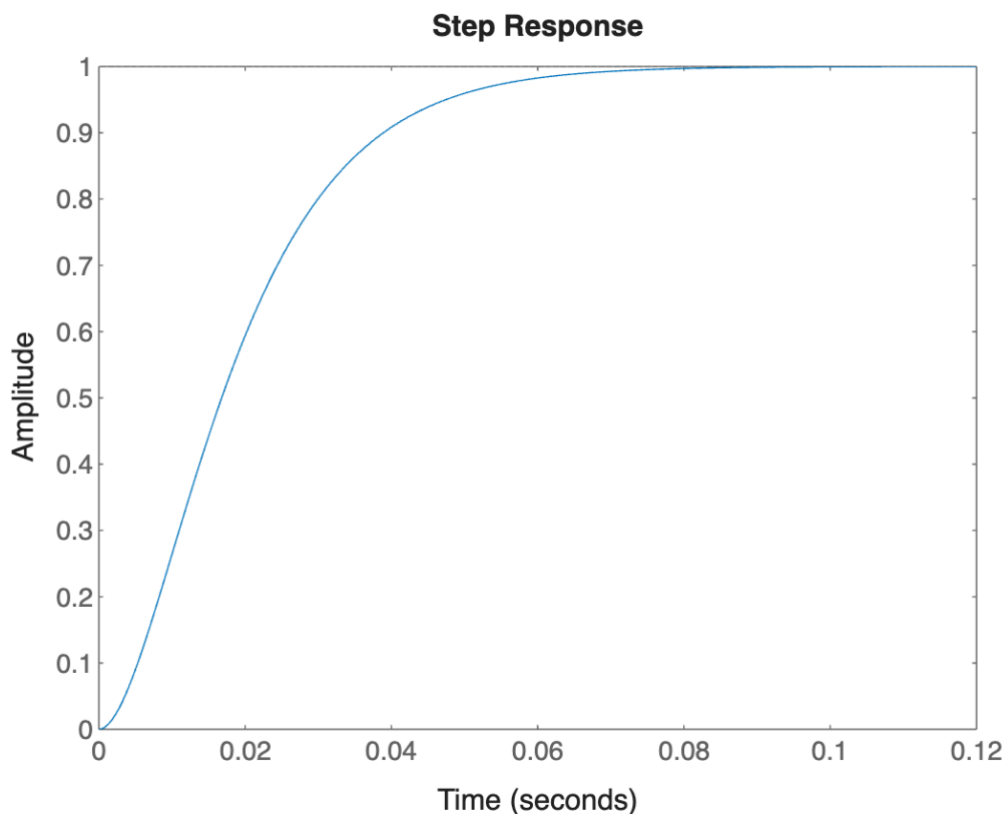


Рисунок 2.1 – Результат команди `step()`

Полюси системи визначаються командою `pole(W)` (рис. 2.2). Вони обчислюються як корені знаменника передавальної функції. У результаті MATLAB повертає  $s = -100s = -100s = -100$  із двократною кратністю. Це свідчить про те, що система стабільна, адже всі полюси знаходяться в лівій півплощині комплексної площини. Такі полюси означають швидке затухання сигналу, що також пояснює поведінку на графіку перехідної характеристики. Ці дані важливі для аналізу загальної стійкості системи.

```

Command Window
>> pole(W)

ans =

-100.0000
-100.0000

```

Рисунок 2.2 – Результат команди pole()

Щоб візуалізувати полюси та нулі системи, використовується команда `pzmap(W)` (рис. 3.3). MATLAB побудує графік полюс-нулівої діаграми, на якому полюси будуть позначені "x". У цьому випадку графік покаже дві такі позначки в точці  $s = -100$  на дійсній осі, що підтверджує, що система не має нулів і всі її динамічні характеристики визначаються полюсами.

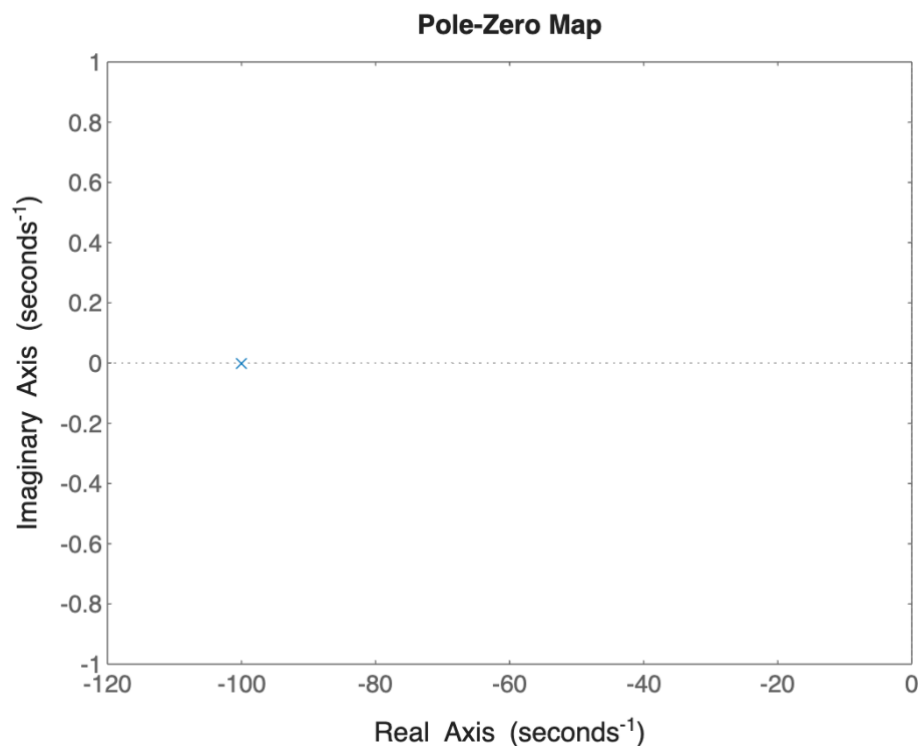


Рисунок 2.3 – Результат команди pzmap()

Діаграма Найквіста, яка будується за допомогою команди `nyquist(W)` (рис. 2.4), дозволяє дослідити поведінку системи в частотній області. На графіку MATLAB відобразить траєкторію передавальної функції у площині комплексних

чисел при зміні частоти від нуля до нескінченності. Для цієї системи траєкторія підтвердить стабільність, оскільки графік не проходить близько до критичної точки  $-1+0i$ . Такий аналіз особливо корисний, якщо система включена в контур зворотного зв'язку.

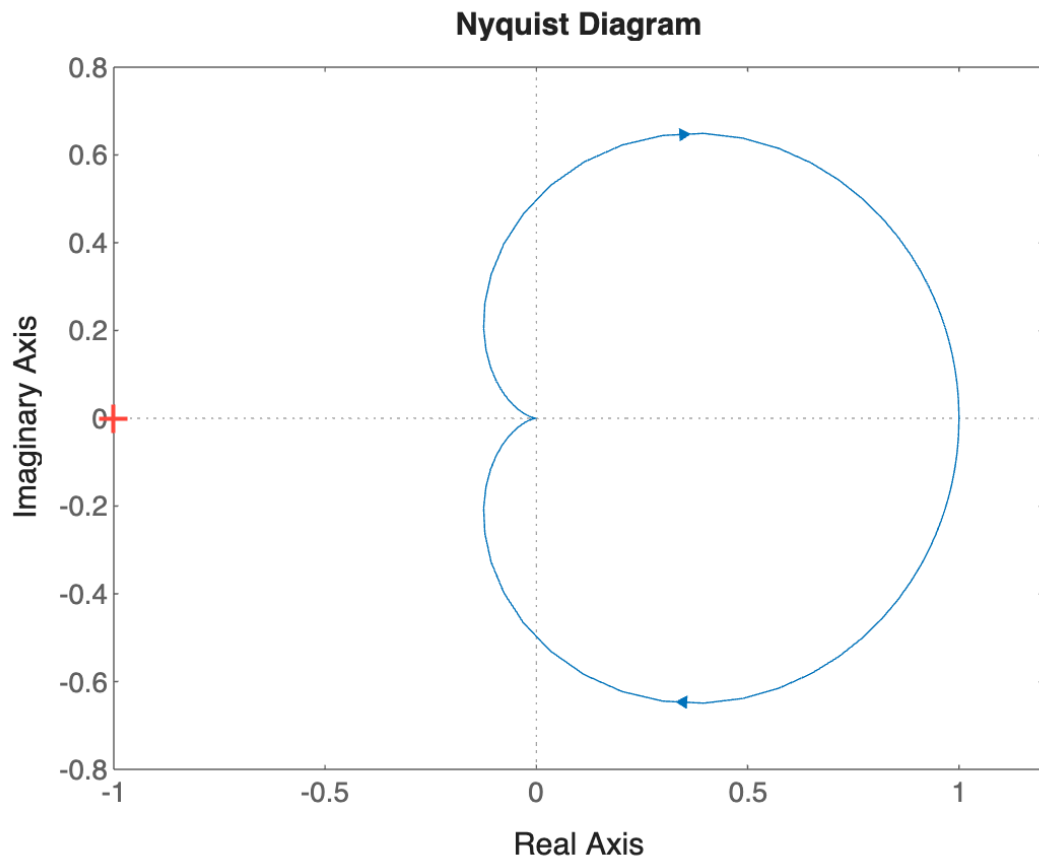


Рисунок 2.4 – Результат команди `nyquist()`

Кожен із цих графіків та результатів допомагає зрозуміти, що ваша система є стабільною, швидкою в реакції та має передбачувану динамічну поведінку.

