

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Методи та засоби керування траєкторією руху роботизованої
газонокосарки**

Виконав: студент(ка) 6 курсу, групи СІм-62
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Стецько В. Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Приймак М. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Тиш Є.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Карпінський М.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«17» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Стецьку Владиславу Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи та засоби керування траєкторією руху роботизованої газонокосарки

Керівник роботи Приймак Микола Володимирович, доктор технічних наук, професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2025 року № 4/7-987

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Алгоритми позиціювання автономних газонокосарок, технічні засоби керування рухом газонокосарок, система навігації Marvelmind Robotics, умови експлуатації: ділянки складної геометричної форми з наявністю внутрішніх перешкод

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1. Аналітична частина

2. Теоретична частина

3. Практична частина

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Актуальність і мета дослідження.

2. Завдання, об'єкт і предмет, наукова новизна і практична цінність дослідження.

3. Вибір ефективних технологій для роботизованої газонокосарки

4. Алгоритм аналізу і обробки території автоматизованою газонокосаркою

5. Принцип роботи оптимізованого BCD алгоритму і створення графу оптимального шляху

6. Структурна схема роботизованої газонокосарки

7. Результати експериментального дослідження.

8. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Осухівська Г. М., зав. кафедри КС</i>	<i>04.12.2025</i>	
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>			

7. Дата видачі завдання 17.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літературних джерел. Постановка завдання на кваліфікаційну роботу.</i>	<i>17.11.2025р. – 23.11.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
2.	<i>Алгоритми і засоби позиціонування автономних газонокосарок</i>	<i>24.11.2025р. – 02.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
3.	<i>Експериментальне дослідження запропонованих алгоритмів визначення траєкторії руху</i>	<i>03.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
4.	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>04.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
5.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>11.12.2025р. – 19.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
6.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>16.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
7.	<i>Захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>26.12.2025 р.</i>	<i>Викон.</i>

Студент

(підпис)*Стецько Владислав Русланович*

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)*Приймак Микола Володимирович*

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Стецько В. Р. Методи та засоби керування траєкторією руху роботизованої газонокосарки: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра: спец. 123 – комп'ютерна інженерія / наук. кер. Приймак М. В. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.

Ключові слова: газонокосарка, автономність, алгоритм руху, траєкторія, кіберфізича система, оптимізація, бустрофедонна декомпозиція, повне покриття.

Кваліфікаційна робота присвячена вдосконаленню системи автоматизованого керування рухом мобільного робота для забезпечення повного покриття площі складних ділянок.

У роботі проведено аналіз існуючих стратегій навігації, досліджено кінематичні особливості платформ з диференційним приводом та виявлено недоліки хаотичних і простих детермінованих методів руху.

На основі аналізу запропоновано оптимізований алгоритм бустрофедонної клітинної декомпозиції (BCD), який використовує ітераційне обертання карти та цільові функції для вибору найкращого напрямку руху, що дозволяє мінімізувати кількість холостих ходів.

У роботі реалізовано програмно-апаратну систему на базі дворівневої архітектури, де мікрокомп'ютер Raspberry Pi 3 відповідає за навігацію та планування маршруту, а мікроконтролер Arduino Mega 2560 керує приводами та обробляє дані з сенсорів системи Marvelmind та ультразвукових датчиків.

Розроблена архітектура забезпечує адаптивне формування маршруту для ділянок довільної форми, що дозволяє скоротити довжину холостих переміщень у 2–3 рази та зменшити загальний час виконання роботи.

Результати роботи мають практичне значення для створення автономних систем обслуговування зелених зон, паркових територій та присадибних ділянок зі складною конфігурацією перешкод.

ANNOTATION

Stetsko V. R. Methods and tools for controlling the movement trajectory of a robotic lawn mower. Master's Graduation Thesis: speciality 123 - Computer engineering / supervisor Priymak M. V. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2025.

Keywords: lawnmower, autonomy, motion algorithm, trajectory, cyber-physical system, optimization, Boustrophedon decomposition, complete coverage.

This thesis is devoted to improving the automated motion control system of a mobile robot to ensure complete area coverage of complex plots.

The thesis analyzes existing navigation strategies, investigates the kinematic features of differential drive platforms, and identifies the shortcomings of chaotic and simple deterministic motion methods.

Based on the analysis, an optimized Boustrophedon Cellular Decomposition (BCD) algorithm is proposed, which uses iterative map rotation and objective functions to select the best direction of movement, thereby minimizing the number of idle moves.

A hardware-software system based on a two-level architecture has been implemented, where a Raspberry Pi 3 microcomputer is responsible for navigation and path planning, and an Arduino Mega 2560 microcontroller controls the drives and processes data from the Marvelmind system sensors and ultrasonic sonars.

The developed architecture ensures adaptive route generation for areas of arbitrary shape, which allows reducing the length of idle movements by 2–3 times and decreasing the total operation time.

