

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра інформаційних систем та технологій

«На правах рукопису»
УДК 004.45

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Олександр РОЛІК
« » _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

«Інформаційне забезпечення робототехнічних систем»

зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

**на тему: «Система навігації мобільного робота при невідомому
рельєфі»**

Виконав:
студент 2 курсу, групи ІК-32мп
Ведмідь Євгеній Ігорович _____

Керівник:
доцент каф. ІСТ, к.т.н., доц.
Ткач Михайло Мартинович _____

Рецензент:
доцент каф. ІСТ, к.т.н., доц.
Ліхоузова Тетяна Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра інформаційних систем та технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 126 «Інформаційні системи та технології»

Освітньо-професійна програма «Інформаційне забезпечення
робототехнічних систем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Ведмідю Євгенію Ігоровичу

1. Тема дисертації «Система навігації мобільного робота при невідомому рельєфі», науковий керівник дисертації Ткач Михайло Мартинович, к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від «08» 11 2024 р. № 5016-с
2. Термін подання студентом дисертації «09» 12 2024 р.
3. Об'єкт дослідження: система навігації мобільного робота
4. Вихідні дані: застосунок системи навігації мобільного робота при невідомому рельєфі.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналіз існуючих рішень, спроектувати архітектуру системи, налаштувати симуляцію мобільного робота, провести тестування, підготувати текстову та графічну частину пояснювальної записки
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: діаграма прецедентів, блок-схема роботи системи, блок-схема роботи клієнта, BPMN діаграма, діаграма послідовності, схема мобільного робота, діаграма компонентів, діаграма класів.
8. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Формування мети та задач дослідження	06.09	
2.	Аналіз предметної області, огляд існуючих аналогів	13.09	
3.	Розробка математичної моделі	20.09	
4.	Аналіз та розробка інформаційного забезпечення	27.09	
5.	Опис інформаційного забезпечення	04.10	
6.	Розробка програмного забезпечення	11.10	
7.	Опис програмного та технічного забезпечення	18.10	
8.	Аналіз результатів	25.10	
9.	Оформлення пояснювальної записки	25.11	
10.	Подання дисертації до захисту	09.12	

Студент

Євгеній ВЕДМІДЬ

Науковий керівник

Михайло ТКАЧ

РЕФЕРАТ

Система навігації мобільного робота при невідомому рельєфі: 105 сторінок, 32 рисунки, 34 таблиці, 8 формул, 9 додатків, 20 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, SLAM, ЛОКАЛІЗАЦІЯ, АВТОНОМНИЙ РУХ, НАВІГАЦІЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Навігація мобільних роботів при невідомому рельєфі є важливою задачею сучасної робототехніки. Існуючі методи, такі як SLAM, алгоритми планування траєкторій і рішення на основі штучного інтелекту, показують значні досягнення, але мають обмеження у складних умовах або при обмежених обчислювальних ресурсах. Алгоритм Брайтенберга, завдяки своїй простоті та адаптивності, пропонує оптимальне рішення для вирішення цих завдань, зберігаючи високу швидкодію та ефективність.

Метою даної роботи є вдосконалення системи навігації для мобільного робота, яка здатна ефективно функціонувати в умовах, де рельєф території є невідомим заздалегідь. Створення системи, яка забезпечить точну та надійну навігацію мобільного робота, незалежно від складності та непередбачуваності місцевості. Об'єктом дослідження є система навігації мобільного робота. Предметом дослідження є методи та алгоритми навігації мобільних роботів, в умовах коли рельєф є заздалегідь невідомим.

Задачі дослідження:

- проаналізувати існуючі системи навігації та визначити оптимальні методи для роботи в невідомих середовищах;
- розробити модель робота з використанням сенсорів для збирання даних про оточення;
- реалізувати та протестувати алгоритми SLAM для побудови карти місцевості і визначення місцезнаходження робота;
- провести симуляційні експерименти для оцінки точності і стабільності роботи навігаційної системи.

ABSTRACT

Navigation system for a mobile robot in unknown terrain: 105 pages, 32 figures, 34 tables, 8 formulas, 9 appendices, 20 sources.

MOBILE ROBOT, SLAM, LOCATION, AUTONOMOUS MOTION,
NAVIGATION OF A MOBILE ROBOT

Navigation system for a mobile robot in unknown terrain is an important task of modern robotics. Existing methods, such as SLAM, trajectory planning algorithms and solutions based on artificial intelligence, show significant achievements, but have limitations in complex conditions or with limited computing resources. The Breitenberg algorithm, due to its simplicity and adaptability, offers an optimal solution for solving these problems, while maintaining high speed and efficiency.

The purpose of this work is to improve the navigation system for a mobile robot, which is able to function effectively in conditions where the terrain is unknown in advance. To create a system that provides accurate and reliable navigation of a mobile robot, regardless of the complexity and unpredictability of the terrain. The object of the study is the navigation system of a mobile robot. The subject of the study is the methods and algorithms for navigating mobile robots in conditions where the terrain is unknown in advance.

Research objectives:

- to analyze existing navigation systems and determine the optimal methods for working in unknown environments;
- to develop a robot model using sensors to collect data about the environment;
- to implement and test SLAM algorithms for building a map of the terrain and determining the location of the robot;
- to conduct simulation experiments to assess the accuracy and stability of the navigation system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	12
1.1 Загальний огляд проблеми	12
1.1.1 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).....	14
1.1.2 Основні компоненти SLAM.....	15
1.1.3 Види SLAM.....	15
1.2 Навігація на основі штучного інтелекту та машинного навчання.....	23
1.2.1 Основні технології ШІ та МН в навігації	24
1.2.2 Принцип роботи навігації на основі штучного інтелекту.....	26
1.3 Алгоритми планування траєкторії.....	28
1.3.1 Алгоритми планування	28
1.3.3 Обмеження існуючих алгоритмів.....	30
1.3.4 Необхідність адаптивних методів	31
1.3.4.1 Проблеми алгоритмів планування траєкторії	31
1.4 Оптимізація навігаційних систем при невідомому рельєфі	32
Висновок до розділу 1.....	33
2 ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО СИСТЕМИ	35
2.1 Формування функціональних вимог	35
2.1.1 Опис акторів	35
2.1.2 Загальна діаграма прецедентів.....	36
2.1.3 Автентифікація в системі	36
2.1.4 Побудова маршруту	38
2.1.5 Виявлення та обхід перешкод.....	40
2.1.6 Адаптація до змін у середовищі	43
2.1.7 Запам'ятовування маршруту та перешкод.....	45
2.2 Формування нефункціональних вимог	47
Висновок до розділу 2.....	49

	7
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ	51
3.1 Вибір та обґрунтування елементів та технологій	51
3.1.1 Вибір алгоритму	53
3.1.1.1 Алгоритм Брейтенберга.....	53
3.1.1.2 Метод сіткових карт.....	56
3.2 Структурна схема системи.....	57
3.2.1 Модуль симуляції.....	58
3.2.2 Модуль інтерфейсу симуляції.....	59
3.4 Реалізація бізнес-логіки системи	60
3.5 Опис інтерфейсу користувача та інструкція використання застосунку.....	60
3.5.1 Опис інтерфейсу користувача,.....	61
3.5.2 Інструкція використання застосунку	66
Висновки до розділу 3	67
4 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ	69
4.1 Мануальне тестування	69
Висновки до розділу 4	77
5 СТАРТАП ПРОЄКТ.....	79
5.1 Опис ідеї проєкту	79
5.2 Технологічний аудит ідеї проєкту.....	81
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	82
5.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту	94
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту.....	97
Висновок до розділу 5.....	100
ВИСНОВОК.....	102
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104
ДОДАТОК А.....	106
ДОДАТОК Б	107
ДОДАТОК В.....	108
ДОДАТОК Г	109
ДОДАТОК Д.....	110

	8
ДОДАТОК Е	111
ДОДАТОК Ж	112
ДОДАТОК И	113
ДОДАТОК К	114

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

КЗ – Комп'ютерний зір;

МН – Машинне навчання;

МР – Мобільний робот

ШІ – Штучний інтелект.

API – Application Programming Interface;

DWA – Dynamic Window Approach;

GPS – Global Positioning System;

IMU – Inertial measurement unit;

LiDAR – Light Detection and Ranging;

ROS – Robot Operating System;

RRT – Rapidly-exploring Random Tree;

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping;

SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats;

ВСТУП

З розвитком науки і техніки та швидким зростанням попиту на автоматизацію, мобільні роботи стають незамінними інструментами для виконання завдань у складних умовах. Системи використовуються як в автономних транспортних засобах, так і в мобільних роботах для дослідження важкодоступних територій, таких зони потенційно небезпечні для людей, космічні простори або підводні середовища. У наукових працях останніх років, що висвітлюють питання мобільної робототехніки, обговорюються можливості навігації у відомому або частково відомому середовищі. При цьому питання надійної та точної навігації в умовах невідомого рельєфу залишаються відкритими.

Однією з ключових задач є забезпечення безпечного і ефективного проходження шляху в умовах, де рельєф невідомий, а також здатність до самонавчання роботів для адаптації до нових умов навколишнього середовища. Дослідження у сфері штучного інтелекту та робототехніки відкривають нові можливості для створення інтелектуальних систем навігації, що дозволяють роботам самостійно оминати перешкоди, будувати маршрути та адаптувати свою поведінку в реальному часі, використовуючи різноманітні датчики.

Зокрема, велика увага приділяється алгоритмам навчання з підкріпленням, які дозволяють мобільним роботам накопичувати досвід і покращувати свою здатність до самостійної навігації. Однак значна кількість існуючих рішень орієнтована на статичні середовища або обмежені сценарії, що не завжди підходить для умов динамічного чи невідомого рельєфу. Також необхідно інтегрувати алгоритми навігації з технологіями одночасної локалізації та картографії (SLAM), що дозволяють роботам створювати карти невідомих середовищ у режимі реального часу.

Проте, незважаючи на значний прогрес, залишаються невирішеними питання розробки системи навігації, яка б поєднувала у собі можливості

швидкого картографування, реального виявлення перешкод та адаптації до умов змінного середовища.

Зростаюча потреба у мобільних роботах для виконання завдань у складних умовах, викликає необхідність у створенні більш надійних систем навігації. Швидкий розвиток технологій у галузі робототехніки та штучного інтелекту сприяє створенню нових можливостей для покращення систем навігації, що здатні працювати в реальному часі у складних та змінних умовах.

Таким чином, доцільність проведення дослідження зумовлена необхідністю розробки надійної системи навігації для мобільних, здатної адаптуватися до нових умов і самонавчатися в реальному часі.

Метою даної роботи є вдосконалення системи навігації для мобільного робота, яка здатна ефективно функціонувати в умовах, де рельєф території є невідомим заздалегідь. Створення системи, яка забезпечити точну та надійну навігацію мобільного робота, незалежно від складності та непередбачуваності місцевості. Об'єктом дослідження є система навігації мобільного робота. Предметом дослідження є методи та алгоритми навігації мобільних роботів, в умовах коли рельєф є заздалегідь невідомим.

Це дослідження буде присвячене розробці адаптивної навігаційної системи, яка зможе працювати у складних та змінних умовах і, таким чином, відповідь на актуальні потреби робототехніки.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Загальний огляд проблеми

Навігація мобільного робота при невідомому рельєфі є однією з важливих задач сучасної робототехніки, що активно досліджується у різних напрямках. Ця проблема полягає в необхідності створення системи навігації робота, який може автономно переміщуватися, адаптуватися до невизначеного середовища та оминати перешкоди, не маючи попередньої карти місцевості. Проблема має важливе значення для різних галузей, наприклад, пошуково-рятувальні операції, сільське господарство, промисловість, тому було запропоновано безліч рішень. Далі буде проаналізовано кілька ключових існуючих підходів та систем для навігації мобільних роботів при невідомому рельєфі.

Boston Dynamics Spot(рисунок 1.1) є одним із найвідоміших прикладів мобільних роботів, здатних до навігації у складних умовах. Це чотириногий робот, створений для роботи в різноманітних середовищах, таких як будівництво, інспекція промислових об'єктів, пошуково-рятувальні операції та навіть зони стихійних лих. Spot оснащений камерами, лідарами та інерційними вимірювальними блоками (IMU), що дозволяє йому виконувати SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), створювати детальні карти навколишнього середовища, уникати перешкод і стабільно пересуватися. Завдяки своїй мобільності та адаптивності робот може підійматися сходами, переміщатися по нерівній місцевості й працювати в умовах, недоступних для традиційної техніки. Boston Dynamics також надає відкритий API для інтеграції власних алгоритмів, що робить Spot універсальною платформою для інновацій у робототехніці. [1]

Іншим прикладом є Jackal(рисунок 1.2), розроблений компанією Clearpath Robotics. Jackal – це компактний, чотириколісний мобільний робот, оптимізований для дослідницьких завдань. Завдяки своїм невеликим розмірам і міцному корпусу, цей робот здатний працювати як у закритих приміщеннях, так і на відкритих ділянках зі складними умовами. Він оснащений камерами, LiDAR,

GPS та ультразвуковими сенсорами, які забезпечують точність при виконанні SLAM та плануванні траєкторій. Jackal підтримує ROS (Robot Operating System), що дозволяє інтегрувати широкий спектр алгоритмів і рішень для навігації, включаючи адаптивні методи на основі машинного навчання. Він широко використовується в університетах і дослідницьких лабораторіях для тестування нових підходів у робототехніці. Висока швидкість роботи сенсорів і можливість реального часу оновлювати карти робить Jackal ідеальним для навігації у складних умовах. [2]



Рисунок 1.1 – Робот Boston Dynamics Spot [1]



Рисунок 1.2 – Робот Clearpath Robotics. Jackal [2]

Ще одним помітним прикладом є TurtleBot 4(рисунок 1.3), розроблений для освітніх і дослідницьких потреб. Цей робот надає платформу для вивчення автономної навігації, SLAM і навчання з підкріпленням. TurtleBot 4 оснащений камерою RealSense та лазерним сканером, які забезпечують детальне картографування та розпізнавання об'єктів у просторі. Використовуючи ROS 2, цей робот дозволяє дослідникам легко розробляти, тестувати та впроваджувати власні алгоритми. TurtleBot 4 часто використовується у навчальних програмах з робототехніки та дослідницьких проектах, спрямованих на розробку адаптивних систем навігації. Його легкість у використанні та низька вартість роблять його привабливим для студентів і науковців. [3]



Рисунок 1.3 – Робот TurtleBot 4 [3]

1.1.1 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

SLAM (одночасна локалізація та відображення) – це метод відображення, який дозволяє мобільним роботам та іншим автономним транспортним засобам створювати карту та локалізувати себе на цій карті одночасно.

Використовуючи широкий спектр алгоритмів, обчислень та інших сенсорних даних, програмні системи SLAM дозволяють роботу або іншому транспортному засобу, як-от безпілотник або самокерований автомобіль,

прокладати курс у незнайомому середовищі, одночасно визначаючи своє власне місцезнаходження в цьому середовищі. [4]

1.1.2 Основні компоненти SLAM

SLAM складається з кількох основних компонентів:

Локалізація – це процес визначення положення робота по відношенню до навколишнього середовища. Робот повинен постійно оновлювати оцінку свого місцезнаходження на основі даних датчиків, таких як камери, LiDAR або ультразвукові датчики.

Картографування – це процес створення карти навколишнього середовища, яку робот використовує для планування свого руху. Карта створюється з даних датчиків і оновлюється в міру руху робота.

Зіставлення даних датчика, щоб успішно виконати SLAM, робот повинен постійно порівнювати нові дані датчика з попередніми, щоб побачити, чи був він у цій області раніше. Це дозволяє роботу «впізнавати» місця, які він уже відвідав, і коригувати карту.

1.1.3 Види SLAM

Існує кілька варіантів реалізації SLAM в залежності від типу датчиків, які використовуються для збору інформації про навколишнє середовище:

1) візуальний SLAM

Як випливає з назви, візуальний SLAM (або vSLAM) рисунок 1.4 використовує зображення, отримані з камер та інших датчиків зображення. Візуальний SLAM може використовувати прості камери (ширококутні камери, камери типу «риб'яче око» та сферичні камери), камери складного ока (стереокамери та багатокамерні камери) та камери глибини та камери ToF.



Рисунок 1.4 – візуальний SLAM [5]

Візуальний SLAM (vSLAM) можна реалізувати з мінімальними витратами, використовуючи доступні за ціною камери. Завдяки великому обсягу даних, які надають камери, їх можна застосовувати для визначення орієнтирів – заздалегідь відомих позицій у просторі. Виявлення таких орієнтирів можна інтегрувати з графовими методами оптимізації, що додає гнучкості у впровадження SLAM-алгоритмів.

Монокулярний SLAM є варіантом vSLAM, у якому для роботи використовується лише одна камера як єдиний сенсор. Визначення глибини в такій конфігурації є складним завданням, яке можна вирішити за допомогою ідентифікації відомих об'єктів, таких як AR-маркери, шахові дошки або інші впізнавані форми, для покращення локалізації. Крім того, інформацію з камери можна доповнити даними від інших сенсорів, наприклад, інерційних вимірювальних одиниць (IMU), які фіксують швидкість і орієнтацію.

Суміжні з vSLAM технології включають структуру від руху (SfM), візуальну одометрію та корекцію пучка, які допомагають покращити точність і стабільність алгоритму.

Алгоритми візуального SLAM можна загалом класифікувати на дві категорії. Розріджені методи зіставляють характерні точки зображень і

використовують такі алгоритми, як PTAM і ORB-SLAM. Щільні методи використовують загальну яскравість зображень і використовують такі алгоритми, як DTAM, LSD-SLAM, DSO та SVO.

Використання візуальних сенсорів у Visual-SLAM стає популярним підходом для створення карти навколишнього середовища. Основна складність полягає у надлишку інформації в зображеннях та труднощах з точним вимірюванням відстаней. Основні методи, що використовуються у Visual-SLAM, включають:

- Mono-SLAM (2007) – перший підхід до візуального SLAM, який використовував розширений фільтр Калмана (EKF) для відстеження ознак та роботи з невизначеностями;

- PTAM (Parallel Tracking and Mapping) – запропонував виділення ключових кадрів і розділення на передню та задню частини, що зробило SLAM більш ефективним;

- ORB-SLAM – вважався віхою у Visual-SLAM завдяки використанню Oriented FAST і Rotated BRIEF (ORB) та детекції петель, що запобігало накопиченню помилок;

- LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular SLAM) – дозволяє будувати напівгусті карти безпосередньо за допомогою монокулярної камери;

- RGB-D SLAM – використовує камери RGB-D для отримання як колірної, так і глибинної інформації, дозволяючи створювати детальні 3D-карти. Метод Kinect Fusion використовує зображення глибини для побудови глобальної карти.

Переваги:

- висока деталізація карт. Використання особливостей, таких як ORB або густинне вирівнювання, дозволяє створювати стабільні карти з високою деталізацією;

- запобігання накопиченню помилок. За допомогою методів замикання петель (наприклад, у ORB-SLAM) можна зменшувати кумулятивну помилку;

- глибина та колір. RGB-D камери (як-от Kinect) дозволяють створювати повну 3D-карту, що є значною перевагою в точності;

Недоліки:

- висока обчислювальна складність. Більшість методів потребують значних обчислювальних ресурсів, особливо при роботі з густинними та напівгустинними методами;

- залежність від умов освітлення та якості зображень. Візуальний SLAM сильно залежить від якості вхідних зображень, і погане освітлення може погіршувати результати;

- проблеми з нелінійністю. Деякі підходи (наприклад, фільтр Калмана) стикаються з труднощами в умовах нелінійності.[6]

2) SLAM на основі LiDAR(рисунок 1.5)

Виявлення світла та визначення дальності (LiDAR) – це метод, який переважно використовує лазерний датчик (або датчик відстані).