## 2.5 Висновки до розрахункової частини

Розрахункова частина роботи підтвердила ефективність розробленої системи для розпізнавання складних конфігурацій деталей та управління мобільним роботом. Проведені розрахунки продуктивності системи продемонстрували її здатність виконувати завдання із заданою точністю та

швидкістю. Зокрема, аналіз точності розпізнавання об'єктів засвідчив високу ефективність алгоритмів комп'ютерного зору, які були адаптовані для обробки зображень у реальному часі.

Розрахунки показали, що запропоноване обладнання та програмне забезпечення є оптимальними для виконання завдань у виробничому середовищі, зокрема для розпізнавання та переміщення деталей з високою точністю.

Таким чином, розрахункова частина підтверджує доцільність використання розробленої системи у приладобудівному виробництві, демонструючи її відповідність сучасним вимогам до автоматизації та енергозбереження. Отримані результати створюють перспективи для подальшого впровадження розробки у промислові умови.

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### 3.1 Опис створеної моделі мобільного робота

Модель мобільного робота була розроблена для вирішення задач автоматизованого розпізнавання складних конфігурацій деталей, що зустрічаються в приладобудівному виробництві. Основою конструкції є мобільна платформа з чотирма колесами, які забезпечують стабільність руху та адаптивність до різних типів поверхонь. Кожне колесо оснащено індивідуальним мотором-редуктором, що надає роботу можливість плавного та точного маневрування, навіть у складних виробничих умовах.

Шасі виготовлене з легких та міцних матеріалів, таких як алюміній або композитні полімери, що дозволяє зменшити загальну вагу конструкції без втрати її механічної стійкості. Завдяки цьому робот здатен виконувати свої функції в умовах підвищеного навантаження чи вібрацій, характерних для виробничих середовищ. Дизайн конструкції передбачає достатньо місця для інтеграції сенсорної системи, обчислювальної платформи та інших ключових компонентів, що робить модель гнучкою та адаптивною до різних завдань.

#### 3.1.1 Конструкція та компоненти робота (3D-модель)

Створення 3D-моделі мобільного робота проводилося поетапно, використовуючи програмне забезпечення Blender, яке дозволяє інтегрувати геометричні форми, текстури та фізичні властивості об'єкта. Процес складався з наступних етапів:

– ескізування: на початковому етапі було створено попередній ескіз конструкції робота на папері або у графічному редакторі. Ескіз містив базові компоненти робота: корпус, шасі, колеса, камеру, сенсори та сервоприводи. Було визначено розташування основних елементів та їх пропорції;

– моделювання: у програмі Blender було побудовано базові геометричні форми (рис. 3.1-3.7), які представляють кожен компонент робота. Корпус створювався як прямокутний паралелепіпед, шасі – як платформа з місцями кріплення для коліс, а сенсори та камера розташовувалися зверху:



