

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та охоронних систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ
РОБОТОМ З ЕЛЕМЕНТАМИ МАШИННОГО ЗОРУ**

**MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM FOR MOBILE ROBOT
WITH MACHINE VISION ELEMENTS**

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІз-41
Масло Ігор Андрійович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« » червня 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент
Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та охоронних систем

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____, доц. Т. Терлецький
« 08 » _____ 05 _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Маслу Ігорю Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Мікропроцесорна система керування мобільним роботом з елементами машинного зору

Керівник роботи к.т.н., доцент Гринюк Сергій Васильович

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06» травня 2026 року № 211/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 28.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області, різні інтернет-ресурси технічного спрямування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Теоретичні основи побудови мобільних роботів з елементами машинного зору

Проектування апаратної та програмної структури системи

Моделювання мікропроцесорної системи керування мобільним роботом з елементами машинного зору у середовищі CoppeliaSim

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Послідовність побудови віртуальної моделі мобільного робота в CoppeliaSim

Структура віртуальної моделі мобільного робота в середовищі CoppeliaSim

Взаємозв'язок етапів побудови моделі та функцій системи керування

Блок-схема алгоритму керування рухом мобільного робота

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Теоретичні основи побудови мобільних роботів з елементами машинного зору</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Проектування апаратної та програмної структури системи</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Моделювання мікропроцесорної системи керування мобільним роботом з елементами машинного зору у середовищі Coppeliasim</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Лавренчук С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	%		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 08.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми, аналіз предметної області та наявних рішень</i>	до 10.05.2026 р.	
2.	<i>Теоретичні основи побудови мобільних роботів з елементами машинного зору</i>	до 12.05.2026 р.	
3.	<i>Проектування апаратної та програмної структури системи</i>	до 15.05.2026 р.	
4.	<i>Моделювання мікропроцесорної системи керування мобільним роботом з елементами машинного зору у середовищі Coppeliasim</i>	до 20.05.2026 р.	
5.	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	до 22.05.2026 р.	
6.	<i>Нормоконтроль</i>	до 23.05.2026 р.	
7.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 25.05.2026 р.	
8.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедру</i>	до 28.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ігор МАСЛО

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Сергій ГРИНЮК

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Масло І. А. Мікропроцесорна система керування мобільним роботом з елементами машинного зору. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел, додатків.

У першому розділі проаналізовано класифікацію та сфери застосування мобільних робототехнічних комплексів, розглянуто методи й алгоритми машинного зору для навігації мобільних роботів, а також досліджено основні принципи побудови мікропроцесорних систем керування. Окрему увагу приділено аналізу існуючих рішень мобільних роботів з елементами комп'ютерного зору.

У другому розділі обґрунтовано вибір апаратної платформи для реалізації мобільного робота, розглянуто використання Arduino UNO R3 як керуючого модуля, вибрано сенсорний блок для орієнтації робота в середовищі, описано роль камери в системі машинного зору, а також розроблено структурну та принципову схеми мікропроцесорної системи керування.

У третьому розділі виконано моделювання системи керування мобільним роботом у середовищі CoppeliaSim. Побудовано віртуальну модель мобільного робота, налаштовано сенсори, камеру та виконавчі механізми, розроблено алгоритм керування рухом і змодельовано роботу камери як елемента машинного зору. Отримані результати підтверджують доцільність запропонованої структури та можливість її використання для навчальних і дослідницьких завдань у галузі комп'ютерної інженерії.

Ключові слова: мобільний робот, мікропроцесорна система керування, Arduino UNO R3, машинний зір, камера, сенсорний блок, виконавчі механізми, CoppeliaSim, моделювання, комп'ютерна інженерія.

ANNOTATION

Maslo I. Microprocessor control system for a mobile robot with elements of machine vision. Manuscript.

Bachelor's qualification work EP «Computer Engineering» specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The first chapter analyzes the classification and areas of application of mobile robotic complexes, considers methods and algorithms of machine vision for navigating mobile robots, and also explores the basic principles of building microprocessor control systems. Special attention is paid to the analysis of existing solutions for mobile robots with elements of computer vision.

The second section justifies the choice of hardware platform for the implementation of a mobile robot, considers the use of Arduino UNO R3 as a control module, selects a sensor unit for orientation of the robot in the environment, describes the role of the camera in the machine vision system, and develops a structural and schematic diagram of the microprocessor control system.

In the third section, the simulation of the mobile robot control system is performed in the CoppeliaSim environment. A virtual model of the mobile robot is built, sensors, camera and actuators are configured, a motion control algorithm is developed, and the operation of the camera as an element of machine vision is simulated. The results obtained confirm the feasibility of the proposed structure and the possibility of its use for educational and research tasks in the field of computer engineering.

Keywords: mobile robot, microprocessor control system, Arduino UNO R3, machine vision, camera, sensor unit, actuators, CoppeliaSim, modeling, computer engineering.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ З ЕЛЕМЕНТАМИ МАШИННОГО ЗОРУ	11
1.1 Класифікація та сфери застосування мобільних робототехнічних комплексів	11
1.2 Огляд методів та алгоритмів машинного зору для навігації мобільних роботів	14
1.3 Основні принципи побудови мікропроцесорних систем керування мобільними роботами	18
1.4 Аналіз існуючих рішень мобільних роботів з елементами комп'ютерного зору	23
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ.....	28
2.1 Обґрунтування вибору апаратної платформи для реалізації мобільного робота.....	28
2.2 Вибір мікроконтролерної платформи Arduino UNO R3 для керування мобільним роботом	32
2.3 Вибір сенсорного блоку для орієнтації робота в навколишньому середовищі.....	37
2.4 Обґрунтування використання камери в системі машинного зору мобільного робота.....	42
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ З ЕЛЕМЕНТАМИ МАШИННОГО ЗОРУ У СЕРЕДОВИЩІ CORPELIASIM.....	52
3.1 Обґрунтування вибору середовища CorreliaSim для моделювання мобільного робота.....	52
3.2 Побудова віртуальної моделі мобільного робота.....	56
3.3 Налаштування сенсорів, камери та виконавчих механізмів	63

3.4 Розробка алгоритму керування рухом мобільного робота	68
3.5 Моделювання роботи камери та елементів машинного зору	71
ВИСНОВКИ	76
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79

ВСТУП

Сучасний розвиток комп'ютерної інженерії тісно пов'язаний із проєктуванням інтелектуальних вбудованих систем, здатних взаємодіяти з фізичним середовищем, аналізувати дані від сенсорів і виконувати керуючі дії в режимі реального часу. Одним із перспективних напрямів таких систем є мобільна робототехніка, у якій поєднуються мікропроцесорні засоби керування, електронні сенсорні модулі, виконавчі механізми, алгоритми обробки даних і програмне забезпечення. Мобільні роботи застосовуються в освіті, промисловості, логістиці, охоронних системах, медицині, аграрному секторі та дослідницькій діяльності, оскільки вони можуть виконувати завдання переміщення, моніторингу, виявлення об'єктів, уникнення перешкод і автономної навігації.

Актуальність теми зумовлена зростанням потреби у створенні доступних, гнучких і функціональних мобільних роботизованих платформ, які можуть використовуватися для навчання, експериментального дослідження та практичного відпрацювання принципів мікропроцесорного керування. Особливого значення набувають системи, у яких традиційні сенсори доповнюються елементами машинного зору. Використання камери або візуального модуля дає змогу розширити функціональні можливості мобільного робота, оскільки система отримує не лише числові дані від датчиків, а й візуальну інформацію про навколишнє середовище. Це створює передумови для реалізації алгоритмів виявлення перешкод, розпізнавання об'єктів, орієнтації в просторі та формування більш обґрунтованих керуючих рішень.

У межах комп'ютерної інженерії мікропроцесорна система керування мобільним роботом є прикладом комплексної апаратно-програмної системи, де важливе значення має узгоджена робота всіх компонентів. Мікроконтролер або мікропроцесорний модуль приймає дані від сенсорів, обробляє їх відповідно до заданого алгоритму та формує сигнали керування для двигунів і допоміжних механізмів. Сенсорний блок забезпечує сприйняття середовища, виконавчі

механізми реалізують рух, а програмне забезпечення визначає логіку поведінки робота. Тому дослідження принципів побудови такої системи є важливим для формування практичних навичок у сфері мікроконтролерного програмування, схемотехніки, робототехніки та обробки даних.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення та дослідження мікропроцесорної системи керування мобільним роботом з елементами машинного зору.

Об'єктом дослідження є процес керування мобільним роботом у середовищі з перешкодами та візуальними об'єктами.

Предметом дослідження є апаратно-програмні засоби побудови мікропроцесорної системи керування мобільним роботом з використанням сенсорів, виконавчих механізмів і елементів машинного зору.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено вирішити такі завдання:

- проаналізувати класифікацію, принципи побудови та сфери застосування мобільних робототехнічних комплексів;
- розглянути методи та алгоритми машинного зору, які можуть використовуватися для навігації мобільних роботів;
- дослідити основні принципи побудови мікропроцесорних систем керування мобільними роботами;
- обґрунтувати вибір апаратних компонентів для реалізації мобільної роботизованої платформи;
- розробити структурну схему мікропроцесорної системи керування мобільним роботом;
- описати програмну логіку роботи системи керування та взаємодію її основних компонентів;
- провести моделювання роботи мобільного робота та оцінити працездатність розробленої системи.

Методи дослідження ґрунтуються на аналізі науково-технічних джерел, порівнянні існуючих робототехнічних рішень, структурному моделюванні

апаратно-програмної системи, алгоритмізації процесів керування, експериментальному тестуванні та узагальненні отриманих результатів.

Практична значимість роботи полягає у створенні апаратно-програмної основи мобільного робота, яка може використовуватися для навчальних, лабораторних і дослідницьких завдань у галузі комп'ютерної інженерії. Запропонована система дає змогу дослідити принципи мікропроцесорного керування, взаємодію сенсорів і виконавчих механізмів, а також базові підходи до використання машинного зору в мобільній робототехніці.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ З ЕЛЕМЕНТАМИ МАШИННОГО ЗОРУ

1.1 Класифікація та сфери застосування мобільних робототехнічних комплексів

Мобільні робототехнічні комплекси є важливим напрямом розвитку сучасних комп'ютерно-інженерних систем, оскільки поєднують апаратні засоби, мікропроцесорне керування, сенсорні модулі, виконавчі механізми та програмні алгоритми обробки інформації [1]. На відміну від стаціонарних роботизованих пристроїв, мобільні роботи здатні переміщуватися в просторі, взаємодіяти з навколишнім середовищем, сприймати його параметри за допомогою сенсорів і виконувати певні дії відповідно до закладеного алгоритму або отриманих команд [2]. Саме здатність до автономного чи напіваавтономного руху визначає їхню практичну цінність у промисловості, логістиці, медицині, сільському господарстві, освіті, дослідницькій діяльності та побутовій автоматизації [3].

Класифікація мобільних робототехнічних комплексів може здійснюватися за кількома ознаками: середовищем функціонування, типом ходової частини, рівнем автономності, призначенням, способом керування та складністю сенсорної системи [1]. За середовищем функціонування мобільні роботи поділяють на наземні, повітряні, водні та комбіновані системи. Наземні роботи найчастіше застосовуються для навчальних, дослідницьких, логістичних і сервісних завдань, оскільки мають відносно просту конструкцію, доступну компонентну базу та зручні можливості для програмування [4].

За типом ходової частини наземні мобільні роботи можна поділити на колісні, гусеничні, крокуючі та комбіновані [2]. Колісні мобільні роботи є найбільш поширеними в навчальних і лабораторних системах, оскільки вони прості у складанні, мають невелику вартість, достатню маневреність і легко керуються за допомогою мікроконтролерів. Гусеничні платформи краще пристосовані до нерівних поверхонь і можуть використовуватися там, де

потрібна підвищена прохідність. Крокуючі роботи мають складнішу механіку та алгоритми стабілізації, тому частіше застосовуються у дослідницьких проєктах, пов'язаних із біоміметикою, балансуванням і адаптивним рухом [3].

Основні підходи до класифікації мобільних робототехнічних комплексів подано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація мобільних робототехнічних комплексів

Класифікаційна ознака	Основні типи	Коротка характеристика
За середовищем функціонування	Наземні, повітряні, водні, комбіновані	Визначають умови, у яких робот може виконувати поставлені завдання
За типом ходової частини	Колісні, гусеничні, крокуючі, комбіновані	Характеризують спосіб переміщення робота в просторі
За рівнем автономності	Дистанційно керовані, напівавтономні, автономні	Визначають ступінь участі оператора в процесі керування
За призначенням	Навчальні, сервісні, промислові, логістичні, дослідницькі	Відображають основну сферу використання робототехнічного комплексу
За типом сенсорної системи	З базовими сенсорами, з розширеним сенсорним блоком, з елементами машинного зору	Визначають здатність робота сприймати параметри середовища
За способом керування	Програмні, дистанційні, автоматизовані, інтелектуальні	Характеризують логіку прийняття рішень і спосіб формування керуючих сигналів

За рівнем автономності мобільні роботи можна поділити на дистанційно керовані, напівавтономні та автономні [1]. Дистанційно керовані роботи виконують команди оператора, який задає напрям руху, швидкість або режим роботи. Напівавтономні системи можуть самостійно виконувати окремі операції, наприклад уникати перешкод, рухатися за лінією або зупинятися перед об'єктом, але при цьому потребують участі користувача для вибору режиму. Автономні роботи здатні самостійно аналізувати середовище, будувати маршрут, приймати рішення та коригувати рух на основі даних із сенсорів [3].

Окреме значення має класифікація мобільних роботів за типом сенсорної системи. Найпростіші платформи використовують базові датчики, наприклад ультразвукові сенсори, інфрачервоні датчики або енкодери двигунів. Такі засоби дають змогу визначати відстань до перешкод, контролювати рух коліс і реалізовувати базові алгоритми автономної поведінки [2]. Складніші комплекси

оснащуються камерами, модулями машинного зору, інерціальними датчиками, GPS-приймачами, LiDAR-сенсорами або комбінованими системами просторового сприйняття [3].

Особливо важливими є мобільні робототехнічні комплекси з елементами машинного зору. Машинний зір дає змогу роботі не лише реагувати на прості сенсорні сигнали, а й отримувати більш змістовну інформацію про навколишнє середовище [5]. Наприклад, камера може використовуватися для розпізнавання перешкод, орієнтації за візуальними маркерами, виявлення кольорових об'єктів, руху за лінією, контролю положення робота або передавання зображення оператору.

Сфери застосування мобільних робототехнічних комплексів є досить широкими. У промисловості та логістиці такі системи використовують для транспортування вантажів, переміщення комплектуючих, автоматизації складських операцій і зменшення участі людини в повторюваних процесах [2]. У медичній сфері мобільні роботи можуть застосовуватися для доставки медикаментів, підтримки внутрішньої логістики закладів охорони здоров'я, дезінфекції приміщень або допоміжного моніторингу [3]. У сільському господарстві мобільні роботизовані платформи використовують для збору даних про стан рослин, моніторингу територій, автоматизації окремих операцій і підвищення ефективності точного землеробства [5].

В освітній та дослідницькій діяльності мобільні робототехнічні комплекси мають особливе значення, оскільки дозволяють практично вивчати принципи мікропроцесорного керування, програмування мікроконтролерів, роботу сенсорів, керування двигунами, основи комп'ютерного зору та побудову алгоритмів автономної поведінки [4]. Навчальні платформи на базі Arduino є зручними для здобувачів спеціальності «Комп'ютерна інженерія», оскільки поєднують апаратну і програмну складові. На їх основі можна досліджувати принципи взаємодії мікроконтролера з периферійними пристроями, формування керуючих сигналів, обробку даних від сенсорів і реалізацію логіки прийняття рішень [4].

Загальну класифікацію мобільних робототехнічних комплексів доцільно подати у вигляді структурної схеми, наведеної на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Узагальнена класифікація мобільних робототехнічних комплексів за середовищем функціонування, типом ходової частини, рівнем автономності та призначенням [5]

Мобільні робототехнічні комплекси є багатокомпонентними системами, що поєднують механічну платформу, мікропроцесорний або мікроконтролерний модуль, сенсорний блок, виконавчі механізми та програмне забезпечення [1]. Їх класифікація залежить від конструктивних особливостей, рівня автономності, способу керування, типу сенсорів і сфери застосування.

1.2 Огляд методів та алгоритмів машинного зору для навігації мобільних роботів

Машинний зір є одним із ключових напрямів розвитку сучасних мобільних робототехнічних комплексів, оскільки забезпечує можливість сприйняття навколишнього середовища за допомогою камер і подальшої програмної обробки зображень. На відміну від простих датчиків відстані, камера дає змогу

отримувати більш інформативні дані про простір: форму об'єктів, їх розташування, колір, контури, рух, текстуру поверхонь і наявність перешкод. У системах навігації мобільних роботів машинний зір використовується для виявлення перешкод, розпізнавання об'єктів, побудови карти середовища, визначення положення робота, руху за лінією, орієнтації за маркерами та підтримки автономного прийняття рішень [6].

Одним із базових напрямів використання машинного зору в мобільній робототехніці є візуальне виявлення перешкод. Такий підхід передбачає отримання зображення з камери, його попередню обробку, виділення важливих ознак і прийняття рішення щодо подальшого руху робота. Наприклад, якщо в полі зору камери або за даними додаткового сенсора виявляється об'єкт на шляху руху, система керування може сформувати команду зупинки, об'їзду або зміни траєкторії. У сучасних дослідженнях для цього застосовують як класичні методи комп'ютерного зору, так і нейромережеві моделі виявлення об'єктів [7].

До класичних методів машинного зору належать алгоритми фільтрації зображень, виділення контурів, сегментації, порогової обробки, аналізу кольору та пошуку характерних точок. Такі методи є відносно простими для реалізації, не потребують значних обчислювальних ресурсів і можуть бути використані в навчальних робототехнічних системах. Наприклад, для руху за лінією камера або оптичні сенсори можуть визначати контрастну смугу на поверхні, після чого мікроконтролер коригує швидкість лівого та правого двигунів. Для виявлення простих об'єктів може застосовуватися сегментація за кольором, коли програма визначає пікселі певного діапазону кольорів і на основі їх положення формує напрям руху робота.

Окрему групу становлять алгоритми виділення ознак зображення. До них належать SIFT, SURF, ORB та інші методи, які використовуються для пошуку характерних точок, зіставлення зображень і визначення переміщення камери в просторі. У мобільній робототехніці такі алгоритми можуть застосовуватися для візуальної одометрії, тобто оцінювання переміщення робота на основі послідовності кадрів. Наприклад, якщо камера фіксує зміну положення

характерних точок між двома кадрами, програмний алгоритм може оцінити напрям і величину переміщення платформи. Проте такі підходи залежать від якості освітлення, наявності текстурованих поверхонь і стабільності роботи камери [8].

Важливим напрямом є візуальна SLAM-навігація, тобто одночасна локалізація та побудова карти середовища на основі відеоданих. Visual SLAM дає змогу мобільному роботу будувати карту невідомого простору та одночасно визначати власне положення в ньому. Зазвичай така система містить кілька основних етапів: отримання зображення, виділення ознак, зіставлення кадрів, оцінювання положення камери, побудову карти та корекцію помилок за допомогою виявлення замикання циклу. У сучасних оглядах Visual SLAM розглядається як один із базових підходів до навігації мобільних роботів, особливо в умовах, коли використання GPS є неможливим або неточним, наприклад у приміщеннях [9].

Для задач розпізнавання об'єктів у навігації мобільних роботів активно використовують нейромережеві алгоритми, зокрема моделі сімейства YOLO. Їх перевага полягає у здатності виявляти об'єкти на зображенні в режимі, близькому до реального часу. У робототехнічних системах такі алгоритми можуть використовуватися для визначення перешкод, людей, дорожніх знаків, маркерів, предметів або інших об'єктів, що впливають на траєкторію руху. Наприклад, у дослідженні NAV-YOLO запропоновано підхід, у якому попередньо навчена модель YOLOv5 інтегрується в навігаційний стек ROS для покращення виявлення перешкод і планування руху мобільного робота [10].

Порівняно з класичними алгоритмами, нейромережеві методи забезпечують вищу гнучкість і можуть працювати зі складнішими сценами. Водночас вони потребують більших обчислювальних ресурсів, навчальних наборів даних і ретельного налаштування. Для невеликих навчальних платформ, побудованих на Arduino UNO R3, повноцінна обробка відеопотоку нейронною мережею безпосередньо на мікроконтролері є обмеженою через малу обчислювальну потужність і невеликий обсяг пам'яті. Тому в таких системах

камера найчастіше використовується для передавання відео на зовнішній пристрій або для реалізації простіших алгоритмів візуального спостереження.

