

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютерних технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розроблення системи автоматичного керування мобільним роботом на основі
аналізу просторово-геометричної інформації на виробничому підприємстві

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,

групи КІТПВм-23-1

Воронов Д.О.

Спеціальність 174 Автоматизація,

комп'ютерно-інтегровані технології та

робототехніка

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані

технологічні процеси і виробництва

Керівник проф. Сезонова І. К.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	Освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТУ

здобувачеві Воронову Денису Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматичного керування мобільним роботом на основі аналізу просторово-геометричної інформації на виробничому підприємстві

Затверджено наказом по університету від 22.11.2024 №1231 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 LiDAR-сенсор

3.2 Мова програмування Cotlin

3.3 Алгоритм пошуку шляху A* та AABV

3.4 Системи керування на базі аналізу просторово-геометричної інформації

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ

4.2 Аналіз систем автоматичного керування мобільним роботом

4.3 Вибір програмних та апаратних модулів

4.4 Розробка системи керування

4.5 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал, представлені у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 12 стор. Формату А4

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та аналогічних існуючих продуктів	02.09.2024 – 01.10.2024	виконано
2	Аналіз предметної області та постановка задач	01.10.2024 – 18.10.2024	виконано
3	Розробка структурної схеми	18.10.2024 – 05.11.2024	виконано
4	Вибір програмних та апаратних модулів	05.11.2024 – 07.11.2024	виконано
5	Опис моделей	07.11.2024 – 22.11.2024	виконано
6	Програмна реалізація проекту	22.11.2024 – 01.12.2024	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2024 – 12.01.2025	виконано
8	Подання роботи до ЕК	13.01.2025	виконано

Дата видачі завдання _____ 02.09.2024

Здобувач  Воронов Д.О.

Керівник роботи _____ Сезонова І. К.

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

«19» грудня 2025 р.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Воронов Д.О.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 23 рис., 2 дод., 18 джерел.

НАВІГАЦІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ОПТИМАЛЬНИЙ ПОШУК, МОБІЛЬНІ РОБОТИ, УНИКНЕННЯ ЗІТКНЕНЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТУ

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого керування мобільними роботами у виробничому середовищі.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та лабораторні моделі для аналізу та навігації мобільних роботів на основі технології LiDAR.

Мета дослідження – підвищення ефективності автоматизованих систем навігації мобільних роботів шляхом розробки алгоритмів та програмної реалізації динамічного вибору маршруту з використанням LiDAR.

Методи дослідження – алгоритми пошуку шляху (A^*), методи виявлення колізій (AABB), технологія просторового сканування на основі LiDAR, цифрова обробка геометричних даних, моделювання та програмування на Kotlin.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз сучасних систем автоматизації мобільних роботів, їх конструктивних особливостей, функціональних можливостей та сфер застосування. Було виявлено, що системи на основі LiDAR є одними з найефективніших для роботи в умовах динамічного середовища завдяки здатності створювати точні тривимірні карти та забезпечувати адаптивну навігацію.

На основі проведеного аналізу було розроблено структурну модель, алгоритми роботи та програмне забезпечення для автоматизованої системи керування мобільним роботом. У межах дослідження реалізовано алгоритм пошуку оптимального шляху A^* із урахуванням перешкод, а також алгоритм виявлення зіткнень на основі методу мінімально обмежувальної коробки (AABB). Система динамічно адаптується до змін у середовищі шляхом автоматичного перерахунку

маршруту за даними LiDAR.

Було здійснено вибір апаратних компонентів, включаючи LiDAR-сенсор для збору просторово-геометричної інформації, а також допоміжні модулі для обробки й передачі даних. Програмну частину реалізовано на основі мови Kotlin, що забезпечує високий рівень продуктивності, точності й адаптивності системи.

Розроблений модуль візуалізації дозволяє відстежувати стан робота та візуалізувати його рух у режимі реального часу. Для тестування алгоритмів і перевірки працездатності системи було створено модуль генерації тестового простору з перешкодами. Проведені випробування підтвердили ефективність та надійність запропонованої системи, зокрема її здатність виконувати завдання в умовах складного середовища.

Отримані результати відкривають широкі можливості для впровадження системи в реальні умови роботи. Подальший розвиток може включати інтеграцію додаткових сенсорів, розширення функціоналу системи з використанням штучного інтелекту, а також реалізацію зворотного зв'язку для передачі аналітичних даних користувачеві. Це сприятиме створенню ще більш ефективних та автономних рішень для виробництв і логістичних процесів, забезпечуючи їхню конкурентоспроможність у сучасному світі.

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

ABSTRACT

Explanatory note: 80 p., 23 figures, 2 appendix, 18 sources.

NAVIGATION, AUTOMATION, OPTIMAL PATHFINDING, MOBILE ROBOTS, COLLISION AVOIDANCE, ROUTE OPTIMIZATION

Object of the research – the process of automated control of mobile robots in an industrial environment.

Subject of the research – methods, algorithms, and laboratory models for analyzing and navigating mobile robots based on LiDAR technology.

Objective of the research – to improve the efficiency of automated navigation systems for mobile robots by developing algorithms and implementing dynamic route selection using LiDAR.

Research methods – pathfinding algorithms (A*), collision detection methods (AABB), LiDAR-based spatial scanning technology, digital processing of geometric data, modeling, and programming in Kotlin.

During the course of the bachelor's thesis, an analysis of modern automation systems for mobile robots was conducted, focusing on their structural features, functional capabilities, and fields of application. It was found that LiDAR-based systems are among the most effective for operating in dynamic environments due to their ability to create accurate 3D maps and ensure adaptive navigation.

Based on the conducted analysis, a structural model, operation algorithms, and software for an automated mobile robot control system were developed. Within the scope of the research, a pathfinding algorithm (A*) was implemented to find optimal routes while accounting for obstacles, along with a collision detection algorithm based on the axis-aligned bounding box (AABB) method. The system dynamically adapts to environmental changes by automatically recalculating routes based on LiDAR data.

The selection of hardware components included a LiDAR sensor for collecting spatial and geometric information, as well as auxiliary modules for processing and transmitting data. The software part was implemented in Kotlin, ensuring high performance, precision, and adaptability of the system.

A visualization module was developed to monitor the robot's state and visualize its movement in real-time. A testing environment with obstacle generation was created to verify the algorithms and assess system functionality. The conducted tests confirmed the effectiveness and reliability of the proposed system, including its ability to perform tasks in complex environments.

The obtained results open up vast opportunities for implementing the system in real-world conditions. Further development may involve integrating additional sensors, extending the system's functionality with artificial intelligence, and implementing feedback mechanisms for transmitting analytical data to the user. These improvements will contribute to creating even more efficient and autonomous solutions for production and logistics processes, ensuring their competitiveness in the modern world.

The results of this work can be attributed to Sustainable Development Goal 9, "Industry, Innovation, and Infrastructure," specifically to target 9.4: "Promote accelerated development of high- and medium-technology sectors in the manufacturing industry, based on the integration of the 'education – science – production' chain and a cluster-based approach in the following areas: development of an innovative ecosystem; advancement of information and communication technologies (ICT); application of ICT in agriculture, energy, transport, and industry; high-tech mechanical engineering; creation of new materials; and the development of pharmaceutical and bioengineering industries."

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	10
Вступ.....	11
1 Огляд сучасних систем автоматичного керування мобільним роботом на основі аналізу просторово-геометричної інформації на виробничому підприємстві	13
1.1 Аналіз систем автоматичного керування мобільним роботом	13
1.2 Аналіз сенсорних систем для збору просторових даних	18
1.3 Аналіз та формування вимог до системи	21
1.4 Висновки по розділу 1	22
2 Апаратні модулі та програмні засоби для розробки системи керування...	24
2.1 Вибір компонентів	24
2.2 Вибір алгоритмів	26
2.3 Мова програмування	29
2.4 Середовище розробки	31
2.5 Висновки по розділу 2	32
3 Опис системи та її програмна реалізація	34
3.1 Загальний алгоритм роботи системи.	34
3.2 Модель сцени	34
3.3 Модель мультисегментного сенсору	39
3.4 Модель прийняття рішень.....	43
3.5 Генерація тестового простору	45
3.6 Висновки по розділу 3	48
4 Охорона праці.....	50
Висновки	51
Перелік джерел посилання.....	53
Додаток А Апробація результатів роботи	56
Додаток Б Демонстраційний матеріал	63
Додаток В Лістинг програми	64

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології;

A* (A-Star) – евристичний алгоритм пошуку;

AABB (Axis-Aligned Bounding Box) – алгоритм обмежуючого паралелепіпеду вирівняного по координатних осях;

Chunk – термін для організації даних або виконання обчислень;

FOV (Field of view) – широта спостережуваного світу, поле зору;

GUI (Graphical user interface) – графічний інтерфейс користувача;

IDEA (Integrated development environment) – інтегроване середовище розробки;

LiDAR (Light Detection and Ranging) – технологія отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем.

ВСТУП

Сучасний світ характеризується швидким розвитком технологій та зростанням вимог до автоматизації процесів. Одним із ключових напрямків у цьому контексті є аналіз просторово-геометричної інформації, який дозволяє підвищити ефективність роботи мобільних роботів на виробничих підприємствах. Обробка просторово-геометричних даних відіграє критичну роль у плануванні маршруту, уникненні перешкод та адаптації мобільного робота до змін у виробничому середовищі.

На сучасних підприємствах ефективне управління просторовими ресурсами та точність виконання завдань є визначальними чинниками успіху. Аналіз просторово-геометричної інформації дозволяє оптимізувати рух мобільного робота, мінімізувати час виконання завдань і уникати помилок, спричинених невідповідністю просторових даних реальним умовам. Інтеграція сенсорних систем із програмним забезпеченням для аналізу просторової інформації сприяє адаптації роботів до складних виробничих процесів.

Зростання попиту на аналіз просторово-геометричної інформації зумовлене розвитком сенсорних технологій, таких як лідари, а також алгоритмів машинного навчання. Це забезпечує роботам здатність не лише сканувати середовище, а й будувати тривимірні карти простору в реальному часі. Такі можливості дозволяють мобільним роботам забезпечувати безпечну та ефективну роботу навіть у динамічних середовищах.

Використання мобільних роботів на основі просторово-геометричної інформації сприяє скороченню витрат на логістику, покращенню організації виробництва та зменшенню людського втручання. Розширення можливостей аналізу просторової інформації дозволяє збільшити точність виконання завдань і вдосконалити управління виробничими процесами.

Виходячи з проаналізованої інформації, можна безумовно стверджувати, що тема даної кваліфікаційної роботи є актуальною.

Об'єкт дослідження – процес аналізу просторово-геометричної інформації для виконання виробничих завдань автоматизованої системи.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та технології аналізу просторово-геометричної інформації.

Мета дослідження – удосконалення аналізу просторово-геометричної інформації шляхом розроблення моделі мобільного робота та відповідної системи обробки даних для оптимізації виробничих процесів.

Методи дослідження – методи комп'ютерного зору, алгоритми обробки графічних даних, теорія графів, методи об'єктно-орієнтованого програмування, алгоритми планування та оптимізації шляху.

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

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз структури та застосування сучасних автоматизованих систем із пристроями збору просторово-геометричної інформації;
- проаналізувати можливості сенсорних систем для збору просторових даних;
- виконати вибір апаратних та програмних засобів для збору та обробки просторово-геометричної інформації;
- розробити модель сцени та візуалізації даних;
- розробити загальну модель прийняття рішень та обробки даних з сенсора;
- оформити пояснювальну записку згідно ДСТУ3008:2015 [1] та методичним вказівкам [2].

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПРОСТОРОВО ГЕОМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ВИРОБНИЧОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

1.1 Аналіз систем автоматичного керування мобільним роботом

Системи автоматичного керування мобільним роботом – це складні апаратно-програмні комплекси, які забезпечують автономне або напівавтономне функціонування роботів у різних середовищах. Їх основне завдання полягає у забезпеченні мобільного робота здатністю орієнтуватися у просторі, виконувати задані задачі, долати перешкоди та реагувати на зміни у середовищі в режимі реального часу. Подібні системи є невід'ємною частиною сучасної робототехніки, оскільки вони значно розширюють функціональні можливості мобільних платформ, роблячи їх придатними для виконання завдань у різних сферах.