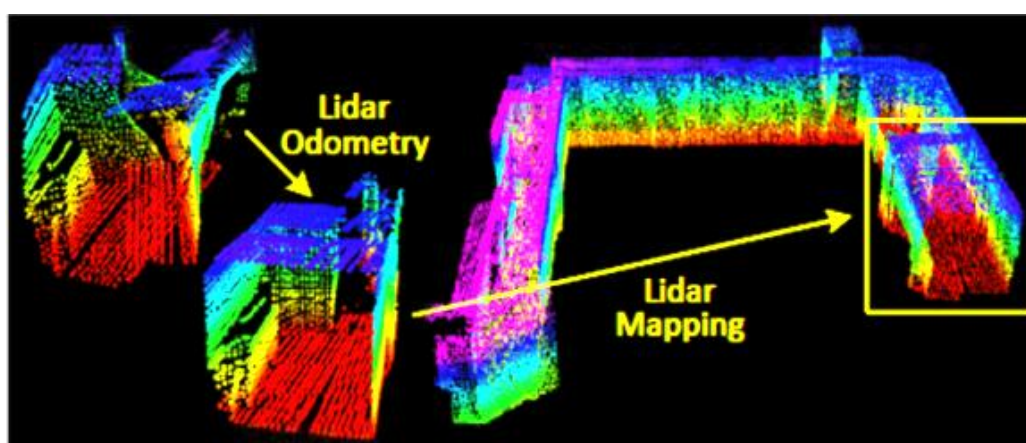


Рисунок 1.5 – SLAM на основі LIDAR[7]

Порівняно з камерами, ToF-камерами та іншими сенсорами, лазери (рисунок 1.6) забезпечують значно вищу точність, що робить їх ідеальними для використання в додатках із високошвидкісними транспортними засобами, такими як безпілотні автомобілі та дрони. Дані, отримані від лазерних датчиків, зазвичай представляються у вигляді хмар точок у 2D (x, y) або 3D (x, y, z). Хмара точок дозволяє отримувати точні вимірювання відстані та ефективно використовується для побудови карт за допомогою SLAM-алгоритмів.



Рисунок 1.6 – Time-of-flight камера[8]

Оцінка руху виконується через послідовну реєстрацію хмар точок, а розрахована траєкторія використовується для локалізації транспортного засобу. Для обчислення відносних перетворень між хмарами точок застосовуються алгоритми реєстрації, наприклад, ітеративне зближення найближчої точки (ICP) або нормальне розподільче перетворення (NDT). Також можуть використовуватись методи, засновані на обробці ознак, такі як LOAM (лідарна одометрія та картографування) або швидка глобальна реєстрація (FGR), яка використовує функції FPFH. Отримані 2D або 3D карти хмар точок можуть бути представлені у форматі сіткових або воксельних карт.

Локалізація автономних транспортних засобів часто потребує об'єднання даних від різних джерел, таких як одометрія коліс, GNSS і IMU, щоб забезпечити більшу точність. Для завдань, як-от складська робототехніка, зазвичай використовується 2D LIDAR SLAM, тоді як 3D SLAM на основі хмар точок є стандартом для БПЛА та систем автоматизованого водіння.

Переваги:

– лазерний SLAM є більш точним, ніж Visual SLAM, оскільки сенсор LiDAR може вимірювати відстані з високою точністю;

– LiDAR SLAM добре працює за умов низького освітлення, оскільки LiDAR може працювати навіть у темряві;

– лазерний SLAM менше залежить від таких факторів навколишнього середовища, як пил, дим або туман.

Недоліки:

– сенсори LiDAR дорожчі за камери, що робить лазерний SLAM більш витратним;

– сенсори LiDAR мають обмежене поле зору і не можуть «бачити» за кутами чи через перешкоди;

– сенсори LiDAR потребують більше обчислювальної потужності, ніж камери, що може уповільнювати їх роботу. [9]

3) гібридні системи SLAM

Гібридні системи SLAM – це тип алгоритму SLAM, що використовує різні сенсори, такі як камери, інерційні вимірювальні блоки (IMU), GPS, LiDAR, радар та інші, для підвищення точності та надійності роботи. Поєднуючи сильні сторони різних сенсорів та компенсуючи їхні окремі обмеження, гібридні системи SLAM забезпечує високу продуктивність. Наприклад, камери надають детальні візуальні дані, але можуть мати труднощі при слабкому освітленні або на високих швидкостях, тоді як LiDAR стабільно працює в різних умовах освітлення, але може стикатися з труднощами на певних поверхнях.

Гібридні системи SLAM є більш надійним у порівнянні з односенсорними системами, оскільки об'єднує дані з різних джерел. Фактор-граф – це модульна й адаптивна структура, яка дозволяє інтегрувати різні типи сенсорів, зокрема камери, IMU та GPS, а також кастомні вхідні дані, як-от LiDAR та одометрію, шляхом перетворення їх на фактори позиції. Це дозволяє реалізовувати різні конфігурації гібридних систем SLAM, такі як моно-візуально-інерціальний SLAM (Monocular Visual-Inertial SLAM) та LiDAR-IMU SLAM. Перевагами є більша точність і стабільність в умовах, коли один із датчиків може не забезпечувати надійну роботу (наприклад, слабе освітлення або складна місцевість).[10]

Для реалізації гібридних систем SLAM(рисунок 1.7) важливою складовою є інтеграція різномірних сенсорів, таких як LiDAR, інфрачервоні (IR) камери, радарні системи та CMOS-камери. Як видно на представленому рисунку, система використовує LiDAR Velodyne Puck (VLP-16) для створення точних тривимірних карт, інфрачервону камеру FLIR Boson 640 для роботи в умовах поганого освітлення, радар Simrad 4G для оцінки віддалених об'єктів у широкому діапазоні та CMOS-камеру FLIR Blackfly GigE для детального аналізу зображень.

Така комбінація сенсорів дозволяє компенсувати недоліки окремих компонентів, наприклад, зниження точності камери в темряві або труднощі LiDAR на гладких поверхнях. Завдяки використанню цих сенсорів у гібридній системі забезпечується висока точність та стабільність роботи в різних умовах, таких як погане освітлення, складні поверхні або наявність рухомих об'єктів.

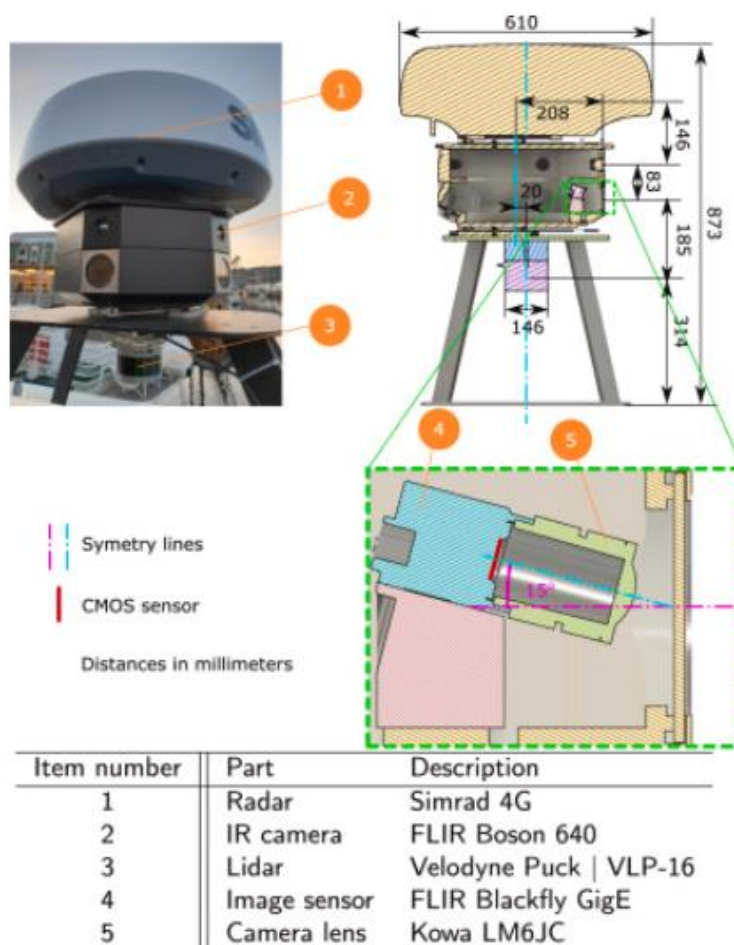


Рисунок 1.7 – Гібридна SLAM [11]

Недоліками є складність інтеграції даних та високі вимоги до обчислювальних ресурсів.

Проблеми та виклики SLAM:

– обробка великої кількості даних датчиків (особливо візуальних або 3D-датчиків) є інтенсивним обчислювальним завданням, яке потребує потужного апаратного забезпечення;

– дані датчика можуть містити шум, який впливає на локалізацію та точність відображення. Це особливо вірно для візуальних систем, які можуть втратити стабільність у складних умовах або в умовах слабкого освітлення;

– SLAM найкраще працює в статичних середовищах тому у динамічному середовищі (наприклад, коли інші об'єкти рухаються в середовищі) система може мати труднощі з підтримкою точної карти;

– під час роботи SLAM система може накопичувати помилки через неправильні вимірювання або неправильні збіги даних. Це призводить до поступової втрати точності (дрейфу).

Незважаючи на значний потенціал методів SLAM, він має ряд технічних викликів, які обмежують його використання.

SLAM-алгоритми схильні до накопичення похибок, які можуть призводити до суттєвих відхилень. Це явище називається «проблемою замикання циклу», коли робот не може точно повернутись до початкової точки, що створює спотворення карти. Для подолання цієї проблеми використовують графічну оптимізацію, яка враховує пози роботи для мінімізації похибок. Наприклад, у візуальному SLAM застосовується техніка коригування пакета, яка покращує точність карти шляхом оптимізації позицій об'єктів.[10]

Деякі підходи до SLAM не враховують динаміку руху робота, що може призводити до різких стрибків позиції. Для запобігання таким помилкам застосовують фільтри, наприклад, розширений фільтр Калмана та фільтри частинок, які об'єднують дані з різних сенсорів (IMU, кодери коліс) для точнішої локалізації. Якщо позиція все ж втрачається, допомагає використання ключових кадрів, що зберігають особливості раніше відвіданих місць. Деякі методи

включають пакети функцій (BoF) та глибоке навчання для відновлення позиції.[10]

Обчислювальні ресурси є обмеженими на вбудованих системах, що створює проблему для SLAM, адже алгоритми потребують високої продуктивності для обробки зображень та хмар точок. Це особливо важливо для обчислювально затратних процесів, таких як замикання циклу. Одним із методів оптимізації є розпаралелювання обчислень, наприклад, вилучення ознак, яке піддається паралельній обробці. Використання багатоядерних процесорів, SIMD та вбудованих графічних процесорів може суттєво підвищити швидкість обробки. [10]

1.2 Навігація на основі штучного інтелекту та машинного навчання

Навігація мобільних роботів на основі штучного інтелекту та машинного навчання (рисунок 1.8) є одним із найсучасніших і стрімко розвиваючих напрямів у галузі робототехніки. Ці передові технології забезпечують роботам здатність не лише виконувати запрограмовані дії, але й самостійно приймати оптимальні рішення на основі аналізу отриманої інформації. Завдяки цьому, мобільні роботи можуть ефективно адаптуватися до змінюваних умов навколишнього середовища, виявляти непередбачувані фактори та модифікувати свою поведінку в режимі реального часу.

Навігаційні системи, засновані на методах штучного інтелекту та машинного навчання, використовують широкий спектр алгоритмів для вирішення складних завдань. Зокрема, такі системи дозволяють роботам здійснювати побудову карт раніше невідомих територій за допомогою технологій SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), оптимізувати маршрути руху для зменшення енергоспоживання та часу виконання завдання, а також ефективно ухилятися від перешкод, що можуть виникнути на шляху. Ці функції роблять навігаційні системи ключовим компонентом автономних

роботів, підвищуючи їхню ефективність та універсальність у виконанні різноманітних завдань.



Рисунок 1.8 – Робот Jetson Nano з навігацією на основі ШІ та МН. [13]

1.2.1 Основні технології ШІ та МН в навігації

У сучасній навігації роботів активно використовуються такі технології штучного інтелекту та машинного навчання:

- нейронні мережі. Це один із основних інструментів штучного інтелекту, який використовується для обробки складних даних і прийняття рішень. Нейронні мережі можуть навчатися з прикладів і виявляти приховані закономірності в даних, що робить їх корисними для навігаційних завдань, таких як розпізнавання об'єктів, визначення перешкод і прогнозування руху;

- глибоке навчання. Це спеціалізована форма машинного навчання, яка використовує багатопові нейронні мережі для аналізу складних структур даних, таких як зображення, відео або тривимірні карти. Глибоке навчання

дозволяє роботам покращувати свою здатність орієнтуватися в навколишньому середовищі, розпізнавати об'єкти та визначати оптимальні шляхи руху;

– навчання з підкріпленням. Цей підхід дозволяє роботам навчатися через досвід(рисунок 1.9), отриманий під час взаємодії з навколишнім середовищем. У посиленому навчанні агент (робот) отримує винагороди або покарання за свої дії, що дозволяє йому з часом знаходити оптимальні стратегії поведінки, включаючи навігацію у складних умовах;

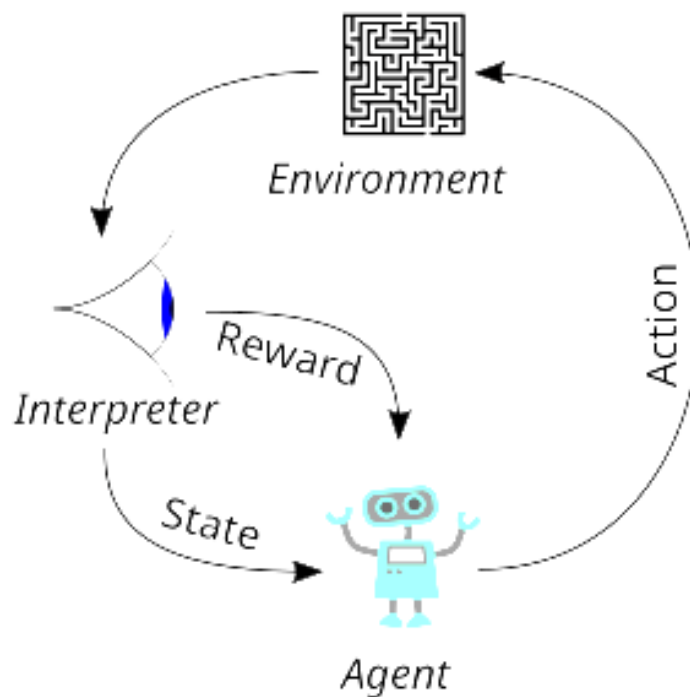


Рисунок 1.9 – Алгоритм навчання з підкріпленням[14]

– комп'ютерний зір. Для мобільних роботів, що працюють в реальному світі, комп'ютерний зір(рисунок 1.10) є важливою технологією, що дозволяє їм «бачити» своє оточення. Завдяки використанню глибоких нейронних мереж та інших методів комп'ютерного зору, роботи можуть розпізнавати об'єкти, перешкоди та інші важливі елементи навколишнього середовища, що значно покращує точність їхньої навігації.



Рисунок 1.10 – Комп’ютерний зір [16]

Модифікація традиційної технології Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) з використанням машинного навчання дозволяє поліпшити точність побудови карт і локалізації робота, особливо в умовах складного рельєфу або при наявності великої кількості динамічних об’єктів.

1.2.2 Принцип роботи навігації на основі штучного інтелекту

Роботи отримують інформацію про навколишнє середовище через різні сенсори: камери, лазерні дальноміри (LIDAR), радары, ультразвукові сенсори тощо. Штучний інтелект використовується для обробки цих даних і перетворення їх на корисну інформацію для навігації. Завдяки машинному навчанню робот може розпізнавати важливі елементи середовища (наприклад, стіни, двері, інші роботи) та приймати рішення про найкращі шляхи руху або ухилення від перешкод.

Використання нейронних мереж і методів глибокого навчання дозволяє роботам адаптуватися до змін у середовищі в режимі реального часу. Робот може

обираючи оптимальні маршрути, уникати перешкод або змінювати свою стратегію поведінки на основі інформації, отриманої від сенсорів.

Переваги використання штучного інтелекту та машинного навчання в навігації:

- однією з головних переваг штучного інтелекту є його здатність навчатися та адаптуватися до нових, невідомих умов. Це дозволяє мобільним роботам працювати в різноманітних середовищах, навіть якщо їх рельєф чи конфігурація не були відомі заздалегідь;

- штучний інтелект та машинне навчання дозволяють роботам розпізнавати об'єкти та перешкоди з високою точністю, навіть у складних умовах, таких як погане освітлення або наявність динамічних об'єктів;

- використання методів штучного інтелекту, таких як генетичні алгоритми або методи навчання з підкріпленням, дозволяє оптимізувати маршрути руху роботів, зменшуючи витрати енергії або часу;

- за допомогою машинного навчання та глибоких нейронних мереж роботи можуть швидко ухилятися від динамічних об'єктів, таких як інші роботи, люди або транспортні засоби, забезпечуючи безпеку та ефективність навігації.

Виклики та обмеження:

- системи на основі ШІ потребують значних обчислювальних ресурсів для обробки даних і навчання моделей. Це може бути проблемою для мобільних роботів із обмеженими ресурсами енергії або обчислювальних потужностей;

- якість навчання роботів значною мірою залежить від якості та кількості даних. Недостатня кількість навчальних даних або їх неточність може призвести до низької ефективності навігаційних алгоритмів;

- незважаючи на адаптивність, системи на основі ШІ можуть мати труднощі з швидкою адаптацією до різких або непередбачуваних змін у середовищі, таких як раптова поява перешкод або змінення рельєфу.

Невизначеність і безпека:

- роботи, які використовують машинне навчання для ухилення від перешкод, іноді можуть приймати невизначені або неправильні рішення в

умовах обмеженої інформації, що може призвести до небажаних результатів або зіткнень.

Застосування в робототехніці:

– штучний інтелект та машинне навчання широко використовуються в системах автономного водіння для розпізнавання дорожньої ситуації, ухилення від перешкод, прогнозування поведінки інших учасників руху та вибору оптимальних маршрутів.

– у ситуаціях, де GPS недоступний або середовище є складним для традиційних навігаційних систем (наприклад, у глибоких шахтах, під водою або в космосі), роботи використовують штучний інтелект для адаптивної навігації та побудови карт.

– роботи, що працюють у побутових умовах, можуть використовувати штучний інтелект для розпізнавання об'єктів, ухилення від перешкод і оптимізації маршрутів у реальному часі, забезпечуючи більш ефективну взаємодію з середовищем.

1.3 Алгоритми планування траєкторії

Алгоритми планування траєкторії є ключовим компонентом для успішної навігації мобільних роботів у складних середовищах. Основною метою цих алгоритмів є визначення найефективнішого маршруту для робота з точки А до точки В з урахуванням наявних перешкод та умов середовища. У сучасних системах навігації застосовують різні підходи, які можна розділити на глобальні та локальні алгоритми. Кожен з підходів має свої переваги та обмеження, що залежать від завдань і умов експлуатації.

1.3.1 Алгоритми планування

Глобальні алгоритми планування траєкторії працюють на основі повної або часткової інформації про середовище, яку робот отримує заздалегідь або

збирає під час руху. Ці алгоритми ефективні в статичних середовищах, де розташування перешкод не змінюється. До найбільш популярних методів належать:

– алгоритм A*: Один із найбільш популярних алгоритмів пошуку найкоротшого шляху. Він використовує евристичну функцію для оцінки вартості проходження від стартової точки до цілі та дозволяє знайти оптимальну траєкторію з урахуванням перешкод. A* працює добре в середовищах зі статичними перешкодами, але може бути неефективним у динамічних середовищах або при невідомому рельєфі; [17]

– алгоритм Дейкстри: Це ще один алгоритм пошуку найкоротшого шляху, який гарантує знаходження оптимальної траєкторії у графі. Він не використовує евристику і розраховує траєкторію на основі реальних витрат на переміщення між точками. Алгоритм працює добре в умовах відомого рельєфу, але повільніший, ніж A*, і менш адаптивний до змін середовища; [18]

– D* – це алгоритм динамічного планування шляху, який використовується в робототехніці для пошуку оптимального маршруту в середовищах, що змінюються. Він здатен динамічно оновлювати маршрут у реальному часі при виникненні нових перешкод або змін у карті середовища, що є його ключовою перевагою над статичними алгоритмами, такими як звичайний A*; [19]

– RRT: Це один із найбільш ефективних методів для пошуку траєкторії у великих або невідомих просторах. RRT генерує дерево шляхів, яке швидко розширюється з початкової точки робота, досліджуючи навколишнє середовище. Хоча цей алгоритм є швидким і масштабованим, він не завжди гарантує знаходження оптимального шляху і потребує додаткових оптимізацій; [20]

– DWA: Цей підхід базується на вивченні можливих траєкторій руху робота у реальному часі. DWA обчислює можливі траєкторії з урахуванням швидкості робота, відстані до перешкод та цілі, і вибирає найбезпечніший та найефективніший варіант. Він добре працює у динамічних середовищах, але має

обмеження при роботі в складних середовищах з великою кількістю перешкод; [21]

– алгоритм Брайтенберга – це концепція, запропонована італійським кібернетиком Валентино Брайтенбергом у його книзі «Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology». Він моделює поведінку тварин у мінімалістичний спосіб, починаючи від простих реактивних дій (наприклад, фототаксису) до формування концепцій, просторової поведінки та генерації ідей.