The results of the work have practical significance for the creation of autonomous systems for maintaining green zones, park areas, and garden plots with complex obstacle configurations.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	12
1.1. Огляд літератури по тематиці кваліфікаційної роботи	12
1.2. Огляд сучасних систем позиціювання в мобільній робототехніці	14
1.2.1. Технологія Marvelmind та її переваги для роботів-газонокосарок	18
1.3. Аналіз алгоритмів планування траєкторії руху роботизованої газонокосарки	19
1.3.1. Реактивні стратегії керування.....	20
1.3.2. Методи, засновані на карті середовища	21
1.3.3. Інші підходи (біоінспіровані та ШІ).....	24
1.4. Висновки до розділу 1.	24
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	26
2.1. Способи руху і поворотів роботизованих газонокосарок.....	26
2.1.1. Види руху роботизованої газонокосарки.....	29
2.1.2. Проблема складних середовищ та перешкод	31
2.1.3. Вплив кінематики на вибір алгоритму руху.....	33
2.2. Алгоритм бустрофедонного поділу площини.....	34
2.3. Оптимізований VCD	40
2.4. Планування шляху між комірками.....	42
2.5. Планування шляху на основі датчиків.....	43
2.6. Висновки до розділу 2.	44
РОЗДІЛ 3 АПРОБАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ.....	46
3.1. Опис електронних компонентів і апаратна реалізація	46
3.2. Розрахунок і створення траєкторії руху.....	54

3.3. Результати моделювання і аналіз роботи оптимізованого VCD алгоритму	61
3.4. Висновки до розділу 3.	67
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	69
4.1. Охорона праці	69
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	71
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75
Додаток А. Тези конференцій	

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

- ACD (англ. Approximate Cellular Decomposition) приблизний клітинний розподіл
- BCD (англ. Boustrophedon Cellular Decomposition) бустрофедонна клітинна декомпозиція
- CCPP (англ. Complete Coverage Path Planning) повне покриття робочого простору
- PWH (англ. Polygon With Holes) багатокутник внутрішніми отворами
- SLAM (англ. Simultaneous Localization and Mapping) визначення позиції і побудова карти
- (x, y) координати положення автоматизованої газонокосарки
- θ кут повороту автоматизованої газонокосарки

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку робототехніки та інтелектуальних кіберфізичних систем все більшого поширення набувають автономні мобільні роботи, призначені для виконання прикладних завдань у побутовій, комунальній та промисловій сферах. Одним із перспективних напрямів є використання роботизованих газонокосарок, які забезпечують автоматизоване обслуговування територій без постійної участі оператора, зменшуючи витрати часу, енергії та людських ресурсів.

Ключовою проблемою функціонування автономних газонокосарок є ефективне планування траєкторії руху, яке безпосередньо впливає на повноту покриття площі, енергоефективність, знос механічних вузлів та тривалість виконання завдання. Недосконалі алгоритми проходження площі можуть призводити до повторного скошування одних і тих самих ділянок, пропусків окремих зон, надмірної кількості поворотів і, як наслідок, до зниження загальної продуктивності роботизованої системи.

Особливої актуальності набуває дослідження та математичне обґрунтування алгоритмів детермінованого покриття площі, зокрема гонтових і комбінованих методів, які дозволяють формувати прогнозовані та оптимізовані траєкторії руху в межах складних багатокутних ділянок. На відміну від стохастичних підходів, такі алгоритми забезпечують контрольовану структуру руху, рівномірність покриття та можливість аналітичної оцінки ефективності.

Також актуальним є необхідність інтеграції алгоритмів планування траєкторії з реальними обмеженнями роботизованих газонокосарок, такими як кінематичні характеристики, ширина захвату робочого органу, обмеження на радіус повороту та точність позиціонування. Це вимагає розроблення формалізованих математичних моделей, придатних для програмної реалізації та подальшого впровадження у системи автоматичного керування.

Таким чином, дослідження алгоритмів планування траєкторії руху роботизованої газонокосарки та розроблення математично обґрунтованих методів

проходження площі є актуальним науково-практичним завданням, що відповідає сучасним тенденціям розвитку автономних робототехнічних систем і має безпосереднє прикладне значення для підвищення ефективності їх функціонування.

Мета кваліфікаційної роботи. Метою кваліфікаційної роботи є розроблення та дослідження алгоритмів планування траєкторії руху автономної роботизованої газонокосарки для забезпечення повного та рівномірного покриття площі скошування, зменшення кількості повторних проходів і підвищення енергоефективності функціонування роботизованої системи.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- провести аналіз сучасних підходів і алгоритмів планування траєкторії руху автономних роботизованих газонокосарок;
- дослідити алгоритми формування траєкторії для кругового та гонтового (зигзагоподібного) методів проходження площі з урахуванням ширини захвату робочого органу та кінематичних обмежень руху;
- провести аналіз алгоритмів з точки зору рівномірності покриття площі, наявності повторних проходів і потенційних втрат енергії;
- розробити апаратно-програмний комплекс для апробації запропонованих алгоритмів.

Об'єкт дослідження: Процес керування рухом та планування траєкторії автономних мобільних платформ (роботизованих газонокосарок) під час виконання задачі повного покриття площі.