Використовуються ці системи у найрізноманітніших галузях, від логістики та виробництва до медицини, військової справи й дослідження навколишнього середовища. У логістичних центрах автоматизовані роботи забезпечують транспортування вантажів між зонами складування, тим самим підвищуючи швидкість і точність виконання операцій [3, с. 58]. У виробництві такі системи застосовуються для переміщення матеріалів, моніторингу процесів або навіть виконання складальних операцій (рис. 1.1). У медицині мобільні роботи використовуються для доставки ліків або обладнання, а у військових умовах вони можуть слугувати для розвідки чи транспортування вантажів у небезпечних зонах. В умовах дослідження природного середовища автоматизовані роботи здатні ефективно діяти у важкодоступних місцях, таких як глибокі шахти, гори або морське дно.

Популярність таких систем пояснюється багатьма факторами. Насамперед, вони дозволяють зменшити участь людини у небезпечних або повторюваних завданнях, мінімізуючи ризик помилок, викликаних людським фактором. Крім

того, системи автоматичного керування сприяють підвищенню ефективності та точності виконання завдань, адже робот здатний працювати з високою швидкістю та мінімальними відхиленнями. Не менш важливим є їхній внесок у зниження витрат, оскільки автоматизовані системи можуть працювати в цілодобовому режимі, скорочуючи потребу у великій кількості персоналу.

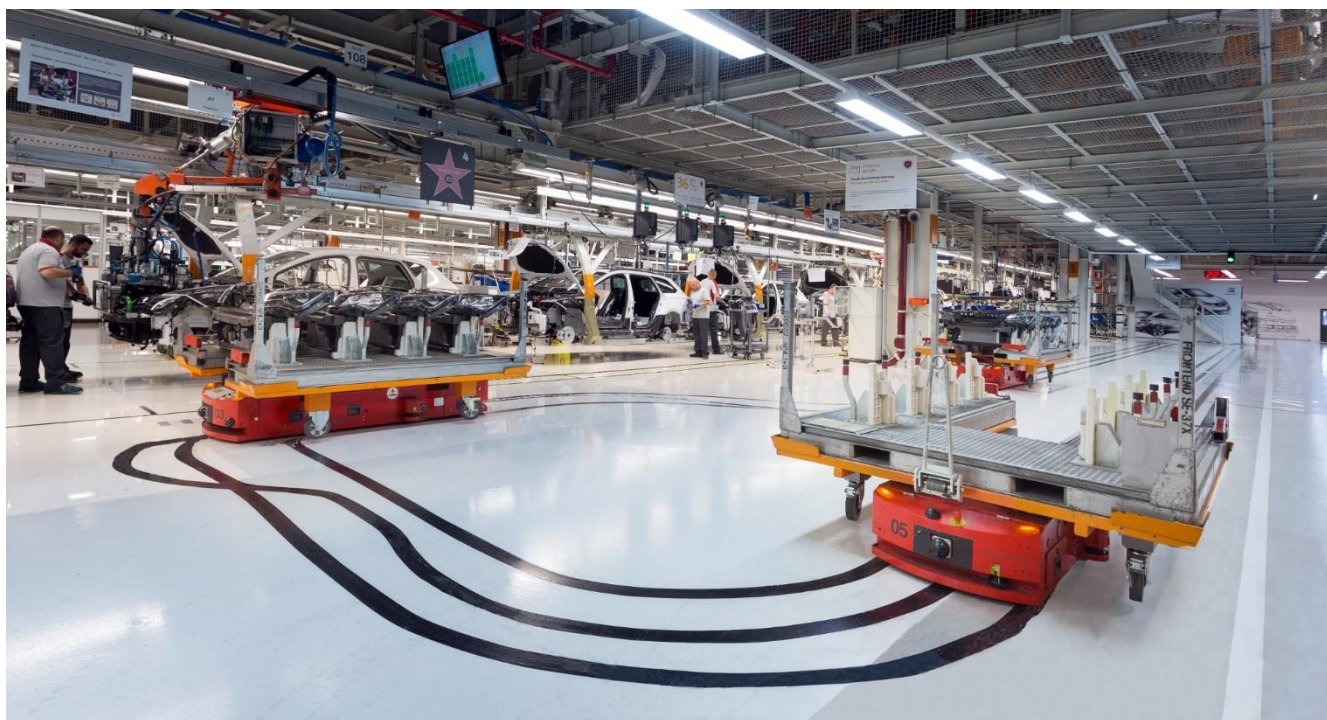


Рисунок 1.1 – Приклад роботи мобільних роботів з автоматичною системою керування на виробництві

Існують різні типи систем автоматичного керування мобільними роботами, залежно від їхніх можливостей, архітектури та призначення. Прості системи керування можуть базуватися на фіксованих маршрутах та мінімальному наборі датчиків, наприклад, для орієнтації у контрольованому середовищі, як це спостерігається на конвеєрах. Складніші системи передбачають адаптацію до змінних умов середовища, використовуючи методи машинного навчання та штучного інтелекту. Високорівневі системи автоматичного керування здатні самостійно будувати карти, визначати оптимальні маршрути та ухвалювати рішення в умовах невизначеності.

Незалежно від типу, ключовим елементом таких систем є засоби збору й аналізу просторових даних. Саме точність і швидкість обробки цих даних визначають здатність робота ефективно орієнтуватися у просторі. Традиційно для цієї мети використовували ультразвукові, інфрачервоні або звичайні оптичні датчики. Однак, із розвитком технологій дедалі більшого поширення набувають сенсорні системи на базі лідара (лазерного сканера). Ці системи забезпечують значно вищу точність та деталізацію отриманих даних порівняно з іншими типами сенсорів.

Лідар дозволяє будувати тривимірну карту простору в реальному часі, що є надзвичайно важливим для орієнтації мобільного робота. Завдяки високій роздільній здатності, такі сенсори здатні виявляти навіть дрібні об'єкти, а також ефективно працювати у динамічних середовищах [4, с. 79]. Використовуючи дані від лідара, робот може визначати своє місцезнаходження, прокладати оптимальні маршрути та уникати перешкод. Це особливо важливо у складних виробничих умовах, де обмежений простір, велика кількість перешкод і динамічні зміни середовища є звичним явищем.

Загалом, системи автоматичного керування мобільними роботами, що базуються на аналізі просторово-геометричної інформації за допомогою лідара, є найкращим вибором для виконання складних завдань. Вони поєднують у собі високу точність, швидкість обробки даних та можливість адаптації до змін у середовищі, роблячи такі системи незамінними у сучасній робототехніці.

Системи автоматичного керування мобільними роботами на виробництвах працюють на основі інтеграції кількох ключових технологій, які забезпечують їхню автономність, точність та ефективність. У виробничих умовах мобільні роботи виконують широкий спектр завдань, таких як транспортування матеріалів, постачання деталей до виробничих ліній, сортування продукції або контроль параметрів середовища. Щоб виконувати ці функції, системи автоматичного керування поєднують апаратне забезпечення, алгоритми обробки даних та інтелектуальні методи ухвалення рішень.

Основою роботи таких систем є збирання та аналіз інформації про простір, у якому працює робот. На виробництвах середовище зазвичай динамічне, з постійними переміщеннями персоналу, обладнання, транспортних засобів та інших об'єктів. Для точного орієнтування мобільного робота використовуються сенсорні системи, серед яких лідари, камери, ультразвукові датчики та датчики інерційної навігації. Лідар відіграє ключову роль [5], оскільки дозволяє створювати тривимірну карту простору в режимі реального часу. Лазерні імпульси, які він випромінює, відбиваються від об'єктів, і за допомогою аналізу часу повернення імпульсів система визначає відстань до цих об'єктів, що забезпечує високу точність побудови карти.

На основі зібраних даних робот формує уявлення про своє середовище. Це включає визначення меж робочої зони, розташування перешкод, проходів, зон підвищеної активності та інших критичних елементів [6]. Високоточна тривимірна карта дозволяє мобільному роботу планувати маршрут до цільового пункту з урахуванням обмежень, таких як вузькі проходи, тимчасові перешкоди чи зони, де рух обмежений.

Система автоматичного керування аналізує карту простору та визначає оптимальний маршрут. Для цього використовуються алгоритми планування, які враховують як найкоротший шлях, так і вимоги до безпеки, швидкості та енерговитрат. Алгоритми, такі як A^* чи Dijkstra, дозволяють знайти найоптимальніший шлях у складних умовах. Крім того, у сучасних системах використовуються методи машинного навчання, які дозволяють роботам адаптуватися до змін у середовищі, аналізуючи попередній досвід виконання завдань.

На виробництвах мобільні роботи також повинні взаємодіяти з іншими учасниками процесу: роботами, людьми чи системами управління (рис. 1.2). Комунікація забезпечується за допомогою бездротових мереж, які дозволяють інтегрувати мобільного робота в загальну систему управління підприємством. Наприклад, робот може отримувати завдання з централізованої системи

управління, яка координує його дії з іншими роботами, або відстежувати час виконання операцій для синхронізації із загальним виробничим циклом.



Рисунок 1.2 – Уникнення роботом перешкод

Під час руху робот постійно сканує навколишнє середовище, щоб переконатися, що маршрут залишається безпечним і доступним. Наприклад, якщо під час виконання завдання виявляється несподівана перешкода, система перераховує маршрут, обходячи її. Це особливо важливо на виробництвах, де процеси часто змінюються, а навколишнє середовище постійно оновлюється. Завдяки сенсорам, робот може не тільки реагувати на зміну умов, але й ухвалювати рішення про подальші дії, наприклад, уповільнити рух у зоні підвищеної активності людей.

Ще одним важливим аспектом роботи системи автоматичного керування є інтеграція даних із кількох сенсорів для покращення точності орієнтування. Наприклад, дані від лідара можуть поєднуватися з інформацією від камер або ультразвукових датчиків, щоб робот міг точніше визначати контури об'єктів чи ідентифікувати типи перешкод. У деяких випадках застосовуються системи

комп'ютерного зору, які дозволяють розпізнавати об'єкти, такі як вантажі, стелажі або інструменти.

Системи автоматичного керування також враховують енергоефективність роботи. У виробничих умовах, де роботи виконують тривалі завдання, важливо мінімізувати споживання енергії. Оптимізація маршрутів, планування зупинок для заряджання акумуляторів та управління швидкістю руху – усе це допомагає досягти ефективного використання ресурсів.

На завершальному етапі виконання завдання робот передає зібрані дані до системи управління або повідомляє про виконання задачі. Це дозволяє контролювати виконання виробничого процесу та аналізувати ефективність роботи мобільних роботів. Інтеграція таких роботів із системами моніторингу та звітності сприяє покращенню загальної організації роботи підприємства.

1.2 Аналіз сенсорних систем для збору просторових даних

Сенсорні системи для збору просторових даних – це комплекс апаратних та програмних засобів, призначених для сприйняття, аналізу та обробки інформації про навколишнє середовище. Їх основна мета – забезпечити автономним мобільним системам, таким як роботи, можливість орієнтуватися в просторі, взаємодіяти з об'єктами, уникати перешкод та виконувати задані завдання в умовах мінливого середовища. Ці системи є невід'ємною частиною сучасних роботизованих платформ, які використовуються в логістиці, виробництві, медицині, сільському господарстві та інших галузях.

Існує кілька основних типів сенсорних систем [7], які використовуються для збору просторових даних. Кожен із них має свої унікальні характеристики, переваги та недоліки, що робить їх придатними для різних застосувань:

– ультразвукові датчики: сенсори працюють на основі випромінювання звукових хвиль високої частоти та аналізу часу, який потрібен для повернення відбитого сигналу, у виробничих умовах ультразвукові сенсори застосовуються для

виявлення перешкод, автоматичного паркування роботів та моніторингу зон, де потрібна висока чутливість до об'єктів на короткій відстані, однак їх точність знижується при роботі з маленькими або звукопоглинаючими поверхнями;

– інфрачервоні датчики: сенсори використовують інфрачервоні промені для визначення відстані до об'єктів або виявлення руху, вони забезпечують високу швидкість роботи і можуть використовуватися для виявлення об'єктів у темряві, на виробництвах інфрачервоні сенсори застосовуються для контролю точності позиціонування роботів, виявлення предметів на транспортних стрічках або моніторингу зон, недоступних для візуального спостереження. Водночас їх точність може погіршуватися при роботі з прозорими або сильно відбиваючими поверхнями;

– камери: камери, які працюють у видимому або ближньому інфрачервоному діапазоні, забезпечують можливість отримання детальної візуальної інформації про навколишнє середовище, у виробничих умовах камери застосовуються для ідентифікації об'єктів, контролю якості продукції, моніторингу зон і забезпечення роботів візуальними даними для ухвалення рішень, проте обробка візуальних даних потребує значних обчислювальних ресурсів, а якість роботи камер сильно залежить від умов освітлення;

– лідари: використовують лазерні імпульси (рис. 1.3), для визначення відстані до об'єктів, створюючи детальні тривимірні карти простору, вони мають високу точність і швидкість роботи, що робить їх ідеальними для мобільних роботів, які працюють у складних динамічних середовищах, у виробничих умовах лідари використовуються для орієнтації роботів у просторі, побудови карт виробничих зон, виявлення перешкод і забезпечення безпечного пересування;

– датчики інерційної навігації (IMU): Датчики IMU включають акселерометри, гіроскопи та магнітометри (рис. 1.4), які дозволяють визначати положення, швидкість і орієнтацію об'єкта в просторі, вони працюють незалежно від зовнішніх джерел сигналу, що робить їх корисними в умовах, де інші сенсори мають обмеження, у виробничих умовах IMU забезпечують стабільність руху

роботів, визначення нахилів або прискорень і допомагають компенсувати помилки інших сенсорів.