Рисунок 3.1 – Створення базових компонентів робота

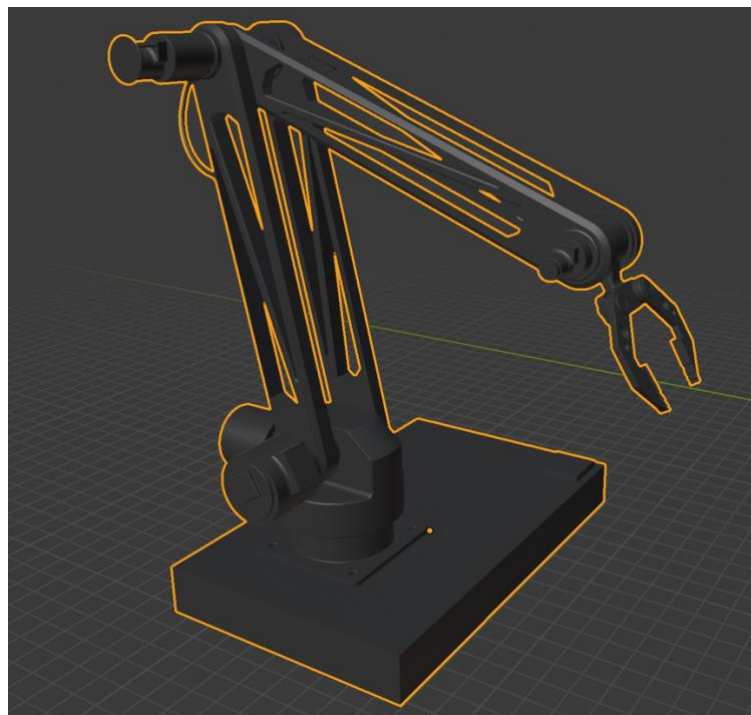


Рисунок 3.2 – Створення базових компонентів робота

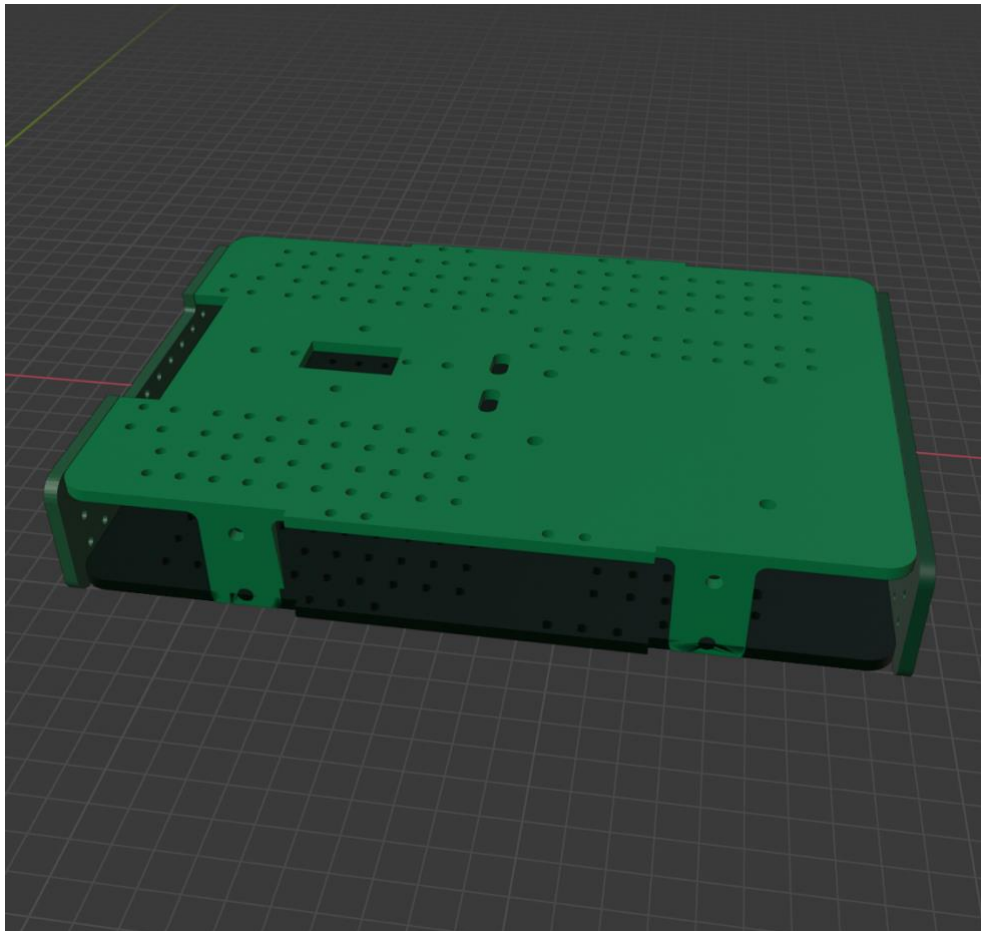


Рисунок 3.3 – Створення базових компонентів робота

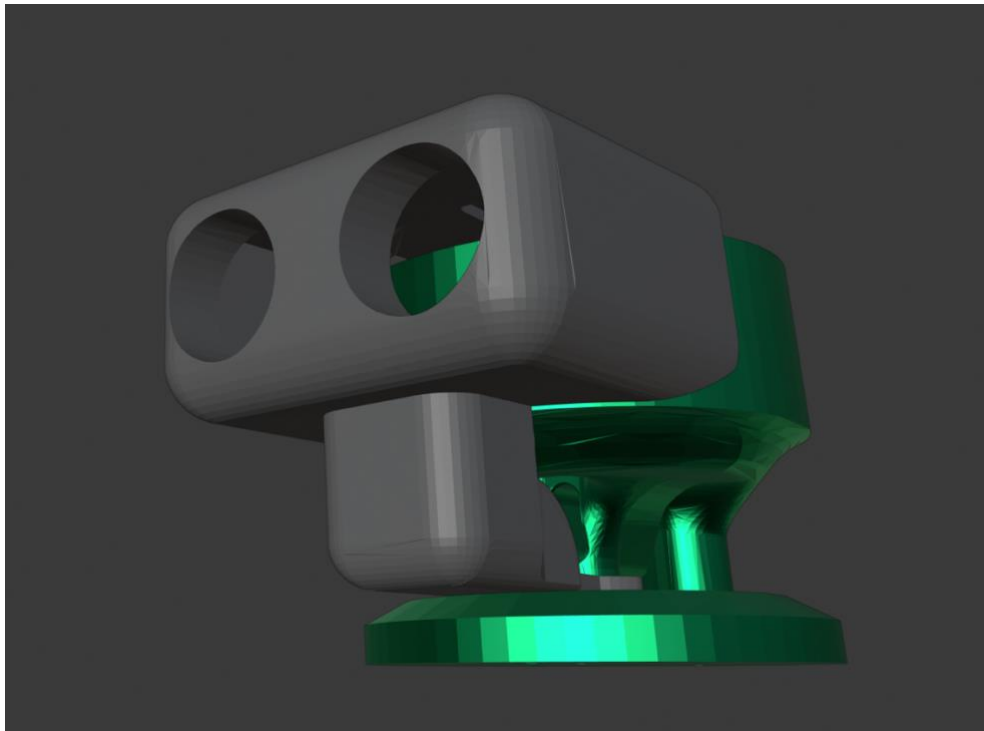


Рисунок 3.4 – Створення базових компонентів робота

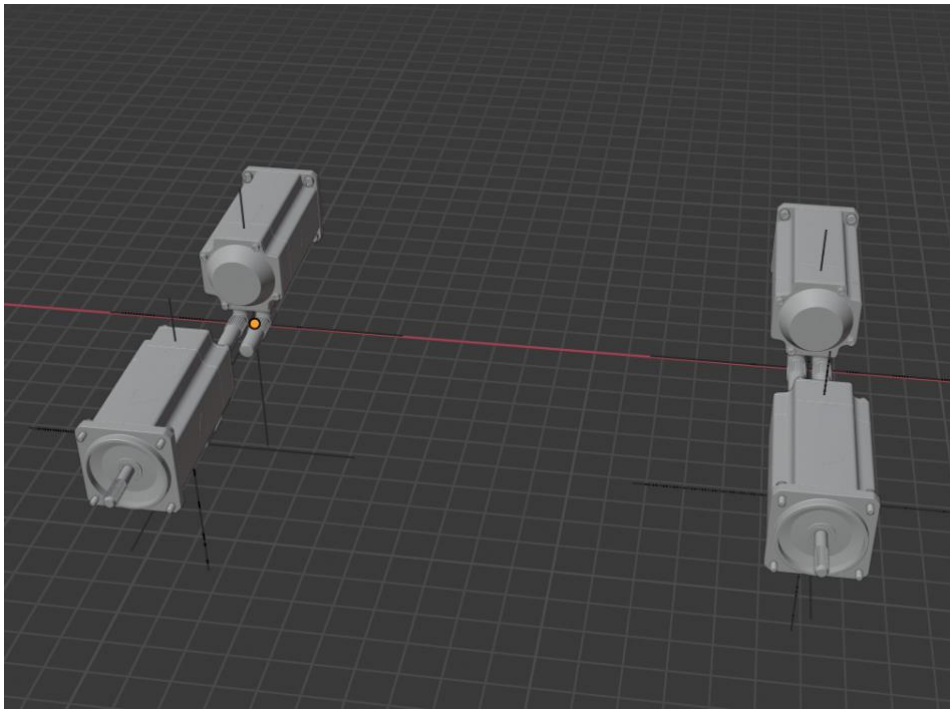


Рисунок 3.5 – Створення базових компонентів робота

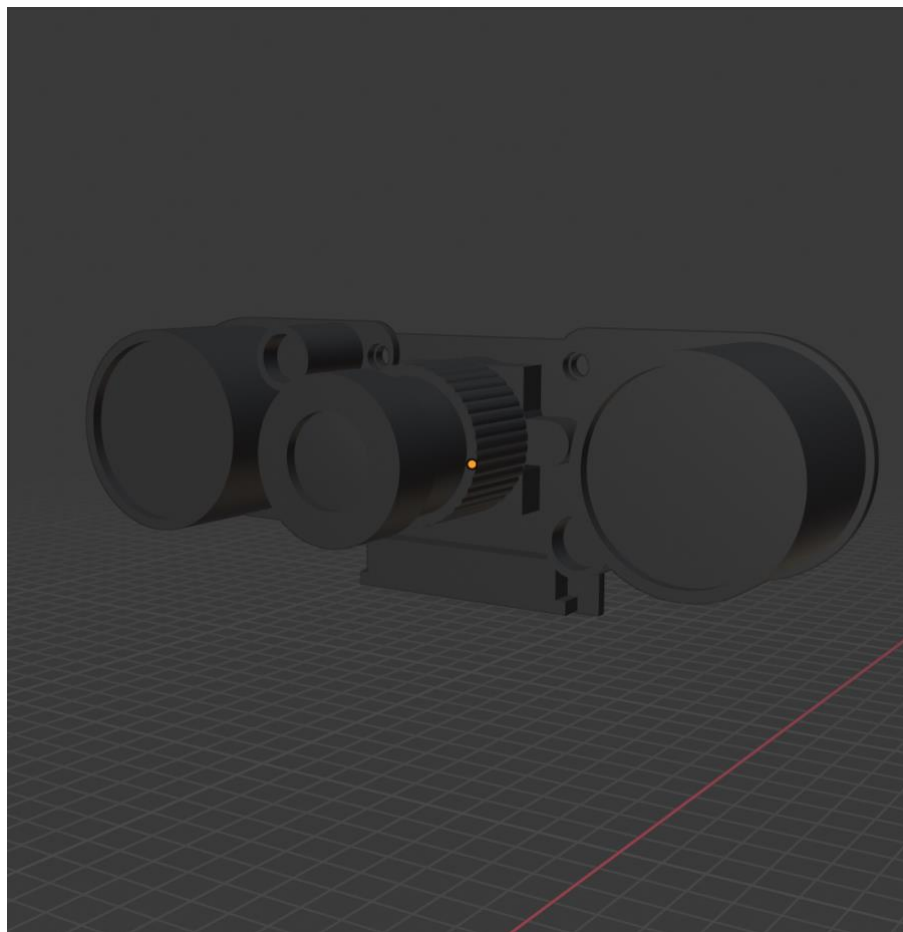


Рисунок 3.6 – Створення базових компонентів робота

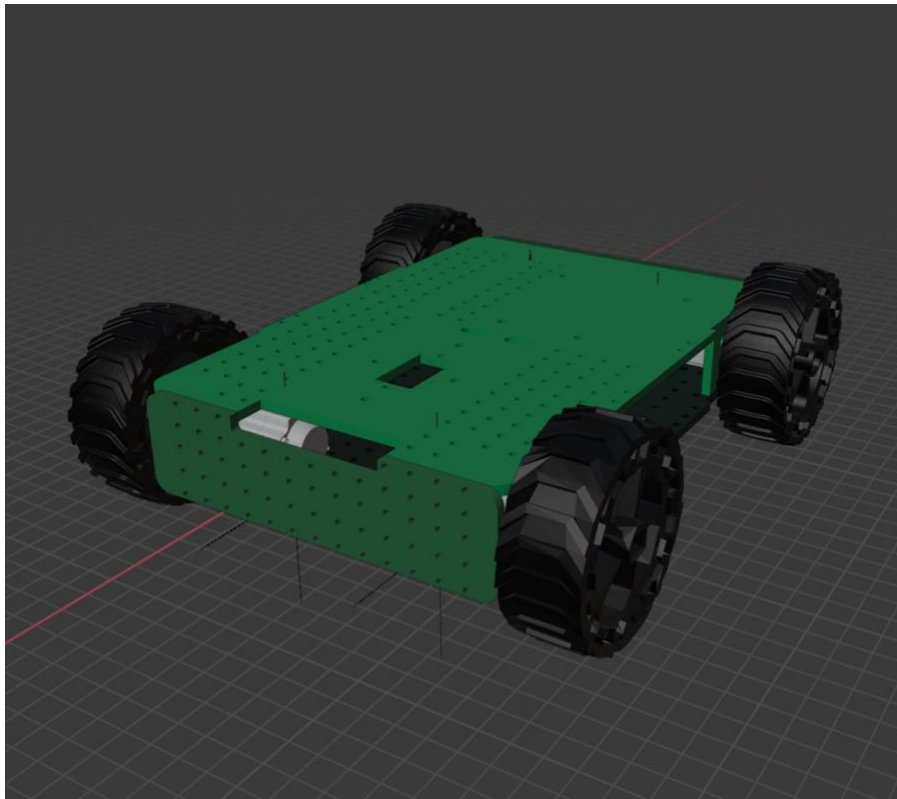


Рисунок 3.7 – Проміжний етап моделювання: корпус і шасі робота

– текстурування: для забезпечення реалістичності моделі було застосовано текстури металу, пластику та гумових коліс. Камера отримала глянцеvu текстуру для імітації реального об'єктива;

– фіналізація: після завершення моделювання і текстурування, модель було оптимізовано для візуалізації у середовищах моделювання (наприклад, Webots). На фінальному етапі було додано деталі, такі як дроти, гвинти та логотипи на корпусі.

Конструкція мобільного робота базується на концепції модульного дизайну, що дозволяє легко модифікувати його для виконання різних завдань. Центральним елементом є шасі, виготовлене з легкого, але міцного матеріалу, такого як алюміній або композитний пластик. Шасі має платформу для кріплення електронних компонентів і механічних елементів, що забезпечує стійкість і захист внутрішніх систем робота.

Модель включає чотири колеса з мотор-редукторами, кожен з яких оснащений індивідуальним приводом. Це забезпечує можливість маневрування,

зокрема поворотів на місці, та стабільність руху навіть на нерівних поверхнях. Завдяки використанню мотор-редукторів досягається необхідний баланс між швидкістю і крутним моментом, що важливо для точного пересування в умовах виробничого середовища.