У сучасних мобільних роботах машинний зір часто поєднується з іншими джерелами даних, зокрема ультразвуковими сенсорами, інфрачервоними датчиками, LiDAR, енкодерами коліс та інерціальними модулями. Такий підхід називають сенсорним злиттям. Його перевага полягає в тому, що недоліки одного сенсора можуть компенсуватися даними іншого. Наприклад, камера дає багато візуальної інформації, але її робота залежить від освітлення, тоді як ультразвуковий сенсор може визначати відстань до перешкоди незалежно від кольору об'єкта. Поєднання цих даних підвищує надійність навігації, особливо в умовах змінного середовища [11].

Узагальнено методи машинного зору для навігації мобільних роботів можна поділити на кілька груп: класична обробка зображень, виявлення контурів і кольорів, пошук характерних точок, візуальна одометрія, Visual SLAM, розпізнавання об'єктів на основі нейронних мереж і комбіновані підходи із сенсорним злиттям. Їх порівняльну характеристику подано в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Методи та алгоритми машинного зору для навігації мобільних роботів

Метод або алгоритм	Основне призначення	Переваги	Обмеження
Порогова обробка зображення	Виявлення ділянок певної яскравості або кольору	Простота реалізації, низькі вимоги до ресурсів	Залежність від освітлення
Сегментація за кольором	Пошук кольорових об'єктів або ліній	Зручна для навчальних роботів і простих задач	Нестійкість до зміни фону та освітлення
Виділення контурів	Виявлення меж об'єктів і перешкод	Дає змогу аналізувати форму об'єктів	Потребує попередньої фільтрації шумів
ORB, SIFT, SURF	Пошук характерних точок і зіставлення кадрів	Можуть використовуватися для візуальної одометрії	Складність реалізації на слабких мікроконтролерах
Visual SLAM	Побудова карти та визначення положення робота	Підходить для автономної навігації в невідомому середовищі	Високі вимоги до обчислювальних ресурсів
YOLO та інші CNN-моделі	Виявлення та класифікація об'єктів	Висока точність і робота в реальному часі на потужних пристроях	Потреба в навчальних даних і продуктивному процесорі

Загальну логіку застосування машинного зору в навігації мобільного робота доцільно подати на рисунку 1.2.

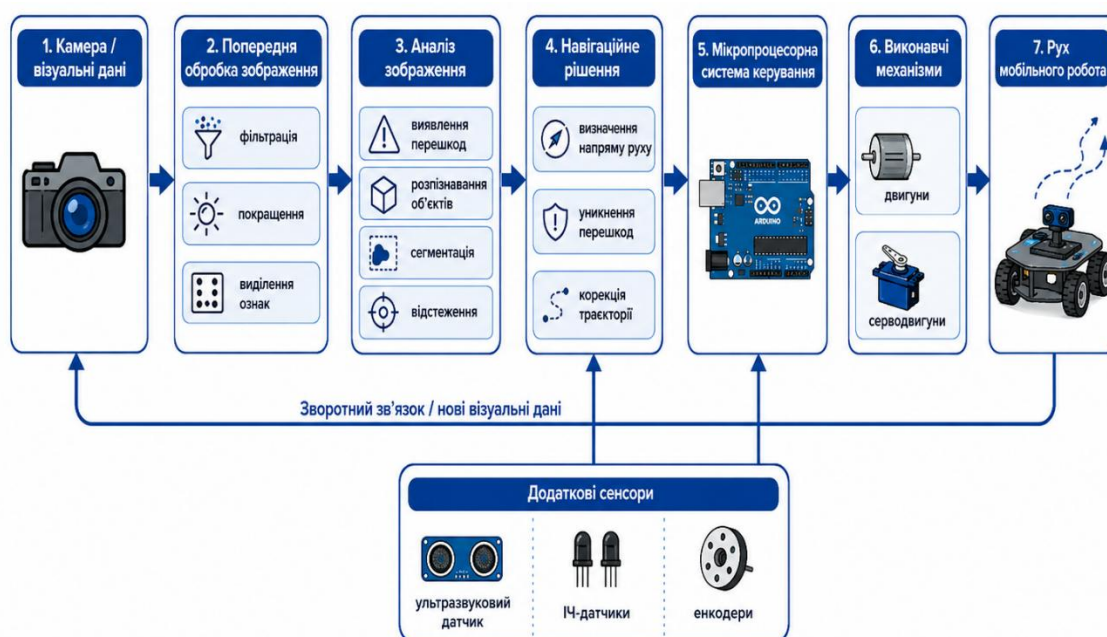


Рисунок 1.2 – Узагальнена схема використання машинного зору в системі навігації мобільного робота [12]

Отже, методи машинного зору відіграють важливу роль у підвищенні автономності мобільних робототехнічних комплексів. Вони забезпечують отримання та аналіз візуальної інформації, виявлення перешкод, розпізнавання об'єктів, оцінювання положення робота та підтримку процесу прийняття рішень.

1.3 Основні принципи побудови мікропроцесорних систем керування мобільними роботами

Мікропроцесорна система керування мобільним роботом є центральною частиною робототехнічного комплексу, яка забезпечує приймання даних від сенсорів, їх програмну обробку, формування керуючих сигналів і передавання команд на виконавчі механізми. У такій системі мікроконтролер або мікропроцесор виконує роль координатора взаємодії між апаратними

компонентами робота. Саме від правильності побудови системи керування залежить здатність мобільної платформи рухатися за заданою траєкторією, реагувати на перешкоди, змінювати напрям руху та виконувати алгоритми автономної або напівавтономної поведінки [13].

У загальному вигляді мікропроцесорна система керування мобільним роботом складається з кількох взаємопов'язаних підсистем: сенсорної, обчислювальної, виконавчої, комунікаційної, енергетичної та програмної. Сенсорна підсистема відповідає за отримання інформації про стан навколишнього середовища та самого робота. До неї можуть належати ультразвукові датчики, інфрачервоні сенсори, енкодери, інерціальні модулі, камера або інші вимірювальні пристрої. Обчислювальна підсистема виконує аналіз отриманих даних і приймає рішення щодо подальшої дії. Виконавча підсистема реалізує фізичний рух за допомогою двигунів, сервоприводів і драйверів. Комунікаційна підсистема забезпечує обмін даними з оператором, мобільним застосунком або зовнішнім комп'ютером. Енергетична підсистема відповідає за живлення всіх компонентів, а програмна підсистема реалізує логіку роботи пристрою [14].

Для мобільних роботів навчально-дослідницького типу часто використовують мікроконтролерні плати, зокрема Arduino UNO R3. Така плата є зручною для реалізації систем керування, оскільки має цифрові та аналогові входи-виходи, підтримує PWM-сигнали для керування швидкістю двигунів, може працювати з датчиками та програмується в середовищі Arduino IDE. Arduino UNO R3 побудована на базі мікроконтролера ATmega328P, має 14 цифрових входів-виходів, з яких 6 можуть використовуватися як PWM-виходи, а також 6 аналогових входів [13]. Ці характеристики дають змогу використовувати плату як базовий керуючий модуль у мобільному роботі з двигунами, ультразвуковим датчиком, сервоприводами та іншими периферійними пристроями.

Основним принципом побудови мікропроцесорної системи керування є розподіл функцій між її компонентами. Мікроконтролер не повинен

безпосередньо жити потужні виконавчі механізми, оскільки його виходи розраховані лише на обмежений струм. Тому для керування двигунами використовують драйвери або моторні плати, які приймають логічні сигнали від мікроконтролера та подають необхідну напругу й струм на двигуни. У такій схемі Arduino формує сигнали напрямку руху та швидкості, а драйвер двигунів виконує силове керування. Це підвищує надійність системи та захищає мікроконтролер від перевантаження.

Важливим принципом є використання зворотного зв'язку. У простій системі керування робот може виконувати наперед задані команди без урахування реального стану середовища. Однак для мобільних роботів більш ефективною є замкнена система керування, у якій рішення приймаються на основі даних від сенсорів. Наприклад, ультразвуковий датчик може визначати відстань до перешкоди, інфрачервоні датчики – положення лінії або межі поверхні, енкодери – швидкість і пройдений шлях коліс, а камера – візуальну інформацію про об'єкти перед роботом. На основі цих даних мікроконтролер змінює швидкість, напрям руху або режим роботи платформи.

Ще одним принципом є модульність апаратної структури. Мобільний робот доцільно проєктувати так, щоб кожен функціональний блок мав чітке призначення і міг бути замінений або доповнений без повної зміни всієї системи. Наприклад, сенсорний блок може містити ультразвуковий датчик для виявлення перешкод, але за потреби до нього можна додати камеру або інфрачервоні датчики. Виконавчий блок може складатися з двигунів постійного струму, але в окремих задачах може бути доповнений сервоприводом для повороту камери або сенсора. Такий підхід є особливо важливим для навчальних робототехнічних платформ, оскільки дозволяє поступово ускладнювати функціональність пристрою.

Програмна частина мікропроцесорної системи керування зазвичай має циклічну структуру. Спочатку виконується ініціалізація портів, сенсорів, драйверів двигунів, змінних і режимів роботи. Після цього програма переходить в основний цикл, у якому послідовно зчитуються дані з датчиків, аналізується

поточна ситуація, приймається рішення та формується керуюча команда. Для Arduino-проектів така логіка реалізується через функції `setup()` і `loop()`, де `setup()` відповідає за початкове налаштування, а `loop()` - за постійне виконання основного алгоритму роботи.

Типову структуру програмного циклу мобільного робота можна подати так: зчитування показників сенсорів, аналіз стану середовища, вибір режиму руху, формування сигналів для драйвера двигунів, виконання руху, повторне зчитування даних. Такий цикл дозволяє роботу постійно адаптувати свою поведінку до змін у навколишньому середовищі. Якщо перед роботом немає перешкод, він може рухатися вперед. Якщо перешкода виявлена на небезпечній відстані, система може зупинити двигуни, виконати поворот або обрати альтернативну траєкторію.

Основні компоненти мікропроцесорної системи керування мобільним роботом подано в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні компоненти мікропроцесорної системи керування мобільним роботом

Компонент системи	Призначення	Приклад реалізації
Мікроконтролер	Обробка сигналів, виконання алгоритму, формування команд	Arduino UNO R3
Сенсорний блок	Отримання даних про середовище та стан робота	Ультразвуковий датчик, ІЧ-датчики, камера, енкодери
Драйвер двигунів	Перетворення логічних сигналів мікроконтролера на силові сигнали	Драйвер постійних двигунів
Виконавчі механізми	Забезпечення руху та зміни положення окремих модулів	Двигуни постійного струму, сервоприводи
Комунікаційний модуль	Обмін даними з користувачем або зовнішнім пристроєм	Bluetooth, Wi-Fi, інфрачервоний пульт
Система живлення	Енергозабезпечення електроніки та двигунів	Акумуляторний блок або батарейний модуль
Програмне забезпечення	Реалізація логіки керування та взаємодії компонентів	Arduino IDE, бібліотеки для сенсорів і двигунів

У мобільному роботі з елементами комп'ютерного зору особливу роль відіграє камера. Вона може використовуватися для передавання відеопотоку, виявлення об'єктів, орієнтації за візуальними ознаками або контролю положення робота. Однак для платформи на базі Arduino UNO R3 потрібно враховувати

обмеження обчислювальних ресурсів. Складна обробка зображень, розпізнавання об'єктів або аналіз відео в реальному часі зазвичай потребують продуктивнішого обчислювального модуля, ніж 8-бітний мікроконтролер. Тому в навчальних роботах доцільно використовувати Arduino для низькорівневого керування рухом, а обробку візуальних даних реалізовувати за допомогою окремого камерного модуля, Wi-Fi-модуля, мобільного застосунку або зовнішнього комп'ютера [15].

З позиції комп'ютерної інженерії важливо розглядати мікропроцесорну систему керування не лише як набір окремих електронних модулів, а як цілісну апаратно-програмну архітектуру. У такій архітектурі вхідні дані надходять від сенсорів і камери, обробляються мікроконтролером або допоміжним обчислювальним модулем, після чого система формує керуючі впливи на двигуни та сервоприводи. Якість роботи мобільного робота залежить від узгодженості цих етапів, швидкості обробки даних, стабільності живлення, правильності підключення компонентів і коректності програмного алгоритму.

Загальну структуру мікропроцесорної системи керування мобільним роботом доцільно подати на рисунку 1.3.

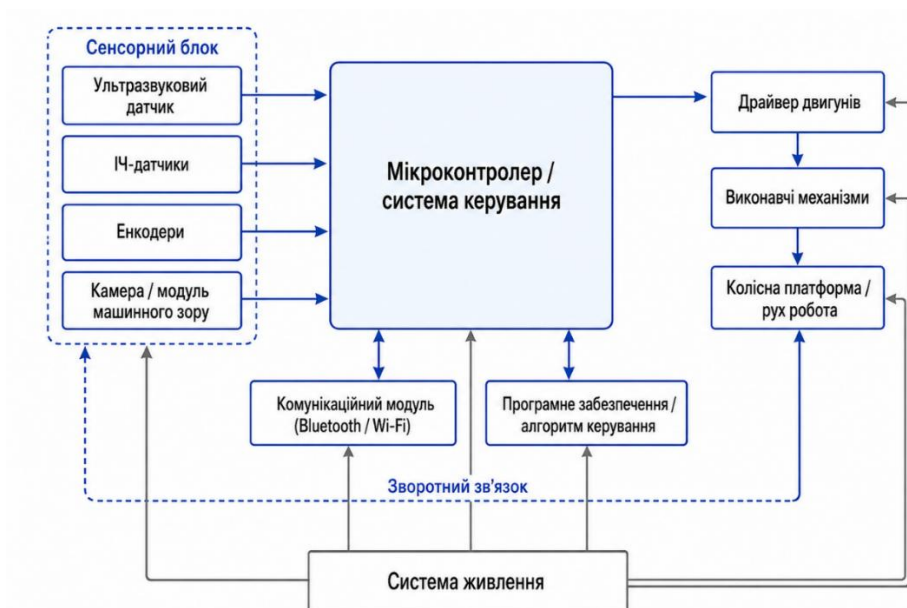


Рисунок 1.3 – Узагальнена структура мікропроцесорної системи керування мобільним роботом [16]

Основними принципами побудови мікропроцесорних систем керування мобільними роботами є модульність, наявність зворотного зв'язку, розподіл функцій між керуючими та силовими компонентами, узгодження апаратної і програмної частин, а також врахування обчислювальних можливостей обраної платформи. Для цієї кваліфікаційної роботи доцільною є архітектура, у якій Arduino UNO R3 виконує функції керування рухом і обробки базових сенсорних сигналів, а камера використовується як джерело візуальної інформації для реалізації елементів комп'ютерного зору [17].

1.4 Аналіз існуючих рішень мобільних роботів з елементами комп'ютерного зору

Аналіз існуючих рішень мобільних роботів з елементами комп'ютерного зору є важливим етапом підготовки до розроблення власної мікропроцесорної системи керування. Він дає змогу визначити типові підходи до побудови апаратної частини, вибору мікроконтролерів або одноплатних комп'ютерів, інтеграції камер, використання сенсорів і реалізації алгоритмів автономного руху. У сучасній робототехніці можна виділити кілька груп таких рішень: навчальні роботи на базі Arduino, ROS-сумісні дослідницькі платформи, роботи з підтримкою штучного інтелекту на базі одноплатних комп'ютерів, а також компактні системи машинного зору на основі спеціалізованих камерних модулів.

Одним із доступних навчальних рішень є робот-конструктор «ELEGOO Smart Robot Car Kit V4.0», який використовується для вивчення основ робототехніки, електроніки, програмування та керування мобільними платформами. Офіційні матеріали ELEGOO містять інструкції, програмний код, додаток, технічні файли та навчальні матеріали для роботи з набором [18]. Особливістю цього рішення є поєднання Arduino-сумісної плати керування, колісної платформи, двигунів, драйверів, ультразвукового датчика та модуля камери. Така структура робить платформу доцільною для бакалаврської роботи з

комп'ютерної інженерії, оскільки вона дозволяє дослідити як апаратну взаємодію компонентів, так і програмну реалізацію алгоритмів руху.

Перевагою «ELEGOO Smart Car V4.0» є відносна простота складання та можливість поетапного вивчення роботи окремих модулів. Студент може окремо дослідити керування двигунами, роботу ультразвукового датчика, взаємодію з камерою, дистанційне керування та алгоритми уникнення перешкод. Водночас обмеженням цієї платформи є невисока обчислювальна потужність Arduino UNO R3 для повноцінної обробки відеопотоку або запуску складних нейромережевих моделей. Тому в межах такої системи Arduino доцільно використовувати для керування рухом і сенсорами, а камеру – як джерело візуальних даних або модуль передавання зображення.

Більш складним дослідницьким рішенням є платформа «TurtleBot3», яка широко використовується у сфері освіти, досліджень і прототипування. Вона є компактною, модульною, програмованою та орієнтованою на використання з ROS. Офіційні матеріали описують TurtleBot3 як платформу для навчання, досліджень, хобі-проектів і розроблення прототипів, а також підкреслюють її модульність і можливість адаптації під різні сенсори та обчислювальні пристрої [19]. У задачах автономного руху TurtleBot3 може використовувати камеру для виявлення смуг руху, кольорової фільтрації та автономного слідування траєкторії.

Порівняно з Arduino-платформами, TurtleBot3 має ширші можливості для реалізації алгоритмів навігації, побудови карти, телеметрії, керування через ROS і моделювання в середовищах на зразок Gazebo. Проте для бакалаврської роботи, орієнтованої саме на мікропроцесорну систему керування мобільним роботом, така платформа може бути надмірно складною та дорожчою. Її використання більше відповідає дослідницьким роботам, у яких основний акцент робиться на ROS-навігації, SLAM, багатосенсорній інтеграції або автономному плануванні руху.

Ще одним прикладом є «NVIDIA JetBot» – відкрита роботизована платформа на базі NVIDIA Jetson Nano, призначена для вивчення штучного інтелекту, комп'ютерного зору та автономної поведінки роботів. NVIDIA описує

JetBot як відкриту AI-платформу для студентів, розробників і ентузіастів, яка може використовувати нейронні мережі для розпізнавання об'єктів, уникнення зіткнень та інших завдань [20]. На відміну від Arduino-рішень, JetBot має значно більші обчислювальні можливості, оскільки базується на одноплатному комп'ютері з підтримкою AI-обчислень.

Перевагою JetBot є можливість виконання алгоритмів комп'ютерного зору безпосередньо на борту робота. Така платформа краще підходить для задач розпізнавання об'єктів, слідування за об'єктом, уникнення зіткнень на основі зображення та навчання нейромережових моделей. Водночас для проєктів, де основною метою є вивчення мікроконтролерного керування, взаємодії сенсорів і виконавчих механізмів, JetBot може зміщувати акцент роботи з апаратно-програмної мікропроцесорної реалізації на високорівневі AI-алгоритми.

Окремий клас рішень становлять системи на базі камерних модулів «OpenMV». OpenMV позиціонується як недорогий і розширюваний Python-сумісний модуль машинного зору, який дає змогу запускати алгоритми обробки зображень і взаємодіяти з апаратними входами та виходами [21]. Такі камери можуть використовуватися для виявлення кольорів, відстеження об'єктів, читання QR-кодів, розпізнавання простих візуальних ознак і реалізації автономної поведінки в невеликих роботизованих системах.

Перевагою OpenMV є те, що частина обробки зображень може виконуватися безпосередньо на камерному модулі. Це дозволяє розвантажити основний мікроконтролер і передавати йому вже підготовлені команди або результати аналізу кадру. Для Arduino-проєктів такий підхід є особливо корисним, оскільки Arduino UNO R3 не призначений для складної відеобробки. Водночас використання OpenMV потребує окремого налаштування, знання Python або MicroPython і розуміння принципів взаємодії між камерою та основним контролером.

Порівняльну характеристику існуючих рішень мобільних роботів з елементами комп'ютерного зору подано в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика існуючих рішень мобільних роботів з елементами комп’ютерного зору

Рішення	Апаратна основа	Використання комп’ютерного зору	Переваги	Обмеження
«ELEGOO Smart Car V4.0»	Arduino-сумісна платформа, колісна база, камера, сенсори	Передавання візуальних даних, базове спостереження, підтримка навчальних експериментів	Доступність, простота складання, зручність для бакалаврської роботи	Обмежені ресурси Arduino для складної обробки зображень
«TurtleBot3»	ROS-сумісна мобільна платформа	Навігація, SLAM, виявлення смуг, робота з камерою та сенсорами	Модульність, підтримка ROS, зручність для досліджень	Вища складність налаштування та вартість
«NVIDIA JetBot»	NVIDIA Jetson Nano, камера, колісна платформа	AI-розпізнавання об’єктів, уникнення зіткнень, автономна поведінка	Висока продуктивність для машинного зору та нейромереж	Менший акцент на класичному мікроконтролерном у керуванні
Роботи з «OpenMV Cam»	Камерний модуль з обробкою зображень	Виявлення кольорів, ліній, QR-кодів, об’єктів	Обробка зображень на модулі, зручність інтеграції з мікроконтролерами	Потреба в окремому програмуванні камери
Саморобні Arduino-роботи з камерою	Arduino, зовнішня камера або Wi-Fi-камера, сенсори	Переважно відеоспостереження або проста візуальна взаємодія	Низька вартість, гнучкість конструкції	Обмежена продуктивність і потреба у власному налагодженні

Аналіз наведених рішень показує, що вибір платформи залежить від мети проєкту. Якщо основний акцент робиться на складних алгоритмах комп’ютерного зору, розпізнаванні об’єктів або штучному інтелекті, доцільніше використовувати JetBot, Raspberry Pi-подібні рішення або інші одноплатні комп’ютери. Якщо метою є дослідження ROS-навігації, SLAM і багатосенсорної інтеграції, більш відповідною є платформа TurtleBot3. Якщо ж завдання полягає у створенні навчально-дослідницької мікропроцесорної системи керування мобільним роботом, доцільним є використання Arduino-сумісної платформи з камерою та базовими сенсорами.