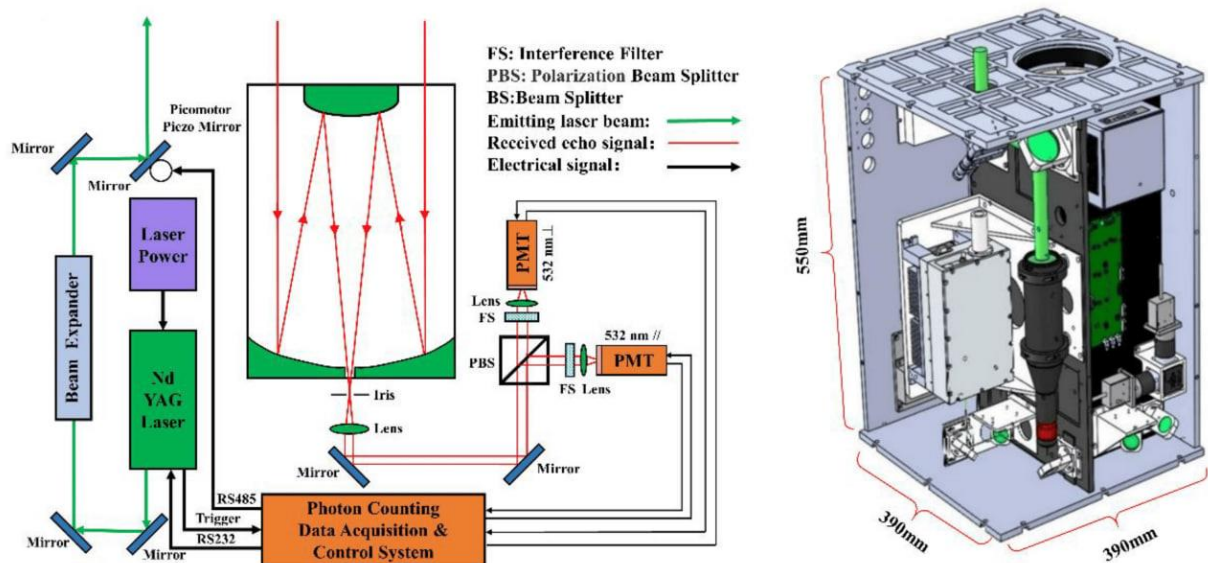


Рисунок 1.3 – Схематичний приклад модуля LiDAR

У виробничому середовищі сенсорні системи є основою для ефективної роботи мобільних роботів. Вони забезпечують сприйняття навколишнього середовища, яке включає створення тривимірних карт, визначення розташування об'єктів, моніторинг зон безпеки та забезпечення точного виконання завдань. Роботи використовують дані сенсорів для орієнтації в складному просторі, уникаючи зіткнень із перешкодами, такими як обладнання, стіни чи персонал.

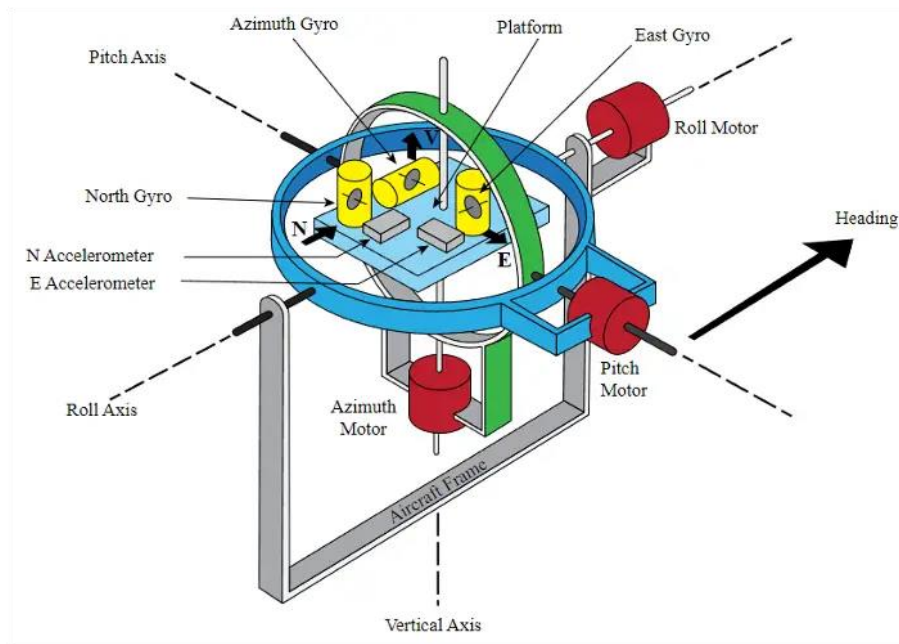


Рисунок 1.4 – Датчики інерційної навігації (IMU)

Збір просторових даних від сенсорів дозволяє роботам адаптуватися до змін у середовищі. Наприклад, якщо в зоні роботи з'являється тимчасова перешкода, робот може швидко переналаштувати маршрут. У динамічному середовищі, де постійно змінюється конфігурація простору, такі системи є критично важливими.

На підприємствах сенсорні системи дозволяють мобільним роботам ефективно виконувати логістичні, складські та виробничі завдання. Вони забезпечують автоматизацію процесів, таких як транспортування деталей між робочими зонами, сортування продукції або виконання завдань у важкодоступних місцях. Сенсорні системи сприяють підвищенню безпеки, адже роботи можуть виявляти зони підвищеного ризику, де працює персонал, і автоматично коригувати свою траєкторію.

Крім того, підприємства використовують сенсорні системи для оптимізації ресурсів. Дані, отримані від сенсорів, дозволяють аналізувати ефективність роботи мобільних роботів, визначати "вузькі місця" у виробничих процесах і приймати рішення про їх усунення.

1.3 Аналіз та формування вимог до системи

Метою роботи є розробка системи автоматичного керування мобільним роботом на основі аналізу просторово-геометричної інформації на виробничому підприємстві. Необхідно щоб система аналізувала простір, уникала перешкод та здійснювала оптимальний маршрут з точки А до точки Б.

Основні задачі проектування наступні:

- аналіз предметної області;
- обґрунтування вибору компонентів, алгоритмів та мов програмування;
- розробка структури та загального алгоритму функціонування пристрою;
- розробка програмної частини;
- тестування розробленої системи.

Вимоги до системи:

- автономність: система повинна працювати автономно, без необхідності постійного втручання оператора, робот має самостійно сканувати середовище, аналізувати отримані дані та планувати маршрут;

- симуляція роботи LiDAR: симуляція повинна враховувати фізичні характеристики реального LiDAR, такі як дальність сканування, кут огляду, частоту вимірювань та точність;

- врахування маршруту: на основі зібраної інформації система повинна будувати найкоротший або найоптимальніший маршрут з точки А до точки Б, це включає обхід перешкод, мінімізацію ризику зіткнень і врахування зон безпеки.

1.4 Висновки по розділу 1

Системи автоматичного керування мобільними роботами є важливим елементом сучасної робототехніки, які забезпечують автономну або напівавтономну роботу роботів у різних середовищах. Вони дозволяють виконувати широкий спектр завдань, таких як транспортування вантажів, збір даних, виконання логістичних операцій, моніторинг середовища та інше.

Основними перевагами таких систем є:

- автономність та адаптивність: мобільні роботи здатні орієнтуватися у просторі, реагувати на зміни середовища та адаптувати свої дії залежно від умов;
- точність і швидкість: використання сенсорних систем, таких як лідари, забезпечує точну побудову тривимірних карт та швидку обробку просторових даних;
- безпека та ефективність: роботи здатні виконувати завдання у небезпечних умовах, мінімізуючи ризики для людей, а також працювати в режимі реального часу, що підвищує продуктивність.

Використання систем автоматичного керування знаходить застосування в різних галузях, таких як логістика, медицина, військова справа, дослідження навколишнього середовища та виробництво. Завдяки цим системам суттєво підвищується ефективність, безпека та точність виконання завдань.

2 ОГЛЯД ВИКОРИСТАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1 Вибір компонентів

Для реалізації проекту були враховані компоненти, необхідні для роботи лазерного далекоміра (LiDAR) та його налаштування. При виборі обладнання бралися до уваги функціональні можливості кожного елемента, його відповідність проектним вимогам та вартість. Важливим критерієм було також співвідношення ціни та продуктивності, оскільки часто можна знайти обладнання з достатнім для реалізації функціоналом, яке є економічно вигіднішим.

Після аналізу доступних рішень і врахування специфікацій, були обрані наступні компоненти для реалізації проекту:

- RPLIDAR A1 360° Laser Range Scanner (рис. 2.1);
- FT232RL USB to UART Serial Adapter Module (рис. 2.2).

RPLIDAR A1 – це лазерний сканер, який використовує методику часового вимірювання відбиття лазерного променя для збору даних про відстань до об'єктів у радіусі 360°. Цей компонент має високу швидкість сканування та забезпечує точний збір даних для побудови карти середовища. Апарат дозволяє виявляти та вимірювати відстані до кількох об'єктів, навіть якщо вони частково перекривають один одного, що є критично важливим у динамічному середовищі виробничого підприємства.

Для забезпечення високої роздільної здатності та дальності вимірювань використовується принцип інтенсивного сканування з частотою обертання до 10 Гц. Завдяки цьому RPLIDAR A1 [8] може формувати карту простору з великою кількістю точок, забезпечуючи високу точність навігації мобільного робота.



Рисунок 2.1 – RPLIDAR A1

Інтерфейси та можливості модуля:

- UART інтерфейс: для передачі даних та комунікації з мікроконтролерами чи комп'ютером;
- живлення: модуль працює від джерела живлення 5 В, що забезпечує його сумісність із більшістю мікроконтролерів та комп'ютерів;
- можливість налаштування швидкості обертання: дозволяє адаптувати сканер до вимог різних застосувань;
- вбудований модуль керування: дозволяє налаштовувати параметри роботи LiDAR без потреби у додаткових контролерах;
- радіус дії: сканер забезпечує точне визначення об'єктів на відстані до 12 метрів із роздільною здатністю 1°.

Модуль FT232RL [9] забезпечує конвертацію сигналів між USB-інтерфейсом і UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), що дозволяє передавати дані між LiDAR і комп'ютером або контролером. Цей модуль забезпечує простоту підключення та високу надійність передачі даних.

Модуль підтримує декілька функцій, необхідних для реалізації проекту, зокрема:

- підключення через USB-порт: дозволяє використовувати стандартний USB-кабель для передачі даних між пристроями;
- сумісність із UART-інтерфейсом: забезпечує з'єднання з LiDAR, який використовує цей стандарт передачі даних;
- живлення: забезпечує живлення для підключених пристроїв без необхідності використання зовнішніх джерел;
- мультифункціональний конектор: модуль має піни для передачі даних (TX), прийому даних (RX), заземлення (GND) і керування режимами (CTS/RTS), що забезпечує гнучкість при підключенні до різних пристроїв;
- сумісність із операційними системами: модуль підтримує роботу з більшістю сучасних ОС, що спрощує його інтеграцію.