Брайтенбергівський транспортний засіб – це агент, який може автономно рухатися на основі вхідних сигналів від сенсорів. Він оснащений примітивними сенсорами, що вимірюють певний стимул у точці, та колесами (кожне з яких приводиться в рух власним мотором), які функціонують як виконавчі механізми. У найпростішій конфігурації сенсор безпосередньо з'єднаний з виконавчим механізмом, тому отриманий сигнал одразу викликає рух колеса. Залежно від того, як з'єднані сенсори та колеса, транспортний засіб демонструє різні поведінкові реакції, які можуть бути цілеспрямованими. Це означає, що, залежно від з'єднання сенсорно-моторних ланцюгів, він прагне досягти певних ситуацій та уникати інших, змінюючи курс при зміні обставин. [22]

1.3.3 Обмеження існуючих алгоритмів

Незважаючи на те, що багато алгоритмів планування траєкторії успішно вирішують завдання навігації в простих або відомих середовищах, вони стикаються з рядом обмежень у складних умовах:

– складність у динамічних середовищах. Більшість глобальних алгоритмів планування, таких як A^* чи Дейкстра, не пристосовані до змін у реальному часі, що робить їх менш ефективними для роботів, що працюють у динамічних середовищах;

– обмежена адаптація до невідомого рельєфу. Існуючі алгоритми часто покладаються на попередньо зібрані дані або точну інформацію про середовище.

Це створює проблеми у випадках, коли робот має працювати на території, яка не була заздалегідь вивчена;

– обчислювальні ресурси. Деякі алгоритми, такі як RRT або DWA, можуть бути обчислювально дорогими, що обмежує їх застосування в реальних роботах з обмеженими ресурсами.

1.3.4 Необхідність адаптивних методів

Сучасні дослідження спрямовані на розробку адаптивних методів, які можуть враховувати динамічні зміни у середовищі та забезпечувати безперервну навігацію. Це включає інтеграцію машинного навчання та штучного інтелекту для того, щоб робот міг навчатися та адаптуватися до нових умов у реальному часі. Наприклад, підходи на основі глибокого навчання дозволяють роботам «вчитися» на основі даних зі своїх сенсорів і швидко приймати рішення щодо безпечної траєкторії.

1.3.4.1 Проблеми алгоритмів планування траєкторії

Алгоритми планування траєкторії, такі як D^* , RRT, та DWA, є основними інструментами для пошуку оптимальних маршрутів, проте вони також мають свої недоліки:

– складність у динамічних середовищах. Глобальні алгоритми, такі як A^* або Дейкстра, є ефективними в статичних середовищах, але вони не призначені для роботи з динамічними перешкодами. Оновлення карти у реальному часі для таких алгоритмів може бути занадто повільним;

– компроміс між швидкістю та оптимальністю. Алгоритми на кшталт RRT добре працюють для великих середовищ, але вони можуть не гарантувати знаходження найкоротшого або найбільш ефективного шляху;

– проблеми локальних мінімумів. Методи, що використовують градієнти або векторні поля, можуть зіткнутися з проблемою локальних мінімумів, коли робот застряє в «пастці» між перешкодами і не може знайти вихід;

– нестабільність у складних середовищах. Алгоритми, такі як DWA, добре працюють у простих середовищах, але можуть давати нестабільні результати у середовищах з великою кількістю перешкод або при складних умовах рельєфу.

1.4 Оптимізація навігаційних систем при невідомому рельєфі

Розробка нової системи навігації для мобільних роботів при невідомому рельєфі має потенціал вирішити багато з наведених вище проблем. Нові підходи можуть поєднувати найкращі елементи існуючих технологій, при цьому усуваючи їхні обмеження:

а) гібридний підхід з використанням різних датчиків;

1) поєднання різних сенсорів (наприклад, камери, лідара, ультразвукових датчиків, GPS та IMU) дозволить створити більш надійну систему, яка не буде залежати від одного джерела даних. Це дасть можливість системі адаптуватися до умов різного рельєфу;

2) інтеграція даних з різних сенсорів (фузія даних) допоможе зменшити вплив похибок окремих сенсорів, таких як дрейф IMU або втрата сигналу GPS;

б) штучний інтелект для адаптації;

1) використання машинного навчання дозволить системі поступово навчатися і адаптуватися до нових умов рельєфу на основі накопиченого досвіду. Такий підхід може значно покращити здатність робота працювати у непередбачуваних середовищах;

2) генеративні моделі на базі нейронних мереж можуть прогнозувати зміни рельєфу та траєкторії, дозволяючи роботу приймати рішення в реальному часі на основі ймовірнісних оцінок.

Оптимізація для динамічних середовищ. Розробка алгоритмів, які враховують динамічність середовища і здатні швидко адаптувати траєкторії в реальному часі, дозволить уникнути багатьох проблем, з якими стикаються існуючі системи. Наприклад, алгоритми планування траєкторії можуть комбінувати глобальне планування з локальними корекціями, що покращить здатність робота уникати перешкод та приймати рішення в складних умовах.

Підвищена автономність. Завдяки комбінуванню адаптивних алгоритмів і гнучкої обробки даних, нова система буде здатна працювати в автономному режимі протягом тривалого часу без втручання людини, навіть в умовах невідомого рельєфу.

Ефективність у ресурсах. Оптимізація алгоритмів та їх інтеграція з менш потужними обчислювальними платформами зробить нову систему доступною для використання на мобільних роботах з обмеженими ресурсами. Це дозволить використовувати систему в роботах середнього та малого розміру, зберігаючи її ефективність.

Висновок до розділу 1

У цьому розділі були розглянуті сучасні підходи до навігації мобільних роботів при невідомому рельєфі, включаючи системи SLAM, алгоритми планування траєкторії та рішення на основі штучного інтелекту й машинного навчання. Було показано, що кожна технологія має свої переваги та обмеження, які визначають її придатність для конкретних завдань.

Системи SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) продемонстрували свою ефективність у статичних середовищах, дозволяючи роботам створювати карти місцевості та локалізувати себе на них у реальному часі. Візуальні, лазерні та гібридні системи SLAM успішно вирішують завдання навігації у складних умовах, але стикаються з викликами у динамічних середовищах, зокрема через високу обчислювальну складність і чутливість до змін зовнішніх умов.

Алгоритми планування траєкторії, такі як A*, RRT та DWA, пропонують широкий спектр підходів для пошуку оптимальних маршрутів. Вони ефективні у різних умовах, але мають обмеження щодо роботи у динамічних середовищах та адаптації до змін у реальному часі.

Серед розглянутих рішень алгоритм Брайтенберга виявився оптимальним для вирішення задач навігації при невідомому рельєфі. Його перевагами є простота реалізації, швидкість реакції на зміни у середовищі та низькі вимоги до обчислювальних ресурсів. Реактивний підхід цього алгоритму забезпечує ефективне уникнення перешкод і плавну адаптацію до умов динамічного середовища без потреби у попередньо побудованих картах чи складних розрахунках.

Таким чином, для вирішення задач навігації при невідомому рельєфі найкращим вибором є використання алгоритму Брайтенберга, доповненого сучасними підходами, які підвищують його функціональність та адаптивність.

2 ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО СИСТЕМИ

2.1 Формування функціональних вимог

2.1.1 Опис акторів

Для навігаційної системи мобільного робота основними акторами є Робот і Оператор. Детальний опис акторів системи описаний у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Детальний опис акторів

Назва	Опис
Оператор	Оператор системи задає початкові та цільові точки для маршруту робота, переглядає збережені маршрути та журнали навігації, а також аналізує ефективність роботи робота. Він може змінювати налаштування параметрів навігації, зокрема пріоритет уникнення перешкод і енергоефективність, залежно від потреб завдання. Оператор також має доступ до керування журналами даних про перешкоди, що дозволяє аналізувати типи перешкод і вдосконалювати алгоритми
Робот	Робот є автономним навігаційним пристроєм, який прокладає маршрут між заданими точками, використовуючи алгоритми пошуку оптимального шляху (наприклад, A*). Під час руху робот виявляє перешкоди за допомогою сенсорів, аналізує їх і коригує маршрут у реальному часі для безпечного обходу. Він записує дані про маршрут, координати перешкод та іншу навігаційну інформацію, яку пізніше передає оператору для аналізу. Робот також має функцію автоматичного повернення до стартової точки у випадках завершення завдання або виникнення критичної помилки.

2.1.2 Загальна діаграма прецедентів

Загальна діаграма прецедентів (додаток К) відображає взаємодію основних акторів системи – Оператора та Мобільного робота – із ключовими функціональними прецедентами системи. Ця діаграма забезпечує загальне уявлення про функціонал системи та взаємозв'язки між її компонентами.

Діаграма включає такі основні прецеденти:

- побудова маршруту;
- виявлення та обхід перешкод;
- адаптація до змін у середовищі;
- запам'ятовування маршруту та перешкод;
- інтерактивний аналіз даних;
- управління системою.

Деталізація кожного з прецедентів наведена у відповідних підрозділах.

2.1.3 Автентифікація в системі

Система повинна забезпечувати надійний доступ до своїх функцій виключно авторизованим операторам. Для цього необхідно реалізувати механізм автентифікації, який включатиме кілька ключових етапів. Першим етапом є введення логіну та паролю, які оператор отримує при реєстрації або надаються адміністратором системи. На цьому етапі користувач вводить свої облікові дані в спеціально відведені поля форми авторизації.

Другим етапом є перевірка введених даних. Після введення логіну та паролю система перевіряє їхню відповідність даним, які зберігаються у базі даних. У цьому процесі використовуються алгоритми для порівняння введених даних із заздалегідь збереженими хешами паролів, що забезпечує додатковий рівень безпеки. У разі невідповідності система повертає повідомлення про помилку і запрошує повторити спробу входу.

Третім етапом є надання доступу до системи лише після успішної авторизації. Якщо введені дані збігаються із записами в базі даних, система ідентифікує оператора як авторизованого користувача і надає доступ до функціональних можливостей відповідно до його рівня доступу. Цей етап може також супроводжуватися додатковими заходами, такими як логування успішних входів у систему або перевірка додаткових факторів безпеки, якщо це передбачено функціоналом.

На рисунку 2.1 представлено схему, яка ілюструє загальний процес автентифікації, а детальний опис відповідної діаграми прецедентів наведений у таблиці 2.2.

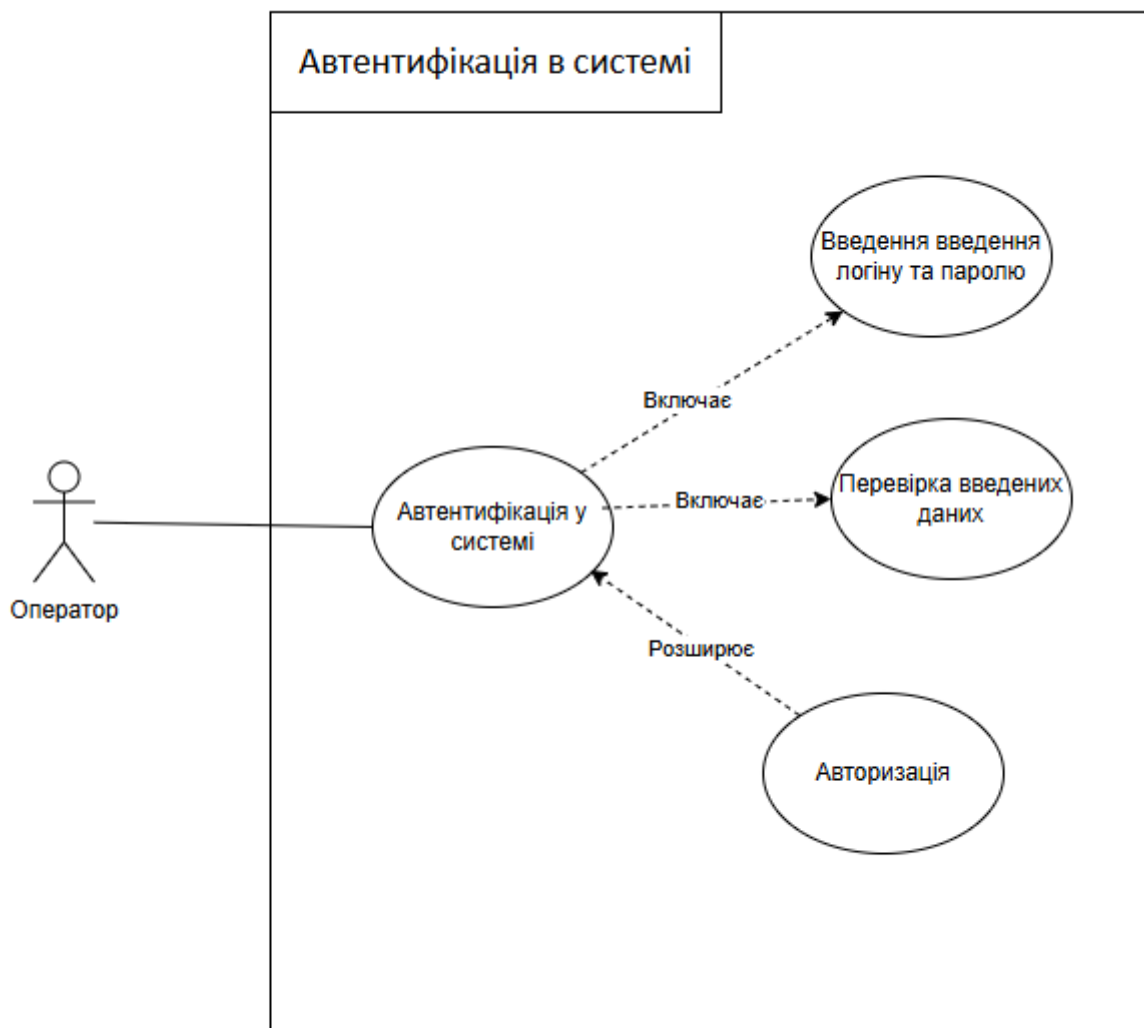


Рисунок 2.1 – Автентифікація в системі

Таблиця 2.2 – Автентифікація в системі

Назва	Опис
Введення логіну та паролю	Для реалізації прецеденту «Автентифікація у системі» оператор вводить у відповідну форму логін і пароль. Це початковий етап автентифікації, необхідний для доступу до системи.
Перевірка введених даних	Для реалізації прецеденту «Автентифікація у системі» система виконує перевірку коректності введених оператором даних (логін і пароль). Перевірка включає пошук відповідності введених даних у базі даних і визначення, чи вони є дійсними. У разі невідповідності система повідомляє користувача про помилку.
Авторизація	Для реалізації прецеденту «Автентифікація у системі» система після успішної перевірки даних визначає права доступу оператора. На основі ролі оператора система відкриває доступ до відповідного функціоналу та ресурсів.
Автентифікація у системі	Основний процес, який об'єднує усі інші прецеденти: введення даних, перевірку введених даних та (при успіху) авторизацію. Метою цього прецеденту є забезпечення захищеного доступу до системи.

2.1.4 Побудова маршруту

Першочерговою функціональною вимогою є побудова маршруту: система повинна самостійно прокладати оптимальний шлях від початкової до цільової точки призначення. Алгоритм повинен враховувати всі відомі перешкоди, щоб мінімізувати відстань і час руху. Для забезпечення цієї функціональності система

має інтегрувати дані з камери та ультразвукових сенсорів, які постійно оновлюватимуть інформацію про оточення рисунок 2.2

Детальний опис діаграми прецедентів наведений у таблиці 2.3.

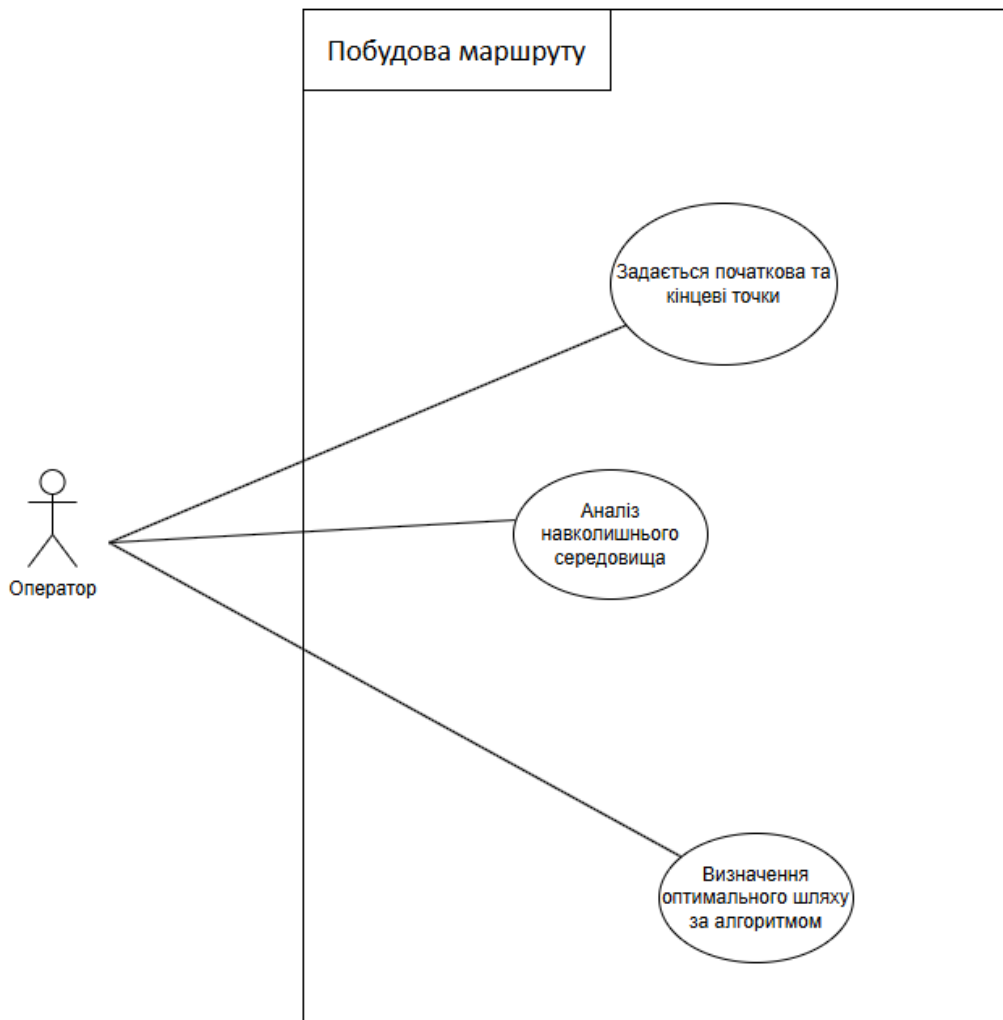


Рисунок 2.2 – Діаграма прецедентів для побудови маршруту

Таблиця 2.3 – Детальний опис діаграми прецедентів

Назва	Опис
Задається початкова та кінцева точки	Для реалізації прецеденту «Побудова маршруту» Оператор задає системі координати початкової та кінцевої точок, між якими робот повинен прокласти маршрут. Ці точки визначають, звідки робот розпочинає рух і куди він має дістатися.

Назва	Опис
Аналіз навколишнього середовища	Для реалізації прецеденту «Побудова маршруту» система проводить аналіз оточення, використовуючи дані з сенсорів робота, таких як ультразвукові сенсори і камера. Система ідентифікує перешкоди, складності рельєфу та інші фактори, які можуть вплинути на побудову маршруту.
Визначення оптимального шляху за алгоритмом	Для реалізації прецеденту «Побудова маршруту» система обчислює оптимальний маршрут за допомогою алгоритму, використовуючи дані про початкову і кінцеву точки та результати аналізу навколишнього середовища. Алгоритм дозволяє вибрати найбільш ефективний і безпечний шлях до цільової точки, уникаючи виявлених перешкод.

Прецедент «Побудова маршруту» забезпечує покрокову побудову оптимального маршруту між двома точками з урахуванням навколишнього середовища, що дає змогу роботу безпечно і ефективно досягти цілі.

2.1.5 Виявлення та обхід перешкод

Другою важливою функцією є виявлення та обхід перешкод у реальному часі. За допомогою ультразвукових сенсорів робот повинен ідентифікувати перешкоди, визначати їхні координати і, за необхідності, оновлювати маршрут для безпечного обходу. Камера дозволяє покращити точність розпізнавання об'єктів та забезпечує додаткову інформацію, яка допоможе оцінити параметри навколишніх перешкод.

Діаграму прецедентів до функціоналу виявлення та обходу перешкод наведено на рисунку 2.3.