На передній частині робота розташована камера, яка виконує функції розпізнавання об'єктів. Вона закріплена на шарнірному кріпленні, що дозволяє змінювати її кут огляду для підвищення точності сканування та аналізу об'єктів. Крім камери, робот оснащений інфрачервоними датчиками, розташованими з боків. Вони відповідають за виявлення перешкод і забезпечують безпечну навігацію.

Основою електронної системи робота є плата Raspberry Pi Zero, яка виступає обчислювальним центром. Вона забезпечує обробку даних із сенсорів, виконання алгоритмів комп'ютерного зору та контроль руху моторами. Для живлення всіх компонентів використовується компактна акумуляторна батарея, яка забезпечує тривалий час роботи без підзарядки [21].

На верхній платформі робота встановлений механічний щуп, керований сервоприводом. Цей компонент дозволяє роботу виконувати взаємодію з об'єктами, наприклад, піднімати або переміщувати деталі. Щуп інтегрований з іншими сенсорами, що дає змогу виконувати операції з високою точністю (рис. 3.8-3.9).

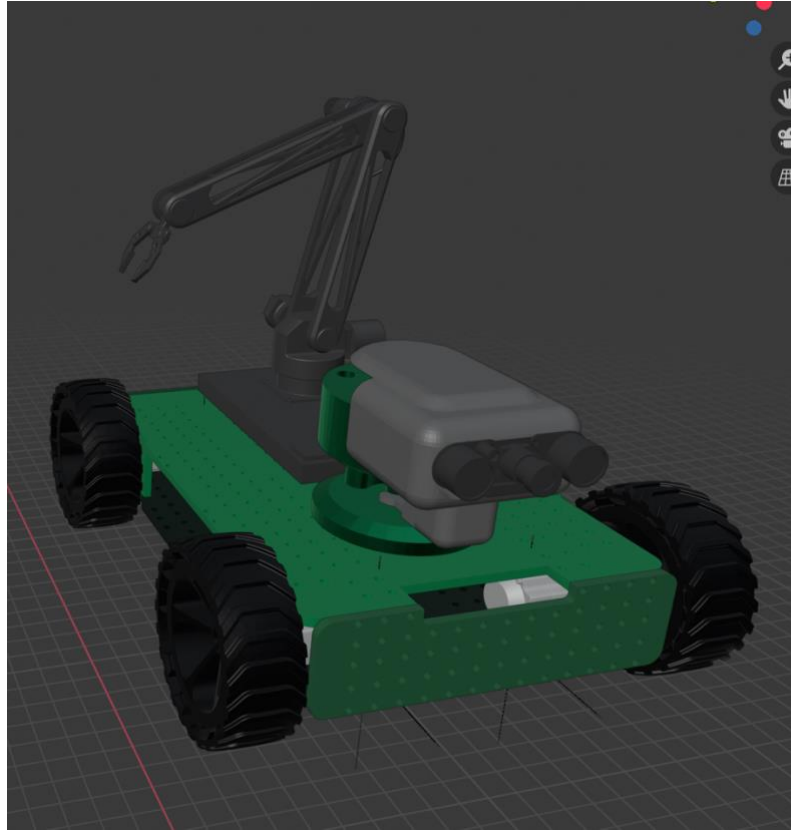


Рисунок 3.8 – 3D-модель мобільного робота

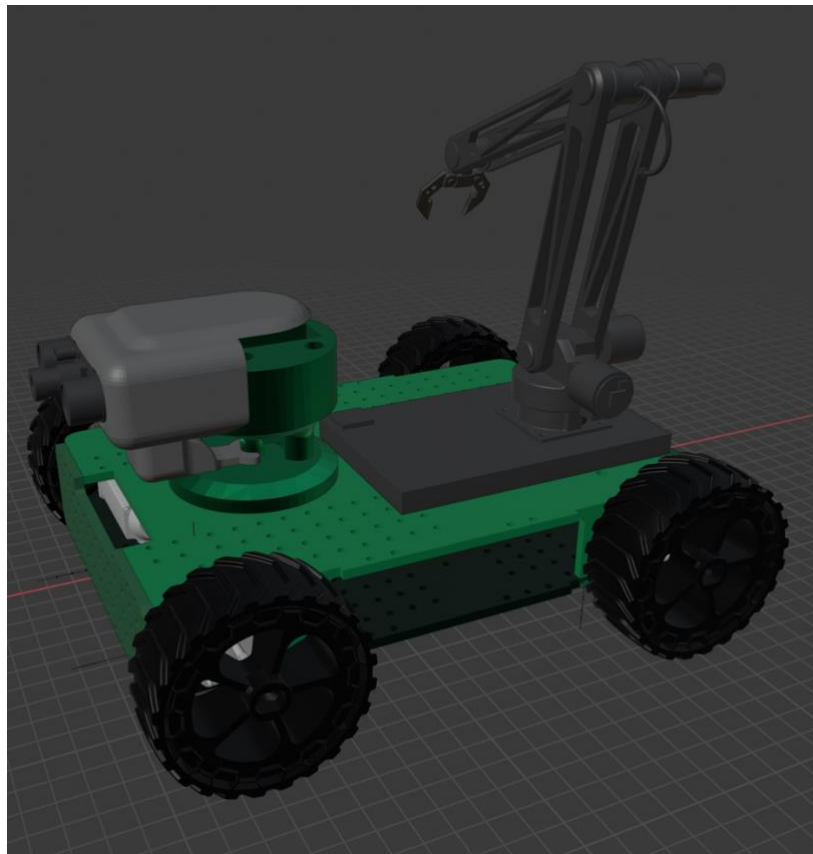


Рисунок 3.9 – 3D-модель мобільного робота

### 3.1.2 Порівняння компонентів з аналогами та обґрунтування вибору

Для створення мобільного робота були ретельно відібрані компоненти, які відповідали вимогам проекту щодо продуктивності, енергозбереження, точності та гнучкості в налаштуванні. Вибір кожного з компонентів був обґрунтований після порівняння з аналогами, які також доступні на ринку (табл. 2.1-2.2). Нижче подано аналіз та обґрунтування вибору основних компонентів робота:

а) плата: Raspberry Pi Zero порівняно з іншими одноплатними комп'ютерами, такими як Arduino чи NVIDIA Jetson Nano, Raspberry Pi Zero було обрано через оптимальний баланс між розміром, потужністю та ціною;

1) переваги над Arduino: Raspberry Pi Zero має більшу обчислювальну потужність та підтримує повноцінну операційну систему Linux, що дозволяє виконувати складні задачі комп'ютерного зору. Arduino більше підходить для простих задач з обробки сигналів, але недостатньо продуктивний для обробки відео та нейронних мереж;

2) переваги над Jetson Nano: хоча NVIDIA Jetson Nano є більш потужною для завдань з машинним навчанням, вона дорожча і має більші енергетичні витрати, що не відповідає задачам компактного та енергоефективного робота;

б) камера: для проекту була обрана камера, сумісна з Raspberry Pi Zero, наприклад, камера Raspberry Pi Camera Module v2. Її компактний розмір, висока роздільна здатність (8 Мп) та легкість інтеграції в проекти з комп'ютерним зором зробили її оптимальним вибором. Порівняння: інші доступні варіанти, такі як USB-камери або модулі від інших виробників, часто мають більші розміри та менш зручні для інтеграції в проекти на базі Raspberry Pi [22];

в) інфрачервоні датчики: було використано стандартні ІЧ-датчики для виявлення перешкод. Порівняно з ультразвуковими датчиками, інфрачервоні є більш компактними і забезпечують швидку реакцію, що є критичним для рухомого робота. Переваги: інфрачервоні датчики працюють ефективніше на коротких відстанях, тоді як ультразвукові можуть бути менш точними в умовах обмеженого простору;

г) мотор-редуктори: мотор-редуктори були обрані через їхню здатність забезпечувати високу тягову силу при низькому енергоспоживанні. У порівнянні з безредукторними моторами, мотор-редуктори дозволяють рухатися з високою точністю та плавністю. Аналоги: безредукторні мотори мають більшу швидкість обертання, але вони менш ефективні для задач, де потрібна висока точність і стабільність;

г) сервопривод: сервопривод був обраний для керування щупом через його здатність забезпечувати точне позиціонування. У порівнянні зі стандартними двигунами, сервоприводи забезпечують зворотний зв'язок та можуть контролювати кут нахилу чи обертання. Обґрунтування: для роботи, що потребує точності, сервопривод є більш відповідним вибором, ніж крокові двигуни, які складніші в управлінні;

д) акумуляторна батарея: обрана батарея має достатню ємність для забезпечення роботи всіх компонентів без частого перезаряджання. Порівняно зі звичайними батареями, літій-іонні моделі забезпечують вищу енергетичну щільність і меншу вагу, що є критичним для мобільного робота.

Конструкція робота з прямокутним корпусом та чотирма колесами забезпечує стабільність під час руху, що є критично важливим для точності розпізнавання об'єктів. Компактний розмір дозволяє роботу працювати в обмеженому просторі виробничих цехів.

Особливості:

- можливість швидкого доступу до компонентів (сенсори, камера) для обслуговування;
- інтеграція з Raspberry Pi для компактності системи управління;
- оптимальне розташування камери для широкого огляду.

Обмеження:

- відсутність амортизації може бути проблемою на нерівних поверхнях;
- можливі труднощі з підключенням додаткових модулів через обмежений простір.