Загальну логіку порівняння існуючих рішень мобільних роботів з елементами комп'ютерного зору доцільно подати на рисунку 1.6.

Рішення	ELEGOO Smart Car V4.0	TurtleBot3 Burger	NVIDIA JetBot	Роботи з OpenMV Cam	Саморобні Arduino-роботи з камерою
Зовнішній вигляд					
Апаратна основа	Arduino UNO R3, набір датчиків, камера	Одноплатний комп'ютер (Raspberry Pi), ROS-сумісна платформа	NVIDIA Jetson Nano, камера, колісна база	Модуль OpenMV Cam (мікроконтролер + камера)	Arduino (або аналог), камера (USB/Wi-Fi), набір датчиків
Обчислювальна потужність	Низька–середня	Середня	Висока (підтримка AI та нейромереж)	Середня (обробка зображень на модулі)	Низька–середня
Елементи комп'ютерного зору	Передача відео, базове спостереження	Виявлення смуг, об'єктів, SLAM (з додатковими модулями)	Розпізнавання об'єктів, уникнення зіткнень, слідування за об'єктом	Виявлення кольорів, ліній, об'єктів, QR-кодів	Відеоспостереження, проста візуальна обробка (на зовнішньому пристрої)
Переваги	✓ Доступна вартість ✓ Простота складання ✓ Добре підходить для навчання	✓ Модульність ✓ Підтримка ROS ✓ Підходить для досліджень	✓ Висока продуктивність ✓ Підтримка AI ✓ Великий потенціал розвитку	✓ Обробка зображень на модулі ✓ Легка інтеграція з мікроконтролерами	✓ Гнучкість конструкції ✓ Низька ціна компонентів ✓ Можливість повної кастомізації
Обмеження	✗ Обмежені ресурси Arduino для обробки зображень	✗ Вища вартість ✗ Складніше налаштування (ROS, Linux)	✗ Вища ціна ✗ Менший акцент на мікроконтролерному керуванні	✗ Потреба у програмуванні камери (Python/MicroPython) ✗ Обмежена роздільна здатність	✗ Потреба у власному налаштуванні всіх компонентів ✗ Обмежена продуктивність
Сфера застосування	Навчальні проекти, вивчення основ робототехніки	Освіта, дослідження, прототипування, автономна навігація	AI-проекти, машинний зір, дослідження, розробка алгоритмів	Прості системи з машинним зором, відстеження, розпізнавання	Навчальні та хобі-проекти, експерименти, прототипи
Орієнтовна складність розробки	Низька	Середня–висока	Середня	Середня	Середня–висока
Орієнтовна вартість	\$ (низька)	\$\$ (середня)	\$\$\$ (висока)	\$ (низька)	\$–\$\$ (низька–середня)

Рисунок 1.6 – Порівняння існуючих рішень мобільних роботів з елементами комп'ютерного зору [22]

Існуючі рішення мобільних роботів з елементами комп'ютерного зору відрізняються апаратною базою, рівнем обчислювальної продуктивності, складністю програмування та сферою застосування. Найпотужніші платформи орієнтовані на ROS, SLAM і нейромережеві алгоритми, тоді як навчальні Arduino-рішення краще підходять для вивчення основ мікропроцесорного керування.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ

2.1 Обґрунтування вибору апаратної платформи для реалізації мобільного робота

Вибір апаратної платформи є одним із ключових етапів розроблення мобільного робота, оскільки саме від неї залежать конструктивні можливості системи, зручність підключення сенсорів, спосіб керування виконавчими механізмами, складність програмування та можливість подальшого розширення функціональності.

Під час вибору апаратної платформи для реалізації мобільного робота було враховано кілька основних критеріїв: наявність готової мобільної бази, підтримка мікроконтролерного керування, можливість підключення сенсорів, наявність камери або модуля візуального спостереження, простота складання, доступність програмного забезпечення. Оскільки метою роботи є розроблення мікропроцесорної системи керування мобільним роботом з елементами машинного зору, платформа повинна забезпечувати не лише рух, а й можливість отримання інформації про навколишнє середовище за допомогою сенсорів і візуального модуля [23].

Для практичної реалізації доцільно обрати готову навчально-дослідницьку колісну роботизовану платформу на базі Arduino-сумісного контролера. Такий вибір пояснюється тим, що Arduino-платформи добре підходять для вивчення електроніки, програмування та взаємодії мікроконтролера з периферійними пристроями. Офіційна документація Arduino зазначає, що Arduino UNO побудована на мікроконтролері ATmega328P, має 14 цифрових входів-виходів, 6 аналогових входів, 16 МГц тактової частоти, USB-підключення та роз'єм живлення, тобто містить базові засоби для створення вбудованих систем керування [24].

У межах розроблення мобільного робота важливо, що Arduino UNO R3 підтримує цифрові сигнали керування, аналогове зчитування даних і PWM-виходи, які можуть застосовуватися для регулювання швидкості двигунів через драйвери. Це дає змогу реалізувати базові режими руху: рух уперед, рух назад, поворот ліворуч, поворот праворуч, зупинку та зміну швидкості. Крім того, плата має просту структуру, широко підтримується навчальними матеріалами та програмується в Arduino IDE, що є перевагою для виконання бакалаврської роботи, орієнтованої на практичну реалізацію апаратно-програмної системи.

Для цієї роботи доцільною є платформа типу «розумного» роботизованого автомобіля з камерою, ультразвуковим датчиком, колісною базою, двигунами, драйверами та контролером Arduino UNO R3 [25].

Окрему перевагу має наявність камерного модуля, оскільки тема роботи передбачає використання елементів машинного зору. У такій системі камера може застосовуватися для отримання візуальної інформації про середовище, передавання відеопотоку або підтримки простих сценаріїв візуального спостереження. При цьому слід враховувати обмежені обчислювальні ресурси Arduino UNO R3. Тому складна обробка зображень не повинна покладатися безпосередньо на основний мікроконтролер. Більш доцільним є підхід, за якого Arduino відповідає за керування рухом, сенсорами та виконавчими механізмами, а камера використовується як окремий візуальний модуль. У документації ELEGOO окремо описано роботу з камерним модулем і завантаження коду до нього, що підтверджує його самостійне значення в структурі платформи [26].

Важливим чинником вибору є колісна ходова частина. Для бакалаврської роботи колісна платформа є оптимальною, оскільки вона має простішу механіку порівняно з гусеничними або крокуючими роботами, забезпечує достатню маневреність і дозволяє легко реалізувати диференційне керування рухом. У такій схемі напрям руху змінюється за рахунок різниці швидкостей лівих і правих двигунів. Це спрощує програмну реалізацію та дає змогу наочно продемонструвати принципи керування виконавчими механізмами.

Під час вибору апаратної платформи також враховано можливість підключення базових сенсорів. Для мобільного робота особливо важливими є датчики, які дозволяють отримувати інформацію про перешкоди та стан навколишнього середовища. Ультразвуковий датчик може використовуватися для визначення відстані до об'єкта перед роботом, інфрачервоні сенсори – для виявлення лінії або межі поверхні, а камера – для візуального спостереження. Така комбінація сенсорів є достатньою для реалізації базових режимів автономної або напівавтономної поведінки.

Критерії вибору апаратної платформи для реалізації мобільного робота подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Критерії вибору апаратної платформи для реалізації мобільного робота

Критерій вибору	Обґрунтування значення критерію	Практична реалізація в обраній платформі
Наявність мобільної бази	Дає змогу реалізувати фізичний рух робота без розроблення шасі з нуля	Колісна роботизована платформа
Підтримка мікроконтролерного керування	Забезпечує виконання алгоритмів руху та обробку сигналів від сенсорів	Arduino UNO R3 або сумісний контролер
Можливість керування двигунами	Необхідна для реалізації руху, поворотів і зупинки	Двигуни постійного струму та драйвери
Наявність сенсорів	Забезпечує зворотний зв'язок із середовищем	Ультразвуковий датчик, ІЧ-сенсори
Наявність камери	Дозволяє реалізувати елементи машинного зору або відеоспостереження	Камерний модуль
Доступність програмного забезпечення	Спрощує розроблення, налагодження та тестування системи	Arduino IDE, приклади коду, навчальні матеріали
Модульність	Дозволяє змінювати або доповнювати окремі компоненти	Можливість підключення додаткових сенсорів і модулів
Освітня придатність	Відповідає рівню бакалаврської роботи та навчальним цілям	Зручність для лабораторного дослідження й експериментів

З таблиці 2.1 видно, що оптимальна апаратна платформа для цієї роботи повинна бути не лише технічно придатною для побудови мобільного робота, а й методично зручною для пояснення принципів комп'ютерної інженерії. Вона має

демонструвати взаємодію апаратної та програмної частин: мікроконтролер приймає сигнали від сенсорів, виконує алгоритм керування, формує команди для драйверів двигунів, а виконавчі механізми забезпечують рух мобільної платформи.

Порівняно з повністю саморобною платформою, готовий роботизований набір має кілька суттєвих переваг. По-перше, він зменшує кількість помилок на етапі механічного складання, оскільки основні компоненти конструктивно узгоджені між собою. По-друге, він містить типові модулі, які часто використовуються в навчальних робототехнічних системах: контролер, двигуни, сенсори, модулі зв'язку та камеру. По-третє, він дає змогу швидше перейти від складання до програмування й тестування алгоритмів. Це особливо важливо для кваліфікаційної роботи, де потрібно не лише зібрати пристрій, а й обґрунтувати його структуру, описати логіку роботи та оцінити результати експериментів.

Водночас використання готової платформи не означає відсутності проєктної складової.

Загальний вигляд апаратної платформи мобільного робота доцільно подати на рисунку 2.1.

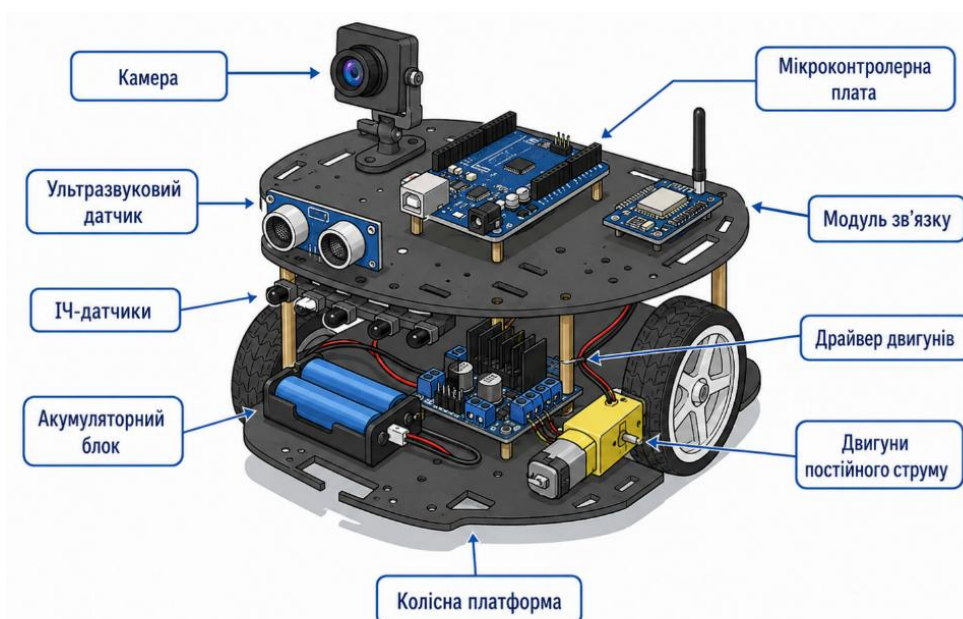


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд апаратної платформи для реалізації мобільного робота [26]

Для реалізації мобільного робота з елементами машинного зору доцільно обрати готову колісну Arduino-сумісну платформу з камерою, сенсорами та виконавчими механізмами. Такий вибір забезпечує оптимальне поєднання доступності, простоти складання, можливості програмування, підтримки сенсорів і придатності для експериментального дослідження. Обрана апаратна платформа дозволяє реалізувати основні функції мобільного робота: рух, поворот, зупинку, виявлення перешкод, отримання візуальної інформації та виконання команд керування. Це відповідає меті кваліфікаційної роботи та створює основу для подальшого розроблення структурної схеми, алгоритму функціонування і програмної реалізації системи.

2.2 Вибір мікроконтролерної платформи Arduino UNO R3 для керування мобільним роботом

Вибір мікроконтролерної платформи є визначальним етапом під час розроблення мобільного робота, оскільки саме мікроконтролер координує роботу сенсорів, виконавчих механізмів, модулів зв'язку та програмного алгоритму керування. У складі мобільного робота мікроконтролерна плата виконує функції центрального керуючого вузла: приймає сигнали від датчиків, аналізує їх відповідно до заданої логіки, формує команди для драйверів двигунів і забезпечує взаємодію окремих апаратних модулів. Для даної роботи доцільним є використання плати Arduino UNO R3, оскільки вона має просту архітектуру, достатню кількість портів введення-виведення, широку підтримку навчальних матеріалів і добре підходить для реалізації базових систем керування мобільними роботами [24].

Arduino UNO R3 є однією з найпоширеніших мікроконтролерних платформ для навчальних і дослідницьких проєктів у сфері робототехніки. Вона побудована на базі мікроконтролера ATmega328P, який забезпечує виконання програмного коду, обробку цифрових і аналогових сигналів, роботу з таймерами, формування PWM-сигналів та взаємодію з периферійними пристроями [27]. Для

мобільного робота ці можливості є важливими, оскільки система повинна одночасно зчитувати дані з датчиків, керувати двигунами, взаємодіяти з сервоприводами та виконувати основний алгоритм руху.

Плата Arduino UNO R3 має 14 цифрових входів-виходів, з яких 6 можуть використовуватися як PWM-виходи, 6 аналогових входів, USB-інтерфейс для програмування, роз'єм живлення та стабілізовані виводи напруги. Наявність PWM-виходів є особливо важливою для керування швидкістю двигунів через драйвер, оскільки широтно-імпульсна модуляція дозволяє змінювати середнє значення напруги, що подається на двигун. Завдяки цьому можна реалізувати плавний старт, зменшення швидкості перед перешкодою, поворот із різною швидкістю коліс і зупинку мобільної платформи [24].

У системі керування мобільним роботом Arduino UNO R3 не підключається безпосередньо до двигунів, оскільки виходи мікроконтролера не розраховані на живлення потужних виконавчих механізмів. Для цього використовується драйвер двигунів, який приймає логічні сигнали від Arduino та комутує силове живлення двигунів. Такий підхід дозволяє розділити керуючу і силову частини системи. Arduino формує команди «рух уперед», «рух назад», «поворот ліворуч», «поворот праворуч», «зупинка», а драйвер двигунів забезпечує подавання необхідної напруги та струму на моторну частину платформи.

Важливою перевагою Arduino UNO R3 є простота програмування. Розроблення програмного забезпечення здійснюється в середовищі Arduino IDE, яке підтримує мову програмування на основі C/C++ і має велику кількість бібліотек для роботи з датчиками, сервоприводами, двигунами та комунікаційними модулями [28]. Для бакалаврської роботи це є суттєвою перевагою, оскільки дає змогу зосередитися не лише на низькорівневих особливостях мікроконтролера, а й на логіці роботи мобільного робота, алгоритмах руху, обробці даних від сенсорів і тестуванні системи.

Основні технічні характеристики Arduino UNO R3, важливі для реалізації мобільного робота, подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики Arduino UNO R3 для системи керування мобільним роботом

Характеристика	Значення	Значення для мобільного робота
Мікроконтролер	ATmega328P	Виконує програмний алгоритм керування
Робоча напруга	5 В	Забезпечує сумісність із більшістю навчальних сенсорів і модулів
Цифрові входи-виходи	14	Дають змогу підключати датчики, драйвери двигунів і модулі керування
PWM-виходи	6	Використовуються для регулювання швидкості двигунів і керування сервоприводами
Аналогові входи	6	Дають змогу зчитувати сигнали з аналогових сенсорів
Тактова частота	16 МГц	Достатня для базових алгоритмів керування рухом
Flash-пам'ять	32 КБ	Використовується для зберігання програмного коду
SRAM	2 КБ	Використовується для змінних під час виконання програми
Інтерфейс програмування	USB	Спрощує завантаження коду та налагодження
Середовище розроблення	Arduino IDE	Забезпечує просте програмування та підтримку бібліотек

Як видно з таблиці 2.2, Arduino UNO R3 має достатні характеристики для реалізації базової мікропроцесорної системи керування мобільним роботом. Її можливостей достатньо для зчитування даних з ультразвукового датчика, інфрачервоних сенсорів, обробки логічних умов і формування сигналів керування двигунами. Крім того, плата може працювати із сервоприводом, який використовується для повороту датчика або камерного модуля, а також із комунікаційними модулями, що забезпечують дистанційне керування або передавання команд.

Під час вибору мікроконтролерної платформи було враховано не лише технічні характеристики, а й відповідність Arduino UNO R3 задачам кваліфікаційної роботи. Оскільки робота спрямована на розроблення мікропроцесорної системи керування, важливо, щоб обрана платформа дозволяла наочно продемонструвати взаємодію між програмним алгоритмом і фізичними компонентами робота. Arduino UNO R3 забезпечує таку можливість, оскільки кожен керуючий сигнал можна пов'язати з конкретною дією:

увімкненням двигуна, зміною напрямку обертання, поворотом сервопривода або реакцією на показники датчика.

Порівняно з потужнішими платформами, наприклад Raspberry Pi або NVIDIA Jetson, Arduino UNO R3 має значно менші обчислювальні ресурси. Водночас саме це робить її доцільною для реалізації низькорівневого керування. У мобільному роботі з елементами машинного зору Arduino UNO R3 доцільно використовувати не для складної обробки відеопотоку, а для керування рухом, обробки сигналів від базових сенсорів і виконання команд, сформованих на основі візуальної інформації. Такий підхід відповідає принципу розподілу функцій: камера або зовнішній модуль забезпечують отримання візуальних даних, а Arduino виконує команди керування рухом.

До переваг Arduino UNO R3 для реалізації мобільного робота можна віднести простоту підключення компонентів, доступність прикладів програмного коду, наявність великої кількості бібліотек, сумісність із навчальними наборами та зрозумілу логіку роботи. Крім того, платформа є ремонтпридатною і дозволяє швидко замінювати або перепідключати окремі модулі. Це важливо під час експериментального тестування, коли може виникати потреба змінити схему підключення, доповнити систему новим датчиком або скоригувати програмну логіку.

Водночас Arduino UNO R3 має певні обмеження. Основними з них є невеликий обсяг оперативної пам'яті, обмежена швидкодія та відсутність апаратних можливостей для повноцінної обробки зображень. Тому для задач машинного зору в межах цієї роботи Arduino слід розглядати як керуючий модуль, а не як пристрій для аналізу відео. Це означає, що складні операції, пов'язані з розпізнаванням об'єктів або обробкою кадрів, мають виконуватися зовнішнім пристроєм, камерним модулем або комп'ютером, тоді як Arduino отримує вже готові сигнали або команди для руху.

Загальну роль Arduino UNO R3 у системі керування мобільним роботом доцільно подати на рисунку 2.2.