Предмет дослідження: методи та алгоритми планування траєкторії повного покриття на основі модифікованої бустрофедонної клітинної декомпозиції з урахуванням кінематичних обмежень газонокосарки.

Методи дослідження: на розробленому макеті роботизованої платформи.

Наукова новизна дослідження. Удосконалено метод бустрофедонної клітинної декомпозиції для планування траєкторії повного покриття. Запропоновано оптимізований алгоритм, який включає ітераційну процедуру обертання карти ділянки (від 0 до 180 градусів) для пошуку найкращого напрямку декомпозиції, що дало можливість адаптувати форму комірок до топографії перешкод, мінімізувати

кількість вузьких проходів і скоротити довжину холостих переміщень порівняно з базовим методом.

Набув подальшого розвитку підхід побудови міжкоміркового маршруту, який ґрунтується на з'єднанні окремих комірок в єдиний маршрут з використанням графа видимості та графа суміжності (графа Ріба), що дозволяє ефективно обходити перешкоди та уникати зайвих маневрів у «тіньових зонах» складних ділянок.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи. Результати дослідження можуть бути використані для створення доступних та ефективних систем автономного обслуговування зелених зон, присадибних ділянок та паркових територій складної конфігурації. Запропонована система забезпечує зниження витрат часу і енергії акумулятора за рахунок оптимізації траєкторії руху, що сприяє підвищенню автономності та загального ресурсу роботи пристрою.

Публікації. Результати дослідження апробовано на XIII науково-технічній конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології», XIV міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», у вигляді тез конференцій [34, 35].

Структура роботи. До складу кваліфікаційної роботи магістра входить розрахунково-пояснювальна записка та графічний матеріал. Розрахунково-пояснювальна записка містить вступ, 4 розділи, загальні висновки, список використаної літератури і додатки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Огляд літератури по тематиці кваліфікаційної роботи

Автоматизація процесів обслуговування прибудинкових територій та зелених зон є одним із найбільш динамічних напрямків розвитку сучасної сервісної робототехніки. Роботизовані газонокосарки, як яскравий представник цього класу пристроїв, переходять із категорії нішевих продуктів у сегмент масового використання, що висуває підвищені вимоги до ефективності, надійності та інтелектуальності їхніх систем керування.

З точки зору теорії автоматичного керування та навігації мобільних роботів, функціонування газонокосарки зводиться до вирішення специфічної задачі повного покриття робочого простору (Complete Coverage Path Planning – CCPP). На відміну від класичних транспортних задач, де метою є переміщення між точками за оптимальним маршрутом, задача CCPP вимагає, щоб робочий орган механізму обробив усю доступну площу ділянки.

Критичною особливістю об'єкта дослідження є його функціонування в неструктурованому зовнішньому середовищі (outdoor environment). На відміну від складських або побутових роботів-пилососів, газонокосарка працює в умовах змінного природного освітлення, впливу погодних факторів (дощ, волога трава), наявності складного рельєфу та різноманітних статичних і динамічних перешкод. Ці фактори накладають суттєві обмеження на вибір сенсорного забезпечення та алгоритмів керування траєкторією.

Еволюція систем керування роботизованими газонокосарками рухається в напрямку переходу від найпростіших реактивних стратегій випадкового руху в межах дротового периметра до складних деліберативних систем, що використовують картографування та інтелектуальне планування шляху для забезпечення енергоефективної та швидкої роботи.

Метою цього розділу є проведення комплексного аналізу існуючих підходів до організації руху роботизованих газонокосарок для визначення найбільш перспективного напрямку вдосконалення їх систем керування. Для досягнення цієї мети в розділі послідовно розглядаються:

- кінематичні особливості та базові стратегії руху мобільних платформ даного типу;
- аналіз сенсорного забезпечення, необхідного для навігації та безпеки в умовах відкритого простору;
- критичний огляд сучасних алгоритмів планування траєкторії повного покриття, з фокусом на методах, здатних ефективно працювати в середовищах складної геометричної форми.

Сучасна самохідна техніка сьогодні працює з використанням автопілота. Точне виконання робіт дозволяє знизити витрати часу та переробку до 20%. При цьому економиться паливе, електроенергія, зменшується час доставки, оптимізується витрата добрив.

Усі відомі системи автоматичного пілотування передбачають встановлення курсовказівника, контролера та приймача сигналів глобального супутникового позиціонування [7]. Ці пристрої є актуальними при роботі на великих площах. Використання цих систем у малій самохідній техніці в умовах сільської місцевості або ділянках територій, закритих чагарниками або деревами є малоефективним.