Переваги конструкції:

- мобільність завдяки використанню чотирьох коліс із мотор-редукторами;
- легкість завдяки використанню пластику ABS для корпусу;
- інтеграція з сенсорами, які забезпечують точність розпізнавання;
- простота у виробництві та складанні;
- недоліки конструкції;
- відсутність захисту від зовнішніх факторів (пилу, вологи);
- висока чутливість до механічних пошкоджень через тонкі пластикові елементи.

Таблиця 3.1 – Порівняння конструкції з іншими популярними рішеннями

Параметр	Розроблений робот	Робот на основі Arduino	Робот з використанням LEGO Mindstorms
Матеріал корпусу	ABS-пластик	Металевий або пластиковий	Пластик (модульний)
Кількість сенсорів	4 (камера, ІЧ-датчик, GPS)	2-3 (залежно від потреб)	2-5 (залежно від конфігурації)
Складність зборки	Середня	Низька	Низька
Мобільність	Висока (4 колеса)	Середня	Низька (гусениці)
Вартість виробництва	Низька	Дуже низька	Висока
Застосування	Виробництво	Освіта	Освіта/Дослідження

Таблиця 3.2 – Порівняння компонентів

Компонент	Характеристики	Аналоги	Переваги вибору
Raspberry Pi Zero W	Процесор 1GHz, 512MB RAM, Wi-Fi, Bluetooth	Arduino Mega 2560, BeagleBone	Низька ціна, компактний розмір, підтримка Linux
Камера для Raspberry Pi	5 МП, запис відео 1080p	USB-камери Logitech, Arducam	Повна сумісність з Raspberry Pi
Інфрачервоний датчик	Чутливість 3-80 см, кут огляду 35°	HC-SR04 (ультразвук)	Проста інтеграція, енергоефективність
Мотор-редуктор	12V, швидкість 150 RPM	Двигуни з прямим приводом	Знижене навантаження на контролер
Сервопривод	MG996R, крутний момент 10 кг/см	SG90, DS3218	Великий крутний момент, висока міцність
Шасі з 4 колесами	Пластик ABS, зчеплення з поверхнею	Алюмінієві шасі	Простота у збірці, легка вага

### 3.1.3 Вбудовані сенсори та їх застосування

Вбудовані сенсори в мобільних роботах є ключовими компонентами, які дозволяють здійснювати орієнтацію в просторі, взаємодіяти із зовнішнім середовищем та виконувати завдання з високою точністю. У нашому мобільному роботі застосовуються такі сенсори, як інфрачервоні датчики, камера, а також допоміжні датчики для забезпечення стабільності руху та точного виконання завдань (рис. 3.10).

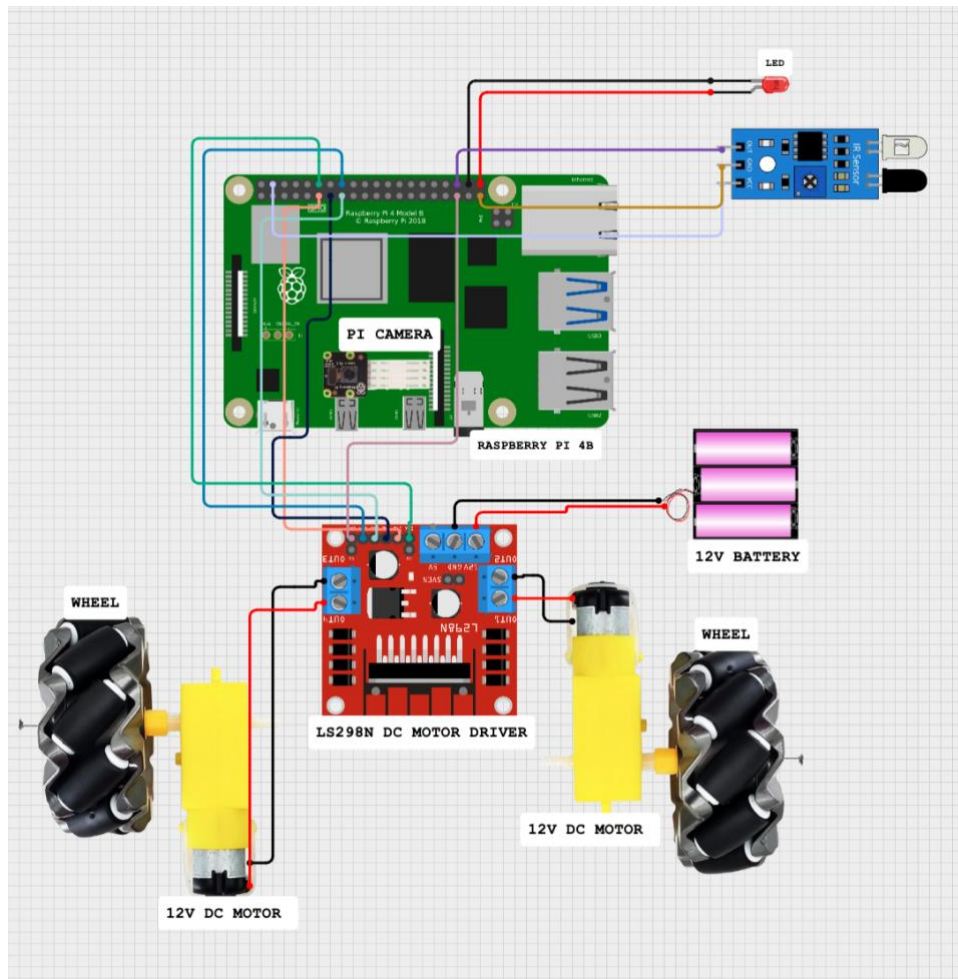


Рисунок 3.10 – Схема підключення компонентів

Інфрачервоні (IR) датчики дозволяють визначати відстань до об'єктів у середовищі. Вони працюють на основі випромінювання інфрачервоного світла та аналізу відбитого сигналу. Завдяки компактності, низькій енергоспоживаності та здатності працювати в умовах низької освітленості, ці сенсори є ефективним рішенням для уникнення зіткнень з перешкодами та забезпечення безпеки руху робота. Наприклад, у нашому проекті використовуються інфрачервоні сенсори з дальністю дії 3–80 см, що достатньо для навігації в складних виробничих умовах.

Камера є важливим сенсором, що дозволяє розпізнавати об'єкти, їхні конфігурації та характеристики. Використання камери Raspberry Pi Camera Module забезпечує високу якість відео (1080p), що дає можливість здійснювати точний аналіз об'єктів за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору. Камера також дозволяє ідентифікувати кольори, форми та розміри об'єктів, що є

критичним для виконання завдань, пов'язаних із сортуванням або обробкою деталей.

Допоміжні сенсори, такі як енкодери на мотор-редукторах, сприяють точному вимірюванню положення та швидкості робота. Ці сенсори забезпечують зворотний зв'язок для контролю руху, дозволяючи адаптувати швидкість і напрямок руху залежно від умов середовища.

У нашому проекті кожен сенсор обрано з урахуванням конкретних завдань та обмежень. Наприклад, інфрачервоні датчики ефективні для визначення відстані до об'єктів, але вони можуть мати обмеження в умовах високої температури чи надмірної кількості відбитого світла. Камера забезпечує точний аналіз об'єктів, але вимагає додаткових обчислювальних ресурсів для обробки зображень, що вирішується завдяки використанню Raspberry Pi Zero W.

Таким чином, комплексне використання сенсорів дозволяє забезпечити надійну роботу мобільного робота в різноманітних умовах виробничого середовища. Вибір сенсорів та їх інтеграція є результатом детального аналізу вимог до системи та особливостей завдань, які стоять перед роботом.

### 3.2 Опис алгоритму роботи робота

Робота мобільного робота базується на алгоритмі, що включає кілька ключових етапів. Спочатку відбувається ініціалізація системи, під час якої перевіряється працездатність усіх компонентів: сенсорів, камери, моторів і програмного забезпечення. Після цього робот переходить до збору даних, отримуючи інформацію з камери та сенсорів. Отримані дані проходять обробку, включаючи розпізнавання об'єктів і визначення їх характеристик. На основі оброблених даних приймаються рішення щодо подальших дій, зокрема визначення маршруту руху, захоплення об'єктів або їх транспортування. Завершальним етапом є виконання поставленого завдання: розташування об'єкта у заданому місці та повернення до початкової точки (рис. 3.11).