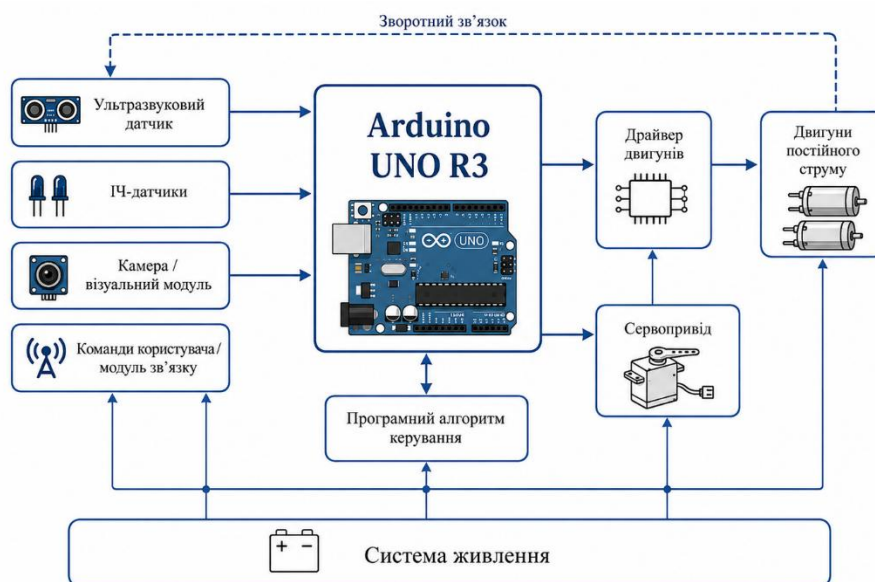


Рисунок 2.2 – Arduino UNO R3 у мікропроцесорній системі керування мобільним роботом

Логіку використання Arduino UNO R3 у складі мобільного робота можна подати так: сенсори формують вхідні дані, мікроконтролер виконує програмний алгоритм, драйвер двигунів отримує керуючі сигнали, а виконавчі механізми забезпечують рух платформи. У разі виявлення перешкоди або отримання команди від користувача Arduino змінює режим роботи двигунів. Якщо система використовує камерний модуль, то візуальна інформація може бути використана для прийняття рішення про зміну траєкторії, зупинку або об'їзд об'єкта.

Arduino UNO R3 є доцільною мікроконтролерною платформою для реалізації мобільного робота в межах даної кваліфікаційної роботи. Вона забезпечує необхідні можливості для підключення сенсорів, керування драйверами двигунів, реалізації алгоритмів руху та взаємодії з додатковими модулями. Основною перевагою цієї платформи є поєднання простоти, доступності, достатньої функціональності та широкої підтримки навчального середовища. При цьому обмеження Arduino UNO R3 щодо обробки зображень враховуються через розподіл функцій між мікроконтролером, камерним модулем і зовнішніми засобами аналізу візуальних даних.

2.3 Вибір сенсорного блоку для орієнтації робота в навколишньому середовищі

Сенсорний блок є однією з основних складових мобільного робота, оскільки саме він забезпечує отримання інформації про навколишнє середовище та створює основу для прийняття керуючих рішень. Якщо мікроконтролерна плата виконує роль обчислювального й керуючого центру, то сенсори формують вхідні дані, на основі яких система визначає наявність перешкод, відстань до об'єктів, положення робота відносно поверхні або маршруту, а також можливість подальшого руху. Для мобільного робота з елементами машинного зору сенсорний блок має поєднувати прості датчики відстані та орієнтації з візуальним модулем, який розширює можливості сприйняття середовища [29].

У межах даної роботи сенсорний блок доцільно сформувати з кількох взаємодоповнювальних елементів: ультразвукового датчика відстані, інфрачервоних датчиків лінії або поверхні, камерного модуля та, за потреби, допоміжних сенсорів положення чи зворотного зв'язку. Такий підхід відповідає структурі навчальних мобільних платформ, у яких передбачено модулі уникнення перешкод, лінійного руху, дистанційного керування та візуального спостереження [29]. Офіційний опис «ELEGOO Smart Robot Car Kit V4.0» зазначає, що набір містить модуль уникнення перешкод, модуль відстеження лінії, інфрачервоне керування та можливість керування через мобільні пристрої, що підтверджує доцільність використання комбінованого сенсорного блоку для навчально-дослідницької системи керування.

Основним датчиком для виявлення перешкод доцільно обрати ультразвуковий датчик типу HC-SR04. Його принцип роботи ґрунтується на випромінюванні ультразвукового імпульсу та вимірюванні часу повернення відбитого сигналу. Датчик формує сигнал «Trigger», після чого приймає відбитий сигнал «Echo», а відстань до об'єкта визначається за часом проходження звукової хвилі. У документації до HC-SR04 наведено формулу розрахунку відстані: відстань у сантиметрах може бути отримана як тривалість імпульсу в

мікросекундах, поділена на 58 [30]. Для мобільного робота це є зручним рішенням, оскільки Arduino UNO R3 може вимірювати тривалість імпульсу та на її основі приймати рішення про зупинку, поворот або об'їзд перешкоди.

Перевагою ультразвукового датчика є його простота, невисока вартість, сумісність з Arduino та достатня точність для навчальних робототехнічних систем. Він не потребує складної обробки даних і може працювати незалежно від кольору об'єкта, що є важливим для виявлення перешкод перед роботом. Водночас слід враховувати певні обмеження: якість вимірювання залежить від кута розташування об'єкта, форми поверхні, відбиття звукової хвилі та наявності дуже м'яких або поглинальних матеріалів. Тому ультразвуковий датчик доцільно використовувати як базовий засіб виявлення перешкод, але не як єдине джерело інформації про середовище.

Другим важливим елементом сенсорного блоку є інфрачервоні датчики, які можуть застосовуватися для руху за лінією, визначення контрасту поверхні або виявлення меж робочої зони. Принцип їх роботи полягає у випромінюванні інфрачервоного світла та реєстрації відбитого сигналу. Світлі й темні поверхні по-різному відбивають інфрачервоне випромінювання, тому датчик може розрізняти контрастні ділянки, наприклад чорну лінію на світлому фоні. У технічному описі TCRT5000 зазначено, що це відбивний оптичний сенсор з інфрачервоним випромінювачем і фототранзистором, який може використовуватися для позиційного виявлення та роботи з відбитим сигналом [31].

Інфрачервоні датчики є доцільними для мобільного робота, оскільки вони дозволяють реалізувати один із базових режимів автономного руху - слідування за лінією. У цьому режимі робот отримує сигнали від кількох ІЧ-сенсорів, порівнює їхній стан і змінює швидкість лівих або правих двигунів для утримання траєкторії. Наприклад, якщо центральний датчик виявляє лінію, робот рухається прямо; якщо лінія зміщується ліворуч або праворуч, мікроконтролер коригує напрям руху. Такий алгоритм є простим для реалізації на Arduino UNO R3 і добре

демонструє принцип зворотного зв'язку між сенсорним блоком і виконавчими механізмами.

Камерний модуль у складі сенсорного блоку виконує іншу функцію, ніж ультразвуковий або інфрачервоний датчик. Він не лише фіксує окреме числове значення, а формує візуальну інформацію про середовище. Камера може використовуватися для передавання відеопотоку, спостереження за маршрутом, виявлення об'єктів, аналізу положення перешкод або подальшої обробки зображення зовнішнім пристроєм. Для мобільного робота з елементами машинного зору камера є важливою, оскільки вона дає змогу перейти від простого сенсорного реагування до більш інформативного візуального сприйняття середовища. В офіційних матеріалах ELEGOO окремо описано роботу з камерним модулем та завантаження програмного коду до нього, що свідчить про його самостійну роль у структурі роботизованої платформи [32].

Водночас під час вибору камерного модуля потрібно враховувати обмеження Arduino UNO R3. Ця плата є ефективною для керування двигунами, сервоприводами та обробки простих сигналів, але не призначена для повноцінної обробки відеопотоку. Тому камера в обраній структурі має розглядатися як допоміжний візуальний модуль, який може передавати зображення або працювати разом із зовнішнім пристроєм. У такій архітектурі Arduino UNO R3 відповідає за низькорівневе керування рухом, а візуальні дані можуть використовуватися для спостереження, прийняття команд або розширення функцій навігації.

Під час формування сенсорного блоку важливо забезпечити узгодженість між типами даних, які надходять від різних сенсорів. Ультразвуковий датчик формує інформацію про відстань до об'єкта, ІЧ-датчики – про характер поверхні або наявність лінії, камера – про візуальний стан середовища. Разом ці компоненти дають змогу реалізувати комбіновану модель орієнтації мобільного робота. Наприклад, ультразвуковий датчик може зупинити робота перед перешкодою, ІЧ-датчики – допомогти рухатися за заданою траєкторією, а

камера – забезпечити візуальний контроль або передавання зображення оператору.

Основні компоненти сенсорного блоку для орієнтації мобільного робота подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Компоненти сенсорного блоку для орієнтації мобільного робота

Компонент сенсорного блоку	Призначення	Переваги	Обмеження
Ультразвуковий датчик HC-SR04	Вимірювання відстані до перешкоди перед роботом	Простота підключення, сумісність з Arduino, достатня точність для навчального робота	Залежність від кута й форми поверхні об'єкта
Інфрачервоні датчики лінії	Виявлення контрастної лінії або межі поверхні	Простий алгоритм роботи, низька вартість, зручність для руху за лінією	Залежність від освітлення та кольору поверхні
Камерний модуль	Отримання візуальної інформації про середовище	Можливість відеоспостереження та використання елементів машинного зору	Потреба в додаткових ресурсах для складної обробки зображень
Сервопривід для повороту сенсора або камери	Зміна напрямку огляду сенсорного модуля	Розширення зони сприйняття середовища	Потреба в додатковому живленні та керуючому сигналі
Енкодери або датчики обертання коліс	Оцінювання переміщення та швидкості руху	Можливість точнішого контролю руху	Ускладнення апаратної та програмної частини

З таблиці 2.3 видно, що сенсорний блок повинен бути не надмірно складним, а функціонально збалансованим. Для роботи важливо не лише встановити максимальну кількість датчиків, а й обґрунтувати їхню роль у системі керування. Найбільш доцільним є поєднання ультразвукового датчика, ІЧ-датчиків і камерного модуля, оскільки така структура дозволяє реалізувати базові режими орієнтації: виявлення перешкод, рух за лінією, візуальне спостереження та підтримку елементів машинного зору [33].

Алгоритмічно робота сенсорного блоку може бути організована таким чином: спочатку мікроконтролер зчитує відстань з ультразвукового датчика, потім перевіряє сигнали з ІЧ-датчиків, після чого враховує дані або стан

камерного модуля. Якщо відстань до перешкоди є безпечною, робот може продовжувати рух. Якщо перешкода розташована близько, система формує команду зупинки або повороту. Якщо активний режим руху за лінією, пріоритет можуть мати сигнали ІЧ-датчиків. Якщо використовується камера, її дані можуть застосовуватися для візуального контролю або подальшого аналізу на зовнішньому пристрої.

Загальну структуру сенсорного блоку мобільного робота доцільно подати на рисунку 2.3.

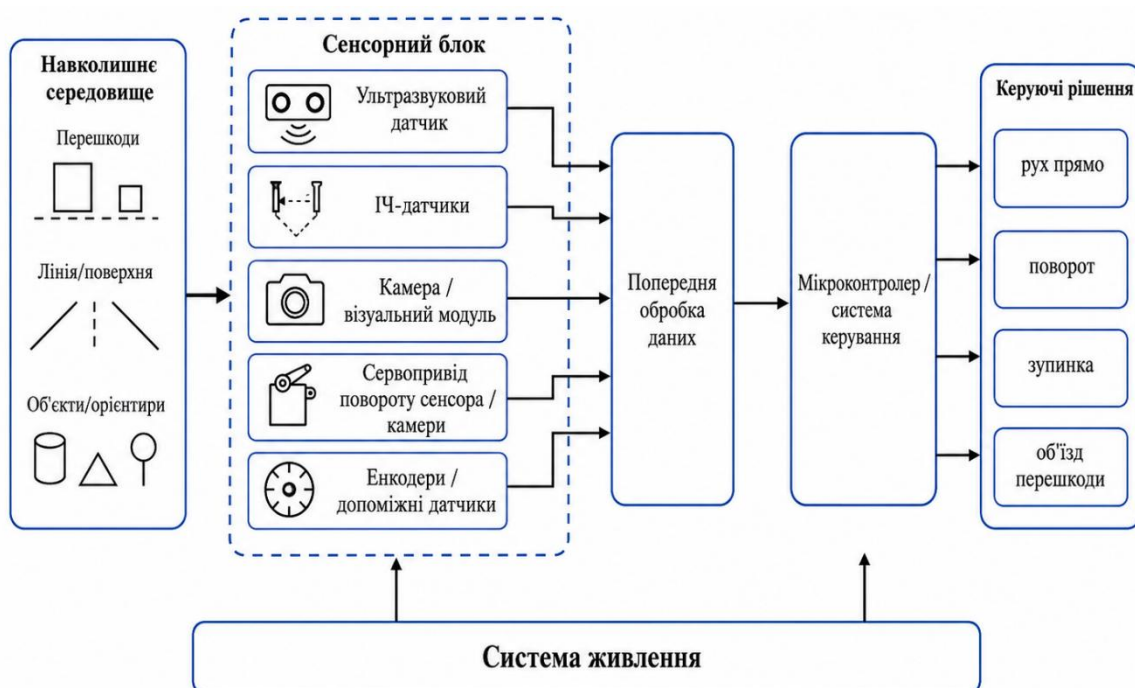


Рисунок 2.3 – Структура сенсорного блоку для орієнтації мобільного робота в навколишньому середовищі

Для орієнтації мобільного робота в навколишньому середовищі доцільно використати комбінований сенсорний блок, який включає ультразвуковий датчик, інфрачервоні датчики та камерний модуль. Ультразвуковий датчик забезпечує визначення відстані до перешкод, ІЧ-датчики дають змогу реалізувати рух за лінією або контроль поверхні, а камера створює основу для використання елементів машинного зору. Така структура є оптимальною для навчально-

дослідницької мобільної платформи, оскільки поєднує простоту реалізації, сумісність з Arduino UNO R3 і можливість подальшого розширення функціональності системи.

2.4 Обґрунтування використання камери в системі машинного зору мобільного робота

Використання камери в системі мобільного робота є важливим етапом розширення його функціональних можливостей, оскільки камера дає змогу отримувати не лише окремі числові показники, як у випадку з ультразвуковими або інфрачервоними датчиками, а повноцінну візуальну інформацію про навколишнє середовище. Якщо ультразвуковий датчик визначає відстань до перешкоди, а ІЧ-датчики фіксують контраст поверхні, то камера формує зображення, на основі якого можна аналізувати розташування об'єктів, їх форму, колір, напрям руху та положення відносно мобільної платформи. Тому в роботі камера розглядається як ключовий елемент сенсорного блоку, що забезпечує основу для реалізації елементів машинного зору.

Для мобільного робота камера може виконувати кілька функцій: передавання відеопотоку оператору, візуальне спостереження за маршрутом, фіксацію перешкод, орієнтацію за об'єктами або маркерами, підтримку дистанційного керування та створення вхідних даних для подальшої обробки зображень. В офіційному описі роботизованого набору з камерою зазначено, що система підтримує FPV-керування та використовує Wi-Fi для передавання відео й керування рухом роботизованої машини [34]. Це підтверджує доцільність використання камери не лише як допоміжного модуля, а як засобу візуальної взаємодії між роботом, середовищем і користувачем.

Камера потрібна передусім для демонстрації принципу візуального сприйняття середовища мобільним роботом. Її застосування дозволяє перейти від простого реагування на перешкоди до більш інформативної моделі поведінки, коли система може отримувати зображення з простору перед роботом і

використовувати його для аналізу ситуації. У найпростішому варіанті камера може застосовуватися для відеоспостереження та дистанційного контролю руху. У складнішому варіанті зображення з камери може передаватися на зовнішній пристрій для подальшої обробки, наприклад виявлення об'єктів, кольорових маркерів, контурів або перешкод.

Обґрунтовуючи використання камери, потрібно врахувати обмеження основної мікроконтролерної платформи. Arduino UNO R3 доцільно використовувати для керування двигунами, сервоприводами, зчитування сигналів із сенсорів і виконання основного алгоритму руху. Водночас ця плата не призначена для повноцінної обробки відеопотоку, оскільки має обмежену оперативну пам'ять і невисоку обчислювальну продуктивність. Тому камера в системі повинна працювати як окремий візуальний модуль, а складні операції обробки зображень доцільно виконувати на зовнішньому пристрої або спеціалізованому камерному модулі.

Типовим прикладом камерного модуля, який використовується в подібних робототехнічних системах, є модуль з сенсором OV2640. Згідно з технічним описом, OV2640 має матрицю 1632×1232 пікселі, тобто приблизно 2 мегапікселі, і підтримує формування цифрового зображення для подальшого передавання або обробки [35]. Для навчального мобільного робота такі характеристики є достатніми, оскільки основне завдання полягає не в отриманні професійного відео, а в забезпеченні візуального каналу сприйняття середовища.

Важливою перевагою камерного модуля є можливість його окремого програмного налаштування. Офіційна інструкція ELEGOO щодо роботи з камерою описує завантаження програмного коду до камерного модуля та налаштування середовища ESP32 для його роботи [36]. Це означає, що камера в такій системі фактично не є пасивним датчиком, а може розглядатися як окремий функціональний вузол, який забезпечує передавання відеоданих і взаємодію з іншими компонентами робота.

З інженерної точки зору доцільним є розподіл функцій між мікроконтролером і камерним модулем. Arduino UNO R3 виконує низькорівневе

керування: формує сигнали для драйверів двигунів, обробляє показники ультразвукового та інфрачервоних датчиків, керує сервоприводом і виконує команди руху. Камера, своєю чергою, забезпечує отримання візуальної інформації та її передавання користувачу або зовнішньому пристрою. Такий розподіл дозволяє уникнути перевантаження мікроконтролера та водночас реалізувати в системі елементи машинного зору.

У практичній роботі камера може бути використана для кількох сценаріїв. Перший сценарій – FPV-спостереження, коли користувач бачить зображення з камери та може оцінювати положення робота в просторі. Другий сценарій – підтримка дистанційного керування, коли відео допомагає оператору обирати напрям руху. Третій сценарій – експериментальна обробка зображень на зовнішньому пристрої, наприклад визначення кольорового об'єкта або перешкоди. Четвертий сценарій – використання камери разом з ультразвуковим датчиком, коли візуальна інформація доповнює числові дані про відстань до об'єкта.

Порівняно з ультразвуковим датчиком, камера має ширші інформаційні можливості. Ультразвуковий датчик дає лише значення відстані в певному напрямку, тоді як камера дозволяє бачити одразу декілька об'єктів у полі зору. Проте камера має і певні недоліки: її робота залежить від освітлення, якості зображення, кута огляду, затримки передавання відео та обчислювальних ресурсів системи. Саме тому камера не повинна повністю замінювати інші сенсори. Найбільш ефективним є комбінований підхід, за якого камера доповнює ультразвуковий та інфрачервоні датчики.

З таблиці 2.4 видно, що камера є не просто додатковим пристроєм для отримання зображення, а важливим елементом сенсорної системи мобільного робота. Вона дозволяє розширити функціональність платформи, забезпечити візуальний контроль, створити умови для подальшої обробки зображень і продемонструвати принципи машинного зору в межах навчально-дослідницької системи.

Таблиця 2.4 – Обґрунтування використання камери в системі мобільного робота

Функція камери	Призначення в системі	Практичне значення
Передавання відеопотоку	Забезпечення візуального контролю середовища	Оператор може бачити простір перед роботом
Візуальне спостереження	Аналіз маршруту та положення об'єктів	Дає змогу краще оцінювати умови руху
Підтримка машинного зору	Формування зображення для подальшої обробки	Створює основу для виявлення об'єктів або маркерів
Доповнення до сенсорів відстані	Поєднання візуальних і числових даних	Підвищує інформативність системи орієнтації
Підтримка дистанційного керування	Допомога користувачу під час керування роботом	Полегшує керування в умовах обмеженої видимості
Експериментальне тестування	Перевірка можливостей візуального модуля	Дає змогу дослідити роль камери в робототехнічній системі

У структурі мобільного робота камера повинна взаємодіяти з іншими компонентами через програмно-апаратну логіку. Наприклад, якщо оператор або зовнішній модуль на основі відеоданих визначає перешкоду, Arduino UNO R3 може отримати команду зупинки або повороту. Якщо камера використовується для спостереження, мікроконтролер продовжує виконувати базовий алгоритм руху за даними ультразвукового та ІЧ-сенсорів. Якщо камера застосовується для елементів машинного зору, то її дані можуть бути використані для формування команд більш високого рівня.

Загальну роль камери в системі машинного зору мобільного робота доцільно подати на рисунку 2.4.