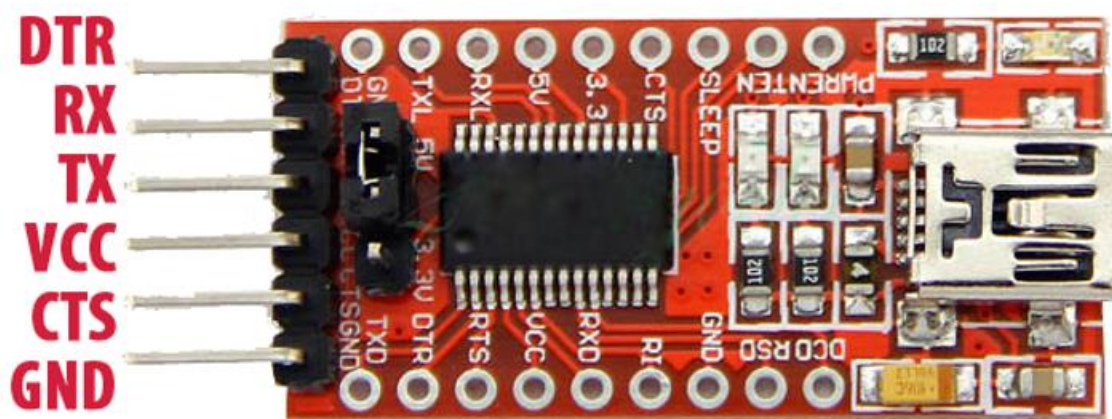


Рисунок 2.2 – FT232RL USB to UART

Обрані компоненти RPLIDAR A1 та FT232RL – забезпечують повний функціонал для симуляції та реалізації роботи системи збору просторово-геометричної інформації. Лідар дозволяє отримувати точні дані про середовище, необхідні для побудови карти, а адаптер FT232RL забезпечує простоту підключення та передачі даних до системи управління. Це рішення оптимально

відповідає вимогам проекту завдяки своїй надійності, функціональності та відносно невисокій вартості.

2.2 Вибір алгоритмів

Для проекту були обрані алгоритми A^* (A-star) [10] та AABV [11] через їхню ефективність у вирішенні задач навігації та обробки просторово-геометричної інформації, що є ключовими аспектами для роботи системи. Обидва алгоритми мають свої унікальні характеристики, які дозволяють досягти високої точності та оптимальності при пошуку маршруту й уникненні перешкод, що особливо важливо в умовах виробничого середовища.

Алгоритм A^* був використаний для пошуку оптимального маршруту між двома точками завдяки його здатності забезпечувати найкоротший шлях із мінімальними витратами. Цей алгоритм використовує евристичні функції для оцінки вартості шляху, що дозволяє зменшити кількість обчислень і підвищити швидкість роботи (рис. 2.3). A^* не тільки забезпечує знаходження найкоротшого маршруту, але й враховує складність середовища, зокрема розташування перешкод і обмежених зон.

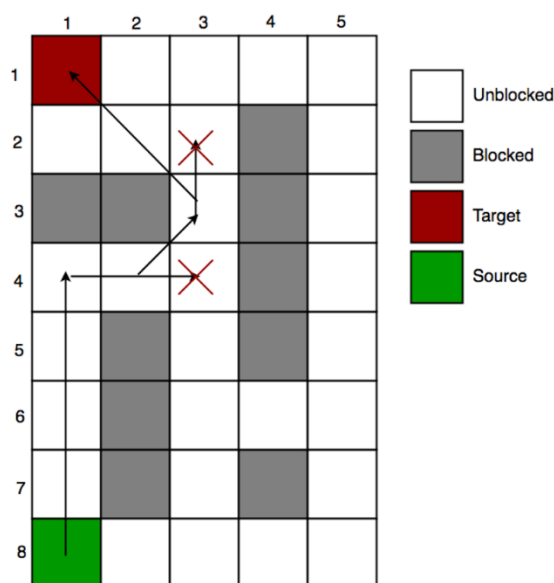


Рисунок 2.3 – Алгоритм A^* (A-star)

У виробничих умовах, де середовище постійно змінюється, A^* дозволяє роботу адаптуватися до нових умов, динамічно перебудовуючи маршрут у разі виникнення несподіваних перешкод. Це робить його ідеальним для задач, де безпека, точність і ефективність є пріоритетами.

Алгоритм AABB (Axis-Aligned Bounding Box) був обраний для виявлення та обробки перешкод у середовищі. Його основна перевага полягає в простоті і швидкості визначення зіткнень між об'єктами. AABB працює шляхом створення прямокутних обмежуючих рамок навколо об'єктів (рис. 2.4), що дозволяє швидко оцінювати, чи перетинаються ці рамки. У контексті виробничого середовища, де присутня велика кількість об'єктів із різною геометриєю, цей алгоритм забезпечує ефективну перевірку зіткнень. Він особливо корисний у поєднанні з даними від LiDAR, оскільки дозволяє легко визначати, які з виявлених об'єктів є критичними для уникнення під час руху.

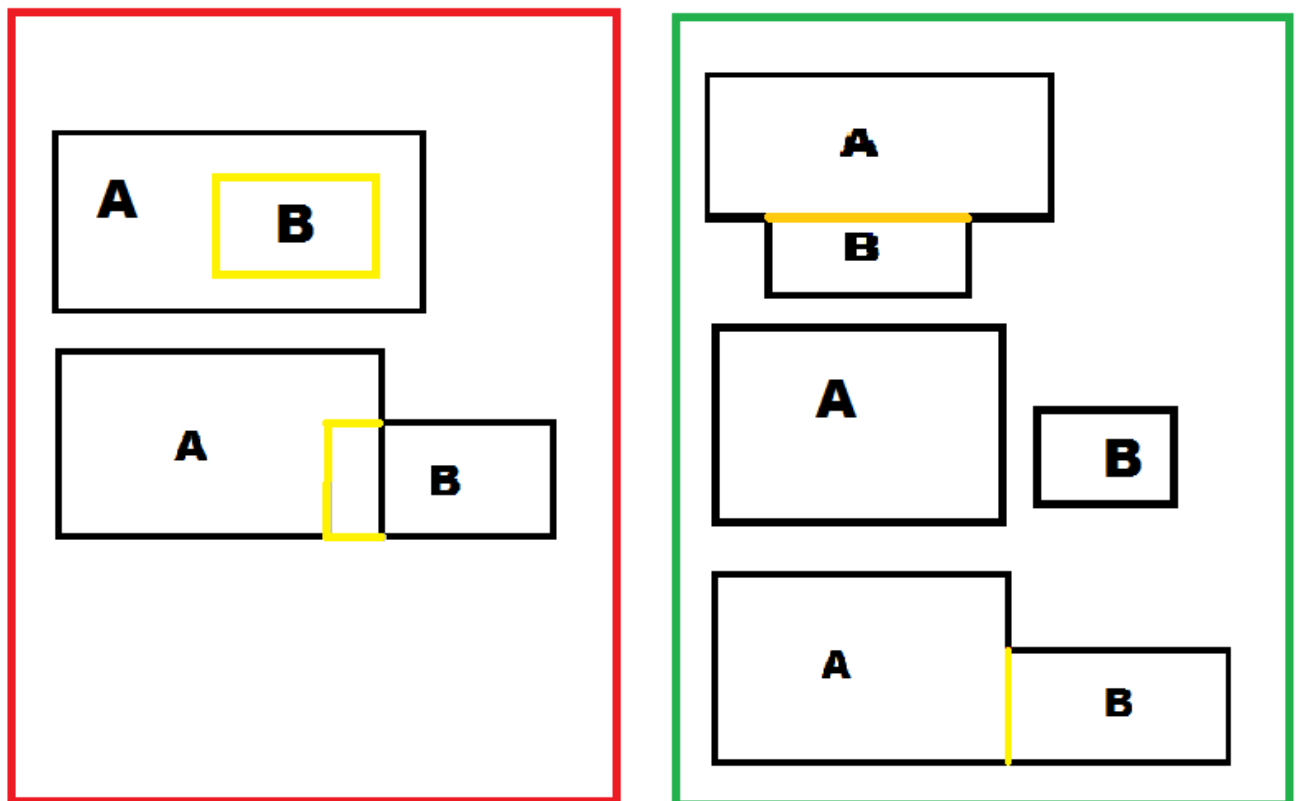


Рисунок 2.4 – Алгоритм AABB

Поєднання алгоритмів A* та AABV забезпечує синергію у вирішенні складних задач. A* гарантує оптимальне планування маршруту, тоді як AABV дозволяє швидко реагувати на перешкоди та забезпечувати безпеку руху робота. Разом ці алгоритми створюють потужну основу для системи, здатної працювати в умовах реального часу, адаптуватися до змін у середовищі та забезпечувати стабільну й ефективну роботу в складних виробничих умовах. Їх інтеграція у проект дозволила досягти балансу між точністю, швидкістю й обчислювальною ефективністю, що є критично важливим для успішного виконання поставлених завдань.

2.3 Мова програмування

Для реалізації проекту було обрано мову програмування Kotlin [12], яка є оптимальним рішенням для розробки алгоритмів, пов'язаних з обробкою даних з LiDAR. Kotlin пропонує високу безпеку, гнучкість і зручність розробки, що дозволяє створювати ефективні рішення для обробки просторово-геометричної інформації з мінімальними витратами часу.

Kotlin – це мова програмування загального призначення з підтримкою статичної типізації, яка працює на платформі Java. Її було розроблено компанією JetBrains у 2011 році як більш сучасну альтернативу Java, з акцентом на продуктивність, зручність кодування та безпеку. Завдяки відкритому коду та підтримці кросплатформного програмування, Kotlin швидко завоювала популярність серед розробників, які створюють застосунки для Android, Java Virtual Machine (JVM) та інших платформ.

Однією з головних причин вибору Kotlin є її здатність підтримувати як об'єктно-орієнтоване, так і функціональне програмування. Це робить її особливо корисною для розробки алгоритмів, які часто базуються на складних взаємодіях між функціями. Крім того, мова забезпечує безпеку типів, що мінімізує ризик помилок, пов'язаних із неправильним використанням типів даних. Це особливо

важливо для обробки великих обсягів даних з LiDAR, де помилки можуть призвести до значних похибок у результатах.

Мова також підтримує багатоплатформену розробку, що дозволяє створювати код, який може бути повторно використаний на різних платформах, таких як Android, сервери або веб-застосунки. Ця гнучкість забезпечує можливість роботи з LiDAR на різних пристроях і середовищах без необхідності переписування великого обсягу коду.

Однією з найбільших переваг Kotlin є її простий та інтуїтивно зрозумілий синтаксис, що робить її доступною навіть для розробників із базовим досвідом програмування. Завдяки цьому процес створення та тестування алгоритмів стає значно швидшим, дозволяючи сконцентруватися на логіці та оптимізації. Крім того, Kotlin активно підтримується спільнотою та має доступ до великої кількості інструментів і бібліотек, що значно спрощує розробку складних проектів.

Водночас мова має і певні обмеження. Наприклад, не всі бібліотеки та інструменти мають повну підтримку Kotlin, що може створювати певні труднощі при інтеграції сторонніх рішень. Також, оскільки Kotlin — відносно молода мова, її спільнота менша, ніж у Java чи Python, що іноді ускладнює пошук рішень для специфічних задач. Незважаючи на це, переваги Kotlin у розробці алгоритмів для LiDAR значно перевищують її недоліки.

Окремо варто відзначити особливості Kotlin, які роблять її особливо привабливою для роботи з LiDAR:

- функціональне програмування дозволяє розробникам ефективно працювати з функціями та їх взаємодіями, що є основою для складних алгоритмів обробки просторових даних;
- типобезпека забезпечує мінімізацію помилок, пов'язаних із несумісністю типів, що особливо важливо при роботі з великими обсягами даних та високоточними обчисленнями;

– мультиплатформна підтримка дає змогу використовувати одну й ту саму кодову базу на різних платформах, що підвищує ефективність розробки та тестування алгоритмів;

– дружність до розробників завдяки зрозумілому синтаксису та низькому порогу входження. Це дозволяє швидко почати розробку і забезпечує комфортну роботу над складними алгоритмічними задачами.

2.4 Середовище розробки

IntelliJ IDEA – це інтегроване середовище розробки (IDE) [13] (рис. 2.5), яке забезпечує підтримку роботи з багатьма мовами програмування, такими як Java, Kotlin, Groovy, Scala, JavaScript, TypeScript, HTML і CSS, та доступне для використання на платформах Windows, Linux і macOS. Розроблена компанією JetBrains, IntelliJ IDEA є однією з найбільш популярних IDE для створення програмного забезпечення на базі Java.