Тому у всьому світі проводяться інтенсивні дослідження щодо створення технологій навігації роботів з використанням indoor технологій, які реалізуються за допомогою лазерного далекоміра, бездротових мереж, орієнтирів, а також відповідності картам місцевості та ін. На основі даних, отриманих від систем позиціонування, створюються підсистеми планування маршруту та підсистеми управління рухом об'єкта. Мобільні роботи – це інтелектуальні пристрої, здатні самостійно виконувати певні завдання в складних середовищах без втручання людини [1, 2]. Роботи-косарки, важлива галузь робототехніки, мають здатність автономно сприймати інформацію про зовнішнє середовище, приймати рішення та плани щодо свого положення та шляху, а також самостійно контролювати свої дії під

час роботи [5]. Як поширений тип сільськогосподарських роботів, роботи-косарки використовуються не лише для скошування газонів у муніципальних зелених зонах, аеропортах, на полях для гольфу та інших місцях, але й для скошування газонів на сільськогосподарських угіддях та в лісах, тому їм приділяється все більша увага.

Від звичайних моделей газонокосарок з ручним керуванням, робот-газонокосарка відрізняється, в першу чергу, своєю самостійністю. Сама назва «робот» передбачає, що пристрій здатний функціонувати автономно, без постійних команд. Роботизована газонокосарка самостійно може визначити час початку та тривалість робіт в залежності від.

Від власника «інтелектуальної газонокосарки» потрібно спочатку поставити робітник графік і визначити кордону оброблюваної ділянки [1]. Робота газонокосарки відбувається практично безшумно і непомітно. Власник газонокосарки, за бажання, у будь-який момент може зупинити або перенаправити газонокосарку. Деякі моделі можуть керуватися безпосередньо з базової станції, пультом керування або відкритими стандартами передачі даних (Bluetooth).

Останнім часом все більше виробників почали розробляти програми на смартфони для управління технікою, що досить зручно, та й керувати пристроєм можна на великій відстані від нього через мережу Internet.

1.2. Огляд сучасних систем позиціювання в мобільній робототехніці

Упродовж останніх п'яти років у наукових публікаціях спостерігається сталий інтерес до розвитку систем позиціювання для автономних мобільних роботів, зокрема наземних сервісних платформ, до яких належать роботи-газонокосарки. Основна увага дослідників зосереджена на підвищенні точності визначення координат, зменшенні затримок обробки сигналів, підвищенні завадостійкості та забезпеченні стабільної роботи в умовах часткового або повного екранування супутникових сигналів [3, 4].

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) залишаються базовим засобом позиціювання на відкритих просторах. Типові споживчі GNSS-приймачі

забезпечують середню похибку 1,5–3 м, що є недостатнім для задач точного слідування траєкторії та обробки країв газону [5]. У роботах 2021–2024 років показано, що використання RTK-GNSS дозволяє знизити похибку до 1–3 см за умови наявності базової станції та стабільного радіоканалу корекції [6]. Водночас критичним недоліком RTK є висока вартість обладнання, залежність від якості прийому супутникових сигналів та значне падіння точності поблизу будівель, дерев і металевих конструкцій, що є типовими умовами експлуатації роботів-газонокосарок [7].

Найпростіший спосіб позиціонування в WiFi мережах, подібно стільниковим, - по базовій станції, до якої підключений абонент. Спосіб використовується для надання різних видів послуг, залежно від типу підключеного пристрою і його місцезнаходження. Радіус дії WiFi точок доступу зазвичай становить від 30 до 200 метрів, ніж визначається точність позиціонування, яка, на жаль, не висока. В ідеальних умовах вона складає в 3-5 метрів, в реальних - 10-15 метрів. Як і в стільникових мережах, у мережах Wi-Fi ідентифікація об'єкта можлива, але зазвичай таке завдання не ставиться.

Альтернативний підхід пов'язаний із застосуванням інерціальних навігаційних систем (IMU), які забезпечують високу частоту оновлення даних (100–1000 Гц) і добру короткочасну точність. Однак накопичення похибки інтегрування призводить до дрейфу координат, який упродовж кількох хвилин може досягати десятків сантиметрів без зовнішньої корекції [8]. Тому сучасні дослідження розглядають IMU виключно як допоміжний елемент у складі гібридних систем.

Технологія вимірювання відстані у ближньому електромагнітному полі (NFER) використовує мітки-передавачі та один або кілька приймачів. Точність позиціонування реальних умовах становить від 1 м до 30 м. Радіохвилі огинають перешкоди, не відбиваються. Тому NFER технологія має переваги у приміщеннях з великою кількістю перешкод.

Значний розвиток у 2020–2024 роках отримали візуальні та LiDAR-SLAM системи. Вони забезпечують точність локалізації на рівні 2–5 см у добре структурованих середовищах і не потребують зовнішньої інфраструктури [9]. Проте

їх застосування в роботах-газонокосарках обмежується високою обчислювальною складністю, чутливістю до змін освітлення, погодних умов та сезонних змін ландшафту, що істотно знижує відтворюваність результатів [10].

Специфіка робіт-газонокосарок полягає в необхідності стабільного позиціонування на обмеженій території з типовими розмірами від кількох сотень до кількох тисяч квадратних метрів. У таких умовах дедалі більшої популярності набувають локальні системи позиціонування, зокрема ультразвукові, радіочастотні та UWB-рішення [11].