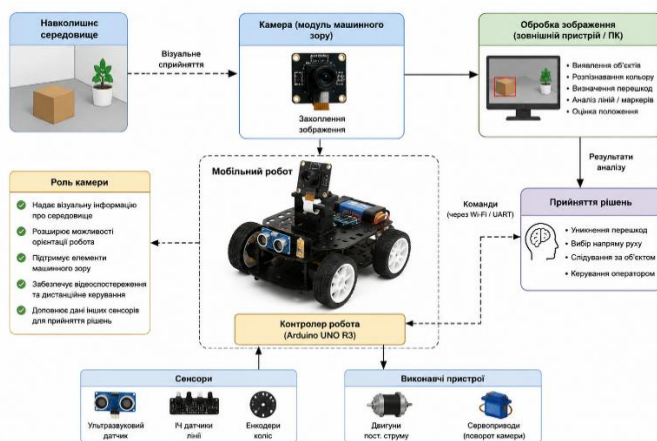


Рисунок 2.4 – Роль камери в системі машинного зору мобільного робота [37]

2.5 Розробка структурної та принципової схем мікропроцесорної системи керування

Розробка структурної та принципової схеми є важливим етапом проєктування мікропроцесорної системи керування мобільним роботом, оскільки саме на цьому етапі визначається взаємозв'язок між основними апаратними компонентами, напрям передавання сигналів, логіка живлення та роль кожного модуля в загальній роботі системи. Для мобільного робота з елементами машинного зору така схема повинна відображати не лише класичне керування двигунами, а й взаємодію мікроконтролера із сенсорним блоком, камерою, модулем зв'язку та системою живлення.

Структурна схема відображає функціональну організацію системи на рівні основних блоків. У межах даної роботи до складу мікропроцесорної системи керування входять: мікроконтролерна плата Arduino UNO R3, сенсорний блок, камерний модуль, драйвер двигунів, виконавчі механізми, модуль зв'язку, система живлення та програмний алгоритм керування. Центральним елементом системи є Arduino UNO R3, який виконує приймання вхідних сигналів, їх обробку відповідно до програмної логіки та формування керуючих сигналів для виконавчих пристроїв [24].

Сенсорний блок забезпечує зворотний зв'язок із навколишнім середовищем. У його складі доцільно передбачити ультразвуковий датчик для визначення відстані до перешкод, інфрачервоні датчики для орієнтації за лінією або контролю поверхні, а також камерний модуль для отримання візуальної інформації. Ультразвуковий датчик працює за принципом вимірювання часу проходження відбитого звукового імпульсу, що дозволяє визначати відстань до об'єкта перед роботом [30]. Інфрачервоні датчики використовуються для виявлення контрастних ділянок поверхні, що є важливим для реалізації режиму руху за лінією [31]. Камера розширює можливості сенсорного блоку, оскільки забезпечує візуальне сприйняття середовища та може використовуватися для відеоспостереження або подальшої обробки зображень [34].

У структурній схемі мікроконтролерна плата взаємодіє з драйвером двигунів через цифрові керуючі сигнали. Arduino UNO R3 не повинна безпосередньо жити двигуни, оскільки її виходи не розраховані на значні струми. Тому між мікроконтролером і двигунами обов'язково використовується драйвер, який виконує силове комутування. Мікроконтролер лише задає напрям обертання, режим руху та швидкість, а драйвер двигунів подає необхідну напругу на двигуни постійного струму. Такий підхід забезпечує електричне розділення логічної та силової частин системи.

Загальну структурну схему мікропроцесорної системи керування мобільним роботом доцільно подати на рисунку 2.5.

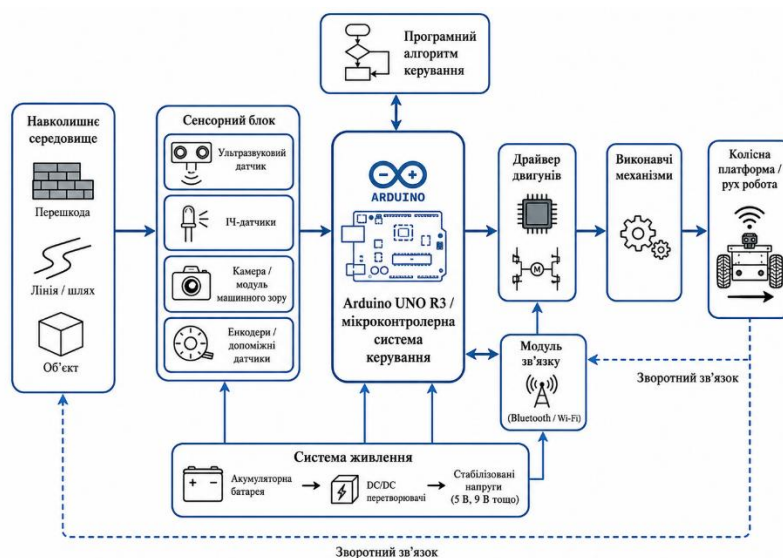


Рисунок 2.5 – Структурна схема мікропроцесорної системи керування мобільним роботом

На структурній схемі вхідними елементами є сенсори та камера, центральним блоком є Arduino UNO R3, а вихідними елементами - драйвер двигунів, двигуни постійного струму та сервопривід. Система живлення забезпечує енергією як логічну частину, так і виконавчі механізми. Програмний алгоритм керування розміщується на рівні мікроконтролера та визначає послідовність дій: зчитування даних, аналіз стану середовища, вибір режиму руху та формування керуючих сигналів.

Принципова схема, на відміну від структурної, деталізує логіку електричного підключення основних компонентів. Вона показує, які сигнальні лінії використовуються для взаємодії Arduino UNO R3 із сенсорами, драйвером двигунів, сервоприводом, камерним або комунікаційним модулем. У межах роботи принципову схему доцільно подавати як спрощену електричну схему підключення, що відображає основні функціональні зв'язки без надмірної деталізації внутрішньої будови готових модулів.

Основою принципової схеми є підключення Arduino UNO R3 до сенсорів і драйвера двигунів. Ультразвуковий датчик підключається до цифрових входів-виходів Arduino через лінії Trigger та Echo. Лінія Trigger використовується для запуску ультразвукового імпульсу, а лінія Echo – для отримання сигналу, тривалість якого відповідає відстані до перешкоди [30]. Інфрачервоні датчики можуть підключатися до цифрових або аналогових входів залежно від типу модуля. Якщо модуль має цифровий вихід, Arduino отримує логічний сигнал про наявність або відсутність лінії. Якщо використовується аналоговий вихід, мікроконтролер може аналізувати рівень відбитого сигналу.

Драйвер двигунів підключається до цифрових виходів Arduino. Частина ліній відповідає за напрям обертання двигунів, а PWM-виходи можуть використовуватися для регулювання швидкості. У разі диференційного керування мобільною платформою ліві та праві двигуни можуть отримувати різні команди, завдяки чому робот рухається прямо, повертає або зупиняється. Наприклад, якщо обидві групи двигунів обертаються вперед з однаковою швидкістю, робот рухається прямо. Якщо одна група двигунів зменшує швидкість або змінює напрям обертання, платформа виконує поворот.

Камерний модуль у принциповій схемі доцільно показати як окремий візуальний блок, що має власну логіку роботи та може взаємодіяти з мікроконтролером або зовнішнім пристроєм через модуль зв'язку. Це важливо, оскільки Arduino UNO R3 має обмежені ресурси для обробки відеопотоку. Тому камера використовується не як звичайний датчик, який передає повне зображення безпосередньо на Arduino, а як окремий модуль для отримання та

передавання візуальної інформації [36]. У такій архітектурі Arduino відповідає за керування рухом, а камера – за візуальний канал спостереження.

Система живлення у принциповій схемі повинна бути показана окремо, оскільки стабільність живлення має прямий вплив на працездатність мобільного робота. Логічна частина, до якої належать Arduino та сенсори, потребує стабілізованої напруги, тоді як двигуни споживають більший струм і можуть створювати електричні завади. Тому живлення двигунів і мікроконтролера бажано розглядати як окремі гілки, які мають спільну «землю» для коректного передавання керуючих сигналів. Такий підхід зменшує ризик збоїв мікроконтролера під час запуску або різкої зміни швидкості двигунів.

Узагальнений розподіл функцій між компонентами принципової схеми подано в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Призначення основних компонентів принципової схеми мікропроцесорної системи керування

Компонент	Тип підключення	Основна функція в системі
Arduino UNO R3	Центральний керуючий модуль	Обробка сигналів, виконання алгоритму, формування команд керування
Ультразвуковий датчик	Цифрові лінії Trigger/Echo	Вимірювання відстані до перешкод
ІЧ-датчики	Цифрові або аналогові входи	Виявлення лінії, межі або контрасту поверхні
Камерний модуль	Візуальний канал, Wi-Fi або окремий інтерфейс	Отримання візуальної інформації про середовище
Драйвер двигунів	Цифрові та PWM-сигнали	Силове керування двигунами постійного струму
Двигуни постійного струму	Виходи драйвера двигунів	Забезпечення руху мобільної платформи
Сервопривід	PWM-сигнал	Поворот камери або сенсорного модуля
Модуль зв'язку	UART, Wi-Fi або інший інтерфейс	Обмін командами з користувачем або зовнішнім пристроєм
Акумуляторний блок	Лінії живлення	Енергозабезпечення логічної та силової частин системи

Принципову схему підключення компонентів мікропроцесорної системи керування доцільно подати на рисунку 2.6.

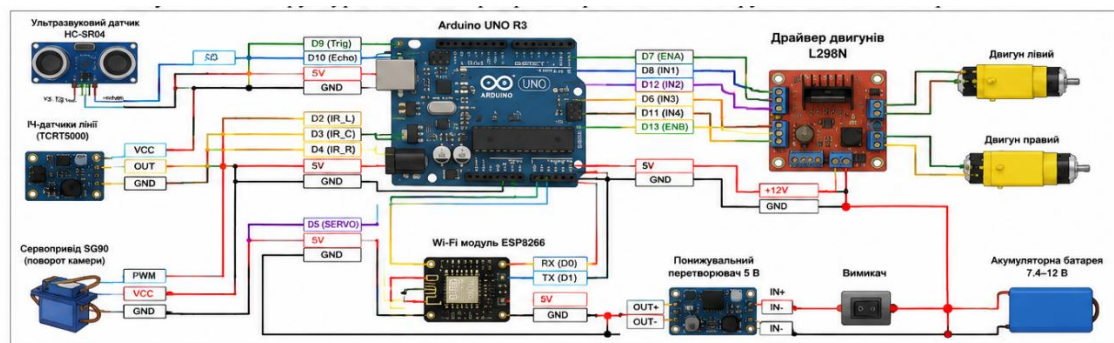


Рисунок 2.6 – Принципова схема підключення компонентів мікропроцесорної системи керування мобільним роботом

Рисунок 2.6 – Принципова схема підключення компонентів мікропроцесорної системи керування мобільним роботом

У принциповій схемі важливо показати, що всі компоненти системи мають бути електрично узгоджені. Сенсори повинні працювати з рівнями напруги, сумісними з Arduino UNO R3, а силові компоненти повинні підключатися через драйвер. Камерний модуль і модуль зв'язку можуть мати власні особливості живлення та програмування, тому їх слід розглядати як окремі функціональні вузли. Особливу увагу потрібно приділити правильному підключенню загальної «землі», оскільки без спільного опорного потенціалу керуючі сигнали між Arduino, драйвером двигунів і сенсорами можуть працювати некоректно.

Робота мікропроцесорної системи за розробленою схемою відбувається циклічно. Спочатку сенсори отримують інформацію про середовище. Далі Arduino UNO R3 зчитує ці дані та передає їх у програмний алгоритм. На основі заданих умов система визначає режим роботи: рух прямо, поворот, зупинка або об'їзд перешкоди. Після цього мікроконтролер формує сигнали для драйвера двигунів і, за потреби, для сервопривода. Камерний модуль забезпечує візуальну інформацію, яка може використовуватися для спостереження, дистанційного керування або розширення функцій навігації.

Таким чином, структурна схема дозволяє описати загальну архітектуру мікропроцесорної системи керування мобільним роботом, а принципова схема деталізує електричну взаємодію її компонентів. Розроблена структура передбачає використання Arduino UNO R3 як центрального керуючого модуля, сенсорного блоку для отримання даних про середовище, камерного модуля для візуального

сприйняття, драйвера двигунів для силового керування та системи живлення для забезпечення стабільної роботи всіх вузлів. Така побудова є доцільною для навчально-дослідницького мобільного робота, оскільки поєднує простоту реалізації, модульність і можливість подальшого розширення функціональності.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ З ЕЛЕМЕНТАМИ МАШИННОГО ЗОРУ У СЕРЕДОВИЩІ CORPELIASIM

3.1 Обґрунтування вибору середовища CoppeliaSim для моделювання мобільного робота

Для перевірки працездатності мікропроцесорної системи керування мобільним роботом доцільно використати спеціалізоване середовище моделювання, яке дає змогу відтворити рух колісної платформи, роботу сенсорів, взаємодію з перешкодами, функціонування виконавчих механізмів і використання камери як елемента машинного зору. У межах цієї роботи таким середовищем обрано CoppeliaSim, оскільки воно призначене для моделювання роботизованих систем різного типу та дає змогу поєднувати 3D-модель робота, фізичну симуляцію, сенсори, візуальні модулі й програмні сценарії керування в єдиному середовищі. Офіційні матеріали CoppeliaSim характеризують його як робототехнічний симулятор, орієнтований на створення, компонування та симуляцію роботизованих систем, а також підтримку різних типів сенсорів і механізмів [38].

Застосування CoppeliaSim є доцільним з огляду на те, що розроблювана система має не лише електронну, а й просторово-механічну складову. Для мобільного робота важливо перевірити не тільки правильність підключення Arduino UNO R3, сенсорів, камери та двигунів, а й поведінку платформи під час руху в середовищі з перешкодами. У звичайних середовищах електронного моделювання можна відтворити логіку роботи мікроконтролера або схему підключення, однак складно повноцінно показати рух робота, зміну траєкторії, орієнтацію в просторі та роботу візуального сенсора. Саме тому CoppeliaSim є більш придатним для третього розділу, оскільки дозволяє дослідити функціонування системи на рівні поведінки мобільного робота.

Загальний вигляд моделі мобільного робота в середовищі CoppeliaSim доцільно подати на рисунку 3.1.

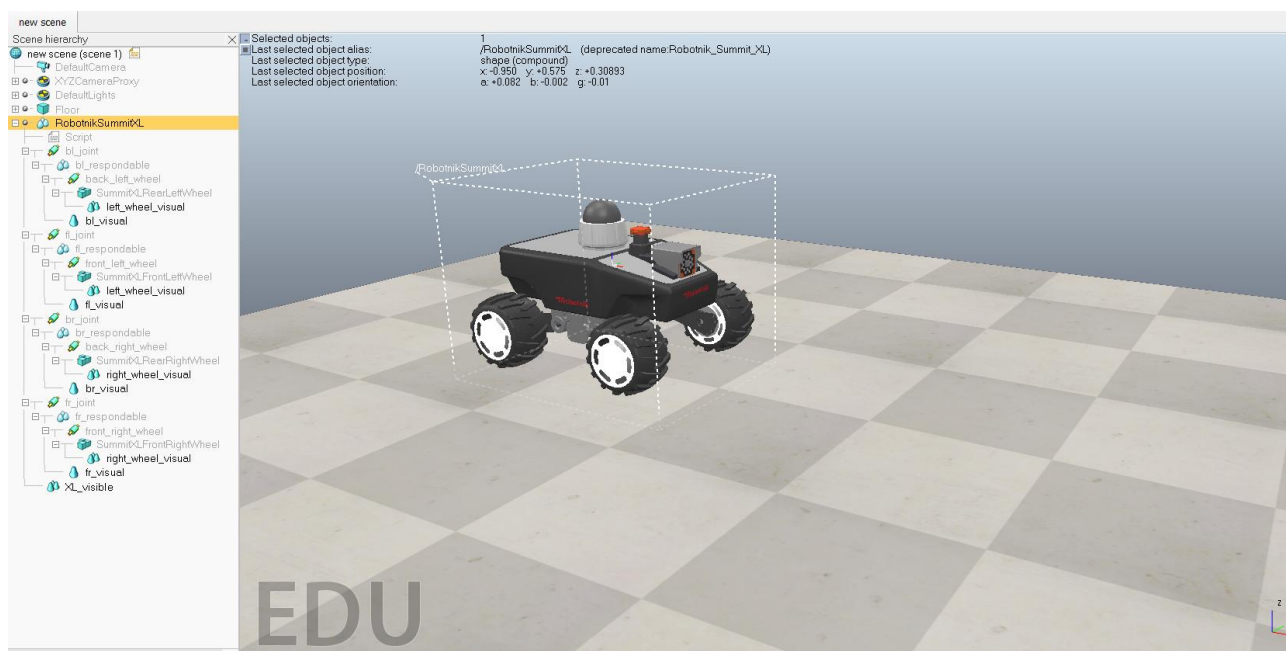


Рисунок 3.1 – Віртуальна модель мобільного робота в середовищі CoppeliaSim

Однією з основних переваг CoppeliaSim є підтримка сенсорного моделювання. У середовищі можуть бути використані сенсори наближення, візуальні сенсори, датчики положення, силові та інші модулі, які дають змогу відтворити логіку роботи реальних сенсорних блоків. Для цієї роботи особливо важливими є proximity sensor і vision sensor, оскільки перший може імітувати роботу датчика виявлення перешкод, а другий - виконувати роль камери або модуля машинного зору. Офіційна документація CoppeliaSim зазначає, що vision sensors працюють подібно до камер і можуть використовуватися тоді, коли в процесі виявлення мають значення кольорів, освітлення або структура об'єктів [39].

Під час моделювання мобільного робота сенсорний блок може бути поданий у вигляді набору віртуальних датчиків, які формують вхідні дані для програмного контролера. Сенсор наближення використовується для визначення наявності перешкоди перед роботом, а візуальний сенсор або камера - для отримання зображення навколишнього середовища. Це дозволяє змоделювати базову логіку машинного зору: отримання візуальних даних, виявлення об'єкта у

полі зору, аналіз його положення та формування керуючої реакції. При цьому CoppeliaSim не обмежує дослідження лише електричними сигналами, а дає змогу оцінити поведінку всієї системи в динаміці.

Основні функціональні можливості CoppeliaSim, які є важливими для моделювання мобільного робота, доцільно подати на рисунку 3.2.

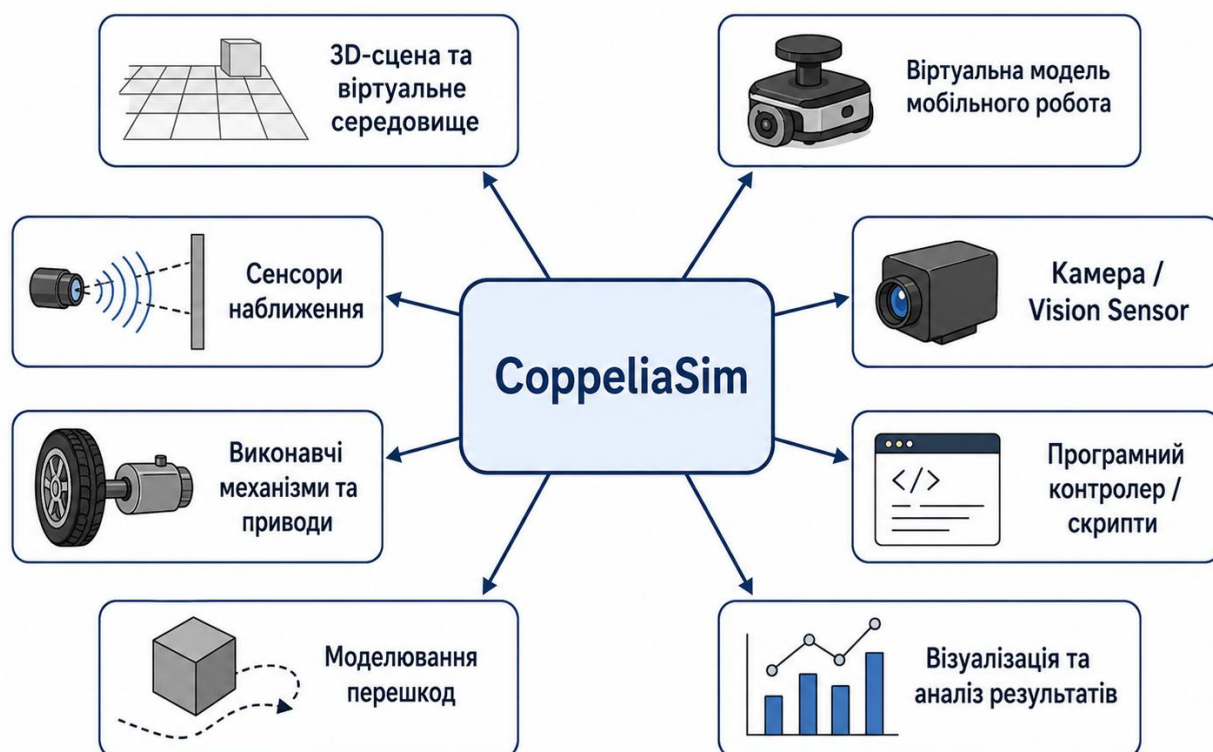


Рисунок 3.2 – Основні можливості CoppeliaSim для моделювання мобільного робота

На рисунку 3.2 відображено такі складові: 3D-сцена, модель мобільного робота, сенсори наближення, камера або vision sensor, двигуни коліс, програмний контролер, перешкоди та блок аналізу результатів. Така схема показує, що CoppeliaSim дає змогу об'єднати в одному середовищі всі основні компоненти, які розглядалися в другому розділі: сенсорний блок, керуючий блок, виконавчі механізми та систему прийняття рішень.