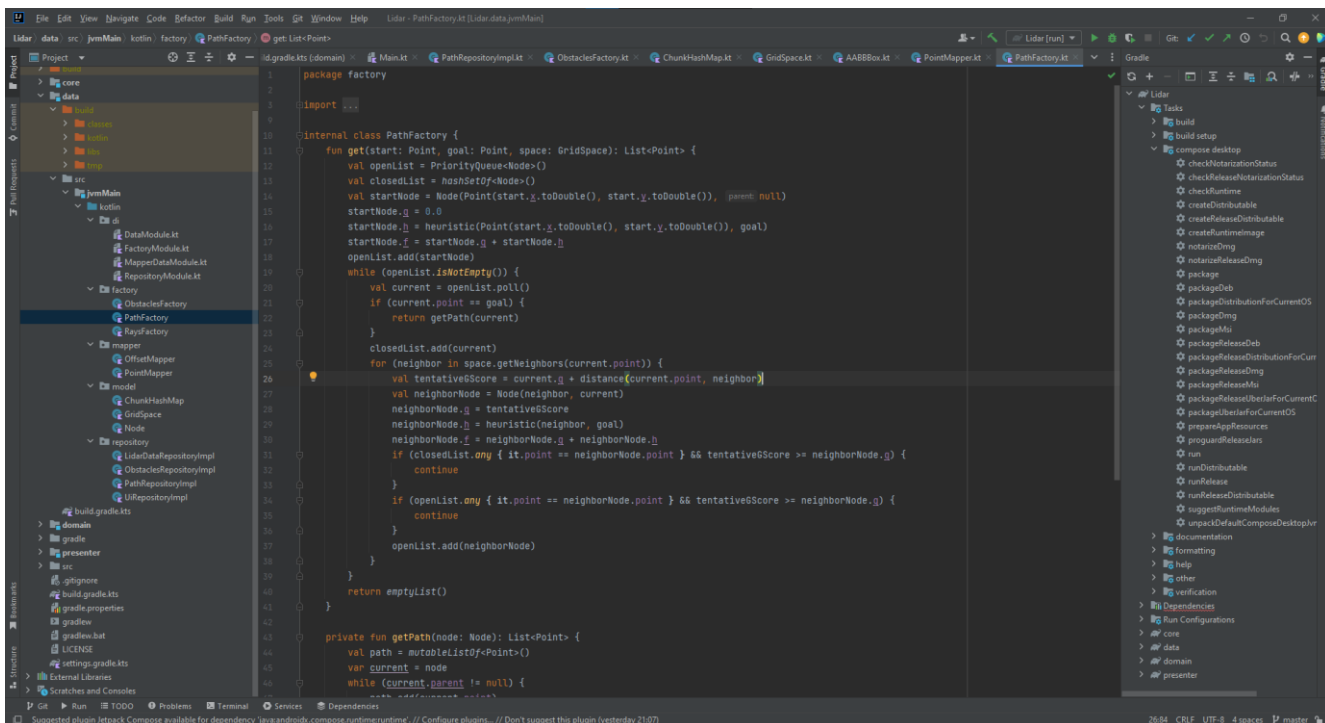


Рисунок 2.5 – Проект у IntelliJ IDEA

Це середовище розробки надає великий набір інструментів, спрямованих на підвищення ефективності роботи програмістів. Серед основних функцій – автодоповнення коду, яке зменшує кількість помилок під час написання програм і прискорює процес розробки. Крім того, IntelliJ IDEA інтегрує систему контролю версій, яка дозволяє програмістам вести спільну роботу над проектами, відстежуючи всі зміни в коді.

До інших корисних можливостей середовища відносяться інструменти для аналізу коду, які допомагають виявляти помилки та оптимізувати написаний код. Вбудована підтримка налагодження та тестування спрощує перевірку роботи програм і їх вдосконалення. Окрім того, IntelliJ IDEA підтримує багато мов програмування, що дозволяє працювати з проектами різного типу, роблячи це середовище універсальним вибором для розробників.

2.5 Висновки по розділу 2

У цьому розділі було проведено детальний аналіз і обґрунтування вибору компонентів, алгоритмів, мови програмування та середовища розробки для реалізації проекту. Основними компонентами системи є RPLIDAR A1 як основний сенсор для збору просторово-геометричної інформації та FT232RL USB to UART Serial Adapter Module, який забезпечує стабільну передачу даних між LiDAR і керуючим пристроєм. Ці компоненти оптимально відповідають вимогам проекту, забезпечуючи точність, продуктивність і економічну ефективність.

Вибір алгоритмів A* та AABV базувався на їхній здатності вирішувати задачі пошуку оптимального маршруту та уникнення перешкод у динамічному середовищі. Ці алгоритми працюють синхронно, забезпечуючи баланс між швидкістю, точністю та ефективністю навігації мобільного робота в умовах виробничого підприємства.

Мова програмування Kotlin була обрана за її функціональність, безпеку типів, простоту використання та підтримку функціонального програмування, що

робить її ідеальною для розробки алгоритмів обробки даних з LiDAR. Її мультиплатформні можливості забезпечують додаткову гнучкість у розробці, дозволяючи адаптувати програму до різних середовищ.

Для реалізації проекту використовується середовище розробки IntelliJ IDEA, яке забезпечує широкий набір інструментів для підвищення продуктивності роботи. Його функції, такі як автодоповнення коду, система контролю версій та вбудовані засоби для тестування, значно спрощують процес створення та оптимізації програмного забезпечення.

Загалом, обрані компоненти, алгоритми, мова програмування та середовище розробки утворюють ефективну, взаємодоповнювальну базу для реалізації системи автоматичного керування мобільним роботом. Цей вибір забезпечує точність, надійність і адаптивність розробленої системи, що дозволяє їй відповідати всім вимогам, висунутим до проекту.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1 Загальний алгоритм роботи системи

Система автоматичного керування мобільним роботом працює за принципом поетапного виконання завдань, починаючи з генерації карти середовища. Спочатку користувач задає параметри, такі як кількість променів LiDAR, кут огляду (FOV), максимальну довжину сканування та інші характеристики. Ці дані формують початкову конфігурацію, яка впливає на точність роботи системи. LiDAR виконує сканування простору, випускаючи лазерні промені, що відбиваються від об'єктів. Отримані дані формують хмару точок, яка обробляється для створення тривимірної карти середовища.

На основі карти алгоритм A^* визначає оптимальний маршрут між заданими точками, враховуючи розташування перешкод і оцінюючи вартість кожного можливого шляху. Якщо у просторі з'являються нові перешкоди, маршрут динамічно перебудовується. Для уникнення зіткнень система використовує алгоритм AABV, що аналізує перетини траєкторій із обмежувачими рамками об'єктів. У разі виявлення потенційної колізії маршрут коригується.

Після побудови маршруту робот отримує команди на рух, постійно оновлюючи дані про середовище. Весь процес відображається у графічному інтерфейсі (рис. 3.1), де користувач може спостерігати карту, маршрут, положення робота та траєкторію руху. Завдання завершується, коли робот досягає кінцевої точки, а система надає звіт про виконаний маршрут, обійдені перешкоди, витрачену відстань і час. Цей алгоритм забезпечує автономність, точність та надійність роботи у складних динамічних умовах.



Рисунок 3.1 – Графічний додаток для відображення роботи програми

3.2 Модель сцени

Для побудови сцени використовується набір заздалегідь визначених ліній, які виконують роль перешкод у середовищі [14, с. 2]. Уся сцена ділиться на менші секції, що називаються чанками (рис. 3.2).

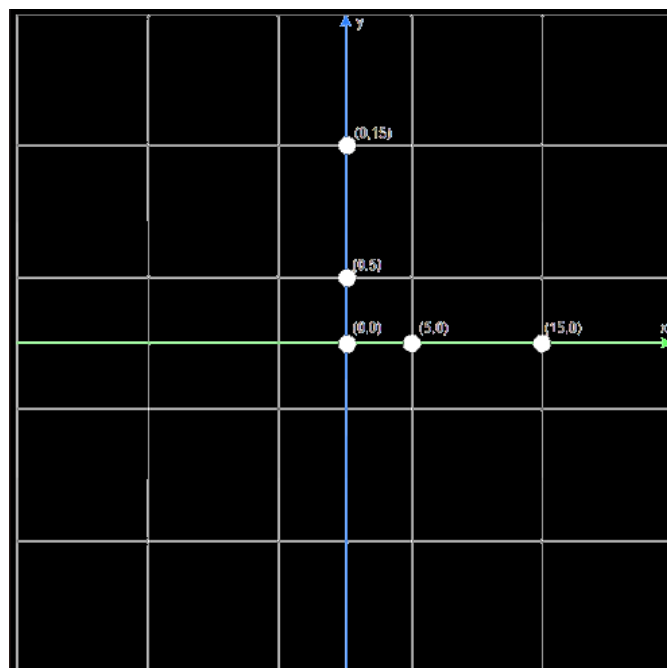


Рисунок 3.2 – Схема поділу сцени на чанки

Цей підхід широко застосовується у багатьох сферах, де необхідна оптимізація обробки великих обсягів даних, що містять надлишкову інформацію.

Для даної моделі використання чанків є оптимальним рішенням, оскільки це дозволяє суттєво знизити витрати ресурсів при обробці даних. Розділення сцени на менші частини дає змогу виконувати обчислення лише для тих частин, які потрапляють у поле зору або є релевантними для поточного аналізу. Це суттєво підвищує швидкодію системи та знижує загальне навантаження на обчислювальні ресурси.

У цій моделі було обрано розмір чанків 10×10 із нульовим чанком, який визначається координатами $x \in (-5, 5)$, $y \in (-5, 5)$. Межі наступних чанків розраховуються за такими формулами:

$$x_{max,min} = x_i \times 10 \pm 5, \quad (3.1)$$

$$y_{max,min} = y_i \times 10 \pm 5, \quad (3.2)$$

$$x_i \in [x_{min}, x_{max}], y_i \in [y_{min}, y_{max}], \quad (3.3)$$

де x_i, y_i – індекси чанків;

x_{min}, x_{max} – лівий та правий кордон чанку;

y_{min}, y_{max} – нижній та верхній кордон чанку.

Цей підхід використовується для реалізації фази грубого пошуку в задачі виявлення зіткнень. Сегментація сцени дозволяє зменшити обсяг обчислень, оскільки аналіз обмежується лише тими чанками, які стосуються конкретної зони інтересу.

Після ініціалізації списку перешкод кожна з них додається до відповідного сегмента, через який вона проходить. Для зберігання інформації про розташування перешкод використовується структура даних `HashMap`, яка дозволяє використовувати сегменти (чанки) як ключі, а списки перешкод у межах цих чанків – як значення. Перевагою `HashMap` є її висока швидкість доступу до даних.

В середньому вона має складність $O(1)$ як зазначено на блок-схемі (рис. 3.3), що забезпечує ефективність роботи системи навіть при значній кількості об'єктів на сцені.