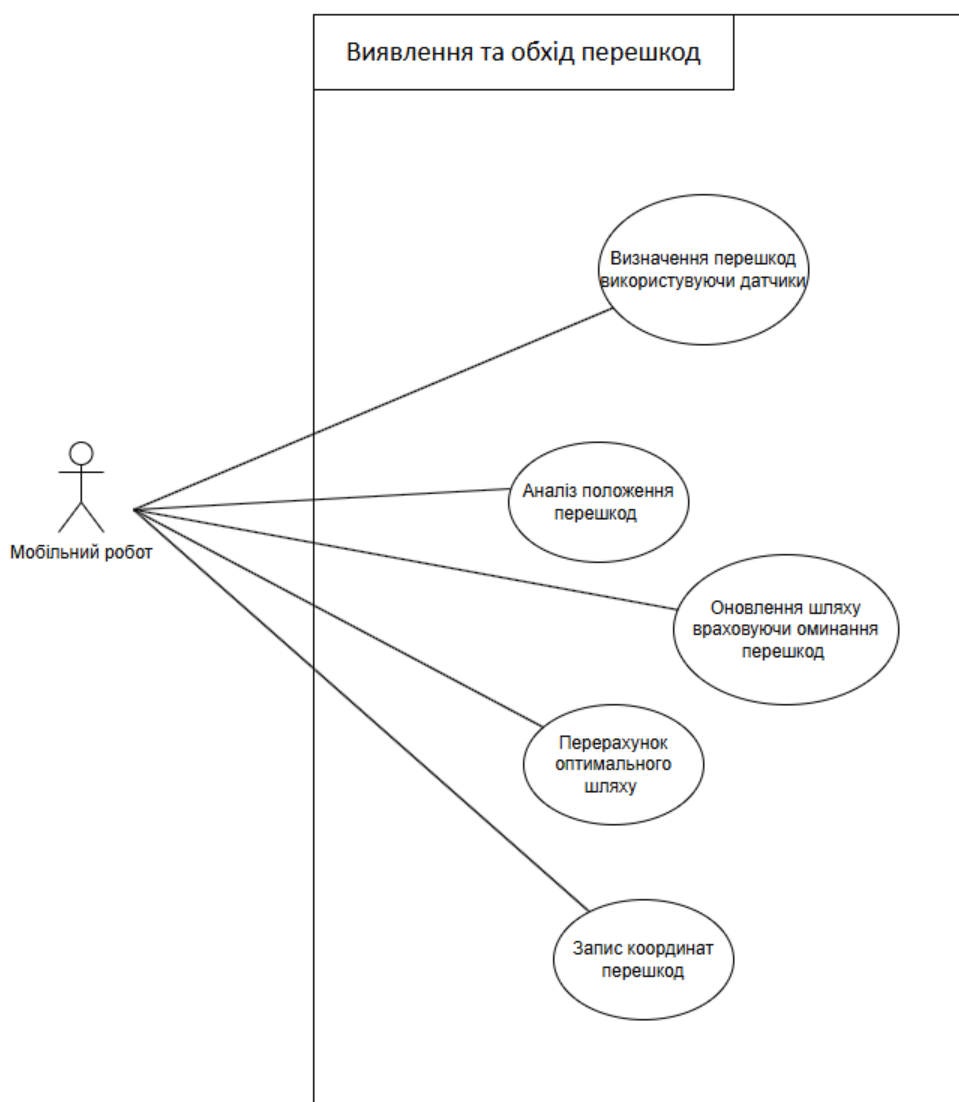


Рисунок 2.3 – Діаграма прецедентів для виявлення та обходу перешкод

Діаграми прецедентів до функціоналу виявлення та обходу перешкод наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Виявлення та обхід перешкод

Назва	Опис
Визначення перешкод використовуючи датчики	Для реалізації прецеденту «Виявлення та обхід перешкод» робот використовує свої сенсори (ультразвукові сенсори та камеру) для виявлення

Назва	Опис
	об'єктів, які можуть бути перешкодами. Система отримує дані від сенсорів, аналізує їх і визначає, чи є на шляху об'єкт, який потребує обходу.
Аналіз положення перешкод	Для реалізації прецеденту «Виявлення та обхід перешкод» після виявлення перешкоди система аналізує її положення, щоб визначити її точні координати, розмір і відстань до робота. Це допомагає зрозуміти, як саме слід обійти перешкоду.
Оновлення шляху, враховуючи оминання перешкод	Для реалізації прецеденту «Виявлення та обхід перешкод» після аналізу положення перешкоди система оновлює маршрут робота, щоб обійти перешкоду безпечно. Робот коригує свій шлях таким чином, щоб уникнути контакту з виявленою перешкодою, зберігаючи при цьому напрямок руху до цільової точки.
Перерахунок оптимального шляху	Для реалізації прецеденту «Виявлення та обхід перешкод» у випадках, коли обхід перешкоди значно впливає на маршрут, система здійснює перерахунок оптимального шляху з урахуванням нової інформації. Цей процес дозволяє роботу знайти найбільш ефективний маршрут до цільової точки з урахуванням виявлених змін у навколишньому середовищі.
Запис координат перешкод	Для реалізації прецеденту «Виявлення та обхід перешкод» після обходу перешкоди робот записує її координати для подальшого аналізу та зберігання у базі даних. Це дозволяє використовувати інформацію про перешкоди для оптимізації маршрутів у майбутньому.

Прецедент «Виявлення та обхід перешкод» забезпечує безпечний рух робота шляхом інтеграції кількох ключових етапів. Спочатку робот використовує свої сенсори, такі як ультразвукові датчики та камери, для виявлення об'єктів, які можуть створювати перешкоди. Система обробляє отримані дані, аналізує їх і визначає, чи є на шляху об'єкт, що потребує обходу. Після виявлення перешкоди система ретельно аналізує її положення, визначаючи точні координати, розміри та відстань до робота, що дозволяє зрозуміти, як найкраще обійти цей об'єкт.

На основі отриманої інформації маршрут робота коригується таким чином, щоб забезпечити безпечний обхід перешкоди без втрати напрямку руху до цільової точки. У випадках, коли обхід істотно впливає на загальну траєкторію, система здійснює перерахунок оптимального шляху, використовуючи нові дані для забезпечення максимально ефективного досягнення мети. Після завершення обходу робот записує координати виявленої перешкоди в базу даних, що дозволяє враховувати цю інформацію в майбутньому для покращення навігації та оптимізації маршрутів.

2.1.6 Адаптація до змін у середовищі

Система повинна також забезпечувати адаптацію до змін у середовищі. У разі появи нових об'єктів на шляху або змін рельєфу робот має динамічно оновлювати маршрут, враховуючи нову інформацію від сенсорів. Це забезпечує гнучкість у навігації та гарантує, що робот досягне цільової точки, навіть якщо початковий маршрут стає недоступним, діаграма прецедентів' зображена на рисунку 2.4.

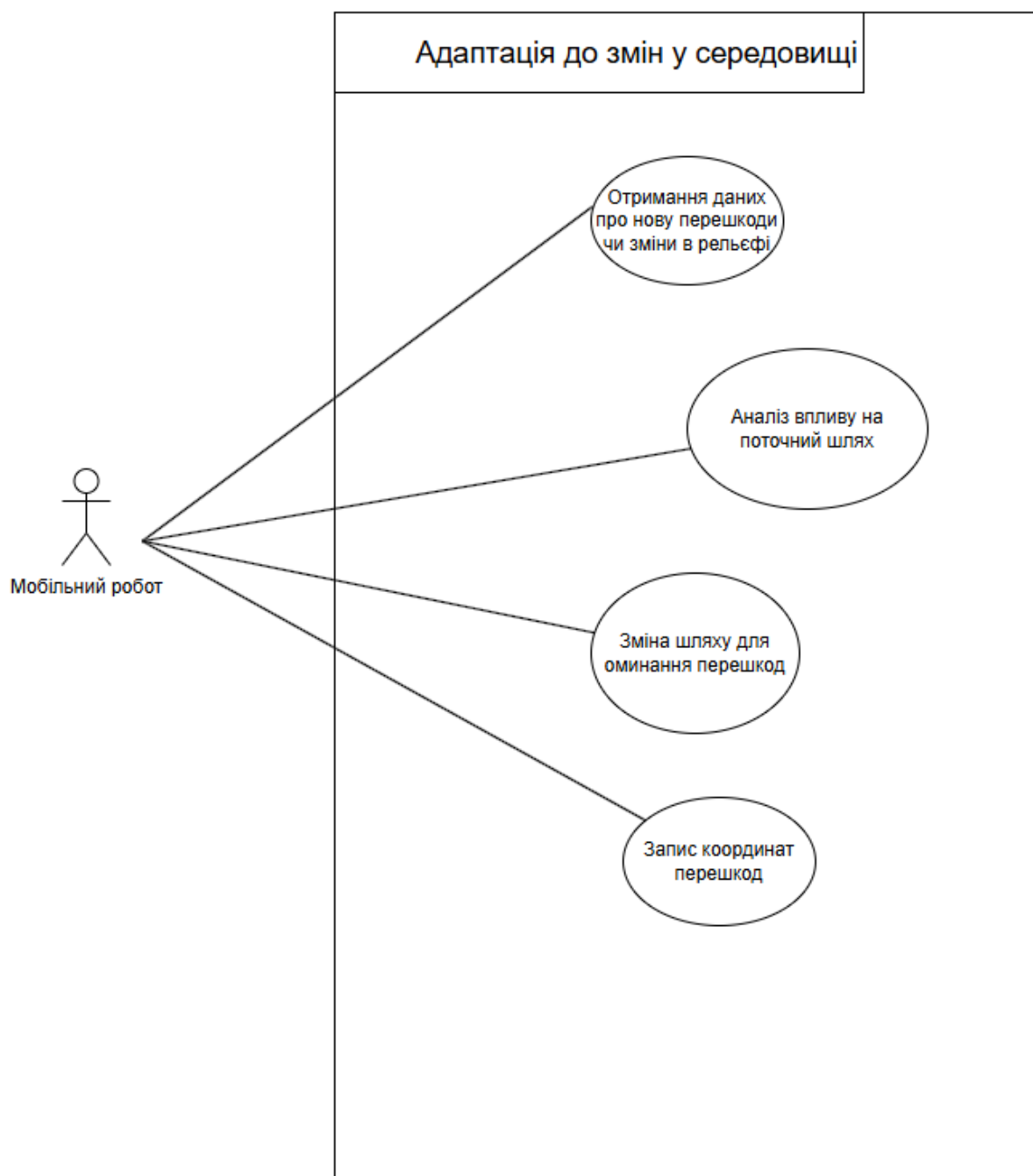


Рисунок 2.4 – Діаграма прецедентів для адаптація до змін у середовищі

Таблиця 2.5 – Адаптація до змін у середовищі

Назва	Опис
Отримання даних про нову перешкоду чи зміни в рельєфі	Для реалізації прецеденту «Адаптація до змін у середовищі» робот постійно отримує дані з ультразвукових сенсорів та камери. У випадку

Назва	Опис
	виявлення нової перешкоди або змін у рельєфі, система фіксує ці дані для подальшого аналізу.
Аналіз впливу на поточний шлях	Для реалізації прецеденту «Адаптація до змін у середовищі» система аналізує отримані дані, щоб визначити, чи потрібно коригувати поточний маршрут для уникнення перешкод або зміни рельєфу. Це включає оцінку можливих ризиків і потребу в коригуванні маршруту.
Зміна шляху для оминання перешкод	Для реалізації прецеденту «Адаптація до змін у середовищі» після аналізу впливу система оновлює маршрут робота для безпечного оминання перешкоди, зберігаючи напрямок руху до цільової точки.
Запис координат перешкод	Для реалізації прецеденту «Адаптація до змін у середовищі» робот записує координати нововиявлених перешкод для подальшого аналізу і зберігання в базі даних. Це дозволяє використовувати накопичені дані для оптимізації майбутніх маршрутів.

Прецедент «Адаптація до змін у середовищі» забезпечує здатність робота в режимі реального часу реагувати на нові перешкоди та зміни в рельєфі, коригуючи маршрут і зберігаючи дані про перешкоди для подальшого вдосконалення навігаційної системи.

2.1.7 Запам'ятовування маршруту та перешкод

Запам'ятовування маршруту та перешкод є ще однією ключовою вимогою. Система повинна зберігати дані про пройдені маршрути, ідентифіковані

перешкоди та оптимальні шляхи. Ця інформація допоможе аналізувати роботу системи, покращувати алгоритми навігації та забезпечити ефективніший рух у подібних умовах у майбутньому(рисунок 2.5).

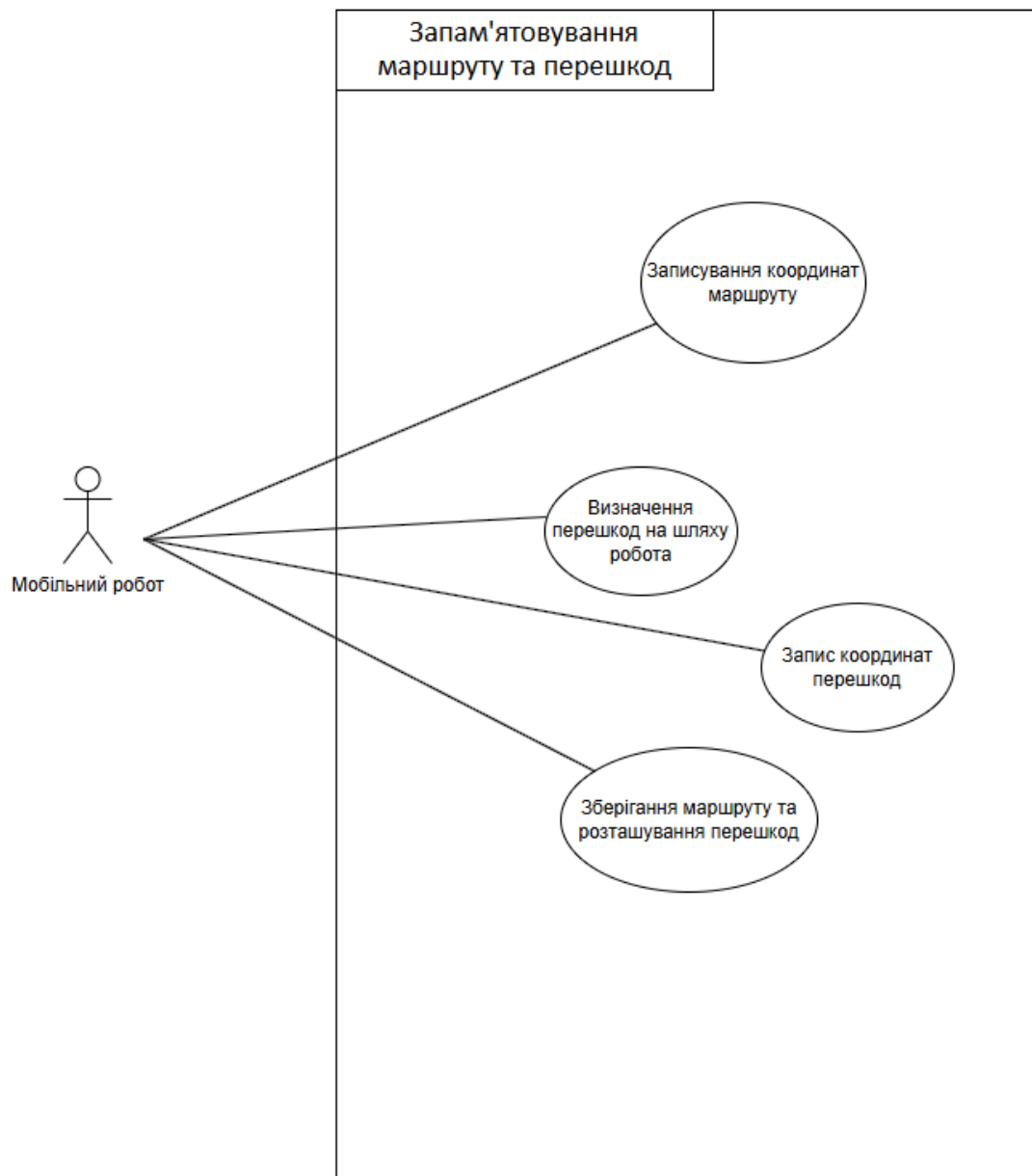


Рисунок 2.5 – Запам'ятовування маршруту та перешкод

Таблиця 2.6 – Запам'ятовування маршруту та перешкод

Назва	Опис
Записування координат маршруту	Для реалізації прецеденту «Запам'ятовування маршруту та перешкод» робот постійно записує

Назва	Опис
	свої координати під час руху. Це дозволяє відстежувати кожен пункт маршруту, який проходить робот.
Визначення перешкод на шляху робота	Для реалізації прецеденту «Запам'ятовування маршруту та перешкод» робот використовує сенсори для виявлення перешкод на маршруті. Це дозволяє зафіксувати, де саме робот зустрів перешкоду, щоб уникати її у майбутньому.
Запис координат перешкод	Для реалізації прецеденту «Запам'ятовування маршруту та перешкод» робот записує точні координати виявлених перешкод. Це забезпечує фіксацію місць, де були виявлені перешкоди, для подальшого використання цієї інформації.
Зберігання маршруту та розташування перешкод	Для реалізації прецеденту «Запам'ятовування маршруту та перешкод» всі дані про пройдений маршрут та координати виявлених перешкод зберігаються в базі даних системи. Це дозволяє використовувати накопичену інформацію для подальшого аналізу та покращення навігації.

Прецедент «Запам'ятовування маршруту та перешкод» забезпечує запис та зберігання всіх даних про пройдений маршрут та виявлені перешкоди, що дозволяє роботу ефективніше адаптуватися до середовища в майбутніх завданнях.

2.2 Формування нефункціональних вимог

Нефункціональні вимоги до системи навігації мобільного робота при невідомому рельєфі охоплюють ключові аспекти: надійність, швидкодію,

стійкість до відмов, масштабованість, зручність використання, безпеку, ефективність використання ресурсів та сумісність. Ці вимоги спрямовані на забезпечення високої якості системи та стабільності її роботи навіть у складних і непередбачуваних умовах.

Надійність є основним параметром, що гарантує стабільну роботу системи під час виконання всіх етапів навігації. Навіть у ситуаціях обмеженої видимості через несприятливі погодні умови, наприклад, туман або пил, або за наявності незначних перешкод, система повинна забезпечувати безперервну працездатність. Застосування алгоритмів самокорекції та перевірки достовірності даних дозволяє підтримувати заданий рівень надійності.

Швидкодія є критичним фактором для забезпечення ефективного реагування на зміну умов середовища. Обробка даних від сенсорів, необхідна для виявлення перешкод, їх аналізу та перебудови маршруту, має виконуватися в межах однієї секунди. Це дозволяє уникнути простоїв у русі робота та зберегти безперервність його операцій. Одночасно алгоритми побудови маршрутів повинні працювати синхронно з реальною швидкістю переміщення робота, щоб уникнути розриву між обчисленнями та фактичними діями.

Система має відповідати вимогам стійкості до відмов, що включає здатність зберегти базову функціональність навіть у разі втрати зв'язку з центральним сервером або контролером. Наприклад, у разі короткочасної втрати сигналу робот повинен продовжувати рух за останнім підтвердженим маршрутом і автоматично відновлювати роботу після повернення зв'язку. Передбачення резервних каналів для обробки даних від сенсорів мінімізує ймовірність критичних помилок через збої обладнання.

Масштабованість системи передбачає можливість її розширення без значної зміни базової архітектури. Наприклад, додавання нових сенсорів, алгоритмів обробки даних або підсистем навігації повинно інтегруватися з основним модулем без необхідності кардинальної переробки коду. Це дозволяє адаптувати систему до нових вимог чи специфічних завдань у майбутньому.

Зручність використання забезпечується інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом оператора, який дозволяє легко контролювати стан роботи та виконання завдань. Оператор повинен мати можливість отримувати повідомлення про ключові події, стани системи та параметри роботи в реальному часі. Це дозволяє швидко реагувати на можливі збої або зміну зовнішніх умов.

Безпека є пріоритетом, особливо для запобігання зіткненням з перешкодами, що можуть пошкодити роботу або інші об'єкти. У разі виявлення критичних помилок система повинна виконувати аварійне вимкнення, мінімізуючи ризики пошкоджень. Алгоритми прогнозування поведінки об'єктів у середовищі дозволяють уникати зіткнень і передбачати можливі загрози.

Ефективність використання ресурсів є важливою для забезпечення стабільності роботи. Система має використовувати не більше 70% доступної обчислювальної потужності та оперативної пам'яті, залишаючи резерв для інших процесів роботи, таких як підтримка комунікації або виконання складних обчислень.

Сумісність з такими платформами, як CoppeliaSim та Python, є важливою для інтеграції системи навігації з іншими модулями. Використання стандартів протоколів для обміну даними забезпечує легке підключення до зовнішніх сервісів, таких як системи моніторингу або аналізу в реальному часі, що підвищує функціональність і адаптивність системи.