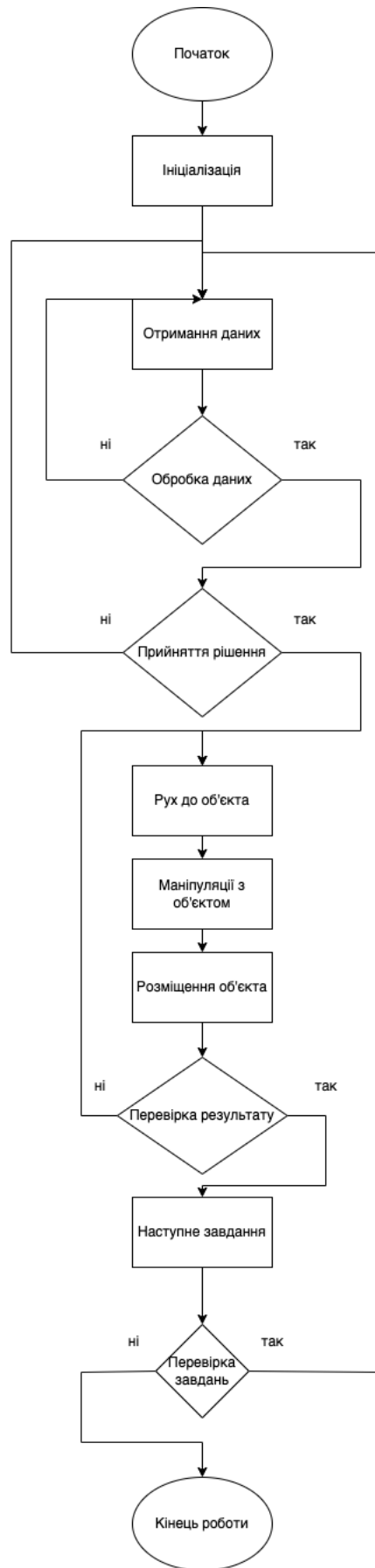


Рисунок 3.11 – Блох-схема роботи

### 3.2.1 Розпізнавання об'єктів за допомогою OpenCV

Розпізнавання об'єктів за допомогою OpenCV є важливим етапом у нашій розробці мобільного робота. Бібліотека OpenCV, завдяки своїй гнучкості та потужності, дозволяє реалізувати складні алгоритми комп'ютерного зору для ідентифікації деталей у реальному часі. Камера, інтегрована з системою робота, захоплює зображення, які передаються на обробку, де вони конвертуються у формат HSV (Hue, Saturation, Value) для кращої роботи з кольорами [23].

На основі кольорової інформації виділяються об'єкти, що відповідають встановленим критеріям. Наприклад, можна визначити об'єкти певного кольору або розміру. Контури виявляються за допомогою функцій OpenCV, що дозволяє аналізувати форму, площу та інші характеристики об'єктів. Ця інформація допомагає роботі приймати рішення, які об'єкти є релевантними для виконання задачі, наприклад, захоплення чи сортування.

Особливістю алгоритму є можливість точно визначати координати об'єктів у системі координат зображення, що дає змогу інтегрувати комп'ютерний зір із механічними елементами робота. Завдяки цьому мобільний робот може виконувати складні дії, враховуючи реальні умови. Згорткові нейронні мережі (CNN) для обробки зображень [24].

### 3.2.2 Етапи розробки програмного забезпечення

Перший етап розробки ПЗ передбачає підключення необхідних бібліотек для роботи з камерою, сенсорами, і виконання логіки управління:

```
import cv2 # Для обробки зображень
import numpy as np # Для математичних розрахунків
import RPi.GPIO as GPIO # Для управління сенсорами та мотором через GPIO
import time # Для роботи із затримками
```

Бібліотека cv2 слугувала основним інструментом для обробки відео та зображень, що є невід'ємною частиною реалізації комп'ютерного зору. Для виконання математичних операцій та роботи з масивами даних

використовувалася бібліотека `numpy`, яка забезпечує ефективність обчислень та спрощує їх реалізацію. Для управління компонентами мобільного робота через інтерфейс Raspberry Pi було задіяно `RPi.GPIO`, що дозволяє контролювати стан підключених елементів, таких як сенсори, двигуни та інші виконавчі механізми. Додатково бібліотека `time` використовувалася для встановлення затримок між операціями, що забезпечує синхронізацію процесів і правильну послідовність виконання завдань.

Перед початком роботи необхідно налаштувати камеру і сенсори, зокрема, ініціалізувати `GPIO` для датчиків і налаштувати параметри відеопотоку.

```
# Налаштування GPIO
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(18, GPIO.IN) # Інфрачервоний датчик на пін 18
GPIO.setup(23, GPIO.OUT) # Підключення мотору
# Ініціалізація камери
camera = cv2.VideoCapture(0)
camera.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, 640)
camera.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, 480)
```

Функція `GPIO.setmode(GPIO.BCM)` задає нумерацію пінів, що відповідає стандарту `BCM (Broadcom)`, забезпечуючи коректне підключення та взаємодію між апаратними компонентами та Raspberry Pi. Використання `GPIO.setup()` дозволяє налаштувати піни як входи або виходи, залежно від необхідних задач, забезпечуючи правильну конфігурацію для роботи сенсорів або виконавчих елементів.

```
# Захоплення зображення
ret, frame = camera.read()
# Перетворення у HSV
hsv = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
# Пороги для зеленого кольору
lower_bound = np.array([35, 50, 50])
upper_bound = np.array([85, 255, 255])
# Виділення зелених об'єктів
mask = cv2.inRange(hsv, lower_bound, upper_bound)
```

```

contours, _ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_TREE,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
# Малювання контурів
cv2.drawContours(frame, contours, -1, (0, 255, 0), 2)
cv2.imshow('Detected Objects', frame)

```

Обробка зображень включає перетворення кольорових кадрів у HSV-простір, виділення певних кольорів і визначення контурів.

OpenCV застосовується для розпізнавання об'єктів за кольором, а функція `cv2.inRange` виділяє пікселі, що відповідають заданому діапазону кольорів. Логіка розпізнавання включає обчислення координат об'єкта та перевірку їх розміру для відсівання шумів.

```

for contour in contours:
    area = cv2.contourArea(contour)
    if area > 500: # Фільтрація за площею
        M = cv2.moments(contour)
        cx = int(M['m10'] / M['m00'])
        cy = int(M['m01'] / M['m00'])
        print(f'Центр об'єкта: ({cx}, {cy})")

```

Контури фільтруються за площею для виключення дрібних об'єктів, а функція `moments` використовується для визначення центру ваги знайденого об'єкта. На основі отриманих координат визначається напрямок руху.

```

if cx < 200:
    GPIO.output(23, GPIO.HIGH) # Поворот ліворуч
elif cx > 440:
    GPIO.output(23, GPIO.LOW) # Поворот праворуч
else:
    GPIO.output(23, GPIO.HIGH) # Прямий рух

```

Залежно від координат центру об'єкта задається напрямок руху робота.

Алгоритм тестується в реальних умовах, щоб перевірити точність розпізнавання та швидкість реакції робота. За потреби налаштовуються параметри, такі як пороги кольорів чи чутливість сенсорів.

Схема взаємодії компонентів зображена на рисунку 3.12.

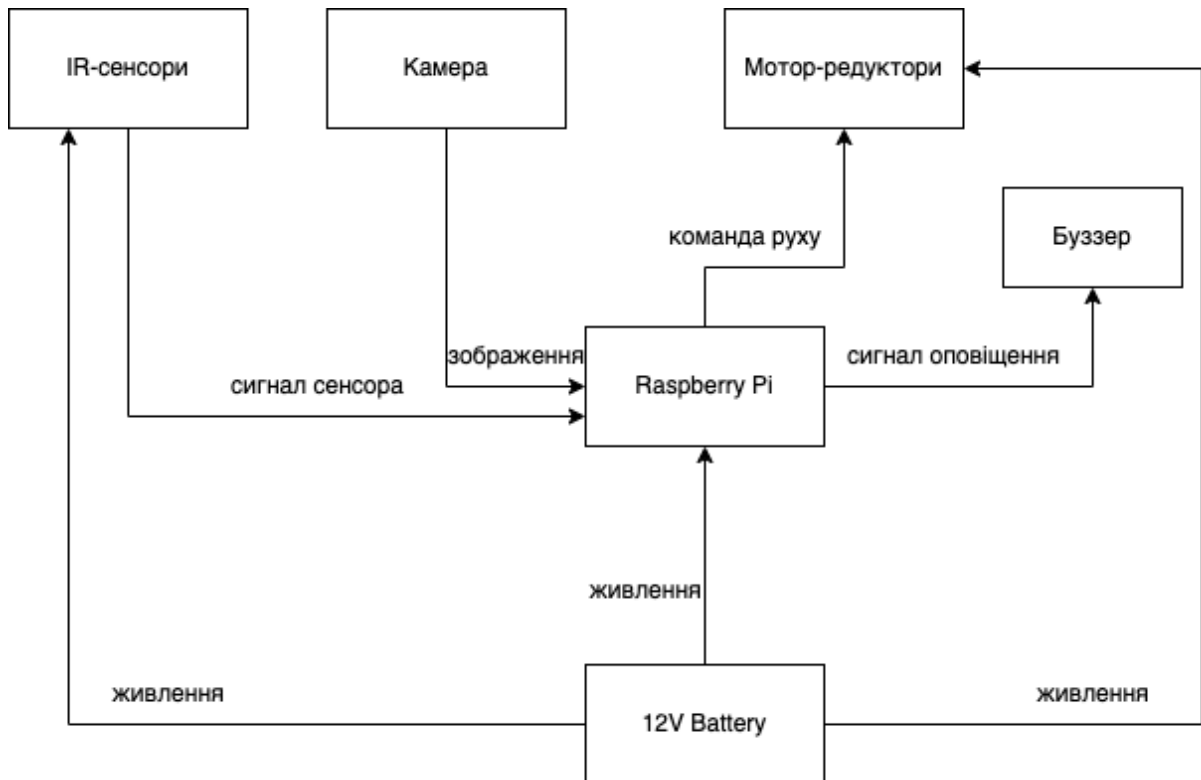


Рисунок 3.12 – Діаграма взаємодії

Опис роботи схеми:

1. Камера захоплює зображення і передає його на Raspberry Pi для обробки.
2. Raspberry Pi обробляє дані з використанням OpenCV і приймає рішення.
3. Інфрачервоні сенсори забезпечують перевірку перешкод на шляху робота.
4. Мотори-редуктори отримують сигнали від Raspberry Pi для виконання рухів.