Ультразвукові системи, що працюють у діапазоні 40–60 кГц, забезпечують точність 2–5 см на відстанях до 10–15 м, однак суттєво залежать від температури повітря, вологості та наявності перешкод [12]. Радіочастотні RSSI-системи мають низьку вартість, але характеризуються похибкою 0,5–2 м, що є неприйнятним для задач точного покриття площі газону [13].

Порівняльний аналіз показує, що супутникові системи, навіть у варіанті RTK, хоча й забезпечують найвищу глобальну точність, є надмірно складними та чутливими до умов експлуатації, характерних для приватних і комунальних газонів. Візуальні та LiDAR-SLAM системи демонструють високу локальну точність, однак їх практичне застосування обмежується значними вимогами до обчислювальних ресурсів і нестабільністю роботи в реальних погодних умовах (табл.1.1).

Найбільш перспективним напрямом, згідно з публікаціями 2021–2025 років, є використання ультраширококутєвих (UWB) систем позиціонування, зокрема комерційних рішень типу Marvelmind [15]. Ці системи демонструють високу точність, малу затримку та стійкість до багатопроменевого поширення сигналів, що є критично важливим для роботи поблизу будівель і зелених насаджень.

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз систем позиціонування для роботів-газонокосарок

Система навігації	Типова точність позиціонування	Частота оновлення	Зона дії	Стійкість до перешкод і екранування	Обчислювальна складність	Інфраструктурні вимоги	Придатність для роботів-газонокосарок
GNSS (стандартний GPS)	1,5–3 м	1–10 Гц	Глобальна	Низька, значне погіршення під деревами та біля будівель	Низька	Відсутні	Обмежена, недостатня точність
RTK-GNSS	1–3 см	5–20 Гц	До кількох км від базової станції	Середня, чутлива до мультипутів і втрати сигналу	Середня	Базова станція, радіоканал корекції	Висока точність, але висока вартість і складність
IMU (інерціальна навігація)	<1 см (короткочасно), дрейф до десятків см	100–1000 Гц	Локальна	Висока, не залежить від зовнішніх умов	Низька	Відсутні	Лише як допоміжна система
Visual SLAM	2–5 см	10–30 Гц	Локальна	Низька при змінному освітленні та погоді	Висока	Камери, потужний процесор	Обмежена через нестабільність
LiDAR SLAM	2–3 см	5–20 Гц	Локальна	Середня, знижується в дощ/туман	Дуже висока	LiDAR, обчислювальна платформа	Технічно ефективна, але дорога
Ультразвукові LPS	2–5 см	5–20 Гц	До 10–15 м	Середня, залежить від температури та вітру	Низька	Маяки	Обмежена зона покриття
RSSI (RF-маяки)	0,5–2 м	1–10 Гц	До 30–50 м	Низька, сильний вплив завад	Низька	RF-маячки	Недостатня точність
Marvelmind (UWB/ультразвук)	1–2 см	до 16 Гц	до 30–50 м між маяками	Висока, стійка до мультипутів	Низька–середня	Мережа маяків	Висока, оптимальне співвідношення параметрів

1.2.1. Технологія Marvelmind та її переваги для роботів-газонокосарок

Система Marvelmind є локальною ультразвуково-радіочастотною гібридною системою позиціювання, яка забезпечує визначення координат мобільного об'єкта відносно мережі стаціонарних маяків. Згідно з експериментальними дослідженнями, опублікованими після 2020 року, середня похибка позиціювання становить 1–2 см у горизонтальній площині при частоті оновлення до 16 Гц [16].

Ключовою технічною перевагою Marvelmind є її незалежність від супутникових сигналів і зовнішніх мереж зв'язку. Система стабільно працює в умовах щільної забудови, під кронами дерев і в умовах складного рельєфу. Дальність між маяками може досягати 30–50 м у відкритому просторі, що є достатнім для більшості приватних і комунальних газонів [15].

На відміну від LiDAR- і візуальних систем, Marvelmind не потребує високопродуктивних обчислювальних ресурсів, оскільки обробка сигналів виконується апаратно. Це дозволяє реалізувати систему на мікроконтролерах середнього класу та зменшити енергоспоживання мобільної платформи, що є критичним параметром для автономних газонокосарок [16].

З позиції інженерної інтеграції Marvelmind забезпечує просте поєднання з IMU та одометрією, що дозволяє реалізувати фільтрацію Калмана або комплементарні фільтри для згладжування траєкторії руху. У публікаціях 2023–2024 років показано, що така гібридна схема дозволяє досягти стабільної навігації з відхиленням не більше 3 см навіть за наявності короткочасних втрат сигналу від окремих маяків [17].

Таким чином, аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що система Marvelmind є технічно обґрунтованим вибором для реалізації високоточного локального позиціювання в роботах-газонокосарках, поєднуючи високу точність, надійність і відносно низьку вартість впровадження.