Висновок до розділу 2

У цьому розділі було сформовано функціональні та нефункціональні вимоги до системи навігації мобільного робота для роботи при невідомому рельєфі.

Першочерговими функціональними вимогами є побудова маршруту, виявлення та обхід перешкод, адаптація до змін у середовищі, а також запам'ятовування маршрутів та перешкод. Кожен з цих аспектів детально розглянутий за допомогою відповідних діаграм прецедентів, що ілюструють

основні процеси, необхідні для забезпечення ефективною та безпечною навігації. Описані прецеденти охоплюють функції, які дозволяють роботу самостійно прокладати оптимальний маршрут, адаптуватися до нових умов, уникати перешкод та накопичувати дані про середовище для підвищення ефективності в майбутніх завданнях.

Нефункціональні вимоги визначають показники, які забезпечують високу якість системи та її стабільність та ефективність у складних умовах. Зокрема, було визначено вимоги щодо надійності, швидкодії, стійкості до відмов, масштабованості, зручності використання, безпеки, ефективності використання ресурсів та сумісності. Дані вимоги спрямовані на забезпечення стабільної роботи системи, швидкої реакції на зміни в оточенні, можливості легкої інтеграції нових модулів та гарантування безпеки під час виконання завдань.

Загалом, вимоги, викладені у цьому розділі, забезпечують основу для подальшого проектування та розробки навігаційної системи робота, що дозволить йому ефективно виконувати свої функції в умовах непередбачуваного середовища, реагувати на зовнішні зміни і виконувати завдання з мінімальними ризиками для себе та навколишніх об'єктів.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ

3.1 Вибір та обґрунтування елементів та технологій

У цьому розділі розглядаються елементи системи та технології, використані для розробки програмного забезпечення, апаратного забезпечення та алгоритмічного забезпечення, а також їх обґрунтування. Кожен компонент системи вибирається відповідно до вимог проєкту, враховуючи його функціональність, продуктивність та сумісність із загальною архітектурою..

Основним апаратним забезпеченням системи є роботизована платформа Pioneer 3-DX. Вибір цієї платформи зумовлений її модульністю, надійністю та широким застосуванням у дослідницьких проєктах. Завдяки підтримці різноманітних сенсорів і актуаторів платформа дозволяє реалізувати комплексні сценарії автономної поведінки.

Для виявлення перешкод використовуються ультразвукові сенсори, які забезпечують точне вимірювання на близьких відстанях, а також лазерний сенсор (LIDAR) для побудови двовимірної карти середовища. Ці сенсори обрано через їхню ефективність у режимі реального часу та сумісність із платформою. Два незалежних мотори забезпечують маневреність робота, що є важливим для виконання алгоритмів навігації.

Як симуляційне середовище обрано CoppeliaSim, оскільки воно надає інструменти для фізичного моделювання роботів, вбудовані API для роботи з сенсорами та моторами, а також підтримує скриптову мову Lua. Використання CoppeliaSim дозволяє візуалізувати рух робота, тестувати алгоритми в симульованому середовищі та інтегрувати різноманітні компоненти в єдину систему.

Крім Lua, використовується Python для створення клієнтського застосунку, який забезпечує інтерактивний контроль симуляції. Завдяки бібліотеці Tkinter реалізовано графічний інтерфейс користувача, а за допомогою `coppeliastm_zmqremoteapi_client` здійснюється комунікація між симулятором і

клієнтською частиною. Простий формат JSON застосовується для зберігання даних користувачів, що забезпечує легкість роботи з файлами.

Алгоритми:

– центральним алгоритмом системи є алгоритм Брейтенберга, який використовується для автономної навігації. Він дозволяє роботу реагувати на перешкоди на основі даних сенсорів, розраховуючи швидкість моторів залежно від активності сенсорів і вагових коефіцієнтів. Цей алгоритм відзначається простотою реалізації та високою швидкодією;

– для створення карти середовища використовується метод сіткових карт (Grid Mapping). Лазерний сенсор забезпечує дані про відстані до об'єктів, а алгоритм оновлює ймовірності комірок у режимі реального часу. Цей підхід враховує похибки вимірювань і дозволяє створювати точну модель середовища, придатну для навігації;

– алгоритм авторизації в Python забезпечує контроль доступу до системи. Він реалізований через порівняння введених даних із збереженими у файлі JSON, що гарантує базовий рівень безпеки.

Система побудована як взаємодія кількох компонентів. Python-застосунок керує симуляцією через API, надсилаючи команди на запуск, зупинку та збереження карти. Алгоритми навігації та побудови карти виконуються в реальному часі в CoppeliaSim, використовуючи дані сенсорів. Інтерфейс користувача дозволяє оператору легко взаємодіяти з системою, контролюючи основні функції.

Структура мобільного робота який буде використаний для симуляцій системи наведена у додатку Б. Передбачено використання лідара (Нокуо) для побудови карти середовища, ультразвукових сенсорів для виявлення перешкод, а також точок кріплення для додаткових модулів. Це забезпечує розширюваність системи.

3.1.1 Вибір алгоритму

Розробка автономної системи навігації робота та побудови карти середовища потребує вибору ефективних алгоритмів, які забезпечують реактивну поведінку, обхід перешкод, побудову карти та цілеспрямований рух. У даній роботі було обрано два основні алгоритми: алгоритм Брейтенберга для управління рухом та метод сіткових карт (Grid Mapping) для побудови карти середовища. Вибір цих алгоритмів базувався на їхній простоті, швидкодії та можливості інтеграції з обраними апаратними і програмними компонентами.

3.1.1.1 Алгоритм Брейтенберга

Алгоритм Брейтенберга моделює реактивну поведінку, де дані із сенсорів безпосередньо впливають на мотори робота через вагові коефіцієнти рисунку 3.1. Основна ідея полягає у прямому перетворенні вхідних сенсорних сигналів у керуючі сигнали для моторів. Цей підхід забезпечує роботу в режимі реального часу.

Такий підхід простий у реалізації, оскільки не потребує складних обчислень чи централізованого управління. Залежно від конфігурації вагових коефіцієнтів, робот може демонструвати різні типи поведінки, наприклад, уникнення перешкод, слідування за джерелом світла чи дослідження середовища.

Основна перевага алгоритму – його швидкодія та адаптивність у динамічних умовах. Однак, через обмеженість у складних завданнях, його часто поєднують із більш складними алгоритмами для створення багаторівневих систем управління.

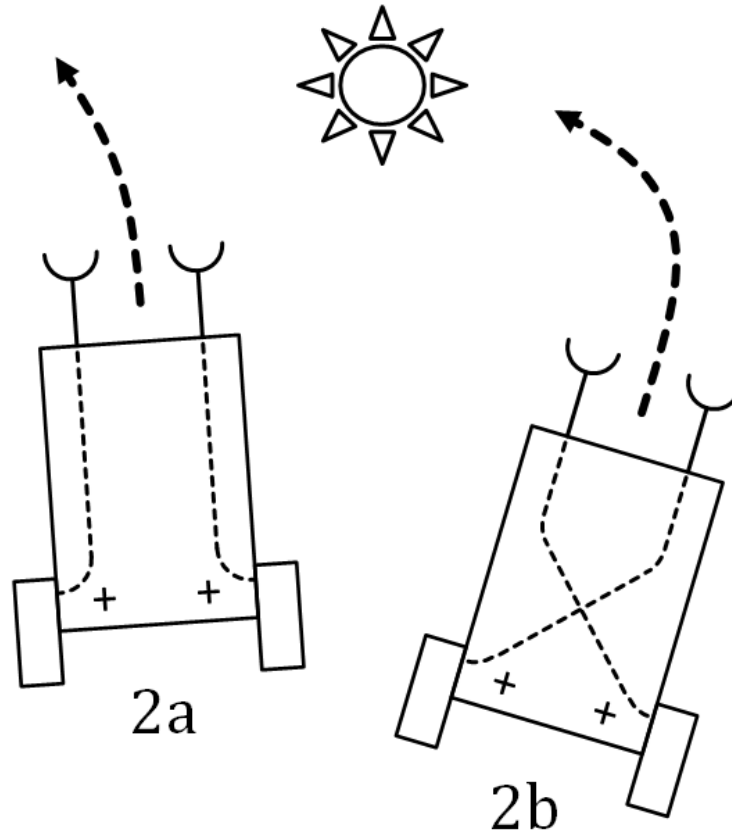


Рисунок 3.1 – Транспортний засіб Брейтенберга

Математична основа. Кожен із n сенсорів робота генерує сигнал, що відображає відстань до перешкоди:

$$s_i = 1 - \frac{d_i + d_{min}}{d_{max} - d_{min}}, \text{ для } d_{min} \leq d_i \leq d_{max}, \quad (3.1)$$

де d_i – відстань, виміряна i -м сенсором;

d_{max}, d_{min} – мінімальна і максимальна дистанція виявлення.

Ця формула використовується для визначення рівня небезпеки перешкоди, де $s_i = 0$ означає, що перешкоди немає, а $s_i = 1$ – перешкода дуже близько. Така нормалізація дозволяє ефективно поєднувати сигнали різних сенсорів.

Після нормалізації значення сенсорів s_i , швидкість лівого та правого моторів обчислюється з використанням вагових коефіцієнтів за формулами 3.2 та 3.3:

$$v_{Left} = v_0 + \sum_{i=1}^n w_{i,L} \cdot s_i, \quad (3.2)$$

$$v_{Right} = v_0 + \sum_{i=1}^n w_{i,R} \cdot s_i, \quad (3.3)$$

де v_0 – базова швидкість руху робота;

$w_{i,L}, w_{i,R}$ – вагові коефіцієнти, які визначають вплив сенсорів на лівий і правий мотори.

Формули 3.2 та 3.3 забезпечують корекцію швидкостей моторів залежно від виявлених перешкод. Наприклад, якщо сенсор із правого боку виявляє перешкоду, його вплив через $w_{i,L}$ сповільнить праве колесо, спрямовуючи робота вліво для уникнення.

Для забезпечення симетрії у поведінці робота використовується умова симетрії вагових коефіцієнтів 3.4:

$$w_{i,L} = -w_{i,R} + 1, R, \quad (3.4)$$

Ця симетрія гарантує, що вплив сенсорів на один мотор врівноважується впливом симетричних сенсорів на інший мотор, що забезпечує плавну та логічну реакцію робота.

Обґрунтування вибору:

- простота реалізації дозволяє інтегрувати алгоритм у систему реального часу.
- алгоритм ефективний для середовищ зі змінними перешкодами.
- реактивна природа забезпечує миттєву реакцію робота на зміни у середовищі.

3.1.1.2 Метод сіткових карт

Опис алгоритму. Метод сіткових карт використовується для побудови двовимірної дискретної моделі середовища. Простір поділяється на комірки, кожна з яких має ймовірність $p(m | z)$, що в ній знаходиться перешкода. Ця ймовірність оновлюється на основі даних із лазерного сенсора.

Математична основа для побудови карти. Карта складається з $M \times M$ комірок. Ймовірність $p(m | z)$ наявності перешкоди в комірці m оновлюється за правилом Байєса (формула 3.5):

$$p(m | z) = \frac{p(m|z) \cdot p(m)}{p(z)}, \quad (3.5)$$

де $p(z)$ — загальна ймовірність отримання даних;

$p(z | m)$ — ймовірність отримання даних z , якщо в комірці є перешкода;

$p(z)$ — загальна ймовірність отримання даних.

Для спрощення обчислень використовується логарифмічна форма:

Особливості параметрів:

- розмір комірки (*cell_size*): 0.05 м;
- максимальний діапазон лазера (*laser_max_range*): 2 м;
- похибка вимірювання.

Ця формула дозволяє враховувати нові дані про середовище, поступово уточнюючи модель. Для спрощення обчислень використовується логарифмічна форма (формула 3.6):

$$\text{logit}(p(m | z)) = \text{logit}(p(m)) + \text{logit}(p(z | m)). \quad (3.6)$$

Це зменшує кількість обчислень та підвищує швидкість роботи алгоритму.

Для побудови карти використовується перетворення даних із лазерного сенсора у декартові координати за формулами (3.7) та (3.8):

$$x = r \cos \theta, \quad (3.7)$$

$$y = r \sin \theta, \quad (3.8)$$

де r – відстань, виміряна лазером;

θ – кут сенсора.

Обґрунтування вибору:

– висока точність у відображенні середовища.

– використання імовірнісного підходу забезпечує надійність навіть у разі помилкових вимірювань.

– можливість інтеграції з іншими алгоритмами навігації.

Отже, оскільки алгоритм Брейтенберга забезпечує реактивну поведінку для уникнення перешкод у реальному часі, а метод сіткових карт створює глобальну модель середовища. Комбінація цих алгоритмів дозволяє роботу одночасно адаптуватися до локальних умов і будувати карту для майбутніх навігаційних завдань.

3.2 Структурна схема системи

Система включає:

а) модуль сенсорів (LiDAR та ультразвукові датчики):

1) Відповідає за отримання даних про навколишнє середовище.

2) Зібрані дані передаються до контролера для подальшої обробки.

б) контролер:

1) центральний елемент системи, що координує взаємодію між усіма модулями.

2) виконує обробку даних сенсорів, передає команди до двигунів, оновлює карту та ініціює команди запуску і зупинки симуляції.

в) модуль побудови маршруту:

Отримує оброблені дані про перешкоди і генерує команди руху для модулю двигунів.

г) модуль двигунів:

Забезпечує рух мобільного робота відповідно до команд, отриманих від контролера.

г) модуль оновлення карти:

Використовується для побудови та збереження карти на основі отриманих сенсорних даних.

д) API системи симуляції:

Забезпечує обмін даними з симулятором, включаючи передачу карти, запуск і зупинку симуляції.

Діаграму компонентів зображено у додатку В.

3.2.1 Модуль симуляції

У цьому розділі будуть наведені модулі системи, розроблені з урахуванням функціональних та нефункціональних вимог. Блок-схема роботи симуляції наведено у додатку Г. Розроблена система складається з двох основних модулів: модуль симуляції та модуль інтерфейсу симуляції.

Головна задача модуля симуляції – отримувати вхідні дані від модуля інтерфейсу, обробляти їх і надсилати відповідь назад. Цей модуль складається з таких частин:

– модуль навігації мобільного робота, цей модуль забезпечує рух мобільного робота в симульованому середовищі та відповідає за реалізацію алгоритму Брейтенберга. Він отримує дані з ультразвукових сенсорів і лазерного сенсора (LIDAR), обчислює швидкості моторів на основі оброблених даних та керує моторними приводами робота;

– модуль побудови карти середовища, даний модуль відповідає за обробку даних лазерного сенсора для створення двовимірної карти середовища. Він інтегрує інформацію про перешкоди у вигляді ймовірностей для кожної комірки

карти, використовуючи метод сіткових карт. Після завершення симуляції цей модуль генерує карту у вигляді зображення, яке передається до модуля інтерфейсу;

– модуль обробки сенсорних даних, цей модуль отримує дані від сенсорів робота: ультразвукових і лазерних. Він обробляє ці дані, передає їх у модулі навігації та побудови карти для подальшого використання в алгоритмах, а також формує інформацію для візуалізації;

– модуль управління симуляцією, відповідає за запуск, зупинку та контроль процесу симуляції. Цей модуль приймає команди від клієнтського застосунку через Remote API, інтегруючи їх у середовище CoppeliaSim.

Ієрархічна структура системи навігації MR наведена у додатку Б.

3.2.2 Модуль інтерфейсу симуляції

Модуль інтерфейсу надає користувачеві засоби взаємодії з системою, включаючи контроль симуляції, візуалізацію та управління функціоналом. Блок-схему роботи інтерфейсу наведено у додатку Д. Він складається з таких компонентів:

– модуль авторизації користувачів, цей модуль забезпечує доступ до системи лише авторизованим користувачам. Він отримує дані із форми входу, перевіряє їх за допомогою бази даних користувачів і надає доступ до функціоналу системи відповідно до прав користувача;

– модуль роботи з базою даних, забезпечує підключення до сховища даних, у якому зберігаються облікові записи користувачів. Цей модуль також виконує запити на створення, оновлення або видалення користувачів;

– модуль управління симуляцією, забезпечує користувачеві можливість запуску, зупинки та збереження результатів симуляції. Команди, отримані через інтерфейс, передаються до модуля управління симуляцією у CoppeliaSim;

– модуль візуалізації карти середовища, цей модуль відповідає за відображення карти середовища, створеної в процесі симуляції. Користувач

може переглянути карту після завершення симуляції або під час її виконання у режимі реального часу;

– модуль обробки даних сенсорів, забезпечує відображення даних, отриманих із сенсорів мобільного робота (ультразвукових і лазерного). Модуль також дає змогу користувачеві відправляти команди для зміни поведінки робота через інтерфейс системи.

3.3 Реалізація бізнес-логіки системи

Реалізація бізнес-логіки системи забезпечує інтеграцію основних алгоритмів, сенсорних даних, управління роботизованою платформою та взаємодії з користувачем. У цьому розділі детально описано, як бізнес-логіка реалізує автономну навігацію робота, побудову карти середовища, управління через інтерфейс і обробку сенсорної інформації. Процеси, що складають бізнес-логіку системи, подано у вигляді BPMN-діаграми в додатку Е. Ця діаграма ілюструє послідовність дій, взаємодію між компонентами системи та ключові точки прийняття рішень.

У додатку Ж представлена діаграма класів, яка деталізує структурну реалізацію компонентів, що забезпечують ці процеси. Вона описує основні елементи бізнес-логіки, їхні функції та зв'язки між ними.

Основні завдання бізнес-логіки:

а) обробка даних із сенсорів;

1) система отримує дані з ультразвукових сенсорів для виявлення близьких перешкод;

2) лазерний сенсор забезпечує інформацію про відстані до об'єктів у середовищі, яка використовується для побудови карти;

3) дані обробляються для отримання зведеної інформації про середовище, що надходить до модулів навігації, побудови карти та візуалізації;

б) Реалізація алгоритму Брейтенберга;

1) основна частина бізнес-логіки полягає у використанні сенсорних даних для автономної навігації;

2) дані з ультразвукових сенсорів обробляються за алгоритмом Брейтенберга, щоб розрахувати швидкості лівого та правого моторів. Ці швидкості забезпечують реактивну поведінку робота, дозволяючи йому уникати перешкод у реальному часі;

в) Побудова карти середовища;

1) лазерний сенсор передає дані про відстані до об'єктів, які обробляються методом сіткових карт;

2) для кожної комірки карти оновлюється ймовірність наявності перешкоди. Дані записуються у вигляді двовимірної моделі середовища;

г) Управління через інтерфейс;

1) користувач може керувати системою через графічний інтерфейс, створений у Python;

2) через інтерфейс доступні такі функції, як запуск і зупинка симуляції, перегляд карти середовища та відправлення команд роботу.

3.4 Опис інтерфейсу користувача та інструкція використання застосунку

Послідовність взаємодії між користувачем і системою показано у додатку И. Ця діаграма демонструє, як користувач отримує доступ до функцій авторизації, запускає симуляцію та переглядає її результати. Взаємодія між компонентами системи, такими як база даних та API, також включена для повноти картини.