Важливою перевагою CoppeliaSim є можливість програмування поведінки робота. Керування моделлю може здійснюватися за допомогою вбудованих

сценаріїв або зовнішніх програмних інтерфейсів. Це дає змогу реалізувати логіку, подібну до роботи мікроконтролера Arduino UNO R3: зчитування даних із сенсорів, аналіз ситуації, вибір режиму руху та формування команд для двигунів. У моделі Arduino UNO R3 доцільно подати як функціональний керуючий блок, який не відтворюється на рівні внутрішньої електричної схеми, але виконує аналогічну роль у системі керування.

Для розроблюваної системи важливо, що CoppeliaSim дає змогу відтворити диференційне керування колісною платформою. У такій моделі лівий і правий двигуни можуть отримувати різні значення швидкості, завдяки чому робот рухається прямо, повертає або виконує об'їзд перешкоди. Наприклад, якщо обидва двигуни обертаються з однаковою швидкістю, робот рухається вперед. Якщо швидкість одного двигуна зменшується, платформа змінює напрям руху. Якщо один двигун обертається вперед, а інший назад, робот може виконати поворот на місці. Така модель відповідає принципам керування реальними колісними роботизованими платформами.

Порівняно з іншими середовищами, CoppeliaSim має збалансовані можливості для цієї роботи. Proteus доцільний для моделювання електронних схем, але менш придатний для просторової симуляції руху робота. Gazebo є потужним середовищем для робототехніки, однак частіше використовується разом із ROS/ROS 2 і потребує складнішого налаштування. Webots також добре підходить для моделювання роботів, однак CoppeliaSim має зручні засоби роботи з роботизованими сценами, proximity sensors, vision sensors і програмними сценаріями. У дослідженні 2022 року, присвяченому порівнянню CoppeliaSim, Gazebo, MORSE та Webots для моделювання мобільних роботів, зазначено, що за обраними метриками CoppeliaSim показав найкращі результати, хоча Gazebo також визначено як близьку альтернативу [40].

Порівняння середовищ моделювання, які можуть використовуватися для створення мобільного робота, подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння середовищ моделювання для дослідження мобільного робота

Середовище	Основне призначення	Переваги
CoppeliaSim	3D-моделювання роботів, сенсорів, камер і виконавчих механізмів	Підтримка мобільних роботів, proximity sensors, vision sensors, сценаріїв керування
Webots	3D-моделювання роботів і сенсорних систем	Зручна візуалізація, підтримка камер і контролерів
Gazebo	Моделювання роботів у зв'язці з ROS/ROS 2	Потужне середовище для ROS-навігації та SLAM
Proteus	Моделювання електронних схем і мікроконтролерів	Зручний для Arduino-схем і перевірки електричних підключень
Tinkercad Circuits	Початкове моделювання електроніки та Arduino	Простота використання, доступність

Вибір середовища Webots для моделювання мобільного робота є технічно та методично обґрунтованим. Це середовище дає змогу створити віртуальну модель мобільної платформи, налаштувати сенсори й камеру, реалізувати програмний контролер, змоделювати рух у середовищі з перешкодами та оцінити працездатність алгоритму керування. У межах даної кваліфікаційної роботи Webots використовується як інструмент функціонального моделювання мікропроцесорної системи керування мобільним роботом з елементами машинного зору.

3.2 Побудова віртуальної моделі мобільного робота

Побудова віртуальної моделі мобільного робота в середовищі CoppeliaSim є необхідним етапом для подальшої перевірки алгоритму керування, роботи сенсорного блоку та використання камери як елемента машинного зору. На цьому етапі реальна апаратна система подається у вигляді функціональної 3D-моделі, у якій відтворюються основні конструктивні та логічні складові мобільного робота: корпус, колісна база, двигуни, сенсори, камера, керуючий блок і середовище з перешкодами. Такий підхід дає змогу перейти від теоретичного опису апаратної структури до практичної перевірки поведінки робота у віртуальному просторі.

У середовищі CoppeliaSim віртуальна модель мобільного робота створюється як сукупність об'єктів, які мають геометричні, фізичні та функціональні властивості. Корпус робота може бути поданий у вигляді прямокутної платформи, на якій розміщуються колеса, сенсорний блок, камера та умовний керуючий модуль. Колеса моделюються як обертові циліндричні елементи, що з'єднуються з платформою за допомогою обертальних з'єднань. Така структура дає змогу реалізувати диференційне керування, за якого напрям руху робота залежить від співвідношення швидкостей лівих і правих коліс.

Загальну послідовність побудови віртуальної моделі мобільного робота в CoppeliaSim доцільно подати на рисунку 3.3.

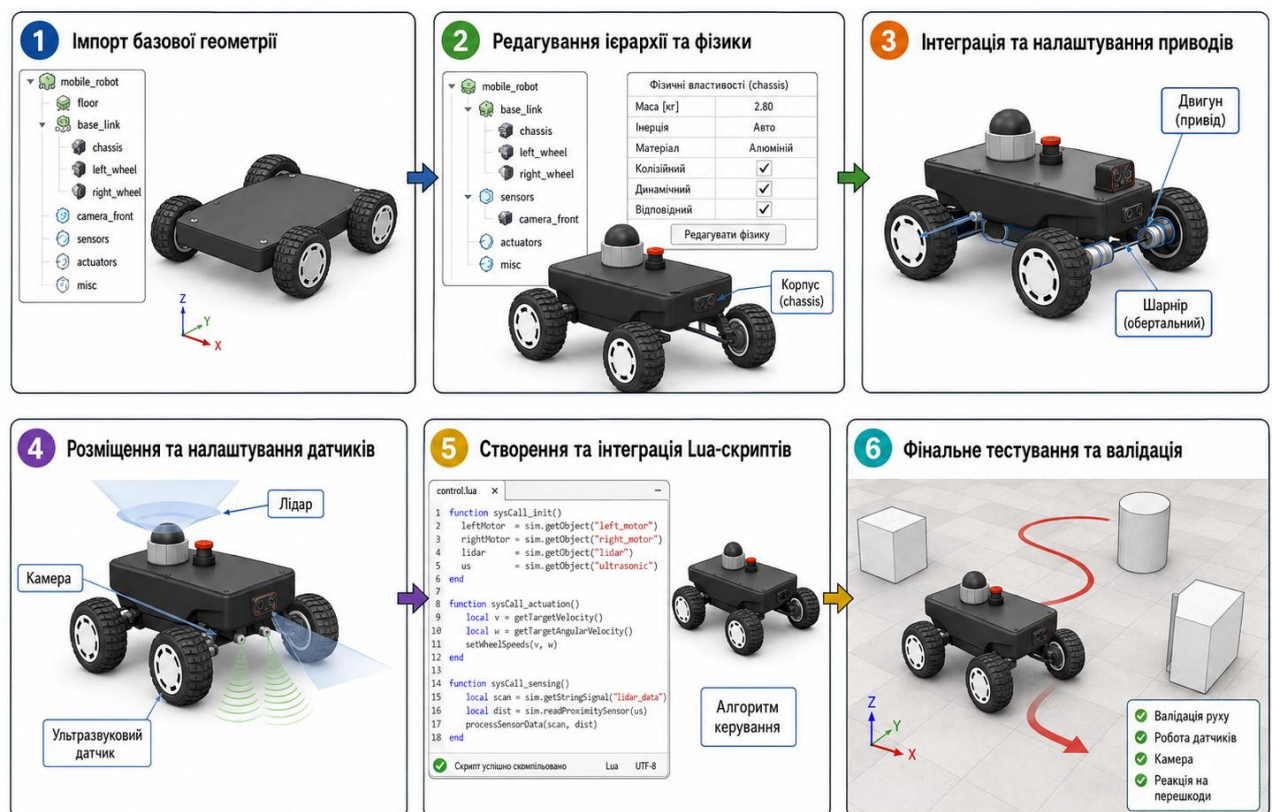


Рисунок 3.3 – Послідовність побудови віртуальної моделі мобільного робота в CoppeliaSim

На рисунку 3.3 представлено основні етапи створення моделі: формування робочої сцени, побудова корпусу, додавання коліс, налаштування приводів, розміщення сенсорів, додавання камери, створення перешкод і підключення

програмного контролера. Така схема допомагає показати, що модель створюється не як окремий графічний об'єкт, а як функціональна система, у якій кожен елемент має конкретне призначення.

Першим етапом побудови моделі є створення робочої сцени. У ній задається площа руху, на якій розміщується мобільний робот, а також об'єкти-перешкоди, що використовуються для перевірки алгоритму орієнтації. Робоча площа імітує поверхню, по якій переміщується реальна колісна платформа. Перешкоди можуть бути представлені у вигляді простих геометричних тіл: кубів, паралелепіпедів або циліндрів. Їх розміщення у сцені дає змогу перевірити, чи здатна система виявляти об'єкти на траєкторії руху та змінювати поведінку відповідно до даних сенсорів.

Другим етапом є створення моделі корпусу мобільного робота. Корпус виконує роль несучої основи, на якій умовно розміщуються всі апаратні компоненти системи. У CoppeliaSim корпус може бути змодельований як прямокутний об'єкт із заданими розмірами, масою та положенням у просторі. Для забезпечення коректної фізичної симуляції важливо задати такі параметри, як центр мас, тип об'єкта, можливість взаємодії з іншими елементами сцени та динамічні властивості. Це дає змогу моделі поводитися більш реалістично під час руху, зіткнення або зміни швидкості.

Третім етапом є додавання колісної бази. Для мобільного робота доцільно використовувати модель із двома або чотирма ведучими колесами. У спрощеній моделі можна реалізувати двоколісну диференційну схему, у якій ліве і праве колесо керуються окремо. У більш наближеному до реальної платформи варіанті можна використати чотири колеса, об'єднавши ліву та праву сторони в окремі групи. Такий підхід дозволяє відтворити базові режими руху: прямолінійний рух, поворот ліворуч, поворот праворуч, зупинку та об'їзд перешкоди.

Структуру віртуальної моделі мобільного робота представлена на рисунку 3.4.

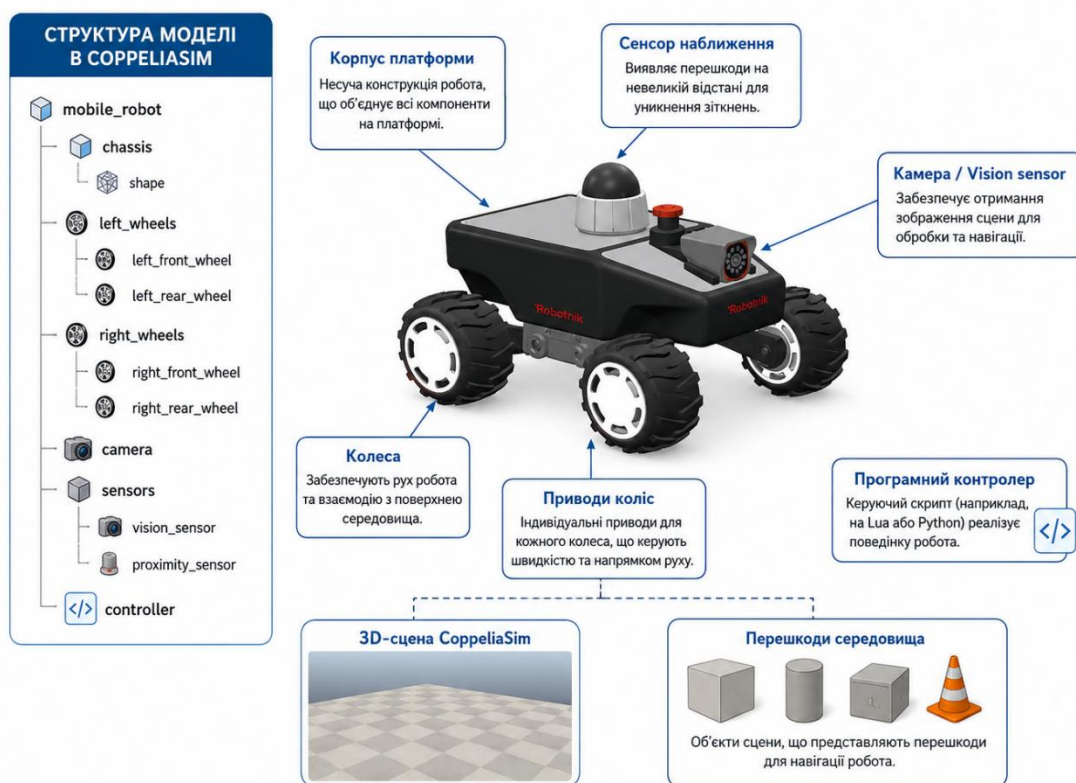


Рисунок 3.4 – Структура віртуальної моделі мобільного робота в середовищі CoppeliaSim

Для імітації роботи сенсорного блоку в CoppeliaSim до моделі додаються сенсори наближення та візуальний сенсор. Сенсор наближення використовується для визначення наявності перешкоди перед мобільним роботом. Його функціональне призначення відповідає роботі ультразвукового датчика, який у реальній системі вимірює відстань до об'єкта. У моделі такий сенсор розміщується в передній частині платформи, щоб він міг фіксувати об'єкти на траєкторії руху. У разі виявлення перешкоди програмний контролер отримує відповідний сигнал і змінює режим руху.

Візуальний сенсор або камера розміщується у передній частині моделі робота. Його призначення полягає в імітації отримання зображення з простору перед роботом. У CoppeliaSim vision sensor може використовуватися для формування зображення сцени, аналізу об'єктів у полі зору або демонстрації роботи елементів машинного зору [39]. У межах цієї роботи камера

застосовується як функціональний аналог реального камерного модуля, що дає змогу оцінити роль візуальної інформації в системі орієнтації мобільного робота.

Керуючий блок у моделі подається як програмний контролер, який виконує логіку мікропроцесорної системи керування. У реальній системі цю роль виконує Arduino UNO R3, що зчитує сигнали сенсорів і формує команди для драйверів двигунів. У CoppeliaSim така логіка реалізується програмним сценарієм, який отримує дані від віртуальних сенсорів, аналізує їх і задає швидкість обертання коліс. Це дозволяє змодельовати поведінку системи без необхідності відтворювати повну електричну схему мікроконтролерної плати.

Основні компоненти віртуальної моделі мобільного робота та їх відповідність реальним апаратним елементам подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Відповідність компонентів реального мобільного робота та його моделі в CoppeliaSim

Компонент реальної системи	Елемент моделі в CoppeliaSim	Функціональне призначення
Корпус мобільного робота	3D-об'єкт платформи	Розміщення основних вузлів і забезпечення механічної основи
Колеса	Циліндричні об'єкти з обертальними з'єднаннями	Забезпечення руху робота
Двигуни постійного струму	Керовані обертальні приводи	Зміна швидкості та напрямку руху
Arduino UNO R3	Програмний контролер	Виконання алгоритму керування
Ультразвуковий датчик	Proximity sensor	Виявлення перешкод перед роботом
Камерний модуль	Vision sensor або камера	Отримання візуальної інформації
Драйвер двигунів	Логіка керування приводами	Передавання команд на колісні приводи
Середовище руху	3D-сцена з площиною та перешкодами	Імітація умов роботи мобільного робота

Як видно з таблиці 3.2, віртуальна модель не копіює кожен електронний компонент на рівні фізичної схеми, а відтворює його функціональне призначення. Такий підхід є доцільним для моделювання поведінки мобільного робота, оскільки основна увага приділяється не внутрішній будові кожного модуля, а їхній взаємодії в процесі руху. Наприклад, Arduino UNO R3 у моделі представлено програмним контролером, але його функція зберігається: отримання даних, прийняття рішення та формування команд керування.

Під час побудови моделі важливо забезпечити ієрархічну організацію об'єктів. Корпус робота виступає базовим елементом, до якого прив'язуються колеса, сенсори, камера та допоміжні вузли. Така структура спрощує переміщення моделі у сцені та забезпечує узгоджене положення всіх компонентів під час руху. Якщо робот змінює положення, разом із ним переміщуються сенсори й камера, що відповідає поведінці реальної мобільної платформи.

Окрему увагу слід приділити налаштуванню фізичних параметрів моделі. Для коректної симуляції необхідно задати розміри платформи, радіус коліс, відстань між колесами, масу об'єктів, тип поверхні та параметри тертя. Ці характеристики впливають на стійкість руху, швидкість переміщення, точність поворотів і поведінку робота під час наближення до перешкод. У спрощеній моделі параметри можуть бути умовними, однак вони повинні зберігати логічну відповідність реальній колісній платформі.

Приклад основних параметрів віртуальної моделі подано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні параметри віртуальної моделі мобільного робота

Параметр моделі	Призначення параметра	Приклад значення для моделювання
Довжина корпусу	Визначає габарити мобільної платформи	0,25 м
Ширина корпусу	Визначає поперечний розмір платформи	0,18 м
Висота корпусу	Визначає висоту розміщення компонентів	0,05 м
Радіус колеса	Впливає на швидкість переміщення	0,03 м
Відстань між лівим і правим колесом	Впливає на радіус повороту	0,16 м
Кількість сенсорів наближення	Визначає зону контролю перешкод	1-3
Положення камери	Визначає напрям візуального огляду	Передня частина платформи
Тип керування	Визначає спосіб руху робота	Диференційне керування

Значення, наведені в таблиці 3.3, можуть бути уточнені відповідно до фактичних параметрів використовуваної апаратної платформи або прийняті як умовні для функціонального моделювання. Головною вимогою є збереження логіки роботи системи: робот повинен мати керовану колісну базу, сенсорне сприйняття середовища, камеру та програмний алгоритм прийняття рішень.

Загальну відповідність між етапами побудови моделі та функціями системи керування доцільно подати на рисунку 3.5.

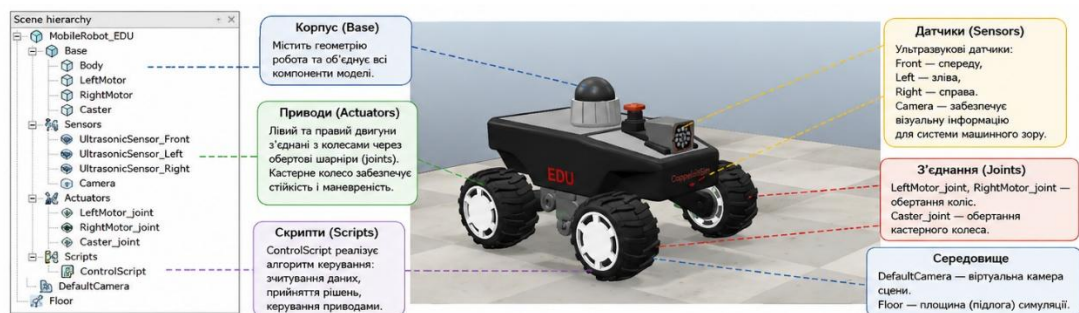


Рисунок 3.4 – Структура віртуальної моделі мобільного робота в середовищі CoppeliaSim



Рисунок 3.5 – Взаємозв'язок етапів побудови моделі та функцій системи керування

Після створення віртуальної моделі її можна використовувати для подальших етапів дослідження: налаштування сенсорів, розроблення алгоритму руху, моделювання роботи камери, перевірки реакції на перешкоди та аналізу результатів. Важливо, що така модель дозволяє багаторазово змінювати умови експерименту без ризику пошкодження реальних компонентів. Наприклад, можна змінювати відстань до перешкод, положення об'єктів, швидкість руху, кількість сенсорів або параметри алгоритму керування.

Побудова віртуальної моделі мобільного робота в CoppeliaSim дає змогу створити функціональний цифровий аналог реальної апаратно-програмної системи. У моделі відтворюються основні компоненти мобільного робота: механічна платформа, колісна база, сенсори, камера, приводи та програмний контролер. Такий підхід забезпечує можливість подальшого моделювання руху, перевірки алгоритмів керування, аналізу роботи сенсорного блоку та дослідження використання камери як елемента машинного зору.

3.3 Налаштування сенсорів, камери та виконавчих механізмів

Після побудови віртуальної моделі мобільного робота в середовищі CoppeliaSim необхідно виконати налаштування сенсорів, камери та виконавчих механізмів. Цей етап є важливим, оскільки саме від правильного розміщення та параметризації сенсорних і виконавчих елементів залежить коректність подальшого моделювання. Якщо корпус і колісна база формують механічну основу робота, то сенсори забезпечують отримання інформації про середовище, камера створює візуальний канал сприйняття, а виконавчі механізми реалізують фізичний рух платформи.