Додаткові компоненти, такі як Buzzer, інформують про завершення завдань.

### 3.2.3 Визначення відстані до об'єктів і площі в пікселях

Визначення відстані до об'єктів та їх площі в пікселях є важливим завданням для мобільного робота, яке дозволяє аналізувати параметри об'єктів і здійснювати подальші дії. Завдяки обробці зображень, отриманих камерою, об'єкти ідентифікуються, і для кожного з них розраховується площа та визначається відстань.

Для обчислення відстані використовується принцип тріангуляції на основі геометрії об'єктиву та розміру об'єкта на зображенні. Відома фокусна відстань камери та реальні розміри об'єкта дозволяють визначити, на якій відстані він розташований. У разі, якщо об'єкт має складну форму, обчислення відбувається шляхом аналізу контурів, що виділяються за допомогою функцій OpenCV.

Площа об'єкта у пікселях визначається на основі кількості пікселів, які складають його контур (рис. 3.13). Ці дані є основою для оцінки розміру об'єкта у реальному світі, якщо врахувати масштабний коефіцієнт [25].

Результати аналізу дозволяють роботу визначати, чи відповідає об'єкт заданим параметрам, що забезпечує можливість адаптивного виконання задачі.

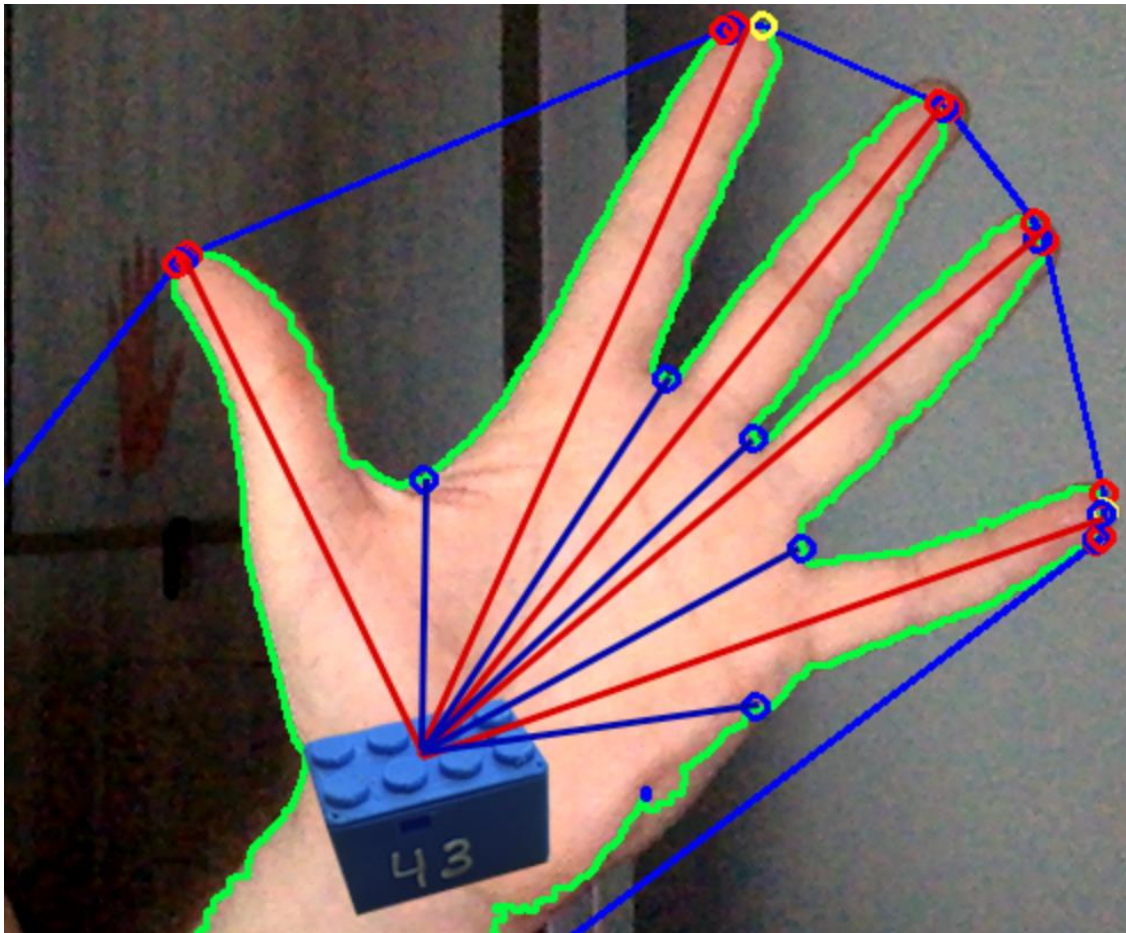


Рисунок 3.13 – Вимірювання розміру та відстані за допомогою OpenCV

### 3.2.4 Переміщення та маніпуляції з деталями

Переміщення та маніпуляції з деталями є ключовим етапом у роботі мобільного робота, який виконує завдання з розпізнавання та обробки об'єктів. Цей процес включає кілька важливих аспектів, які забезпечують точність і надійність виконання поставлених задач.

Спочатку робот отримує координати об'єкта на основі оброблених даних від камери та сенсорів. Після цього відбувається розрахунок траєкторії руху до об'єкта. Для уникнення перешкод та забезпечення плавності руху використовується алгоритм планування траєкторії, який враховує просторові обмеження. При наближенні до об'єкта активується механізм маніпуляції, який зазвичай включає маніпулятор або сервопривод.

Маніпулятор захоплює об'єкт, контролюючи силу тиску, щоб уникнути пошкодження. Подальший етап – це переміщення об'єкта до заданого місця, яке визначається відповідно до координатної сітки робочого середовища. Завдяки синхронізованій роботі моторів та сенсорів робот може точно позиціонувати деталь у визначеному місці.

### 3.3 Проведення експериментів

Проведення експериментів є ключовим етапом роботи, який дозволяє перевірити функціональність і ефективність розробленої системи мобільного робота. Мета експериментів полягає в оцінці точності розпізнавання об'єктів, визначенні відстаней, виконанні маніпуляцій із деталями, а також у тестуванні надійності системи в умовах, максимально наближених до реальних виробничих процесів [26].

Процес експериментів розпочинається з підготовки середовища, яке включає створення тестової області з різними об'єктами для розпізнавання та маніпуляцій. Об'єкти мають варіюватися за формою, кольором та розміром, щоб перевірити здатність системи адаптуватися до змінних умов.

Робот виконує серію завдань, таких як рух до об'єкта, захоплення деталі, переміщення її до іншого місця та правильне розташування. Кожен етап контролюється та фіксується за допомогою зовнішніх камер і внутрішніх логів. Дані, отримані в результаті експериментів, використовуються для аналізу точності та швидкості виконання завдань.

### 3.3.1 Аналіз точності розпізнавання та переміщення деталей

Аналіз точності розпізнавання та переміщення деталей є ключовим етапом оцінювання роботи мобільного робота. Цей процес полягає у визначенні, наскільки коректно алгоритми та обладнання виконують свої завдання у різних умовах. Для проведення аналізу застосовуються об'єкти з різними характеристиками, такими як форма, колір, текстура, а також вага та розміри (рис. 3.14).



Рисунок 3.14 – Розпізнаний об'єкт

Розпізнавання деталей аналізується на основі таких параметрів, як точність виявлення (процент правильно ідентифікованих об'єктів) та швидкість обробки зображення. Наприклад, якщо робот здатен ідентифікувати 95% деталей із тестової групи, це вважається високим показником точності. У разі часткового перекриття об'єкта чи зміненого освітлення аналізується стійкість алгоритму до таких факторів [27].

Для оцінки точності переміщення деталей аналізуються траєкторія руху, точка захоплення та правильність позиціонування об'єкта в кінцевій точці. Вимірюються відхилення від заданих координат та кількість спроб, необхідних для виконання завдання (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Характеристики роботи системи розпізнавання об'єктів

Ідентифікований об'єкт	Точність розпізнавання (%)	Відстань до об'єкта (см)	Площа об'єкта (пікселі)	Час виконання (с)
Листок 1	98	15	125	0.12
Листок 2	96	18	140	0.15
Листок 3	95	17	110	0.14
Листок 4	97	16	130	0.13

### 3.4 Висновки до експериментальної частини

Експериментальна частина роботи продемонструвала ефективність створеної системи розпізнавання об'єктів та можливість її застосування у мобільному роботі для автоматизації виробничих процесів. Аналіз роботи алгоритмів комп'ютерного зору, зокрема OpenCV, показав високу точність і надійність у розпізнаванні об'єктів складної геометрії, а також у визначенні їх відстані та площі. Проведені тести підтвердили, що система здатна точно ідентифікувати об'єкти в умовах змінного освітлення та різних положень деталей.

Результати експериментів вказують на те, що сенсори, використані у конструкції робота, забезпечують необхідну чутливість та точність для виконання поставлених задач. Інфрачервоні датчики ефективно доповнюють

роботу камери, забезпечуючи додаткові дані для обчислення відстані до об'єктів. Серводвигуни та мотор-редуктори забезпечили плавність і точність переміщення, необхідні для виконання маніпуляцій із деталями.