1.3. Аналіз алгоритмів планування траєкторії руху роботизованої газонокосарки

Ефективність функціонування автономної мобільної платформи, призначеної для обслуговування зелених зон, визначається не лише її електромагнітною та механічною надійністю, але й, першочергово, інтелектуальною складовою системи керування. Ключовою задачею цієї системи є планування траєкторії руху.

З рис. 1.1 видно, що у відповідь на сучасний попит на максимальну ефективність скошування та особливі складні екологічні характеристики, з якими стикаються роботизовані косарки, окрім конструктивних досліджень усієї машини, основними дослідницькими пунктами технології планування шляху для роботів-косарок є: планування шляху повного покриття, технологія контролю відстеження та планування шляху уникнення перешкод.

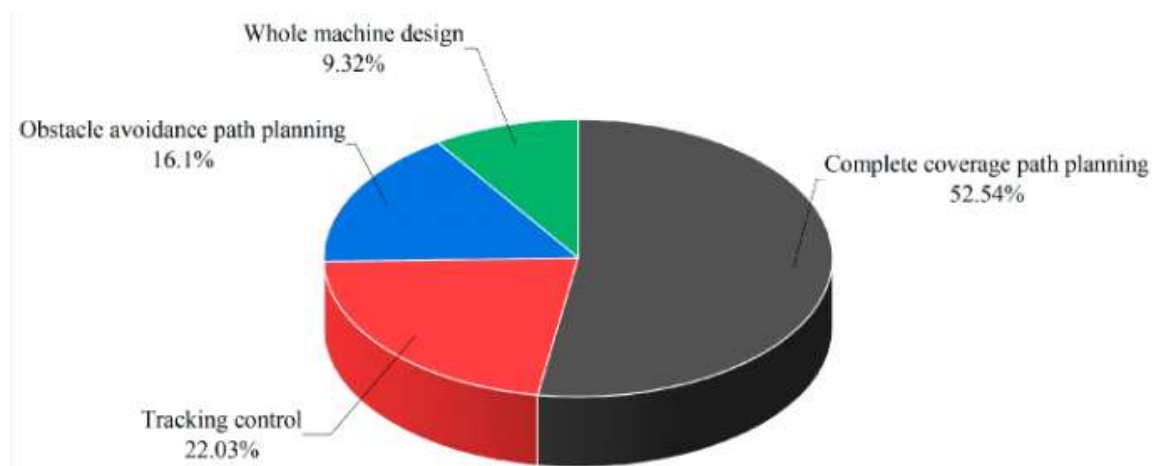


Рис. 1.1. Основні методи планування шляху та керування відстеженням для роботів-косарок

У контексті роботизованих газонокосарок ця задача формулюється як задача повного покриття робочого простору (Complete Coverage Path Planning – CCPP).

На відміну від класичної задачі навігації з точки А в точку Б, де критерієм оптимізації є найкоротший шлях або мінімальний час, CCPP вимагає, щоб робочий інструмент (дека косарки) пройшов через кожну точку вільного простору заданої області. При цьому критично важливими критеріями якості алгоритму стають:

- повнота покриття. Гарантія обробки всієї доступної площі без пропусків;
- мінімізація перекриттів. Зменшення повторних проходів вже оброблених ділянок для економії енергоресурсів та часу;
- кінематична сумісність Траєкторія має враховувати неголономні обмеження мобільної платформи (більшість косарок мають диференційний привод і не можуть миттєво змінювати вектор швидкості перпендикулярно до напрямку руху);
- обчислювальна ефективність. Здатність бортового контролера розраховувати або коригувати шлях у прийнятний час.

У сучасній науковій літературі методи вирішення ССРР традиційно класифікують за ступенем використання апіорної інформації про середовище на дві фундаментальні групи: реактивні (сенсомоторні, безкартні) та деліберативні (засновані на моделі або карті середовища).

1.3.1. Реактивні стратегії керування

Історично першими та найбільш простими в реалізації є реактивні методи. Вони не вимагають побудови глобальної карти середовища і базуються на миттєвій реакції системи керування на поточні показання датчиків (наприклад, бампера зіткнення, індуктивного датчика дроту периметра або ультразвукових сонарів).

Типовим представником цього класу є алгоритм випадкового блукання (Random Walk). У своїй базовій формі, описаній у багатьох фундаментальних працях з робототехніки, зокрема в огляді [19], робот рухається прямолінійно до моменту детектування перешкоди або межі робочої зони. Після цього він виконує поворот на випадковий кут і продовжує рух. Перевагами такого підходу є надзвичайна простота реалізації, низькі вимоги до обчислювальної потужності та відсутність необхідності в складних системах локалізації. Це зумовило широке застосування рандомізованих алгоритмів у комерційних моделях першого та другого поколінь.

Однак, критичний аналіз показує їхню фундаментальну неефективність для задач косіння. Як зазначають автори дослідження [20], що проводили симуляційне моделювання роботи таких алгоритмів на ділянках складної форми, траєкторія роботи є високоюмовірнісною, але не детермінованою. Для досягнення прийнятного рівня

покриття (наприклад, 95%), робот змушений витратити значно більше часу, ніж при систематичному русі. Час, необхідний для покриття, зростає експоненціально щодо площі ділянки. Більше того, на ділянках із вузькими коридорами або складною конфігурацією перешкод виникає проблема «пасток», де робот може блукати тривалий час, залишаючи великі зони нескошеними. Це призводить до нерівномірного зносу газону, перевитрати енергії батареї та загальної незадоволеності користувача результатом.