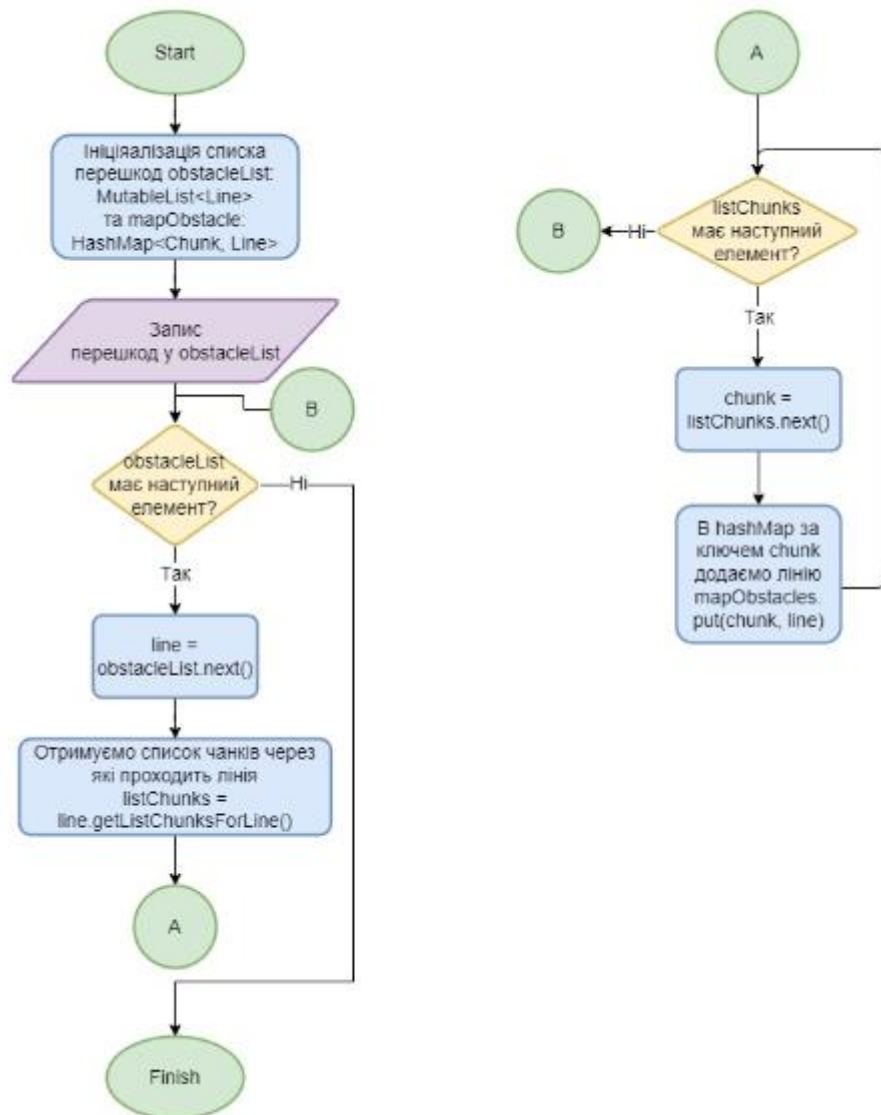


Рисунок 3.3 – Схема алгоритму заповнення чанків перешкодами

Інформація про перешкоди обробляється та управляється за допомогою спеціалізованого класу `ObstaclesFactory` (рис. 3.4). Цей клас забезпечує централізоване управління об'єктами сцени та їхнім розташуванням. Він дозволяє отримати як повний список об'єктів, так і список об'єктів, які розташовані в заданій зоні, визначеній двома точками (рис. 3.5).

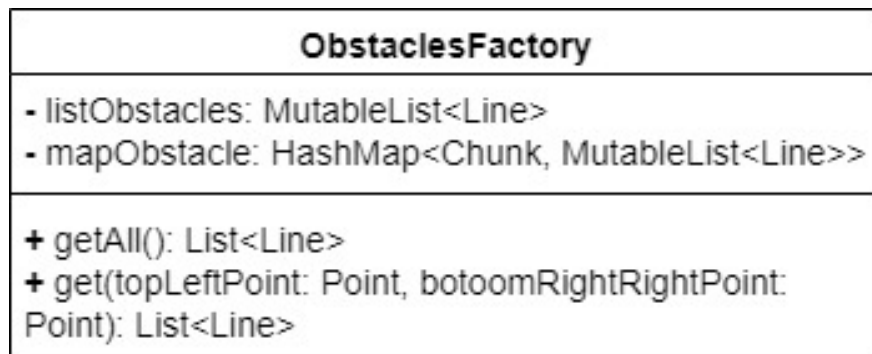


Рисунок 3.4 – UML діаграма класу ObstaclesFactory

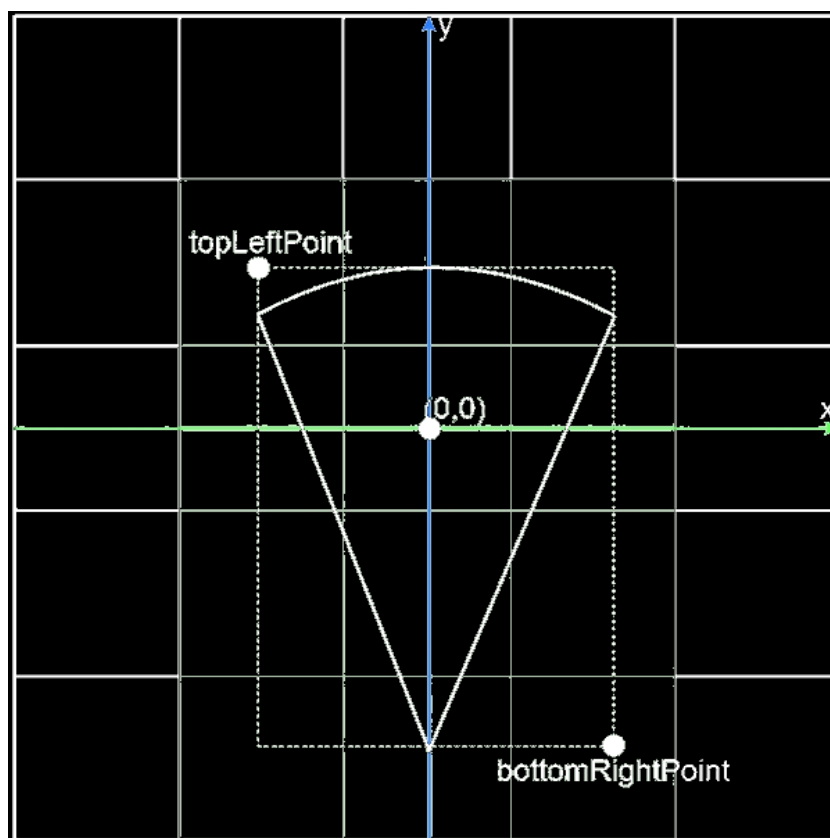


Рисунок 3.5 – Вибір чанків для вилучення перешкод із них у зоні, заданій двома точками

3.3 Модель мультисегментного сенсору

У процесі моделювання роботи мультисегментного сенсору створюється набір ліній, які виконують роль променів. Початковою точкою кожної лінії є

поточна позиція сенсору, а кінцева визначається за допомогою тригонометричних функцій залежно від заданого кута огляду (FOV) і налаштувань дальності. Ці лінії використовуються для визначення перешкод перед сенсором у зоні його дії.

Процес визначення перешкод реалізується у дві фази: груба перевірка (Broad-phase collision detection) і точна перевірка (Narrow-phase collision detection) [15, с. 8].

На першому етапі виконується груба перевірка, де визначаються блоки сцени (чанки), які потрапляють у поле зору сенсору (рис. 3.6). Лише об'єкти, розташовані в цих чанках, передаються на наступний етап для детального аналізу. Такий підхід дозволяє значно знизити обчислювальне навантаження, виключивши з розгляду частини сцени, які не впливають на результат.

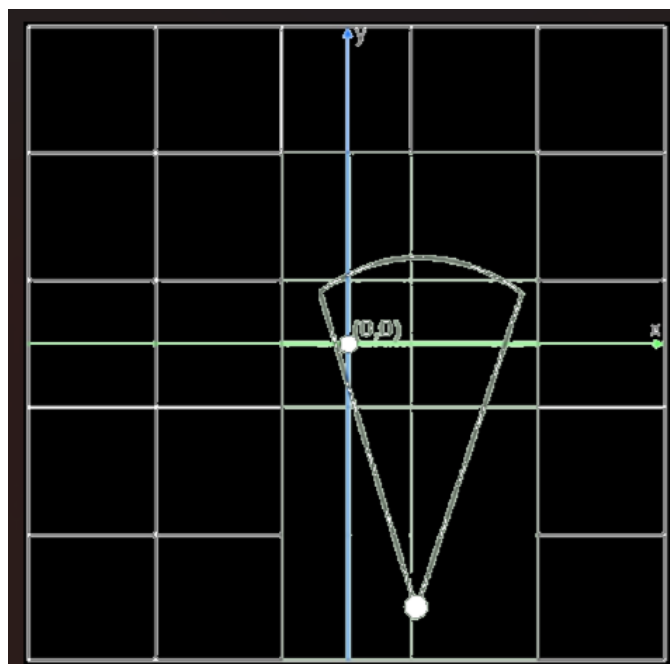


Рисунок 3.6 – Схема вибору блоків

На другому етапі кожна лінія, яка емітує промінь, перевіряється на перетин із перешкодами, відібраними під час першої фази. Для оптимізації процесу використовується метод мінімально обмежувальної коробки (AABB), де кожна перешкода «обгортається» у прямокутник, що дозволяє швидко виключити об'єкти, які точно не перетинаються з променем (рис. 3.7).

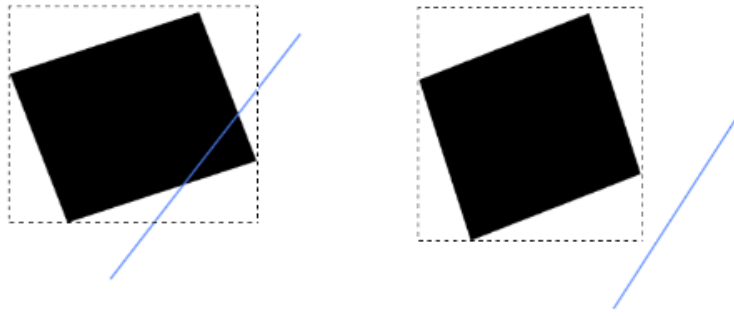


Рисунок 3.7 – Схема вибору блоків

Для визначення точки перетину двох ліній на площині використовується система рівнянь, яка враховує координати початкової та кінцевої точок кожної з них. Спочатку обчислюється знаменник:

$$denominator = (x_1 - x_2) \cdot (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \cdot (x_3 - x_4), \quad (3.4)$$

де $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ — координати першої лінії, а $(x_3, y_3), (x_4, y_4)$ — другої.

Якщо знаменник дорівнює нулю, лінії є паралельними або не перетинаються.

Далі обчислюються параметри t і u , які визначають відносне положення точки перетину:

$$t = \frac{(x_1 - x_3) \cdot (y_3 - y_4) - (y_1 - y_3) \cdot (x_3 - x_4)}{denominator} \quad (3.5)$$

$$u = \frac{(x_1 - x_2) \cdot (y_1 - y_3) - (y_1 - y_2) \cdot (x_1 - x_3)}{denominator} \quad (3.6)$$

Якщо $t \in [0,1]$ і $u \in [0,1]$ лінії перетинаються усередині відрізків (рис. 3.8); інакше точка перетину знаходиться поза межами, і промінь не перетинається з перешкодою (рис. 3.9).

Після цього можна визначити координати точки перетину за формулами:

$$x = x_1 + t \cdot (x_2 - x_1), \quad (3.7)$$

$$y = y_1 + t \cdot (y_2 - y_1) \quad (3.8)$$

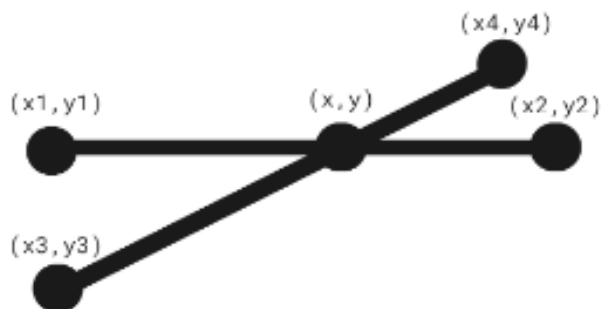


Рисунок 3.8 – Лінії перетинаються усередині

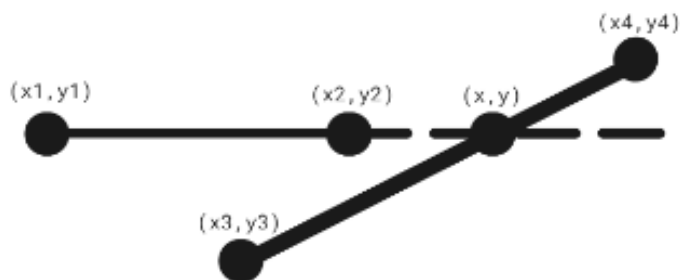


Рисунок 3.9 – Лінії перетинаються зовні

Для відтворення моделі сенсору використовується клас RaysFactory, метод get якого відповідає за генерацію ліній у межах зони дії сенсору. Кінцеві точки ліній розраховуються за допомогою тригонометричних функцій синуса та косинуса:

$$\Delta x = \cos(\alpha) * d; \Delta y = \sin(\alpha) * d, \quad (3.9)$$

де α – кут променя, d – довжина променя (рис. 3.10).