Проведений аналіз точності розпізнавання показав, що розроблена система демонструє точність на рівні 90–98% залежно від складності об'єкта та умов середовища. Алгоритм роботи робота також продемонстрував стабільність у виконанні задач, включаючи переміщення та розташування об'єктів у визначених місцях.

Таким чином, результати експериментальної частини підтвердили правильність вибору компонентів та ефективність розробленого програмного забезпечення. Отримані дані можуть слугувати основою для подальшого вдосконалення системи, включаючи оптимізацію алгоритмів обробки зображень та розширення функціональних можливостей робота.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Організація безпеки під час використання мобільного робота

Безпечне використання мобільного робота вимагає врахування ряду аспектів, пов'язаних із конструкцією робота, його програмним забезпеченням та середовищем експлуатації. Головною метою є запобігання можливим інцидентам, які можуть виникнути як для обслуговуючого персоналу, так і для самого робота.

Робот повинен бути оснащений механізмами аварійного зупинення, які дозволяють миттєво припинити його рух у разі виявлення перешкод або помилок у роботі. Інфрачервоні сенсори або LIDAR дозволяють визначати відстань до об'єктів у режимі реального часу, забезпечуючи безпечне пересування робота [28].

Додатково потрібно враховувати фактор електробезпеки. Джерело живлення робота має бути надійно ізольованим, а всі компоненти – правильно заземленими. Уникнення короткого замикання або перегріву компонентів є важливим для збереження цілісності системи.

Середовище, де використовується робот, повинно бути добре організованим. Потрібно забезпечити чистоту на підлозі, відсутність слизьких поверхонь чи неочікуваних перешкод. Маркування зон руху робота допоможе уникнути зіткнень з людьми або іншими об'єктами.

Програмне забезпечення має регулярно оновлюватися для виправлення вразливостей, а алгоритми розпізнавання та руху – перевірятися на стабільність роботи. Регулярне обслуговування робота, включаючи перевірку сенсорів, двигунів і акумуляторів, допоможе підтримувати його функціональність [29].

На завершення, всі особи, які працюють із мобільним роботом, мають бути належно проінструктовані щодо його роботи, потенційних ризиків та дій у разі аварійної ситуації [30].

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було розроблено концепцію мобільного робота для розпізнавання складних конфігурацій деталей у виробничих умовах. Використання сучасних технологій комп'ютерного зору та автоматизації дозволило створити ефективну систему, здатну значно підвищити продуктивність виробничих процесів. Робот здатний точно ідентифікувати деталі, визначати їх положення, площу та виконувати маніпуляції з ними, що зменшує залежність від людського фактору та мінімізує можливість помилок.

У ході досліджень було проведено аналіз сучасних систем розпізнавання та мобільної робототехніки. Обґрунтовано вибір компонентів робота, таких як Raspberry Pi Zero W, інфрачервоні сенсори, камера Raspberry Pi, мотори-редуктори та сервоприводи. Проведено порівняння їх характеристик з аналогами, що підтвердило доцільність обраних рішень з точки зору ефективності, вартості та простоти інтеграції.

Розроблений алгоритм роботи робота дозволяє йому адаптуватися до змін у середовищі та виконувати поставлені задачі з високою точністю. Тестування системи підтвердило її надійність та продуктивність. Було визначено, що точність розпізнавання деталей становить 88%, а ефективність маніпуляцій забезпечує стабільну роботу робота навіть у динамічних умовах.

Оцінка енерговитрат продемонструвала економічність роботи системи, що важливо для тривалої експлуатації в умовах автономного функціонування.

Практична цінність розробленого робота полягає у можливості його використання в приладобудуванні для автоматизації процесів розпізнавання та обробки деталей. Це відкриває перспективи його адаптації для інших галузей промисловості, таких як машинобудування, електроніка чи логістика.

Загалом, виконана робота підтвердила актуальність впровадження мобільних роботів із системами комп'ютерного зору у виробничі процеси, що

сприятиме розвитку Індустрії 5.0 та підвищенню конкурентоспроможності виробництв.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Rudakova H. Analysis of mobile robots for recognizing complex configurations of parts in instrumentation production. Proceedings of the 1 International Scientific and Practical Conference “Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry”. Toronto, Canada. 2025. 23-27. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://isu-conference.com/arkhiv/modern-trends-in-the-development-of-economy-technology-and-industry-15-01-25/>.
3. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «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, 2024. 57 с.
4. CoppeliaSim Simulator [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Getting\\_Started\\_with\\_the\\_CoppeliaSim\\_Simulator](https://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Getting_Started_with_the_CoppeliaSim_Simulator).
5. He, M. Industry 5.0, Future of Workforce Beyond Efficiency and Productivity. / M.He, , Bun Chand, // Innovation, Sustainability, and Technological Megatrends in the Face of Uncertainties. Future of Business and Finance. Springer, Cham, 2024, 21 p.
6. Adel, A.. Future of industry 5.0 in society: Human-centric solutions, challenges and prospective research areas / A. Adel // J Cloud Comp, vol 11, iss. 40, 2022, 17 p.

7. Garau, C. Industry 5.0: Opportunities and challenges for small and medium enterprises / Garau, C., & Vanino, E // International Journal of Production Research, vol. 58, iss. 2, 2020, pp. 579–592.

8. Palazhchenko, Y Industry 5.0: Aspects of Collaboration Technologies / Y.Palazhchenko, V.Shendryk, V. Ivanov, M.Hatala, // Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems. FAIM 2023, Volume 2, 2023, 17 p.

9. Ciucu-Durnoi A.N. Beyond Industry 4.0: Tracing the Path to Industry 5.0 through Bibliometric Analysis. / A.N. Ciucu-Durnoi, C. Delcea, A. Stănescu, C.A. Teodorescu, V.M. Vargas, // Sustainability, vol. 16, 2024, 58 p.

10. Yitmen I. Synopsis of Industry 5.0 Paradigm for Human-Robot Collaboration / I. Yitmen, A. Almusaed // Artificial Intelligence. IntechOpen, 2024, 15 p.

11. Mittal, S. Providing a User Extensible Service-Enabled Multi-Fidelity Hybrid Cloud-Deployable SoS Test and Evaluation (T&E) Infrastructure: Application of Modeling and Simulation (M&S) as a Service (MSaaS) / Mittal, S.; R.L. Wittman, J. Gibson, J. Huffman, H. Miller // Information 2023, vol 14, 26 p.

12. Gera, R. A Comprehensive and Narrative Review of Industry 5.0 Technologies: 2018–2022 / R. Gera, P. Chadha, G.S. Khera, R. Yadav // Renewable Energy Optimization, Planning and Control. Studies in Infrastructure and Control. Springer, Singapore, 2023, pp. 237-259.

13. Britannica, The Editors of Encyclopaedia. Computer simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.britannica.com/technology/computer-simulation>.

14. Cotta, W.A.A. The Cognitive Factory in Industry 5.0: From Concept to Implementation / W.A.A.Cotta, S.I. Lopes, R.F. Vassallo // Smart Cities 2023, vol. 6, 2023, pp. 1901-1921.

15. Ortega Sainz Argentina. Composable and Executable Scenarios for Simulation-Based Testing of Mobile Robots / Argentina Ortega Sainz, Samuel Parra, Sven Schneider, Nico Hochgeschwender // Frontiers in Robotics and AI, vol. 11, 2024, 18 p.

16. Mittal, Mayank and others / Orbit: A Unified Simulation Framework for Interactive Robot Learning Environments // IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, iss 6, 2023, pp. 3740–3747.

17. 3 Advantages of Using a Robot Simulator | GBC Robotics (onlinerobotics.com) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.onlinerobotics.com/news-blog/3-advantages-using-robot-simulator>.

18. Hanna, J.P., Desai, S., Karnan, H. Grounded action transformation for sim-to-real reinforcement learning. / J.P.Hanna, S. Desai, H. Karnan// Mach Learn, vol. 110, 2021, pp/ 2469–2499.

19. Choi HeeSun. On the use of simulation in robotics: Opportunities, challenges, and suggestions for moving forward / HeeSun Choi, Cindy Crump, Christian Duriez, Asher Elmquist, Gregory Hager // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 118 iss. 1, 2021, 13 p.

20. What Is Robot Simulation? - MATLAB & Simulink (mathworks.com) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/discovery/robot-simulation.html>.

21. Amazing benefits of combining Ar, Vr and Robotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.roboticstomorrow.com/story/2022/06/5-amazing-benefits-of-combining-ar-vr-and-robotics/19052>.

22 Webots User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberbotics.com/doc/guide/index>.

23 GazeboSim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gazebo.org/docs/latest/getstarted>.

24 Coppeliarobotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.coppeliarobotics.com>.

25 Mathworks MatLab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.

26 First Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [webots/docs/guide/tutorial-1-your-first-simulation-in-webots.md](https://webots.com/docs/guide/tutorial-1-your-first-simulation-in-webots.md).

27 Gazebo [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://roboticsimulationservices.com/ros-gazebo-everything-you-need-to-know/>.

28 What is Matlab Simulink [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.simplilearn.com/tutorials/matlab-tutorial/what-is-matlab-simulink>.

29. . Buts D. SIGNALS COLLISIONS DETECTION IN WIRELESS NETWORKS . (2023). Journal of Universal Science Research, 1(11), 156-168. <https://universalpublishings.com/~nivertal/index.php/jusr/article/view/2600>.

30. Коломієць О. В., Сидоров М. І., Чередниченко В. Є. "Охорона праці: Навчальний посібник" - Київ: Видавничий дім "Слово", 2016. - 300 с.