3.4.1. Опис інтерфейсу користувача,

а) головне вікно застосунку. Головне вікно є початковою точкою роботи з застосунком. У ньому відображаються основні кнопки для доступу до функцій,

таких як авторизація, запуск симуляції та перегляд результатів. На рисунку 3.2 показано вигляд головного вікна застосунку;

- 1) заголовок: «RoboteRRR»;
- 2) елементи керування;
 - кнопка «Увійти» для переходу до авторизації;
 - кнопка «Реєстрація» для створення нового облікового запису;
 - кнопка «Вийти» для закриття застосунку;

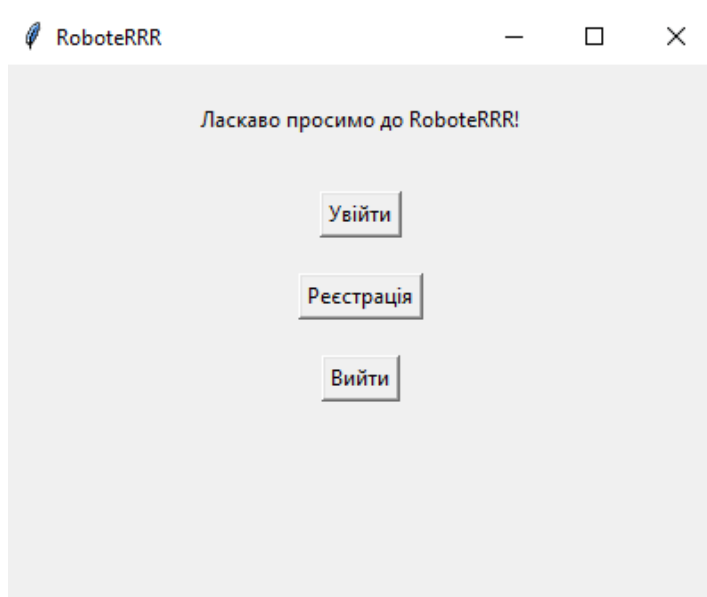


Рисунок 3.2 – Головне вікно застосунку

б) форма авторизації. Форма авторизації дозволяє користувачеві ввести ім'я користувача та пароль для доступу до функцій системи. Її інтерфейс показано на рисунку 3.3;

- 1) поля вводу;
 - поле для введення імені користувача;
 - поле для введення пароля (з прихованим введенням);
- 2) кнопки;
 - «Увійти» – для підтвердження авторизації;
 - «Назад» – для повернення до головного вікна;

в) форма реєстрації. Дозволяє новим користувачам створити обліковий запис. Зовнішній вигляд форми показано на рисунку 3.4;

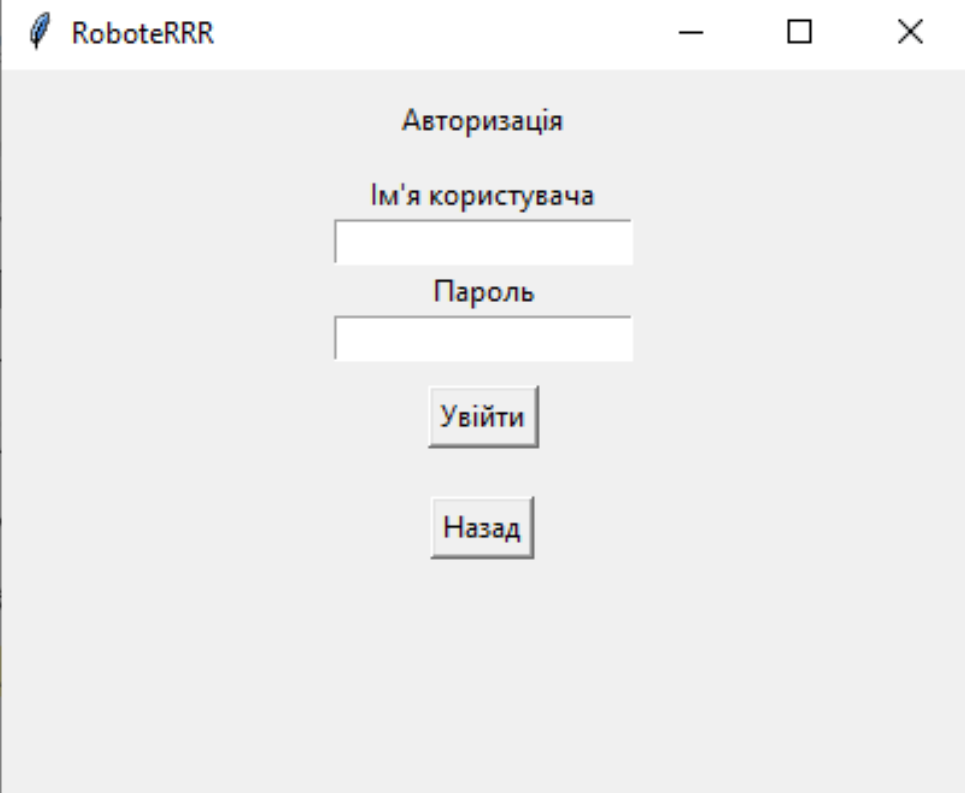


Рисунок 3.3 – Форма авторизації

1) поля вводу;

– ім'я користувача;

– пароль;

2) кнопки;

– «Зареєструватися» – для збереження нового облікового запису;

– «Назад» – для повернення до головного вікна;

г) вікно управління симуляцією. Після успішної авторизації користувач потрапляє у головне меню управління симуляцією. Інтерфейс цього вікна представлений на рисунку 3.5.

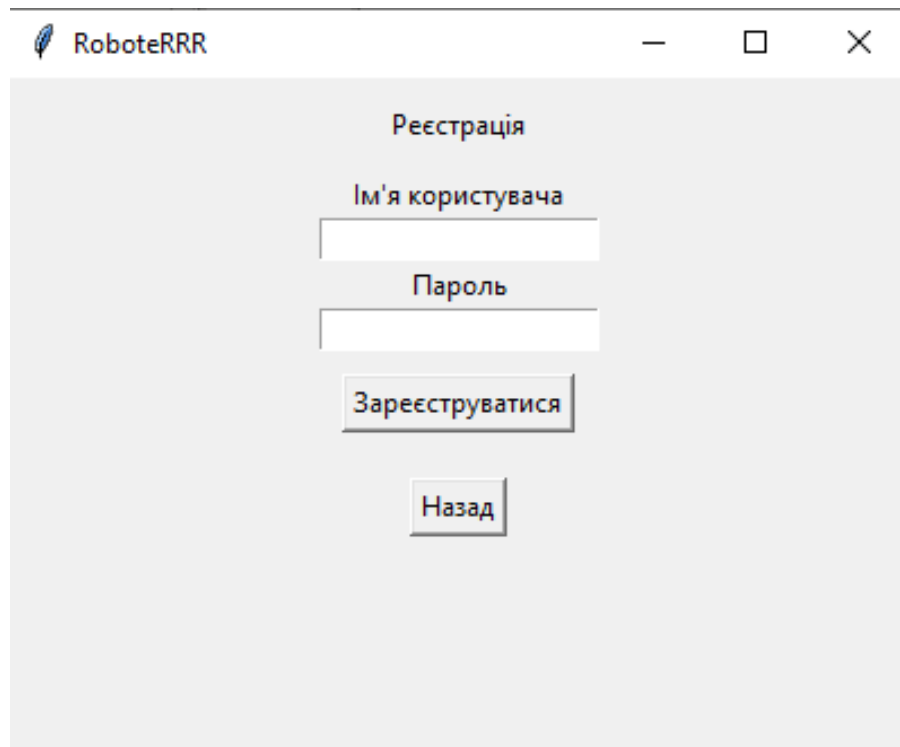


Рисунок 3.4 – Вікно реєстрації

Елементи інтерфейсу:

– кнопка «Почати симуляцію» виконує запуск фізичної симуляції в середовищі CorreliaSim. При натисканні цієї кнопки програма ініціює процес симуляції, який може включати моделювання поведінки мобільного робота в заданому середовищі. У цьому середовищі робот використовує свої сенсори для дослідження простору, взаємодії з об'єктами та побудови карти. Запуск симуляції є ключовим кроком у тестуванні функціональних можливостей системи та перевірці алгоритмів навігації;

– кнопка «Зупинити симуляцію» завершує поточну симуляцію в середовищі CorreliaSim. Натискання цієї кнопки припиняє всі активні процеси симуляції, а також автоматично зберігає карту середовища, створену під час роботи робота. Ця функція дозволяє зберегти результати досліджень і використовувати їх у подальшому аналізі або розробці. Завершення симуляції забезпечує оператору контроль над процесом і гарантує, що отримані дані не будуть втрачені;

– кнопка «Зберегти карту» дозволяє зберегти поточну карту середовища у файл. Карта, створена під час симуляції, може містити інформацію про розташування об'єктів, перешкод і шляхів. Натискання цієї кнопки ініціює процес збереження карти у визначеному форматі, що забезпечує її подальше використання для аналізу, візуалізації або завантаження у майбутніх симуляціях. Ця функція є важливою для документування результатів роботи системи;

– кнопка «Вийти» завершує роботу застосунку. Натискання цієї кнопки зупиняє всі активні процеси, закриває середовище симуляції, а також забезпечує коректне завершення роботи програми. Перед виходом користувачеві може бути запропоновано підтвердити дію, щоб уникнути випадкового завершення роботи. Це гарантує, що всі важливі дані будуть збережені, а система залишиться в стабільному стані.

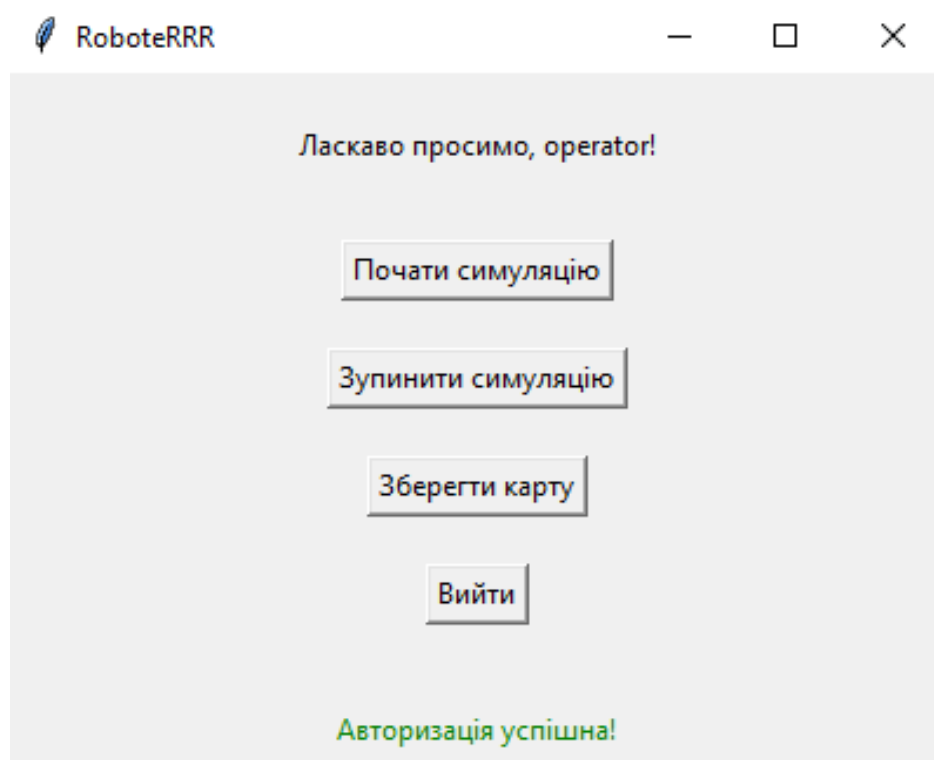


Рисунок 3.5 – Вікно успішної авторизації

У застосунку реалізована функція перегляду збереженої карти середовища. Карта відображається у вигляді графічного зображення, створеного на основі даних симуляції. Приклад карти наведено на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Карта

3.4.2 Інструкція використання застосунку

Крок 1: Запуск застосунку:

– відкрити Python-застосунок, подвійно клацнувши на відповідному файлі виконуваного скрипту;

– у головному вікні застосунку (Рисунок 3.2) натиснути кнопку «Увійти», якщо у вас є обліковий запис, або «Реєстрація», щоб створити новий.

Крок 2: Авторизація або реєстрація:

– для авторизації використовуйте форму авторизації (Рисунок 3.3), введіть своє ім'я користувача та пароль у відповідні поля й натисніть кнопку «Увійти»;

– у разі успішної авторизації відкриється меню управління симуляцією (Рисунок 3.5);

– у разі помилкового вводу система видасть повідомлення про помилку;

– для реєстрації скористайтеся формою реєстрації (Рисунок 3.4), введіть нове ім'я користувача та пароль, після чого натисніть «Зареєструватися»;

Крок 3: Запуск симуляції:

– у вікні управління симуляцією (Рисунок 3.5) натисніть кнопку «Почати симуляцію»;

– спостерігайте за рухом робота в середовищі CoppeliaSim, який уникає перешкод і збирає дані про середовище.

Крок 4: Зупинка симуляції:

– для завершення симуляції натисніть кнопку «Зупинити симуляцію» (Рисунок 3.5);

– система автоматично зупиняє робота, завершує симуляцію в CoppeliaSim і зберігає карту середовища.

Крок 5: Збереження карти:

– у будь-який момент симуляції натисніть кнопку «Зберегти карту» (Рисунок 3.5);

– карта зберігається у форматі BMP у заданому місці, її можна переглянути через вікно результатів (Рисунок 3.6).

Крок 6: Завершення роботи:

– для виходу із системи натисніть кнопку «Вийти» у головному меню (Рисунок 3.5).

Висновки до розділу 3

У цьому розділі було детально розглянуто розробку системи, яка забезпечує автономну навігацію мобільного робота, побудову карти середовища та інтерактивне управління через графічний інтерфейс користувача.

Основою системи є роботизована платформа Pioneer 3-DX, доповнена ультразвуковими сенсорами для виявлення перешкод та лазерним сенсором (LIDAR) для точного моделювання середовища. Використання симуляційного середовища CoppeliaSim разом із Lua-скриптами дозволило реалізувати

ефективну взаємодію апаратних компонентів із алгоритмами навігації та картографії.

Було обґрунтовано вибір двох ключових алгоритмів:

– алгоритм Брейтенберга забезпечує реактивну поведінку робота, що дозволяє уникати перешкод у реальному часі. Його простота та швидкодія є основними перевагами для автономної навігації.

– метод сіткових карт дозволяє створювати точну ймовірнісну модель середовища, яка може бути використана для подальшої навігації робота або візуалізації результатів.

Було описано структурну схему системи, яка складається з модуля симуляції та модуля інтерфейсу. Модуль симуляції реалізує обробку даних сенсорів, навігацію робота та побудову карти середовища, тоді як модуль інтерфейсу забезпечує користувачеві зручний доступ до основних функцій системи, включаючи запуск, зупинку симуляції, перегляд та збереження результатів.

Реалізація бізнес-логіки охоплює інтеграцію всіх компонентів системи: обробку даних, виконання алгоритмів, взаємодію між модулями та управління через інтерфейс. Для полегшення розуміння логіки роботи системи представлено BPMN-діаграму, що ілюструє ключові процеси та їх взаємодію.

Нарешті, було надано детальний опис інтерфейсу користувача та покрокову інструкцію для роботи із застосунком. Завдяки графічному інтерфейсу користувач може легко взаємодіяти із системою, керувати симуляцією та переглядати її результати.

Таким чином, розроблена система відповідає функціональним і нефункціональним вимогам, забезпечуючи ефективне виконання задач автономної робототехніки та інтерактивного управління. Вона є гнучкою, масштабованою та придатною для подальшого вдосконалення та використання в дослідницьких чи навчальних цілях.

4 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

4.1 Мануальне тестування

Мануальне тестування системи передбачає перевірку її основних функціональних компонентів через безпосередню взаємодію з інтерфейсом користувача, симуляційним середовищем та алгоритмами. Було визначено ключові функції, які будуть тестуватися за сценаріями, описаними в таблицях. Результати тестування допоможуть зрозуміти, що система виконує поставлені завдання відповідно до функціональних вимог.

а) авторизація користувача

1) Мета цього тестування – перевірити правильність роботи модуля авторизації. Усі можливі сценарії взаємодії, включаючи успішний вхід, невдалий вхід через неправильний пароль або логін, а також спроби залишити поля порожніми, описані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Авторизація користувача

Назва	Вхідні дані	Очікуваний результат
Успішна авторизація	Введення імені користувача та паролю	Відкривається головне меню з доступними функціями управління симуляцією.(рисунок 4.1)
Невдала авторизація	Введення некоректного імені користувача та паролю	З'являється повідомлення: «Невірне ім'я користувача чи пароль»(рисунок 4.2)
Введення порожніх полів	Натискання кнопки «Увійти» без заповнених полів імені користувача та паролю	З'являється повідомлення: «Будь ласка, заповніть всі поля»(рисунок 4.3).

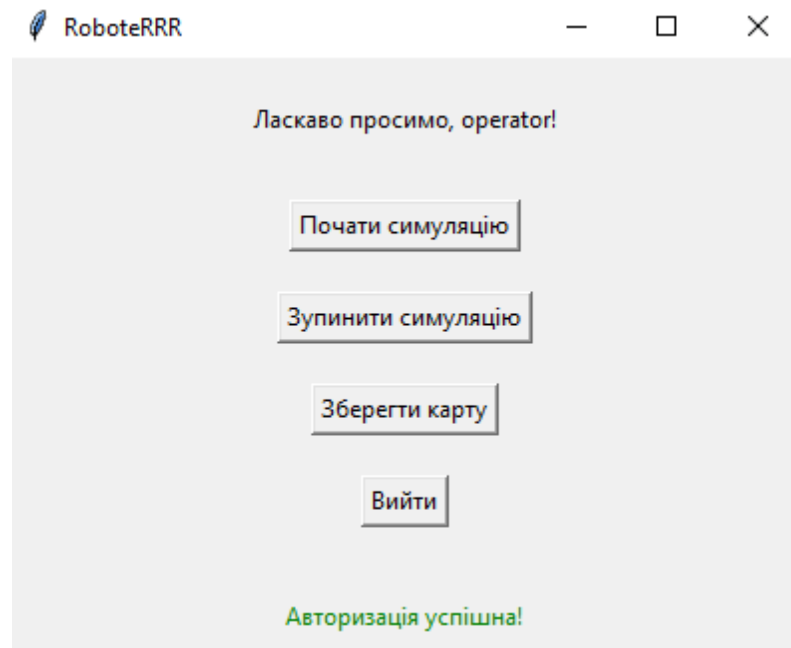


Рисунок 4.1 – Успішна авторизація

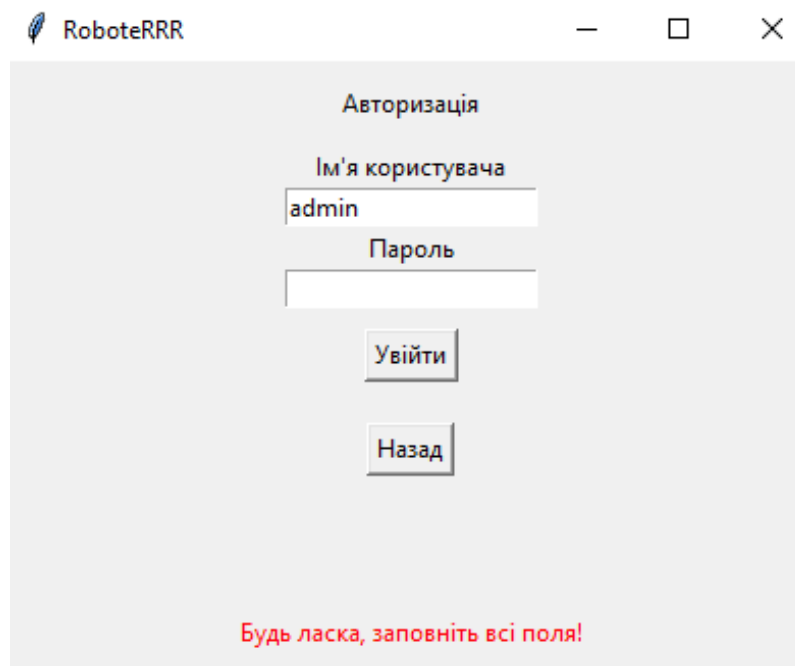


Рисунок 4.2 – Повідомлення «Невірне ім'я користувача чи пароль»

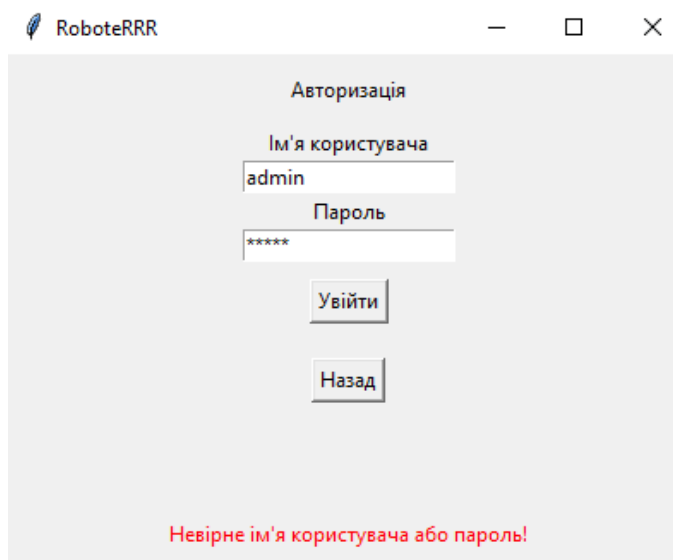


Рисунок 4.3 – Повідомлення: «Будь ласка, заповніть всі поля»

Тестування показало, що система правильно реагує на введення коректних і некоректних даних, повертаючи відповідні повідомлення.

б) реєстрація користувача

1) Мета тестування реєстрації полягала у перевірці можливості створення нових облікових записів. Як описано в таблиці 4.2, успішно перевірено, що нові користувачі додаються до бази даних, а повторна реєстрація з тим самим логіном повертає відповідне повідомлення про помилку.