У межах моделювання сенсорний блок доцільно подати у вигляді кількох функціональних елементів: сенсора наближення, візуального сенсора або камери, а також допоміжних датчиків положення чи орієнтації. Сенсор наближення у CoppeliaSim може використовуватися як функціональний аналог ультразвукового датчика, який у реальній апаратній системі визначає наявність перешкоди перед роботом. У середовищі CoppeliaSim для таких задач використовуються proximity sensors, які мають параметри зони виявлення, дальності спрацювання, кута виявлення та об'єктів, що можуть бути зафіксовані сенсором [41].

Сенсор наближення доцільно розмістити в передній частині мобільного робота, оскільки саме ця зона є основною для контролю перешкод під час руху вперед. Його напрям має збігатися з напрямом руху платформи, а дальність виявлення повинна відповідати умовам моделювання. Якщо дальність буде занадто малою, робот не встигатиме реагувати на перешкоду; якщо надмірно великою, система може реагувати на об'єкти, які фактично не заважають руху. Тому в моделі доцільно встановити умовний діапазон виявлення, достатній для своєчасної зупинки або повороту робота.

Розміщення сенсорів на віртуальній моделі мобільного робота доцільно подати на рисунку 3.6.

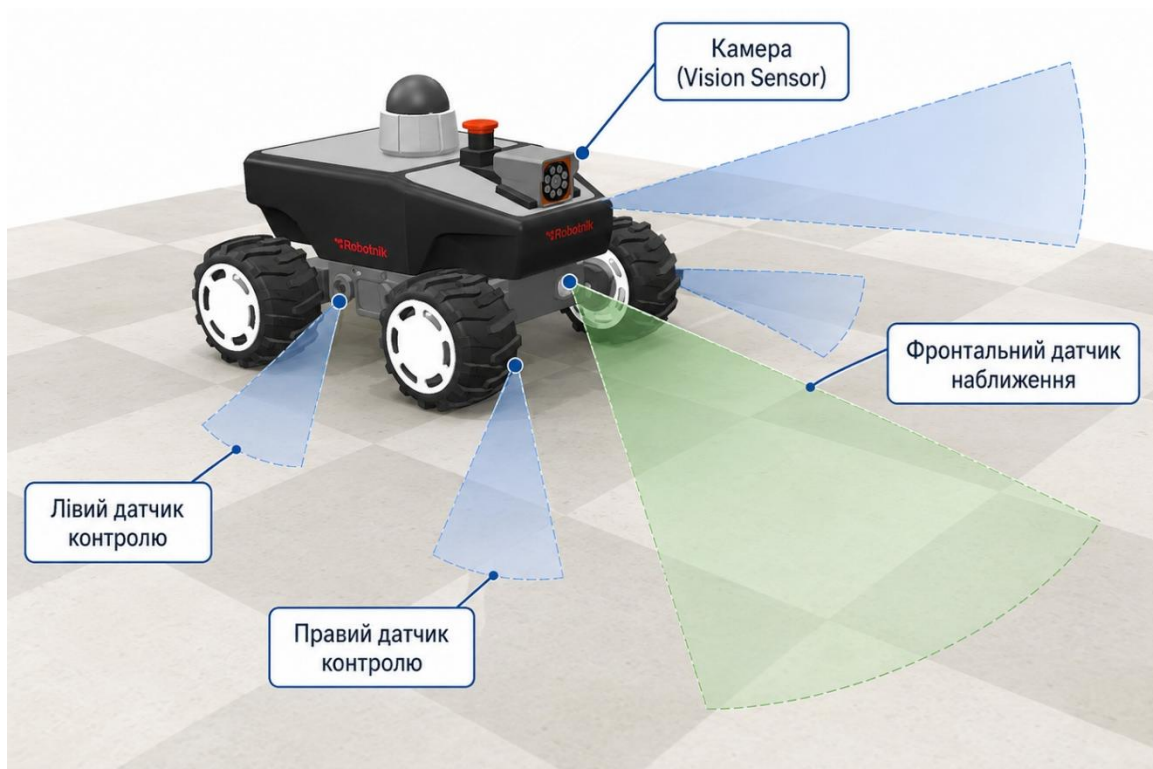


Рисунок 3.6 – Розміщення сенсорів на віртуальній моделі мобільного робота в CoppeliaSim

Візуальний сенсор або камера в моделі використовується для імітації елементів машинного зору. У CoppeliaSim vision sensors працюють подібно до камер і можуть застосовуватися для отримання зображення сцени, аналізу кольору, освітлення, структури об'єктів або їх положення у полі зору [39]. Такий сенсор доцільно розмістити у верхній або передній частині мобільної платформи, щоб він був спрямований у бік руху робота. Це забезпечує огляд простору перед платформою та дозволяє формувати візуальну інформацію для подальшого аналізу.

Під час налаштування камери важливо визначити її положення, кут огляду, напрям спостереження та роздільну здатність зображення. У спрощеній моделі камера може використовуватися для візуального контролю сцени та виявлення об'єктів у полі зору. Для цього доцільно розмістити в середовищі кольорові об'єкти-перешкоди, які камера може фіксувати під час руху робота. Наприклад, якщо перед роботом розташовано об'єкт контрастного кольору, візуальний

сенсор може бути використаний для демонстрації принципу виявлення перешкоди або орієнтира.

Схему використання камери в моделі мобільного робота подано на рисунку 3.7.

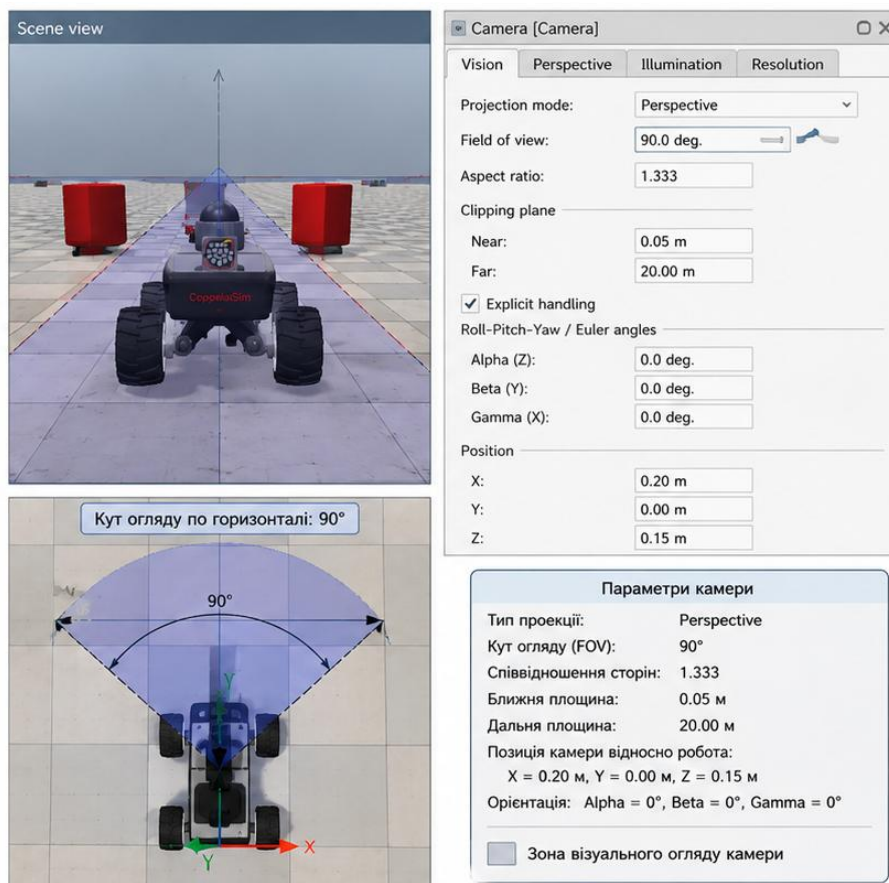


Рисунок 3.7 – Налаштування камери та зони візуального огляду мобільного робота

Виконавчі механізми мобільного робота представлені колісними приводами. У CorreliaSim рух коліс реалізується через обертальні з'єднання, для яких задаються режими керування та цільові параметри руху. У документації CorreliaSim зазначено, що динамічні joints можуть мати різні режими керування, зокрема velocity і position, а також можуть керуватися через цільову швидкість або цільове положення [40]. Для мобільного робота найбільш доцільним є режим керування швидкістю, оскільки рух платформи визначається швидкістю обертання лівого та правого коліс.

Диференційне керування виконавчими механізмами передбачає, що ліві та праві колеса можуть отримувати різні значення швидкості. Якщо швидкість лівого та правого колеса однакова, робот рухається прямо. Якщо швидкість одного колеса зменшується, робот повертає у відповідний бік. Якщо одне колесо обертається вперед, а інше назад, платформа може виконати розворот на місці. Такий спосіб керування є зручним для моделювання, оскільки дає змогу реалізувати всі базові режими руху без складної механічної конструкції.

Основні параметри налаштування сенсорів, камери та виконавчих механізмів подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри налаштування сенсорів, камери та виконавчих механізмів у CoppeliaSim

Елемент моделі	Основні параметри налаштування	Функціональне призначення
Proximity sensor	Положення, напрям виявлення, дальність, кут огляду, об'єкти для виявлення	Виявлення перешкод перед роботом
Vision sensor	Положення, напрям огляду, поле зору, роздільна здатність, параметри зображення	Отримання візуальної інформації
Лівий колісний привід	Режим керування швидкістю, цільова швидкість, напрям обертання	Забезпечення руху лівої сторони платформи
Правий колісний привід	Режим керування швидкістю, цільова швидкість, напрям обертання	Забезпечення руху правої сторони платформи
Програмний контролер	Зчитування сенсорних даних, аналіз умов, формування команд	Керування поведінкою мобільного робота
Об'єкти-перешкоди	Геометрія, положення, розмір, властивість виявлення	Створення умов для тестування алгоритму

З таблиці 3.4 видно, що налаштування моделі охоплює як сенсорну, так і виконавчу частину. Сенсори формують вхідні дані, контролер аналізує їх, а колісні приводи реалізують відповідну реакцію системи. Саме така взаємодія відповідає принципу роботи реальної мікропроцесорної системи керування, у якій Arduino UNO R3 отримує дані від сенсорів і формує керуючі сигнали для драйверів двигунів.

Для забезпечення коректної роботи моделі необхідно налаштувати не лише окремі компоненти, а й логічні зв'язки між ними. Сенсор наближення повинен передавати контролеру інформацію про наявність перешкоди. Камера повинна

формувати візуальні дані або забезпечувати спостереження за сценою. Колісні приводи повинні реагувати на команди контролера та змінювати швидкість відповідно до заданого алгоритму. Усі ці компоненти повинні бути закріплені в ієрархії моделі так, щоб під час руху робота вони переміщувалися разом із корпусом.

У моделі доцільно передбачити кілька режимів роботи виконавчих механізмів. Перший режим – рух прямо, коли обидва колісні приводи мають однакову швидкість. Другий режим – поворот, коли швидкість одного з приводів зменшується або змінює напрям. Третій режим – зупинка, коли обидва приводи отримують нульову швидкість. Четвертий режим – об’їзд перешкоди, коли після виявлення об’єкта робот тимчасово змінює напрям руху, а потім продовжує рух по новій траєкторії. Такі режими є достатніми для перевірки базової логіки керування мобільною платформою.

Під час налаштування сенсорів і виконавчих механізмів також потрібно врахувати часовий крок симуляції. Якщо контролер зчитує дані занадто рідко, робот може не встигнути відреагувати на перешкоду. Якщо ж обробка виконується надто часто без належної фільтрації, модель може демонструвати нестабільну поведінку через різкі зміни команд. Тому в алгоритмі доцільно передбачити періодичне зчитування сенсорів, перевірку умов і плавну зміну швидкості коліс.

Налаштування сенсорів, камери та виконавчих механізмів у CoppeliaSim забезпечує функціональну готовність віртуальної моделі до подальшого моделювання. Сенсор наближення використовується для виявлення перешкод, камера - для отримання візуальної інформації та реалізації елементів машинного зору, а колісні приводи - для виконання команд руху. Узгоджена робота цих компонентів дозволяє перевірити логіку керування мобільним роботом, оцінити реакцію системи на зміну умов середовища та перейти до розроблення програмного алгоритму руху.

3.4 Розробка алгоритму керування рухом мобільного робота

Розробка алгоритму керування рухом мобільного робота є одним із ключових етапів моделювання системи, оскільки саме алгоритм визначає порядок зчитування даних із сенсорів, аналізу навколишнього середовища, прийняття керуючих рішень і формування команд для виконавчих механізмів. У межах цієї роботи алгоритм керування розглядається як функціональний аналог програмної логіки, яка в реальній апаратній системі може виконуватися мікроконтролером Arduino UNO R3, а в середовищі CoppeliaSim реалізується через програмний контролер моделі.

Основна ідея алгоритму полягає в тому, що мобільний робот повинен рухатися вперед за відсутності перешкод, зчитувати дані із сенсора наближення, контролювати зону перед собою за допомогою камери або візуального сенсора, а у разі виявлення об'єкта на траєкторії - змінювати режим руху. Такий підхід відповідає принципу замкненого керування, коли поведінка робота формується не лише за наперед заданою командою, а й на основі поточного стану середовища.

У структурі алгоритму можна виділити кілька основних етапів: ініціалізацію моделі, зчитування сенсорних даних, аналіз відстані до перешкоди, отримання візуальної інформації, вибір режиму руху, формування команд для приводів коліс і повторення циклу керування. Така послідовність забезпечує безперервну реакцію робота на зміну умов середовища. Загальну логіку алгоритму керування рухом мобільного робота доцільно подати на рисунку 3.8.

На першому етапі алгоритму виконується ініціалізація основних елементів моделі. Програмний контролер отримує доступ до об'єктів робота: лівого та правого колісних приводів, сенсора наближення, візуального сенсора або камери. Після цього задаються початкові параметри руху: базова швидкість, швидкість повороту, порогова відстань до перешкоди та початковий режим роботи. У середовищі CoppeliaSim такі параметри використовуються для керування обертальними з'єднаннями, які імітують роботу двигунів мобільної платформи.

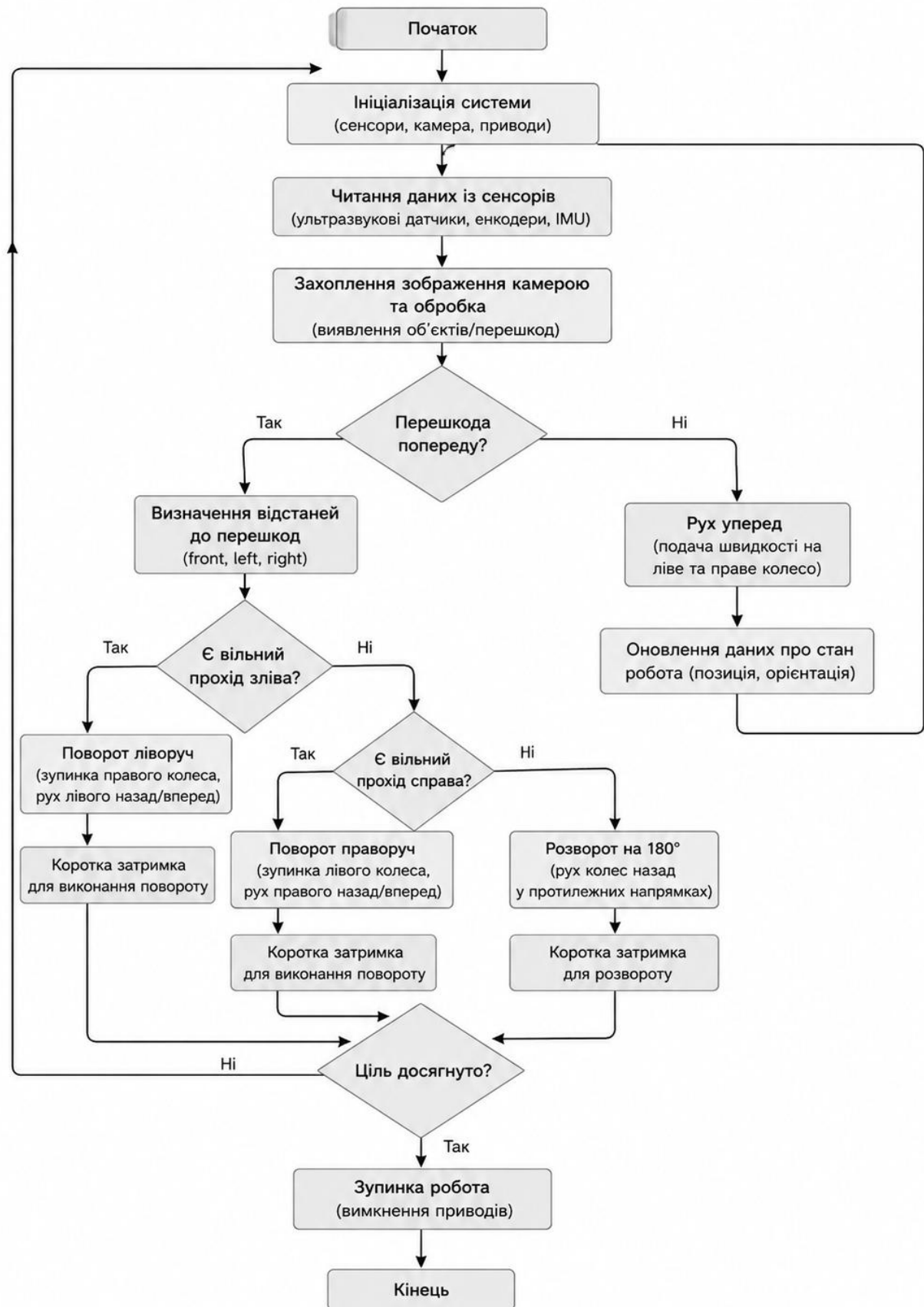


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритму керування рухом мобільного робота

Другим етапом є зчитування даних із сенсорного блоку. Сенсор наближення визначає, чи є перед роботом об'єкт, який може перешкоджати руху. Якщо перешкода не виявлена або розташована на безпечній відстані, робот продовжує рухатися вперед. Якщо ж сенсор фіксує об'єкт у межах заданої зони виявлення, алгоритм переходить до режиму уникнення перешкоди. Така логіка імітує роботу реального ультразвукового датчика, який у фізичній системі може використовуватися для визначення відстані до об'єктів перед роботом.

Третім етапом є використання камери або візуального сенсора. У моделі камера може виконувати функцію візуального контролю середовища та формувати зображення простору перед роботом. У спрощеному варіанті алгоритм не виконує складного розпізнавання об'єктів, а використовує камеру як джерело візуальної інформації для підтвердження наявності перешкод або орієнтирів. У складнішій реалізації зображення може аналізуватися за кольором, контрастом або положенням об'єкта в кадрі. Візуальні сенсори CoppeliaSim можуть застосовуватися для отримання зображень сцени та аналізу властивостей об'єктів у полі зору [39].

Режими роботи алгоритму керування подано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Режими роботи алгоритму керування мобільним роботом

Режим роботи	Умова активації	Дія системи керування	Очікуваний результат
Ініціалізація	Запуск моделі	Налаштування сенсорів, камери та приводів	Система готова до руху
Рух вперед	Перешкоди не виявлено	Лівий і правий приводи працюють з однаковою швидкістю	Робот рухається прямо
Зменшення швидкості	Перешкода виявлена на середній відстані	Швидкість приводів зменшується	Робот готується до маневру
Зупинка	Перешкода розташована близько	Швидкість обох приводів дорівнює нулю	Робот припиняє рух
Поворот	Потрібно змінити напрям руху	Лівий і правий приводи отримують різні швидкості	Робот повертає
Об'їзд перешкоди	Перешкода на траєкторії руху	Робот виконує поворот і рухається новою траєкторією	Перешкоду обійдено
Продовження руху	Шлях знову вільний	Відновлюється рух вперед	Робот продовжує маршрут

Розроблений алгоритм є достатнім для моделювання базової поведінки мобільного робота з елементами машинного зору. Його перевагою є простота реалізації, зрозуміла логіка роботи та можливість подальшого розширення. Наприклад, у майбутньому до алгоритму можна додати розпізнавання кольорових об'єктів, слідування за візуальним маркером, збереження траєкторії руху або побудову карти середовища. Однак у межах цієї роботи основний акцент зроблено на перевірці базових режимів руху, реакції на перешкоди та використанні камери як джерела візуальної інформації.

Алгоритм керування рухом мобільного робота побудовано за принципом циклічного зчитування даних, аналізу стану середовища та формування команд для виконавчих механізмів. Сенсор наближення забезпечує виявлення перешкод, камера доповнює систему візуальними даними, а програмний контролер визначає режим руху мобільної платформи. Така логіка відповідає принципам побудови мікропроцесорних систем керування та є придатною для моделювання роботи мобільного робота в середовищі CoppeliaSim.