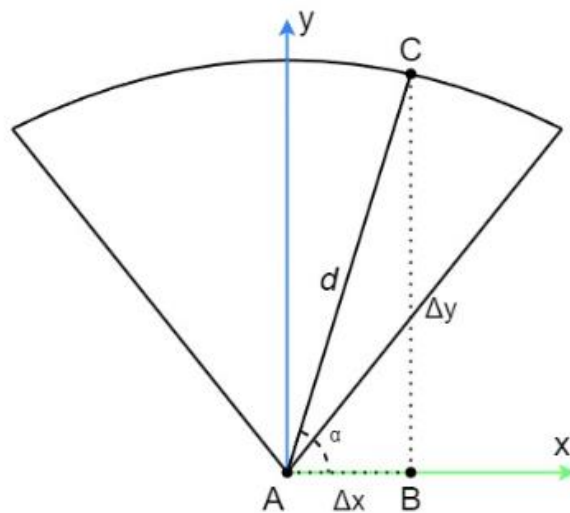


Рисунок 3.10 – Розрахунок кінцевої точки променю

На заключному етапі кожен промінь перевіряється на перетин із перешкодами в чанках, через які він проходить (рис. 3.11). Визначається мінімальна відстань до перетину, яка є результатом роботи сенсору. Об'єкти, що не перетинаються з променем, виключаються з розгляду, що значно підвищує швидкість роботи системи.

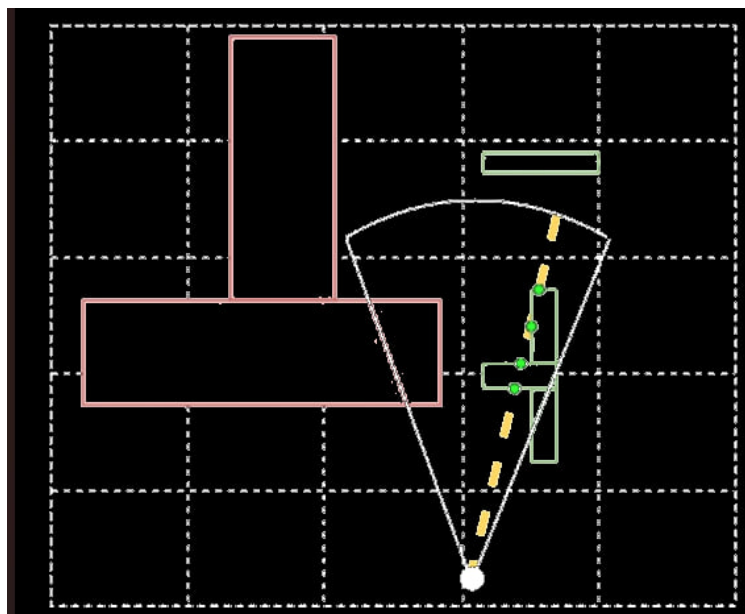


Рисунок 3.11 – Перевірка перешкод на перетин із променем

3.4 Модель прийняття рішень

Для вирішення задачі пошуку оптимального шляху від поточної позиції мобільного робота до заданої цілі було розроблено алгоритм, базований на класичному алгоритмі A^* , з урахуванням специфіки роботи системи в динамічному середовищі (рис. 3.12).

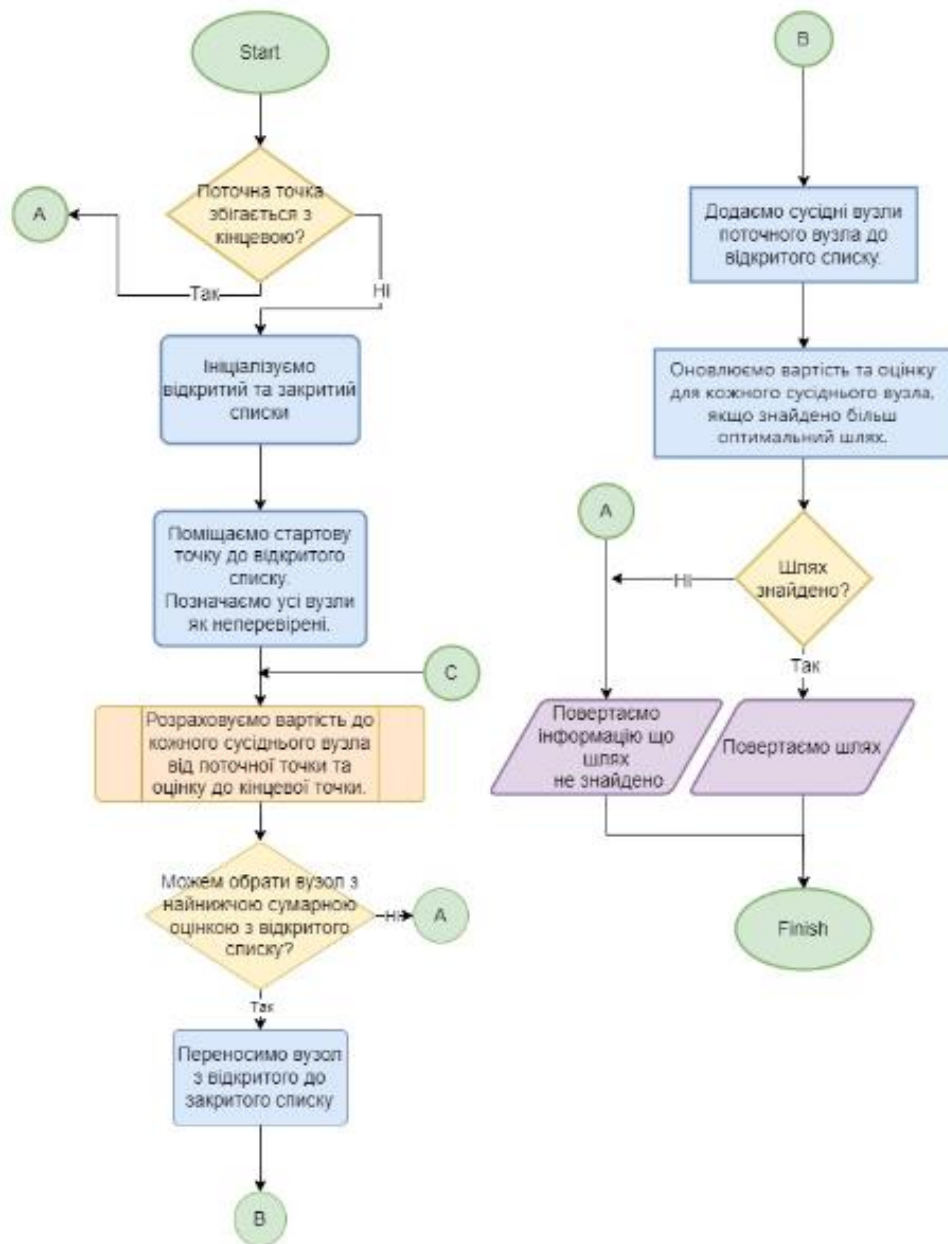


Рисунок 3.12 – Схема алгоритму пошуку шляху

На початковому етапі перевіряється, чи поточна позиція робота збігається з цільовою. Якщо робот вже знаходиться у цільовій точці, виконання алгоритму завершується. У разі, якщо це не так, виконується ініціалізація відкритого та закритого списків позицій. Відкритий список використовується для зберігання потенційних вузлів для подальшого аналізу, тоді як закритий список включає вузли, які вже були оброблені.

Далі для кожної сусідньої позиції навколо поточного положення розраховується вартість. Вартість вузла визначається як сума кількості кроків від початкової точки до цього вузла та евристичної оцінки відстані до кінцевої точки. Евристична функція враховує наявність перешкод і допомагає алгоритму уникати непридатних маршрутів.

Наступний етап передбачає вибір вузла з найменшою вартістю серед доступних у відкритому списку. Якщо вибір такого вузла неможливий (наприклад, усі можливі шляхи заблоковані перешкодами), алгоритм завершує роботу, повертаючи порожній список, який позначає неможливість побудови маршруту між заданими точками. Якщо ж вузол із найменшою вартістю знайдено, алгоритм переходить до обробки його сусідніх вузлів.

У кінцевому результаті алгоритм або знаходить оптимальний маршрут до цільової точки, або визначає, що шлях неможливий. У разі успішного виконання робот отримує список точок, які визначають маршрут руху.

Оскільки інформація про середовище стає доступною лише під час руху робота (завдяки даним LiDAR), первинний маршрут може виявитися недійсним через раптово виявлені перешкоди. У таких випадках алгоритм адаптує маршрут у реальному часі. Якщо запланований рух до наступної точки неможливий через виявлену перешкоду, відбувається динамічний перерахунок шляху з урахуванням нових умов.

Однак, щоб уникнути зайвого навантаження на процесор і зберегти енергоресурси системи, перерахунок маршруту виконується лише тоді, коли це необхідно – наприклад, якщо виявлено, що прямий рух до наступної точки

блокується. Цей підхід оптимізує роботу алгоритму, оскільки регулярний перерахунок після кожного кроку міг би значно сповільнити систему, призвести до зависання програми та збільшити витрати енергії, що негативно позначилося б на автономності роботи мобільного робота.

Такий підхід дозволяє балансувати між швидкістю виконання алгоритму, точністю обчислень і витратами ресурсів. Адаптивний перерахунок маршруту дозволяє ефективно реагувати на зміни в середовищі, забезпечуючи плавну та безпечну навігацію робота. Алгоритм не лише гарантує точність роботи в умовах динамічного середовища, але й забезпечує високу швидкість обробки даних, що є критично важливим для роботи системи в реальному часі.

3.5 Генерація тестового простору

Для тестування розробленого алгоритму було створено модуль із мінімапою (рис. 3.13), яка генерує віртуальний простір із перешкодами. Цей модуль дозволяє створити середовище, що імітує реальні умови, у яких алгоритм буде застосовуватись, і перевірити його працездатність при вирішенні задачі пошуку оптимального шляху.

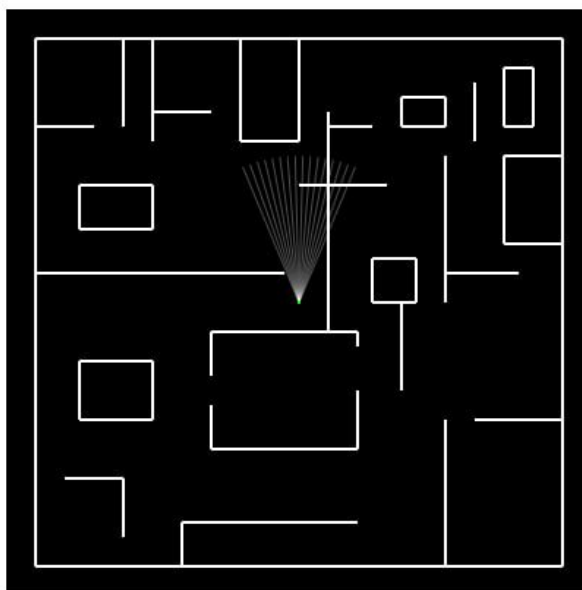


Рисунок 3.13 – Мінімапа тестового простору

Генерація простору з перешкодами дає змогу створити сценарії, які максимально відповідають можливим умовам експлуатації системи. Завдяки цьому модулю можна задати різні типи перешкод, що відображають особливості реального середовища, зокрема вузькі проходи, перешкоди складної форми, нерівномірно розташовані об'єкти або складні маршрути. Це дозволяє оцінити, як алгоритм реагує на різні ситуації і чи здатний він знайти оптимальний шлях за наявності таких обмежень.

Основна перевага створення такого модуля полягає у можливості контролювати параметри тестового середовища. У мінімапі (рис. 3.14) можна змінювати розміри, форму та розташування перешкод, що дозволяє перевірити адаптивність алгоритму. Такий підхід дає змогу оцінити його ефективність і правильність роботи перед впровадженням у реальні задачі або використанням у реальних умовах.