Таблиця 4.2 – Реєстрація користувача

Назва	Вхідні дані	Очікуваний результат
Успішна реєстрація	Введення імені користувача та паролю	Новий обліковий запис створено. Відображається повідомлення: «Реєстрація успішна!» (рисунок 4.4).
Реєстрація з існуючим логіном	Введення даних існуючого користувача	Відображається повідомлення:

Назва	Вхідні дані	Очікуваний результат
		«Користувач із таким ім'ям уже існує» (рисунок 4.5).
Порожні поля реєстрації	Натискання кнопки реєстрації без заповнених полів імені користувача та паролю	Відображається повідомлення: «Будь ласка, заповніть всі поля»(рисунок 4.6).

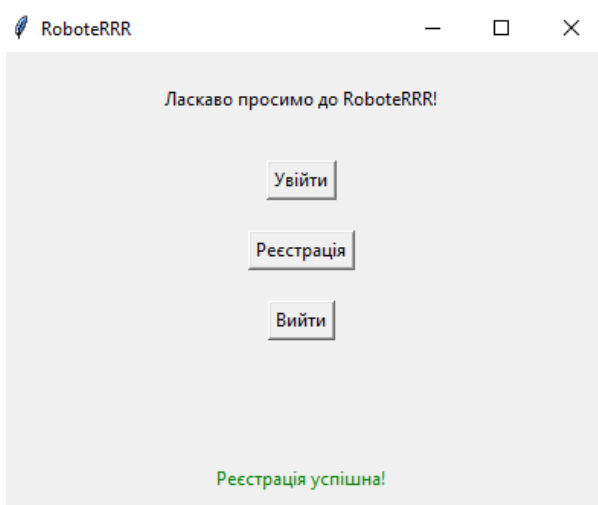


Рисунок 4.4 – Вікно успішної реєстрації

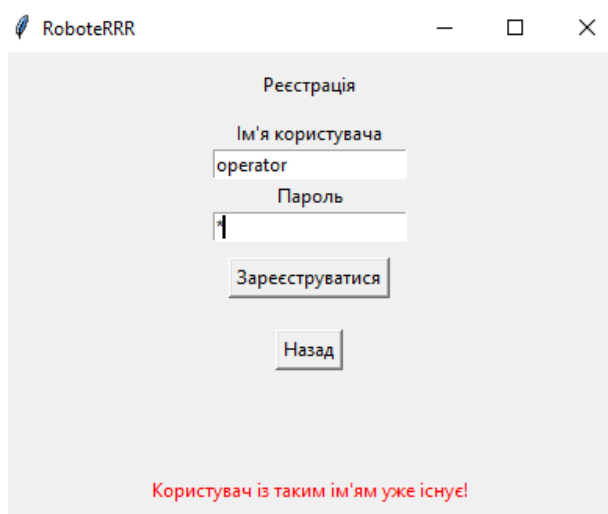


Рисунок 4.5 – Вікно з повідомленням «Користувач із таким ім'ям уже існує»

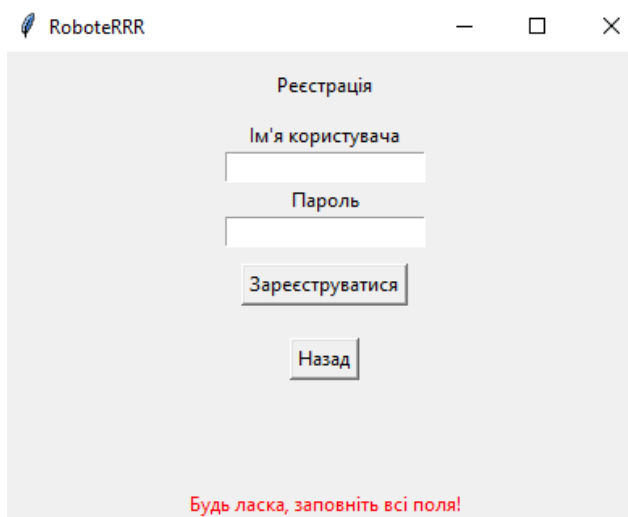


Рисунок 4.6 – Вікно з повідомленням «Будь ласка, заповніть всі поля»

в) запуск симуляції

1) Сценарії тестування запуску симуляції описані в таблиці 4.3. Було перевірено, що при натисканні кнопки «Почати симуляцію» система коректно запускає процес у середовищі CoppeliaSim, а відсутність авторизації блокує доступ до функції, відображаючи попередження.

Таблиця 4.3 – Запуск симуляції

Назва	Вхідні дані	Очікуваний результат
Успішний запуск симуляції	Натискання кнопки «Почати симуляцію».	У середовищі CoppeliaSim запускається симуляція. Робот починає рух згідно з алгоритмом(рисунок 4.7).

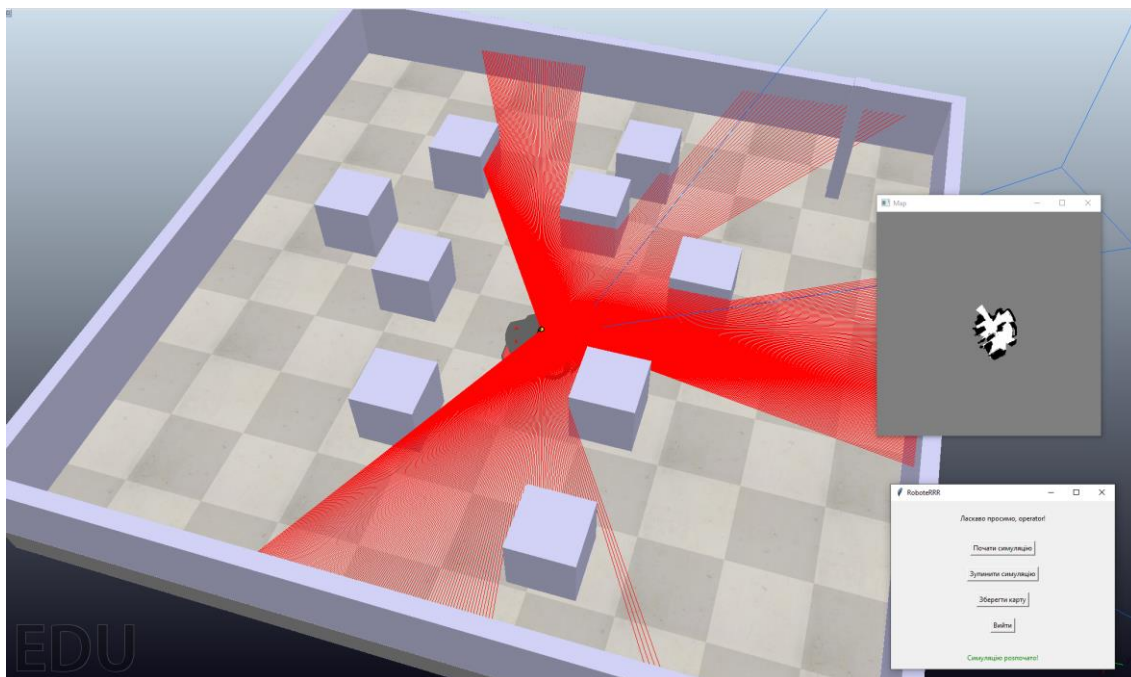


Рисунок 4.7 – Запуск симуляції

г) зупинка симуляції

1) Тестування функції зупинки симуляції описане в таблиці 4.4. Встановлено, що натискання кнопки «Зупинити симуляцію» завершує роботу симуляції, а також автоматично зберігає карту середовища. Якщо симуляція не була запущена, система повертає повідомлення про помилку.

Таблиця 4.4 – Зупинка симуляції

Назва	Вхідні дані	Очікуваний результат
Успішна зупинка симуляції	Натискання кнопки «Зупинити симуляцію».	Симуляція завершується, а карта середовища автоматично зберігається у вигляді BMP-файлу (рисунок 4.8).
Зупинка без активної симуляції	Натискання кнопки «Зупинити симуляцію»	Відображається повідомлення:

Назва	Вхідні дані	Очікуваний результат
	коли симуляція не запущена.	«Симуляція не запущена»(рисунок 4.9).

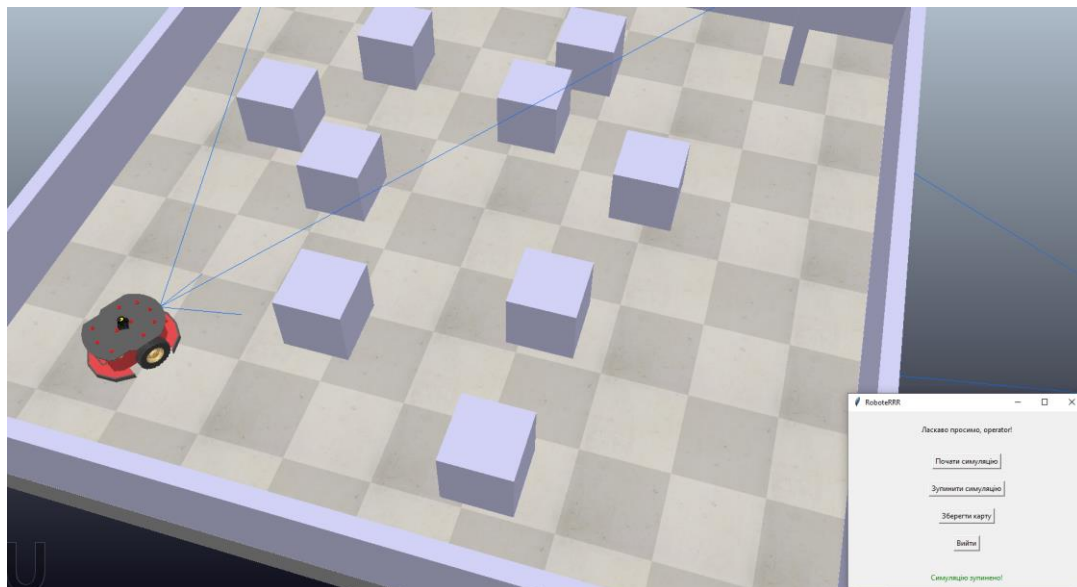


Рисунок 4.8 – Зупинка симуляції

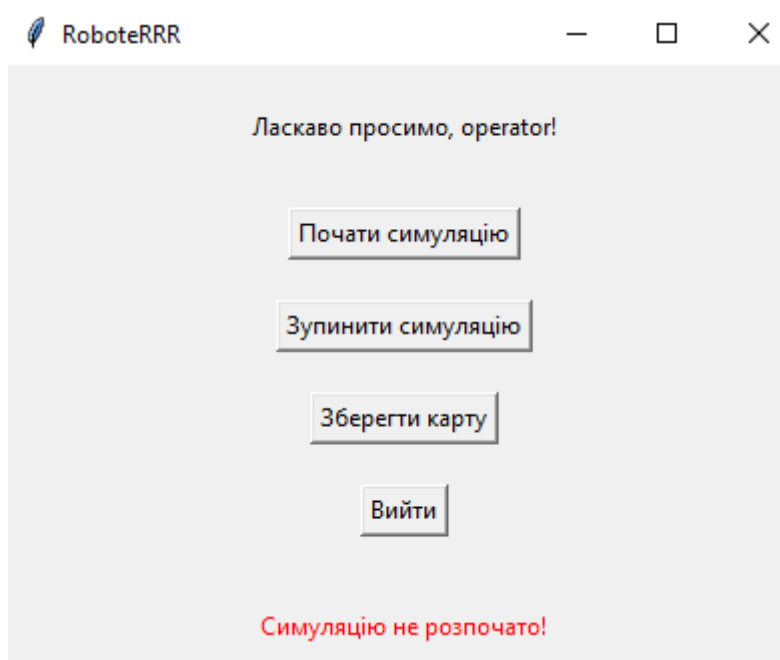


Рисунок 4.9 – Повідомлення: «Симуляція не запущена»(

г) реакція робота на перешкоди

1) Алгоритм Брейтенберга, що забезпечує реакцію робота на перешкоди, перевірявся за сценаріями, викладеними в таблиці 4.5.

Тестування підтвердило, що робот змінює свою траєкторію при виявленні перешкод у зоні сенсорів і продовжує прямолінійний рух за їх відсутності.

Таблиця 4.5 – Реакція робота на перешкоди

Назва	Вхідні дані	Очікуваний результат
Уникнення перешкоди	Перешкода на шляху робота	Робот змінює траєкторію руху, оминаючи перешкоду.
Перешкода поза досяжністю	Перешкода за межами зони дії сенсорів	Робот продовжує рух до точки фінішу без змін у траєкторії.

д) збереження карти середовища;

1) Тестування функції збереження карти наведено в таблиці 4.6. Було перевірено, що карта середовища успішно зберігається у форматі BMP, якщо симуляція активна. У разі спроби зберегти карту без активної симуляції система виводить попередження про помилку.

Таблиця 4.6 – Збереження карти середовища

Назва	Вхідні дані	Очікуваний результат
Успішне збереження карти	Натискання кнопки «Зберегти карту».	Карта середовища зберігається у форматі BMP у зазначеному каталозі(рисунок 4.10).
Збереження без активної симуляції	Натискання кнопки «Зберегти карту» коли симуляція не запущена.	Відображається повідомлення: «Немає даних для збереження»(рисунок 4.11).

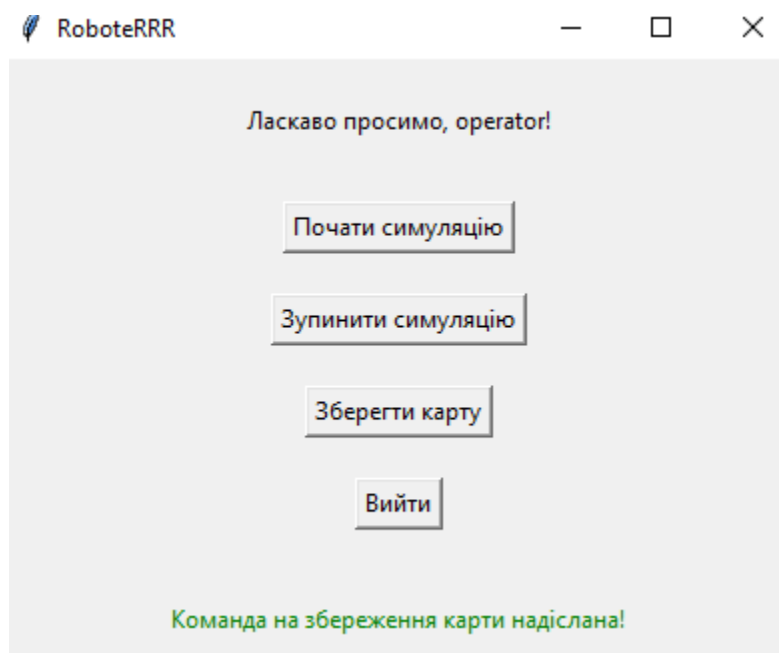


Рисунок 4.10 – Збереження зображення карти маршруту

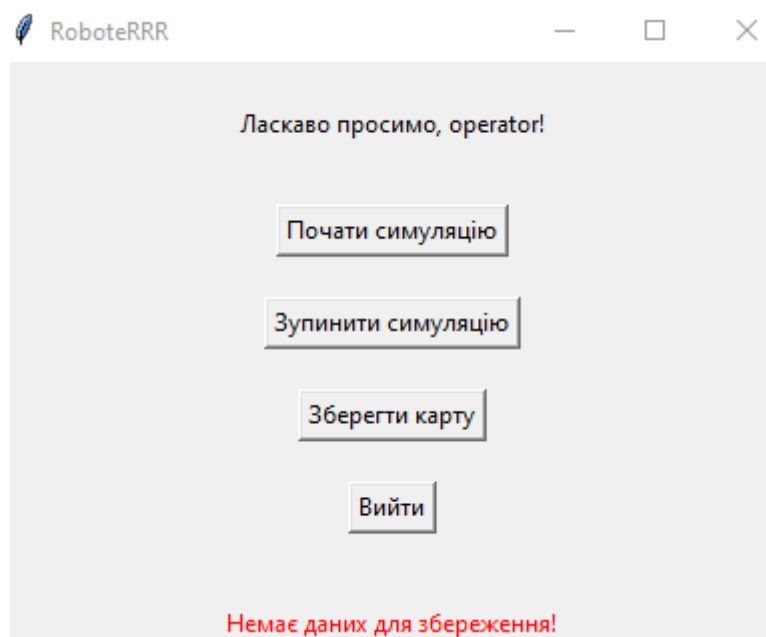


Рисунок 4.11 – Повідомлення: «Немає даних для збереження»

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було проведено тестування системи вручну, що дозволило перевірити всі основні функції, включаючи авторизацію, реєстрацію користувачів, запуск і зупинку симуляції, реакцію робота на перешкоди, а також збереження та перегляд карти середовища.

Результати тестування показали, що система працює стабільно та виконує поставлені завдання відповідно до вимог. Усі модулі функціонують коректно: користувачі можуть входити до системи, реєструвати нові облікові записи, запускати симуляцію та керувати її виконанням через інтерфейс. Робот реагує на перешкоди відповідно до закладених алгоритмів, а карта середовища створюється та зберігається без помилок.

Система адекватно обробляє як правильні, так і некоректні дії користувача, надаючи відповідні повідомлення. Це свідчить про надійність і готовність системи до практичного використання.

5 СТАРТАП ПРОЄКТ

5.1 Опис ідеї проєкту

В рамках цього підрозділу будуть розглянуті наступні складові:

- зміст ідеї стартап-проєкту;
- напрямки застосування стартап-проєкту;
- вигоди для кінцевого користувача;
- відмінність від вже існуючих аналогів.

Перші три пункти з вищенаведеного списку наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка системи навігації для мобільного робота, здатного автономно орієнтуватися в незнайомій місцевості, знаходити оптимальні маршрути, та адаптуватися до нових перешкод.	Робототехніка для промисловості (наприклад у логістиці, або на складах).	Зменшення витрат на персонал у промислових умовах завдяки автоматизації.
	Рятувальні операції, дослідження небезпечних територій.	Підвищення ефективності та швидкості рятувальних операцій.
	Дослідження важкодоступних місць (наприклад, кар'єри, печери).	Збір даних у важкодоступних місцях без ризику для людини

Для останнього пункту проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (таблиця 2).

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристик и ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабк а сторо на)	N (ней трал ьна стор она)	S (сил ьна стор она)
		Мій проє кт	Boston Dynami cs Spot	Clearpath Robotics Jackal	Turtle Bot 4			
1.	Реальна часова адаптація маршруту до перешкод	Так	Так	Так	Ні			
2.	Можливість роботи в невідомій місцевості	Так	Так	Так	Ні			
3.	Ефективність обробки даних із сенсорів	Сере дня	Висока	Середня	Низьк а			
4.	Інтеграція з камерами, LiDAR та ультразвукови ми сенсорами	Так	Так	Так	Так	+		

За результатами аналізу, наведеного в таблиці 5.2, можна зробити висновок, що проєкт демонструє хорошу конкурентоспроможність у ключових аспектах, таких як адаптація до перешкод у реальному часі та робота в невідомих умовах. Основні вдосконалення варто зосередити на підвищенні ефективності

обробки даних із сенсорів, щоб досягти рівня лідерів ринку, таких як Boston Dynamics Spot.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Буде розглянуто технологічну здійсненність ідеї стартап проект, яка містить аналіз технологій, які мають бути використані при реалізації ідеї стартап-проекту, їх наявність та доступність авторам проекту. Технологічна здійсненність ідеї проекту наведена в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Виявлення та обхід перешкод	Python, LIDAR та ультразвукові сенсори.	Наявні, їх потрібно доробити	Доступні
2	Побудова карти в реальному часі	SLAM	Наявні, дороблювати не потрібно	Доступні
3	Планування маршруту робота	Алгоритми	Наявні, дороблювати не потрібно	Доступні
4	Обробка даних із сенсорів	Lua	Наявні, дороблювати не потрібно	Доступні
5	Симуляція роботи системи в віртуальному середовищі	CoppeliaSim	Наявні, дороблювати не потрібно	Доступні

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
<p>Обрана технологія реалізації ідеї проекту:</p> <p>мови програмування Lua, Python.</p> <p>Алгоритми: Алгоритм Брайтенберга.</p> <p>Симуляційне середовище: CoppeliaSim.</p>				

Проект є технологічно здійсненним, оскільки всі необхідні технології доступні та можуть бути інтегровані без значних доопрацювань. Водночас, існують можливості для покращення, зокрема у підвищенні ефективності алгоритмів навчання, оптимізації роботи сенсорів та їх інтеграції з іншими компонентами системи. Додаткові доопрацювання можуть сприяти підвищенню продуктивності та надійності проекту, особливо в складних умовах експлуатації.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз попиту, а сам аналіз його наявності, обсягу та динаміки розвитку ринку наведено у таблиці 5.4

Таблиця 5.4 – Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	<6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	405 млн грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15-20%

Попередній аналіз ринку показує, що ринок автономних мобільних роботів є перспективним для входження завдяки його зростаючій динаміці та значному обсягу продаж. Проте високий рівень конкуренції та специфічні вимоги до сертифікації можуть стати перешкодами для входження. Враховуючи середню норму рентабельності в галузі, яка перевищує банківський відсоток, проект є привабливим для інвестування за умови належної підготовки та адаптації до ринкових вимог.