Спроби покращити реактивні методи призвели до появи детермінованих локальних патернів, таких як рух по спіралі (Archimedean spiral) від центру вільної зони до периферії, або алгоритмів слідування вздовж межі (boundary following). Проте, як показано в роботі [21], ці методи ефективні лише на локальних ділянках і не вирішують проблему глобального планування в складному середовищі. Після завершення спіралі робот знову змушений переходити до випадкового пошуку нової нескошеної зони.

1.3.2. Методи, засновані на карті середовища

Сучасні вимоги до енергоефективності та якості роботи вимагають переходу до деліберативних методів, які використовують карту середовища. Карта може бути завантажена апіорі (наприклад, на основі супутникових знімків або попереднього об'їзду периметра оператором) або будуватися в реальному часі за допомогою технологій SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Наявність карти дозволяє застосовувати алгоритми, що гарантують повне покриття. Ці методи поділяються на два основні підкласи: сіткові (grid-based) та методи клітинної декомпозиції (cellular decomposition).

Сіткові методи (Approximate Cellular Decomposition). Цей підхід передбачає дискретизацію робочого простору накладанням на нього регулярної сітки (зазвичай квадратної форми). Кожна комірка сітки позначається як «вільна», «зайнята перешкодою» або «оброблена». Розмір комірки зазвичай співмірний із шириною захвату робочого інструменту робота.

Планування траєкторії зводиться до пошуку шляху, що проходить через усі «вільні» комірки. Популярними алгоритмами тут є методи на основі хвильового фронту (wavefront algorithm) або покриття на основі зв'язного дерева (spanning tree coverage). В роботі [22] детально проаналізовано застосування сіткових методів для сервісних роботів. Автори підкреслюють головну перевагу підходу – простоту представлення перешкод довільної форми та гарантію покриття (якщо розмір комірки обрано коректно).

Однак критичний аналіз виявляє суттєві недоліки сіткових методів для застосування в газонокосарках.

Першою є проблема масштабування та роздільної здатності. Точність представлення середовища залежить від розміру комірки. Зменшення розміру комірки для кращого огинання складних перешкод призводить до квадратичного зростання вимог до пам'яті та обчислювальних ресурсів. Для великих присадибних ділянок це може стати критичним обмеженням для вбудованих систем.

Сіткові методи часто генерують траєкторії з великою кількістю поворотів на 90 градусів, навіть на відкритих прямих ділянках, оскільки рух прив'язаний до центрів комірок. Як зазначено у дослідженні [23], кожен поворот для диференційно керованого робота – це зупинка або суттєве уповільнення коліс, що збільшує час виконання завдання та енергоспоживання порівняно з рухом по довгих прямих лініях.

Комірки на межі перешкод часто бувають заповнені лише частково. Якщо вважати таку комірку зайнятою, залишається нескошена ділянка. Якщо вільною – робот ризикує зіткнутися з перешкодою.

Наступний це метод точної клітинної декомпозиції (Exact Cellular Decomposition). Цей підхід є найбільш перспективним для складних ландшафтів, оскільки він працює не з апроксимованою сіткою, а з точним геометричним представленням меж робочої зони (зазвичай у вигляді полігонів). Ідея полягає у розділенні (декомпозиції) складного вільного простору на набір простіших, опуклих регіонів (клітинок), усередині яких покриття можна здійснити простими стандартними патернами, наприклад, рухом «змійкою» (zigzag) або «спіраллю».

Фундаментальним методом у цьому класі є трапецієвидна декомпозиція, яка згодом еволюціонувала у більш ефективний метод бустрофедонної клітинної декомпозиції (Boustrophedon Cellular Decomposition – BCD). Термін «бустрофедон» описує спосіб руху, аналогічний руху плуга на полі: довгі прямі проходи з розворотами на 180 градусів на кінцях.

В основі методу BCD, детально описаного в класичній роботі Choset та Pignon [24], лежить концепція «підмітаючої лінії» (sweep-line). Уявна лінія рухається через карту середовища. У моменти, коли ця лінія перетинає "критичні точки" перешкод (локальні мінімуми або максимуми полігональних перешкод, де змінюється зв'язність вільного простору), відбувається формування меж нових клітинок.

Критичний аналіз, проведений у [25], висвітлює ключові переваги BCD перед сітковими методами саме для задачі косіння газонів:

- BCD природним чином генерує довгі прямі відрізки шляху, мінімізуючи кількість поворотів. Це ідеально відповідає кінематиці косарок і є найбільш енергоощадним режимом роботи.

- Метод працює з точною геометрією меж, що дозволяє якісно обробляти краї газону без проблем дискретизації, властивих сіткам.