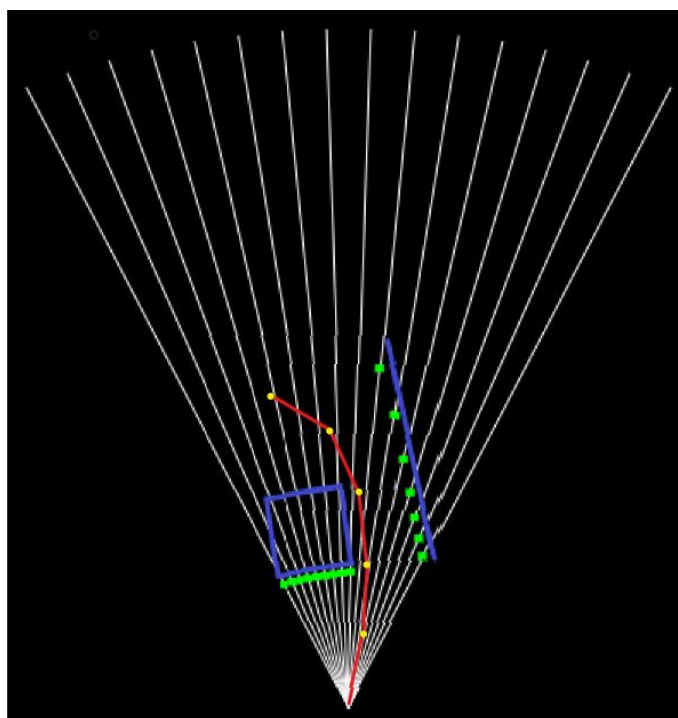


Рисунок 3.14 – Приклад роботи алгоритму в умовах тестового простору

Генерація простору для тестування алгоритму реалізується через створення списку перешкод (`listObstacles`) та карти перешкод (`mapObstacle`). Ці структури визначають обмеження, які алгоритм має враховувати під час побудови шляху.

На першому етапі створюється порожній список перешкод, який заповнюється набором ліній. Кожна лінія визначається двома точками: початковою та кінцевою, які задають її геометричне положення. Лінії формують основу для тестових перешкод у середовищі.

Далі кожна лінія обробляється за допомогою методу `getListChunksForLine()`, який визначає, через які частини (чанки) сцени проходить ця лінія. Отримані чанки додаються до карти перешкод (`mapObstacle`). У цій карті кожен чанк містить список ліній, які його перетинають. Завдяки цьому вдається швидко визначити, які перешкоди впливають на задану область сцени, що значно оптимізує обчислення.

Метод `get` забезпечує доступ до списку ліній, які перетинаються із зазначеною областю, визначеною двома точками: верхньою лівою (`topLeftPoint`) та нижньою правою (`bottomRightPoint`). Це дозволяє локалізувати перешкоди, які потрібно враховувати в обчисленнях, і перевірити, як алгоритм працює в заданих умовах.

Цей модуль генерує середовище з перешкодами, яке стає основою для перевірки алгоритму. Він створює систему перешкод, які алгоритм має враховувати при побудові шляху. Алгоритм визначає оптимальний маршрут, уникаючи або обходячи перешкоди, що імітує його роботу в реальних умовах.

Можливість змінювати параметри простору дозволяє протестувати алгоритм на різних сценаріях, таких як складні маршрути, густо заповнені перешкодами зони або динамічні умови. Це забезпечує всебічну перевірку ефективності алгоритму та дозволяє адаптувати його до конкретних потреб системи. Завдяки цьому підходу ми отримуємо надійну методику тестування перед практичним впровадженням алгоритму в реальні задачі.

3.6 Висновки по розділу 3

У цьому розділі було розглянуто основні аспекти роботи системи автоматичного керування мобільним роботом, включаючи моделі сцени, мультисегментного сенсора, алгоритм прийняття рішень та генерацію тестового простору для перевірки алгоритму.

Модель сцени з розбиттям на чанки дозволила оптимізувати обчислення, зосереджуючи аналіз лише на релевантних частинах середовища. Це суттєво підвищує ефективність системи, особливо за умови роботи з великими обсягами просторово-геометричних даних. Застосування структури даних типу HashMap забезпечило швидкий доступ до інформації про перешкоди в межах окремих чанків, що мінімізувало обчислювальне навантаження.

Модель мультисегментного сенсора продемонструвала, як можна ефективно реалізувати виявлення перешкод у дві фази: грубу перевірку та точну перевірку. Використання методу мінімально обмежувальної коробки (AABB) дозволило прискорити обробку даних і підвищити точність визначення точок перетину.

Алгоритм пошуку шляху на основі A* довів свою здатність адаптуватися до динамічних змін у середовищі. Завдяки механізму перерахунку маршруту в реальному часі система може ефективно уникати раптово виявлених перешкод, зберігаючи при цьому високий рівень продуктивності. Оптимізований підхід до перерахунку маршруту дозволив знизити навантаження на систему, зберігаючи її енергетичну автономність.

Генерація тестового простору із мінімапою забезпечила можливість тестування алгоритму в умовах, наближених до реальних сценаріїв. Це дозволило оцінити ефективність роботи алгоритму в різних умовах, таких як складні маршрути, вузькі проходи та динамічні зміни середовища.

Загалом, у розділі було запропоновано комплексний підхід до розробки та тестування системи автоматичного керування мобільним роботом. Усі етапи, від моделювання сцени до перевірки алгоритму, були оптимізовані для забезпечення

високої швидкості, точності та адаптивності системи. Це створює надійну основу для подальшого впровадження розроблених рішень у реальні задачі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Згідно зі статтею 8 Конституції України – основним правовим документом України є Конституція України. Конституція України має найвищу юридичну силу. Закони і інші нормативно-правові акти приймаються на підставі Конституції України і повинні відповідати їй [16]. На підставі Конституції України прийнятий Закон України “Про охорону праці”.

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних заходів, а так само санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних засобів, направлених на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. (згідно закону України "Про охорону праці" стаття 1)

Згідно з статтею 2 закону «Про охорону праці» дія закону розповсюджується на всі підприємства, установи і організації не залежно від форми власності і видів їх діяльності, на всіх громадян, які працюють, а також повернуті до праці на цих підприємствах.

Виходячи із загальних завдань в області охорони праці, в даному дипломному проекті необхідно виконувати нижче вказані вимоги.

Пожежна безпека. Офіс, згідно НАПБ Б.03.002-2007 [17], належить до категорії Гз оскільки в ньому знаходяться (обертаються) негорючі речовини і/або матеріали в гарячому, розпеченому і/або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор і/або полум'я, а також горючі гази, рідини і/або тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо.

Було введено такі заходи протипожежної безпеки:

– в офісі введено план евакуації, який включає чіткі шляхи евакуації, розташування місця збору після евакуації та процедури повідомлення про пожежу. План розроблений і доступний для всього персоналу;

– в офісі встановлено пожежні сповіщувачі та пожежну сигналізацію, які виявляють пожежу і автоматично сповіщають про неї. Також було впроваджено 6

вогнегасників типу ВВК-1,4 відповідно до Наказу Міністерства внутрішніх справ України від 06 травня 2021 року № 342 [18].

Було введено вимогу використання вогнестійких матеріалів для меблів та інших обшивок в офісі. Проведено перевірку відповідності матеріалів вимогам пожежної безпеки.

Електробезпека. Приміщення забезпечили нейтралізаторами, металеві прилади приєднали до заземлення з опором в 5 Ом, встановили датчики напруги, розетки обладнали запобіжниками. Було проведено інструктаж з безпеки для персоналу, для екстрених випадків запровадили можливість безпечно залишити приміщення.

ВИСНОВКИ

Випускна кваліфікаційна робота магістра присвячена вирішенню актуальної задачі – розробці системи автоматичного керування мобільним роботом на основі аналізу просторово-геометричної інформації у виробничому середовищі.

У першому розділі було проведено аналіз сучасних підходів до автоматизації мобільних роботів із використанням систем LiDAR. Встановлено, що такі системи активно застосовуються у виробничих процесах, логістиці, моніторингу та інших галузях, де важливими є автономна навігація, точність руху та обробка великого обсягу просторових даних. Основні функції LiDAR-систем включають створення тривимірних карт середовища, виявлення та уникнення перешкод, а також забезпечення безперебійної роботи в умовах динамічного середовища.

У другому розділі було розглянуто та обґрунтовано вибір компонентів системи. Для реалізації проекту були обрані сучасні апаратні модулі, зокрема високоточний сенсор LiDAR, що забезпечує збір просторових даних, та допоміжні адаптери для передачі інформації. Було визначено мову програмування Kotlin, яка завдяки своїм можливостям забезпечує ефективну реалізацію алгоритмів обробки даних, та середовище розробки IntelliJ IDEA. Також були розроблені моделі сцени та механізми оптимізації роботи через розбиття простору на чанки, що дозволяє знизити обчислювальне навантаження.

У третьому розділі було створено алгоритм роботи системи автоматичного керування мобільним роботом. Алгоритм включає динамічну обробку даних LiDAR для побудови тривимірного середовища, пошук оптимального маршруту за допомогою алгоритму A^* , а також уникнення перешкод із використанням алгоритму AABV. Для тестування алгоритмів було розроблено віртуальне середовище із генерацією перешкод різної складності. Реалізовано модуль візуалізації, що дозволяє користувачам стежити за рухом робота в режимі реального часу. Проведені тести підтвердили високу точність, швидкість роботи та адаптивність системи в умовах динамічних змін середовища.

Результати роботи доводять актуальність розробки та її практичну цінність. Система автоматичного керування мобільним роботом із використанням технології LiDAR має широкі перспективи застосування на виробничих підприємствах, у логістиці та інших сферах, де потрібна точна й автономна навігація. Подальше вдосконалення системи може включати інтеграцію додаткових сенсорів, реалізацію більш складних алгоритмів прийняття рішень та функцій зворотного зв'язку для передачі інформації користувачеві. Це дозволить розширити функціональні можливості системи та підвищити її ефективність у більш складних і спеціалізованих задачах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1 ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст]. – Введ. 2015-06-22. – К.: Держстандарт України, 2017., 29 с.

2 Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньо-професійних програм «Автом [Електронний ресурс] / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – електрон. вид. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – 1,25 Мб. – pdf / 1,25 Мб

3 Цимбал О. М. Системи адаптації роботів і технологія OpenCV : навч. посіб. / О. М. Цимбал, А. І. Бронніков ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2019. – 144 с. : іл. – ISBN 978-966-659-268-5. – 8.80

4 Brown, A., & Smith, J. (2019). LiDAR Technologies for Robotic Navigation. New York: Springer [Електронний ресурс] — <https://mitpress.mit.edu/9780262201629/probabilistic-robotics/>

5 LiDAR laser: what is LiDAR and how does it work? | Sensor Partners [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://sensorpartners.com/en/kennisbank/how-a-LiDAR-laser-works/>

6 Воронов Д.О. Розробка методу визначення швидкості переміщення об'єктів на основі аналізу зображень [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей. Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Нелюдова та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 1. – 336с. Воронов Д.О. с.119-123.

7 Types of Sensors [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.kellertechnology.com/blog/7-types-of-sensors-for-object-detection/>

8 RPLIDAR A1 360° Laser Range Scanner [Електронний ресурс] / Режим

доступу: <https://www.slamtec.com/en/lidar/a1>

9 FT232RL USB to UART Serial Adapter Module [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ft232rl%20datasheet&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAhbi8BhDIARIsAJLOlud3XARIIWkzVNBsF3BIHYRpAKL1UC4MKMMixPulO0pvXKLgh4H85kYaAmZUEALw_wcB

10 Алгоритм AABB (Axis-Aligned Bounding Box) [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Games/Techniques/3D_collision_detection

11 Алгоритм A* (A-Star) [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.geeksforgeeks.org/a-search-algorithm/>

12 Що таке Котлін [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://uk.education-wiki.com/1625670-what-is-kotlin>

13 Комерційне інтегроване середовище розробки IntelliJ IDEA [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/IntelliJ_IDEA

14 How good is random linear coding based distributed networked storage [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://web.mit.edu/~medard/www/page2/mpapers/netcod2005_accek.pdf

15 Physics - Broad phase [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://research.ncl.ac.uk/game/mastersdegree/gametechnologies/physicstutorials/accelerationstructures/Physics%20-%20Spatial%20Acceleration%20Structures.pdf>

16 Закон України "Про охорону праці" [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ohranatruda.in.ua/pages/21/> – 01.06.2022.

17 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою НАПБ Б.03.002-2007 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://antifire.ua/ua/dbn/5.pdf>

18 Наказ Міністерства внутрішніх справ України 06 травня 2021 року N 342 НОРМА № 6 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/RE36310?an=1>