3.5 Моделювання роботи камери та елементів машинного зору

Моделювання роботи камери є важливим етапом дослідження системи керування мобільним роботом, оскільки саме камера забезпечує отримання візуальної інформації про навколишнє середовище. На відміну від сенсора наближення, який фіксує лише факт наявності перешкоди або відстань до неї, камера дає змогу аналізувати просторову сцену, форму об'єктів, їх колір, положення в полі зору та відносне розташування перед роботом. Тому в моделі CoppeliaSim камера розглядається як елемент машинного зору, що доповнює сенсорний блок і підвищує інформативність системи керування.

У середовищі CoppeliaSim для моделювання камери доцільно використовувати vision sensor. За офіційною документацією, vision sensor має фіксовану роздільну здатність, дає змогу отримувати зображення через API та може бути використаний для обробки зображень за допомогою відповідних

callback-функцій [39]. Це відрізняє vision sensor від звичайної камери, яка використовується переважно для перегляду сцени й не завжди надає прямий доступ до вмісту зображення через API [39]. Отже, для задач машинного зору в моделі мобільного робота доцільно використовувати саме vision sensor, оскільки він дозволяє не лише візуалізувати середовище, а й отримувати дані для подальшого аналізу.

Загальну схему використання камери в моделі мобільного робота подано на рисунку 3.9.

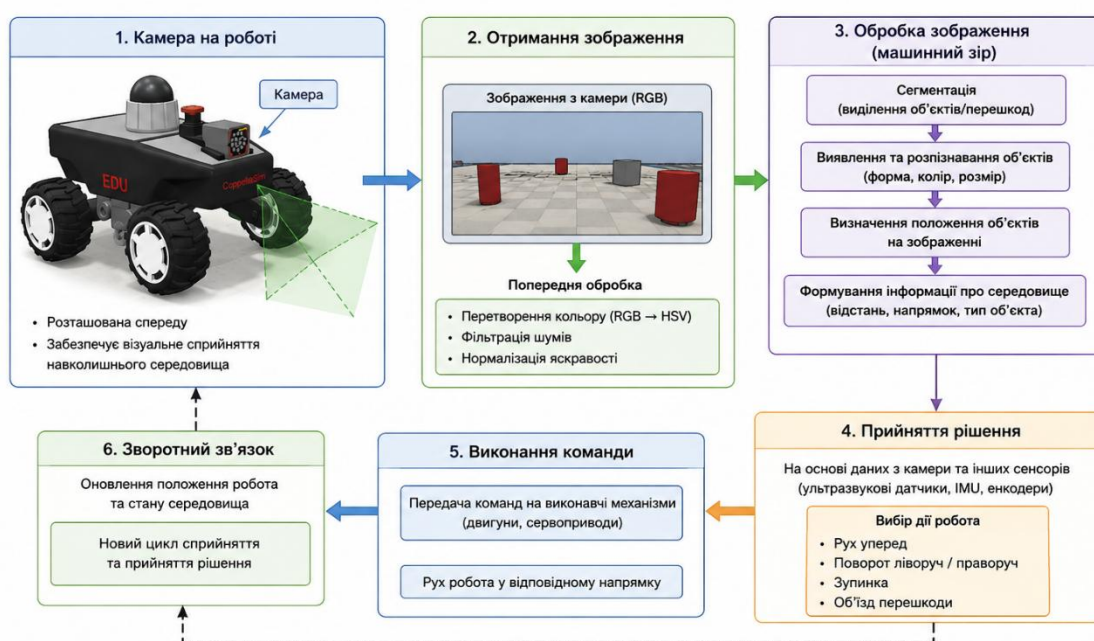


Рисунок 3.9 – Схема використання камери в моделі мобільного робота з елементами машинного зору

У моделі мобільного робота камера розміщується в передній частині платформи та спрямовується в напрямі руху. Таке розташування є найбільш доцільним, оскільки дозволяє контролювати простір перед роботом, фіксувати перешкоди та візуальні орієнтири ще до моменту наближення до них. Для коректної роботи камери необхідно налаштувати її положення, напрям огляду, кут поля зору, роздільну здатність і параметри сцени. Якщо камера розташована занадто низько, поле огляду буде обмеженим; якщо занадто високо - зображення

може втратити деталізацію об'єктів перед роботом. Тому оптимальним є фронтальне розміщення камери з невеликим нахилом у напрямі руху.

Основні параметри моделювання камери подано в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Параметри моделювання камери в середовищі CoppeliaSim

Параметр	Призначення	Значення для моделі
Тип візуального модуля	Визначає спосіб отримання зображення	Vision sensor
Розташування	Визначає зону огляду	Передня частина платформи
Напрямок огляду	Формує область спостереження	У напрямі руху робота
Поле зору	Визначає ширину контрольованої зони	Достатнє для виявлення перешкод попереду
Роздільна здатність	Впливає на деталізацію зображення	Середнє значення для зменшення навантаження
Об'єкти в сцені	Використовуються для перевірки роботи камери	Куби, циліндри, кольорові маркери
Результат обробки	Дані, які використовуються контролером	Наявність об'єкта, колір, положення в кадрі

Як видно з таблиці 3.7, моделювання камери передбачає не лише її додавання до 3D-сцени, а й налаштування параметрів, які впливають на якість отриманих візуальних даних. Для цієї роботи достатньо реалізувати базову модель машинного зору, у якій камера визначає наявність об'єкта в полі зору та передає результат до алгоритму керування.

Елементи машинного зору в моделі можуть бути реалізовані через просту обробку зображення. Найбільш доступним підходом є виявлення об'єктів за кольором або контрастом. Для цього у віртуальному середовищі розміщуються об'єкти різного кольору, наприклад червоний куб або синій циліндр. Камера отримує зображення сцени, після чого програма аналізує наявність пікселів заданого кольорового діапазону. Якщо кількість таких пікселів перевищує встановлений поріг, система робить висновок, що об'єкт виявлено.

У задачах комп'ютерного зору для поділу зображення на об'єкт і фон часто застосовується порогова обробка. У документації OpenCV зазначено, що під час thresholding значення пікселя порівнюється з порогом: якщо воно більше або менше заданого значення, пікселю присвоюється одне з двох значень, що дає змогу отримати бінарне зображення [44]. Такий підхід є зручним для спрощеної

моделі машинного зору, оскільки дозволяє виявляти контрастні або кольорові об'єкти без використання складних нейронних мереж.

Після виявлення об'єкта важливо не лише зафіксувати його наявність, а й оцінити його положення в кадрі. Якщо об'єкт розташований у центральній частині зображення, робот може зменшити швидкість або зупинитися. Якщо об'єкт зміщений ліворуч, система може сформувати команду повороту праворуч. Якщо об'єкт зміщений праворуч, робот може повернути ліворуч. Такий підхід дозволяє використати камеру як джерело навігаційної інформації, а не лише як засіб візуального спостереження.

Логіку прийняття рішення на основі зображення з камери подано в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Реакція системи керування на результати аналізу зображення

Результат аналізу зображення	Інтерпретація ситуації	Рішення контролера	Команда для робота
Об'єкт не виявлено	Простір перед роботом вільний	Продовжити рух	Рух прямо
Об'єкт у центрі кадру	Перешкода або орієнтир перед роботом	Зменшити швидкість або зупинитися	Гальмування / зупинка
Об'єкт ліворуч у кадрі	Перешкода зміщена ліворуч	Обрати правий напрям обходу	Поворот праворуч
Об'єкт праворуч у кадрі	Перешкода зміщена праворуч	Обрати лівий напрям обходу	Поворот ліворуч
Об'єкт займає значну частину кадру	Робот наблизився до об'єкта	Увімкнути режим уникнення перешкоди	Зупинка та маневр
Зображення нестабільне	Можлива зміна освітлення або шум	Використати дані сенсора наближення	Перевірка за додатковим сенсором

У процесі моделювання роботи камери можна передбачити кілька експериментальних сценаріїв. Перший сценарій – об'єкт відсутній у полі зору, і робот продовжує рух уперед. Другий сценарій – об'єкт з'являється в центрі кадру, після чого робот зупиняється або змінює напрям. Третій сценарій – об'єкт знаходиться ліворуч або праворуч, і система обирає напрям обходу. Четвертий сценарій – дані камери підтверджуються сенсором наближення, що підвищує надійність реакції системи.

Практичне значення такого моделювання полягає в тому, що воно дозволяє перевірити роль камери в системі керування без фізичного ризику для апаратних компонентів. У середовищі CoppeliaSim можна змінювати розташування об'єктів, їх колір, форму, відстань до робота та умови огляду. Це створює можливість багаторазово перевіряти алгоритм і вдосконалювати його до використання в реальній системі.

Моделювання роботи камери та елементів машинного зору в CoppeliaSim дає змогу дослідити візуальний канал сприйняття мобільного робота. Vision sensor використовується для отримання зображення сцени, елементи обробки зображення дозволяють виявляти об'єкти за кольором або положенням, а результати аналізу передаються до контролера для формування команд руху. Поєднання камери із сенсором наближення підвищує надійність орієнтації робота в середовищі та створює основу для реалізації простих алгоритмів машинного зору.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено та досліджено мікропроцесорну систему керування мобільним роботом з елементами машинного зору. У процесі виконання поставленої мети було послідовно розглянуто теоретичні, апаратні та програмно-модельні аспекти побудови мобільної роботизованої платформи, здатної отримувати інформацію про навколишнє середовище, аналізувати її та формувати керуючі дії для виконання руху.

Проаналізовано класифікацію, принципи побудови та сфери застосування мобільних робототехнічних комплексів. Встановлено, що мобільні роботи можуть класифікуватися за середовищем функціонування, типом ходової частини, рівнем автономності, призначенням і способом керування. Найбільш придатними для реалізації навчально-дослідницьких завдань є наземні колісні мобільні платформи, оскільки вони мають відносно просту конструкцію, достатню маневреність, доступну компонентну базу та зручні можливості для програмування. Такі системи можуть використовуватися в освіті, логістиці, промисловості, моніторингу, охоронних системах і дослідницькій діяльності.

Розглянуто методи та алгоритми машинного зору, які можуть застосовуватися для навігації мобільних роботів. Визначено, що машинний зір розширює можливості сенсорного сприйняття, оскільки камера дає змогу отримувати візуальну інформацію про об'єкти, перешкоди, орієнтири та простір перед роботом. До основних методів, придатних для таких систем, належать попередня обробка зображень, сегментація, виявлення контурів, аналіз кольору, визначення положення об'єкта в кадрі та поєднання візуальних даних із показниками інших сенсорів. Для розроблюваної системи найбільш доцільним є використання спрощених підходів машинного зору, які не потребують значних обчислювальних ресурсів і можуть бути реалізовані в поєднанні з мікроконтролерною системою керування.

Досліджено основні принципи побудови мікропроцесорних систем керування мобільними роботами. Встановлено, що така система повинна містити

керуючий блок, сенсорну підсистему, виконавчі механізми, драйвери двигунів, систему живлення та програмний алгоритм керування. Центральним елементом системи є мікроконтролер або мікропроцесорний модуль, який приймає сигнали від сенсорів, обробляє їх і формує команди для руху. Важливими принципами побудови є модульність, наявність зворотного зв'язку, розділення логічної та силової частин, узгодження апаратного й програмного забезпечення, а також урахування обмежень обчислювальної платформи.

Обґрунтовано вибір апаратних компонентів для реалізації мобільної роботизованої платформи. Для побудови системи доцільно використовувати Arduino UNO R3 як центральний мікроконтролерний модуль, сенсорний блок для отримання інформації про середовище, драйвер двигунів для керування виконавчими механізмами, колісну платформу для забезпечення руху та камеру як елемент машинного зору. Arduino UNO R3 є придатною платформою для реалізації базових алгоритмів керування, оскільки має достатню кількість цифрових і аналогових входів-виходів, підтримує PWM-сигнали та програмується в середовищі Arduino IDE. Водночас встановлено, що складну обробку зображень доцільно виконувати за допомогою окремого модуля або зовнішнього програмного середовища, оскільки ресурси Arduino UNO R3 є обмеженими для повноцінної відеообробки.

Розроблено структурну та принципову схеми мікропроцесорної системи керування мобільним роботом. У структурній схемі визначено взаємозв'язок між сенсорним блоком, камерою, мікроконтролером, драйвером двигунів, виконавчими механізмами, системою живлення та програмним алгоритмом. Принципова схема дала змогу деталізувати логіку підключення основних компонентів, зокрема сенсорів, камери, двигунів, драйвера та керуючого модуля. Особливу увагу приділено правильному розподілу функцій між керуючою і силовою частинами, оскільки мікроконтролер формує лише логічні сигнали, а силове керування двигунами виконується через драйвер.

Описано програмну логіку роботи системи керування та взаємодію її основних компонентів. Алгоритм роботи системи передбачає ініціалізацію

компонентів, зчитування даних із сенсорів, отримання візуальної інформації з камери, аналіз стану середовища, вибір режиму руху та формування команд для двигунів. Основними режимами роботи мобільного робота є рух уперед, зупинка, поворот, об'їзд перешкоди та продовження руху після зміни траєкторії. Така логіка відповідає принципам замкненого керування, коли поведінка робота визначається не лише наперед заданою програмою, а й поточними даними від сенсорів і камери.

Проведено моделювання роботи мобільного робота в середовищі CoppeliaSim. Це середовище обрано як доцільний інструмент для перевірки поведінки мобільної платформи, оскільки воно дозволяє створити віртуальну модель робота, налаштувати сенсори, камеру, колісні приводи, перешкоди та програмний контролер. У межах моделювання перевірено логіку руху, реакцію системи на перешкоди, роботу сенсорного блоку та використання камери як джерела візуальної інформації. Отримані результати підтвердили працездатність запропонованої структури та доцільність використання обраного підходу для реалізації мобільного робота з елементами машинного зору.

Розроблена система поєднує мікроконтролерне керування, сенсорне сприйняття, виконавчі механізми та елементи машинного зору. Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальшого вдосконалення мобільної роботизованої платформи, зокрема шляхом додавання складніших алгоритмів комп'ютерного зору, розпізнавання об'єктів, автономного планування маршруту або інтеграції з більш продуктивними обчислювальними модулями.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Arduino. Arduino UNO Rev3 Documentation. *Arduino Documentation*. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3> (date of access: 26.01.2026).
2. Arduino. Arduino UNO R3 Datasheet. *Arduino Documentation*. URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf> (date of access: 26.01.2026).
3. Arduino. Arduino IDE Documentation. *Arduino Documentation*. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide/> (date of access: 26.01.2026).
4. ATmega328P Datasheet. *Microchip Technology*. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf (date of access: 26.01.2026).
5. Smart Robot Car Kit V4.0 With Camera. *ELEGOO Official Website*. URL: <https://www.elegoo.com/products/elegoo-smart-robot-car-kit-v-4-0> (date of access: 26.05.2026).
6. ELEGOO Smart Robot Car Kit V4.0 Tutorial. *ELEGOO Official Website*. URL: <https://www.elegoo.com/blogs/arduino-projects/elegoo-smart-robot-car-kit-v4-0-tutorial> (date of access: 26.01.2026).
7. Smart Robot Car V4.0 with Camera: Upload Code to the Camera Module. *ELEGOO Official Website*. URL: <https://www.elegoo.com/blogs/learn/elegoo-smart-robot-car-v4-0-with-camera-upload-code-to-the-camera-module> (date of access: 26.01.2026).
8. HC-SR04 Ultrasonic Ranging Module Datasheet. *SparkFun Electronics*. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf> (date of access: 26.01.2026).
9. TCRT5000 Reflective Optical Sensor with Transistor Output. Datasheet. *Vishay Semiconductors*. URL: <https://www.vishay.com/docs/83760/tcrt5000.pdf> (date of access: 26.01.2026).

10. OV2640 CameraChip Sensor Datasheet. *OmniVision Technologies*. URL: https://www.uctronics.com/download/cam_module/OV2640DS.pdf (date of access: 26.01.2026).
11. CMOS OV2640 Camera Module Datasheet. *Arducam*. URL: https://blog.arducam.com/downloads/modules/OV2640/1Inch4_2_Megapixel_OV2640_CMOS_Camera_Module_REVB_DS.pdf (date of access: 26.02.2026).
12. CoppeliaSim: Robot Simulator. *Coppelia Robotics Official Website*. URL: <https://www.coppeliarobotics.com/> (date of access: 26.02.2026).
13. Vision Sensors. *CoppeliaSim User Manual*. URL: <https://manual.coppeliarobotics.com/en/visionSensors.htm> (date of access: 26.02.2026).
14. Proximity Sensors. *CoppeliaSim User Manual*. URL: <https://manual.coppeliarobotics.com/en/proximitySensors.htm> (date of access: 26.02.2026).
15. Building a Clean Model Tutorial. *CoppeliaSim User Manual*. URL: <https://manual.coppeliarobotics.com/en/buildingAModelTutorial.htm> (date of access: 26.02.2026).
16. How to Pick a Mobile Robot Simulator: A Quantitative Comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a Focus on Accuracy of Motion. *Robotics and Autonomous Systems*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X22001046> (date of access: 26.02.2026).
17. Mobile Robot Navigation Based on Embedded Computer Vision. *Mathematics*. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/11/2561> (date of access: 26.02.2026).
18. A Review of Visual SLAM for Robotics: Evolution, Properties, and Future Applications. *Frontiers in Robotics and AI*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11056647/> (date of access: 26.02.2026).
19. Research on Robot Path Planning Based on Visual SLAM. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2404.14077> (date of access: 26.03.2026).

20. Enhanced Visual SLAM for Mobile Robots in Indoor Dynamic Scenes. *Electronics*. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/23/4592> (date of access: 26.03.2026).
21. Mobile Robot Obstacle Detection and Avoidance with NAV-YOLO. *Cranfield University*. URL: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/items/5e9eb087-ae41-4715-9dc9-d9ab00db0fe2> (date of access: 26.03.2026).
22. Survey on Autonomous Navigation for Mobile Robots: From Traditional Techniques to Deep Learning and Large Language Models. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44443-025-00216-x> (date of access: 26.03.2026).
23. Path Planning Trends for Autonomous Mobile Robot Navigation. *Sensors*. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/4/1206> (date of access: 26.05.2026).
24. Vision-Based Navigation and Perception for Autonomous Systems. *Applied System Innovation*. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4117/6/7/153> (date of access: 26.03.2026).
25. Visual-Based Obstacle Avoidance Method Using Advanced CNN for Mobile Robots. *Internet of Things*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2542660525000514> (date of access: 26.03.2026).
26. Obstacle Avoidance Technique for Mobile Robots at Human-Robot Collaborative. *Tasks. Sensors*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12031456/> (Date of access: 26.03.2026).
27. Negative Obstacle Detection and Avoidance Using YOLOv8 and Depth Validation. *Discover Applied Sciences*. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-026-08326-5> (date of access: 26.03.2026).
28. Mobile Robotics in Smart Farming: Current Trends and Applications. *Frontiers in Artificial Intelligence*. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/artificial-intelligence/articles/10.3389/frai.2023.1213330/full> (date of access: 26.03.2026).
29. OpenCV. Image Thresholding. *OpenCV Documentation*. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html (date of access: 26.04.2026).

30. OpenCV. Contours: Getting Started. *OpenCV Documentation*. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html (date of access: 26.04.2026).

31. OpenCV. Feature Detection and Description. *OpenCV Documentation*. URL: https://docs.opencv.org/4.x/db/d27/tutorial_py_table_of_contents_feature2d.html (date of access: 26.04.2026).

32. ROBOTIS. TurtleBot3 Features. *ROBOTIS e-Manual*. URL: <https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/features/> (date of access: 26.04.2026).

33. NVIDIA. JetBot AI Robot Kit. *NVIDIA Embedded Systems*. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetbot-ai-robot-kit/> (date of access: 26.04.2026).

34. NVIDIA-AI-IOT. JetBot: An Educational AI Robot Based on NVIDIA Jetson Nano. *GitHub Repository*. URL: <https://github.com/NVIDIA-AI-IOT/jetbot> (date of access: 26.04.2026).

35. OpenMV. OpenMV Cam. *OpenMV Official Website*. URL: <https://openmv.io/> (date of access: 26.04.2026).

36. OpenMV. OpenMV Documentation. *OpenMV Official Documentation*. 2026. URL: <https://docs.openmv.io/> (date of access: 26.04.2026).

37. Gazebo. Gazebo Sim Documentation. *Gazebo Official Documentation*. URL: <https://gazebo.org/docs/> (Date of access: 26.04.2026).

38. Webots. Webots Robot Simulator. *Cyberbotics*. URL: <https://cyberbotics.com/> (date of access: 26.04.2026).

39. ISO 8373:2021. Robotics - Vocabulary. *International Organization for Standardization*. URL: <https://www.iso.org/standard/75539.html> (date of access: 26.04.2026).

40. International Federation of Robotics. *World Robotics 2023: Service Robots – and Methods*. URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/WR_Service_Robots_2023_Sources_and_Methods.pdf (date of access: 26.0.2026).