У таблиці 5.5 проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Автоматизація логістичних процесів у великих складських комплексах	Логістичні компанії, оператори складів, виробничі підприємства	Орієнтуються на зниження витрат, високу надійність та простоту інтеграції в існуючі процеси	– висока точність роботи сенсорів – простота інтеграції – низькі витрати на обслуговування – технічна підтримка від постачальника
2	Обстеження та дослідження небезпечних	Рятувальні служби, організації з	Пріоритет на безпеку, стійкість	– висока автономність

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	територій (пожежі, радіоактивні зони, зони стихійних лих)	ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій	системи до екстремальних умов, автономність	– надійність роботи в екстремальних умовах – здатність працювати в умовах відсутності зв'язку з оператором
3	Автоматизація інспекцій на промислових об'єктах (нафтові вежі, електростанції, трубопроводи)	Промислові компанії, енергетичні компанії	Важливі точність збору даних, довговічність та здатність працювати в складних промислових умовах	– висока точність сенсорів і камери – стійкість до промислових умов – гарантійне та післягарантійне обслуговування
4	Освітні та дослідницькі потреби (демонстрація	Університети, дослідницькі лабораторії	Пріоритет на простоту налаштування, можливість	– програмна гнучкість – можливість модифікації

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	робототехніки, навчання, експерименти зі штучним інтелектом)		модифікації та доступну ціну	апаратної частини – інтуїтивно зрозуміле програмне забезпечення

У таблицях 6-7 проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Висока конкуренція	Присутність на ринку сильних гравців, таких як Boston Dynamics та Clearpath Robotics.	Створення конкурентних переваг, таких як нижча ціна, гнучка інтеграція, інноваційні алгоритми.
2	Потреба у великих початкових інвестиціях	Висока вартість розробки, впровадження та тестування робота.	Залучення зовнішніх інвесторів або партнерів, які зацікавлені в співпраці та спільному фінансуванні.
3	Обмежений доступ до	Дефіцит високоточних сенсорів чи камер через	Пошук альтернативних постачальників або

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
	окремих компонентів	глобальні проблеми у ланцюжках постачання.	створення стратегічних запасів компонентів.
4	Ризик недовіри до нових продуктів	Потенційні клієнти можуть віддати перевагу перевіреним рішенням від відомих брендів.	Створення пілотних проектів, що демонструють ефективність роботи, проведення презентацій та тестувань.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на автономні роботи	Ринок розвивається, завдяки автоматизації процесів в логістиці, промисловості та дослідженнях.	Активний маркетинг та участь у спеціалізованих виставках для демонстрації можливостей продукту.
2	Можливість інтеграції інновацій	Впровадження машинного навчання для покращення продуктивності та адаптивності.	Інвестування у R&D, створення унікальних алгоритмів для підвищення конкурентоспроможності.
3	Широке коло потенційних клієнтів	Попит з боку логістичних, промислових компаній,	Розробка адаптивних рішень для різних сегментів клієнтів, створення модульної конструкції продукту.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
		рятувальних служб та освітніх закладів.	
4	Державна підтримка інноваційних проектів	Багато країн стимулюють розвиток технологій через гранти та субсидії.	Подача заявок на грантове фінансування, співпраця з державними програмами розвитку робототехніки.
5	Розвиток програмного забезпечення	Доступність потужних бібліотек для обробки даних та інтеграції сенсорів, таких як OpenCV і TensorFlow.	Оптимізація розробки програмного забезпечення через використання відкритих бібліотек та інструментів.

У таблиці 8 проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: монополія	Ринок насичений кількома великими гравцями, такими як Boston Dynamics, Clearpath Robotics, TurtleBot 4, а також	Розробка унікальних продуктів або послуг, що відрізняються від пропозицій конкурентів; фокус на нішевих ринках або спеціалізованих застосуваннях.

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
	численними меншими компаніями.	
2. За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	Діють на глобальному ринку, постачаючи продукцію в різні країни.	Вихід на міжнародні ринки через участь у виставках, сертифікацію продукції за міжнародними стандартами, встановлення партнерських відносин з іноземними компаніями.
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Змагання між виробниками автономних мобільних роботів за частку ринку.	Зосередження на інноваціях, підвищенні якості продукції та обслуговування клієнтів; розробка рішень, що відповідають специфічним потребам різних галузей.
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між різними моделями автономних мобільних роботів, що виконують схожі функції, але відрізняються за характеристиками та ціною.	Розробка продуктів з унікальними функціями або кращими характеристиками; пропозиція різних цінових категорій для охоплення ширшої аудиторії.

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Основна боротьба відбувається за рахунок інновацій, якості, надійності та функціональних можливостей продукції.	Інвестування в дослідження та розробки для впровадження нових технологій; підвищення якості продукції та обслуговування клієнтів; побудова сильного бренду.
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	Марочна конкуренція: клієнти надають перевагу відомим брендам з перевіреною репутацією.	Побудова та просування власного бренду через маркетингові кампанії, участь у галузевих заходах, отримання позитивних відгуків від клієнтів та партнерів.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером наведено у таблиці 9, який є детальнішим за аналіз у таблиці 8

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Відсутні	Boston Dynamics, Clearpath Robotics	Відсутні	Клієнти мають високі вимоги до якості,	Відсутні

				інтеграції в наявні системи, низьких витрат на обслуговування	
Висновки:	Прямі конкуренти у даній галузі відсутні	Потенційні конкуренти присутні	Постачальники відсутні	Клієнти хочуть отримати товар, що відповідає якості та має якомога нижчу ціну та товар, що відповідає їх нагальним вимогам	Відсутні

Ринок автономних мобільних роботів є сприятливим для входження, оскільки прямі конкуренти відсутні, хоча потенційні конкуренти, такі як Boston Dynamics та Clearpath Robotics, можуть становити загрозу в майбутньому. Постачальники не мають значного впливу, а товари-замінники відсутні, що зменшує ризики. Клієнти висувують високі вимоги до якості, інтеграції та мінімізації витрат, тому успіх залежить від створення продукту, що відповідає їхнім потребам.

У таблиці 5.10 наведено обґрунтування та перелік факторів конкурентоспроможності, що базується на даних з таблицях 2, 5-7 та 9

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Актуальність	Ринок автономних мобільних роботів активно зростає завдяки попиту на автоматизацію в логістиці, промисловості, дослідженнях та рятувальних операціях.
2	Ціна	Вартість розробки й обслуговування робота нижча порівняно з конкурентами завдяки оптимізації компонентів і використанню відкритих бібліотек, що робить продукт привабливим для широкого кола клієнтів.
3	Адаптивність	Система здатна працювати в умовах невідомої місцевості, адаптуватися до перешкод у реальному часі, що робить її ідеальним для рятувальних операцій, логістики та промисловості.
4	Модульність	Використання модульної конструкції та гнучкої архітектури дозволяє масштабувати рішення і адаптувати його для різних потреб ринку, таких як освітні чи комерційні застосування.

За наведеними факторами в рамках аналізу конкурентоспроможності, який був наведений в таблиці 5.10, можна провести аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту, який буде наведений в таблиці 5.11

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Актуальність	7		+					
2.	Ціна	4		+					
3.	Адаптивність	4	+						
4.	Модульність	4		+					

На основі наведених у таблиці 5.11 ринкових загроз та можливостей буде виконано SWOT-аналіз. У рамках цього аналізу буде складено матрицю, яка відображає сильні та слабкі сторони проекту, а також можливості та загрози ринку. Результати аналізу представлено у таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: високий попит на автоматизацію в логістиці та промисловості.	Слабкі сторони: висока вартість початкових інвестицій для розробки та впровадження продукту.
Можливості: зростання ринку автономних роботів через активну автоматизацію.	Загрози: швидкий розвиток технологій у сфері робототехніки може призвести до появи прямих аналогів системи.

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Участь у грантових програмах та	Висока	6-12 місяців

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
	отримання державної підтримки		
2.	Залучення інвесторів або партнерів для фінансування розробки	Середня	6-8 місяців
3.	Проведення пілотних проектів для демонстрації ефективності системи	Висока	6-9 місяців
4.	Участь у виставках і конференціях для пошуку клієнтів і партнерів	Висока	3-6 місяців
5.	Впровадження інновацій для покращення продуктивності системи (машинне навчання тощо)	Середня	1-2 роки

З представлених альтернатив було обрано участь у виставках і конференціях для пошуку клієнтів і партнерів. Альтернатива є оптимальною для першого етапу впровадження стартапу на ринок, після чого можна буде перейти до масштабніших заходів, таких як залучення інвесторів або впровадження інновацій.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії проекту включає вибір цільових груп потенційних споживачів, що відображено у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Логістичні компанії та оператори складів	+	Значний	Середня	Середня
2.	Рятувальні служби та організації з ліквідації надзвичайних ситуацій	+	Помірний	Низька	Висока
3.	Університети та дослідницькі лабораторії	+	Помірний	Низька	Висока
Які цільові групи обрано: логістичні компанії та оператори складів, рятувальні служби та організації з ліквідації надзвичайних ситуацій, університети та дослідницькі лабораторії					

З огляду на вибір кількох сегментів та необхідність розробки окремих програм ринкового впливу для кожного з них, компанія використовуватиме стратегію диференційованого маркетингу. Це дозволить ефективно адаптувати товар до специфічних потреб кожного сегмента ринку, враховуючи різні вимоги та особливості клієнтів.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Маркетинг, орієнтований на всі групи потенційних клієнтів	Масовий маркетинг	Унікальні властивості продукту відсутність замінників на ринку, що знижує чутливість до ціни та підвищує рентабельність	Стратегія диференціації

Далі у таблиці 5.16 буде обрано стратегію конкурентної поведінки.

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Компанія змагатиметься за споживачів, пропонуючи	Ні, буде вдосконалено технології для підвищення	Стратегія виклику лідера

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
		конкурентоспроможну ціну та якість	продуктивності	

На основі вимог споживачів (таблиця 5), базової стратегії розвитку (таблиця 15) та конкурентної поведінки (таблиця 16) формується стратегія позиціонування (таблиці 17), яка визначає ринкову позицію та асоціації, за якими споживачі ідентифікуватимуть проєкт чи торговельну марку, яка зображена у таблиці 5.17

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
1	Висока точність роботи, автономність, надійність у складних умовах	Стратегія диференціації	Інноваційність, адаптивність до складних умов, ефективність	1) технологічний прорив 2) надійність у будь-яких умовах

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувану комплексну позицію власного проекту (три ключових)
				3) рятувальні рішення

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

У таблиці 5.18 наведено результат аналізу конкурентоспроможності товару

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Автоматизація логістичних процесів	Зниження витрат на персонал, підвищення ефективності	Висока точність сенсорів, низька вартість обслуговування
2	Проведення рятувальних операцій в небезпечних умовах	Безпека, автономність роботи у важкодоступних місцях	Надійність у екстремальних умовах, здатність працювати без постійного контролю

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
3	Дослідження важкодоступних місць	Збір даних без ризику для людей	Висока автономність, інтеграція з сучасними сенсорами.
4	Навчання та дослідницькі експерименти	Простота використання, модульність для різних завдань	Легкість налаштувань, можливість модифікації, доступна ціна

Трирівневу модель товару в якій уточнюються її ідея, фізичні складові, особливості процесу його надання наведено у таблиці 5.19.

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Головною функцією системи є визначення оточення мобільного робота		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1) висока автономність	М	Тх
	2) адаптивність до складних умов	М	Тх
	3) інтеграція з сучасними сенсорами.	М	Тх
	Якість: ручне та тестування у реальних умовах		
Пакування: посилання на завантаження файлів системи			
Марка: RoboteRRR			

Рівні товару	Сутність та складові
III. Товар із підкріпленням	До продажу: технічна підтримка, консультації, документація
	Після продажу: гарантія, сервісне обслуговування, модернізація
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент	

Цінові межі, наведені у таблиці 5.20, дозволяють керуватися ними при визначенні ціни на потенційний товар.

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	Товари-замінники відсутні	75 000– 110 000 грн	Середній	40 000 – 70 000 грн

У таблиці 5.21 наведена найбільш підходяща система збуту для даного продукту.

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Оптові закупівлі	Надання інформації про функціонал, інструктаж із використання,	Прямі переговори з клієнтами, прямі	Власна система збуту

№	Специфіка	Функції збуту, які має	Глибина	Оптимальна
п/п	закупівельної поведінки цільових клієнтів	виконувати постачальник товару	каналу збуту	система збуту
		підтримка, обговорення ціни.	продажі через сайт	

У таблиці 5.22 наведена розроблена концепція маркетингової комунікації.

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка	Канали	Ключові	Завдання	Концепція
п/п	поведінки цільових клієнтів	комунікацій, якими користуються цільові клієнти	позиції, обрані для позиціонування	рекламного повідомлення	рекламного звернення
1.	Зацікавленість у придбанні продукту	Електронна пошта, захищені месенджери	Надійність, клієнтоорієнтованість	Зацікавити потенційного клієнта та підвищити шанси вибору даної системи	Висвітлення функціоналу, надійності та швидкості системи

Висновок до розділу 5

За результатами аналізу, проведеного в рамках цього розділу, можна зробити висновок, що проєкт системи навігації для мобільного робота має високі шанси на комерціалізацію та є перспективним з точки зору рентабельності. На даний момент прямі конкуренти відсутні, а наявні потенційні конкуренти, пропонують продукти з частково схожим функціоналом, але не орієнтовані на ті

цільові групи, які охоплює запропонований проєкт: логістичні компанії, рятувальні служби, дослідницькі установи та заклади освіти.

Аналіз ринкового середовища показав, що попит на автономні мобільні роботи зростає завдяки активній автоматизації логістичних та промислових процесів, а також необхідності застосування технологій у рятувальних операціях і дослідницьких проєктах. Відсутність товарів-замінників та низький рівень бар'єрів для входження на ринок створюють сприятливі умови для впровадження проєкту. Завдяки SWOT-аналізу було визначено сильні сторони проєкту, такі як інноваційність, адаптивність та конкурентоспроможність, що дозволяє ефективно конкурувати навіть за умови активного розвитку галузі.

Було запропоновано низку альтернатив для ринкового впровадження стартапу, таких як участь у грантових програмах, проведення пілотних проєктів і участь у виставках. Найбільш доцільною стратегією на початковому етапі є участь у галузевих виставках і конференціях, що сприятиме налагодженню контактів із потенційними клієнтами та партнерами. Подальша комерціалізація передбачає масштабування за рахунок залучення інвесторів та впровадження інновацій.

Таким чином, проєкт є цілком доцільним для реалізації з комерційної точки зору. Його імплементація дозволить зайняти конкурентну нішу на ринку, відповідаючи зростаючим вимогам споживачів і глобальним тенденціям автоматизації та автономності.

ВИСНОВОК

Було створено систему навігації для мобільного робота при невідомому рельєфі, що є актуальною проблемою сучасної робототехніки. Основою розробки став алгоритм Брайтенберга, який забезпечує реактивну поведінку робота. Завдяки цьому алгоритму робот може швидко реагувати на зміни середовища завдяки прямому зв'язку сенсорів і виконавчих механізмів. Це дозволяє ефективно уникати перешкоди і забезпечує плавний рух, не вимагаючи значних обчислювальних ресурсів. Додатково в системі було використано метод сіткових карт, що допоміг будувати ймовірнісну модель навколишнього середовища на основі даних, які збираються з сенсорів робота. Для збору цих даних були використані лідар та ультразвукові сенсори, що дозволило досягти високої точності роботи навіть у складних умовах.

Також під час розробки було створено інтерфейс користувача, який дозволяє легко керувати роботом, а саме запускати й зупиняти симуляцію, а також зберігати результати роботи у зручному форматі для подальшого аналізу. Додатково реалізована функція авторизації, яка обмежує доступ до системи і забезпечує її захист від несанкціонованого втручання.

Тестування системи проводилося у середовищі CoppeliaSim, яке продемонструвало високу працездатність запропонованих алгоритмів і їх відповідність заявленим вимогам. Робот успішно орієнтувався у середовищі з непередбачуваними перешкодами, будував маршрути й оперативно реагував на зміни умов завдяки поєднанню алгоритму Брайтенберга і сіткових карт. Результати показали стабільність та точність навігації, а реактивний підхід забезпечив миттєве ухилення робота від перешкод під час руху.

У розділі стартап-проєкту було проаналізовано можливості комерційного використання системи. Було виявлено, що ця система може мати високу затребуваність у таких сферах, як логістика, рятувальні операції та дослідження важкодоступних територій, де потрібна автономна робота роботів. Проведений аналіз ринку показав, що основними перевагами системи є економічна

ефективність, швидка адаптація до змін середовища та низькі обчислювальні витрати, що робить її конкурентоспроможною.

Таким чином, розроблена система навігації для мобільного робота повністю відповідає завданням роботи. Вона забезпечує точну та ефективну навігацію в умовах невідомого рельєфу, демонструючи високу швидкодію та стабільність завдяки поєднанню алгоритму Брайтенберга з методами картографування. Тестування підтвердило працездатність системи, а стартап-аналіз вказав на можливість її успішного впровадження у різних галузях. Усі результати доводять, що система є перспективною, інноваційною і готовою до подальшого практичного використання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Robotics for safer, more predictable operations: <https://bostondynamics.com/products/spot/>
2. Jackal UNMANNED GROUND VEHICLE: <https://clearpathrobotics.com/jackal-small-unmanned-ground-vehicle/>
3. TurtleBot 4 ROBOTICS LEARNING PLATFORM: <https://clearpathrobotics.com/turtlebot-4/>
4. What is Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)?: <https://www.flyability.com/blog/simultaneous-localization-and-mapping>
5. Visual SLAM: <https://robotics.pme.duth.gr/research/visual-slam/>
6. МЕТОД ОДНОЧАСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА КАРТОГРАФУВАННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ 2,5D-КАРТИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАСОБАМИ ROS: <https://itssi-journal.com/index.php/itssi/article/view/398/365>
7. LIDAR based SLAM, What's New in Autonomous Navigation: <https://semiwiki.com/automotive/313897-lidar-based-slam-aka-loam-whats-new-in-autonomous-navigation/>
8. LightWare SF45/B 50m Scanning LiDAR Range Sensor: <https://acroname.com/store/scanning-range-sensor-r460-sf45b>
9. LiDAR SLAM vs Visual SLAM: Which is Better?%: <https://eu.hookii.com/blogs/robot-lawn-mowers/laser-slam-vs-visual-slam-which-is-better>
10. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping): <https://www.mathworks.com/discovery/slam.html>
11. Heterogeneous multi-sensor tracking for an autonomous surface vehicle in a littoral environment: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822005753>
12. Ai Lidar Ros Robot Car Slam Build Map Navigation Obstacle Avoidance with Depth Camera 3D Scanner Tank Mobile Robot Platform: <https://shchipboard.en.made-in-china.com/product/BQipRbmAmLru/China-Ai-Lidar-Ros-Robot-Car-Slam-Build->

[Map-Navigation-Obstacle-Avoidance-with-Depth-Camera-3D-Scanner-Tank-Mobile-Robot-Platform.html](#)

13. Діаграма: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1b/Reinforcement_learning_diagram.svg

14. ROUTE CONSTRUCTING FOR A MOBILE ROBOT BASED ON THE DSTAR ALGORITHM: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/c5b13f04-3708-4f61-b6ed-e5051cc2f5ac/content>

15. Computer Vision in Robotics – An Autonomous Revolution: <https://viso.ai/computer-vision/computer-vision-in-robotics/>

16. Реалізація алгоритму пошуку шляху за допомогою A* пошуку: https://peerdh.com/uk/blogs/programming-insights/implementing-a-pathfinding-algorithm-using-a-search?utm_source=chatgpt.com

17. Алгоритм Дейкстри: C++, Python Приклад коду: https://www.guru99.com/uk/dijkstras-shortest-path-algorithm.html?utm_source=chatgpt.com

18. Rapidly exploring random tree: https://en.wikipedia.org/wiki/Rapidly_exploring_random_tree?utm_source=chatgpt.com

19. Dynamic window approach: https://de.wikipedia.org/wiki/Dynamic_window_approach

20. Braitenberg vehicle: https://en.wikipedia.org/wiki/Braitenberg_vehicle