- Розмір та форма клітинок декомпозиції адаптуються до локальної геометрії середовища, а не є фіксованими квадратами.

Однак класичний BCD не позбавлений проблем, які є предметом актуальних наукових досліджень. Головною проблемою є визначення оптимальної послідовності обходу отриманих клітинок.

Після декомпозиції задача зводиться до пошуку шляху на графі суміжності клітинок (часто використовується граф Ріба). Необхідно знайти такий порядок відвідування комірок, який мінімізує холості пробіги (рух без косіння) між ними. Ця задача є NP-повною і близькою до задачі комівояжера (TSP). Другим недоліком є чутливість класичного BCD до динамічних змін середовища – поява нової перешкоди вимагає локального або глобального перепланування декомпозиції.

1.3.3. Інші підходи (біоінспіровані та ШІ)

Окремо варто згадати методи обчислювального інтелекту, такі як нейронні мережі, генетичні алгоритми або мурашині алгоритми. Наприклад, у [26] пропонується використання нейронної мережі Хопфілда для динамічного планування шляху. Кожна нейронна одиниця відповідає ділянці простору, а її активність – необхідності відвідування.

Хоча такі методи демонструють високу адаптивність до невідомих середовищ і здатність уникати динамічних перешкод, вони мають суттєві недоліки для комерційного застосування: відсутність математичної гарантії 100% покриття, складність налаштування параметрів та висока ймовірність потрапляння в локальні мінімуми (робот може «зациклитися» в певній зоні). На даному етапі розвитку вони частіше використовуються як допоміжні евристичні, а не як основний алгоритм планування.

1.4. Висновки до розділу 1.

У першому розділі проведено комплексний аналіз стану проблеми керування траєкторією руху роботизованих газонокосарок. За результатами виконаного огляду можна зробити наступні висновки, що визначають напрямки подальшої роботи:

Керування рухом роботизованої газонокосарки відноситься до класу задач повного покриття робочого простору (Complete Coverage Path Planning – CCPP). Ключовими критеріями ефективності вирішення цієї задачі є гарантія обробки 100% площі ділянки, мінімізація сумарної довжини шляху (енерговитрат) та часу виконання операції, а також врахування кінематичних обмежень мобільної платформи.

Встановлено, що реактивні стратегії керування, засновані на випадковому русі (хаотичне блукання), які досі широко застосовуються в бюджетних моделях, є неефективними для сучасних вимог. Вони характеризуються експоненціальним зростанням часу роботи відносно площі ділянки, значним перекриттям вже

оброблених зон та нерівномірністю скошування. Їх застосування виправдане лише на малих ділянках простої форми.

Прості детерміновані алгоритми руху, такі як спіральне покриття або паралельний рух («зигзаг») без попередньої обробки карти, ефективні виключно на відкритих ділянках опуклої форми. У реальних умовах присадибних ділянок (наявність перешкод, складна геометрія меж) ці методи залишають значні необроблені «тіньові зони» або вимагають складних маневрів для їх покриття, що знижує загальну продуктивність.

На основі порівняльного аналізу методів планування шляху визначено, що найбільш перспективним підходом для складних середовищ є методи точної клітинної декомпозиції, зокрема, бустрофедонна клітинна декомпозиція (BCD). Цей метод дозволяє розділити складний робочий простір на набір простих підобластей, кожна з яких може бути ефективно покрита паралельними проходами. Такий підхід ідеально узгоджується з кінематикою роботів із диференційним приводом та забезпечує енергоефективний режим руху на довгих прямих ділянках.

Аналіз класичного методу BCD виявив його суттєвий недолік: після декомпозиції простору залишається невирішеною задача визначення оптимальної послідовності обходу отриманих клітинок. Неоптимальний порядок призводить до значних холостих пробігів (руху з вимкненим робочим органом між клітинками), що суттєво збільшує загальний час роботи та енергоспоживання.

Таким чином, актуальною задачею кваліфікаційної роботи є вдосконалення системи керування траєкторією руху роботизованої газонокосарки на базі методу бустрофедонної клітинної декомпозиції шляхом розробки алгоритму оптимізації послідовності обходу клітинок для мінімізації холостих ходів.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Способи руху і поворотів роботизованих газонокосарок

Алгоритм руху описує, як і по якому шляху повинна рухатися газонокосарка, щоб повністю обробити ділянку безпечним та ефективним у частині витрат енергії та часу способом.

Колісні газонокосарки більшу частину часу перебувають у криволінійному русі, причому траєкторія безперервно змінюється. Маневреність руху обумовлена необхідністю здійснювати повороти в відповідно з задається траєкторією, а також відхиленням газонокосарки від неї внаслідок дії зовнішніх сил.

При русі на прямолінійних ділянках межі зміни радіуса кривизни траєкторії невеликі, ε визначає інтервал, протягом якого можна вважати, що косарка рухається по прямій (рис.2.1), тому такий рух розглядається умовно як прямолінійний, що дозволяє розглядати експлуатаційні властивості окремо як при прямолінійному, так і криволінійному русах.

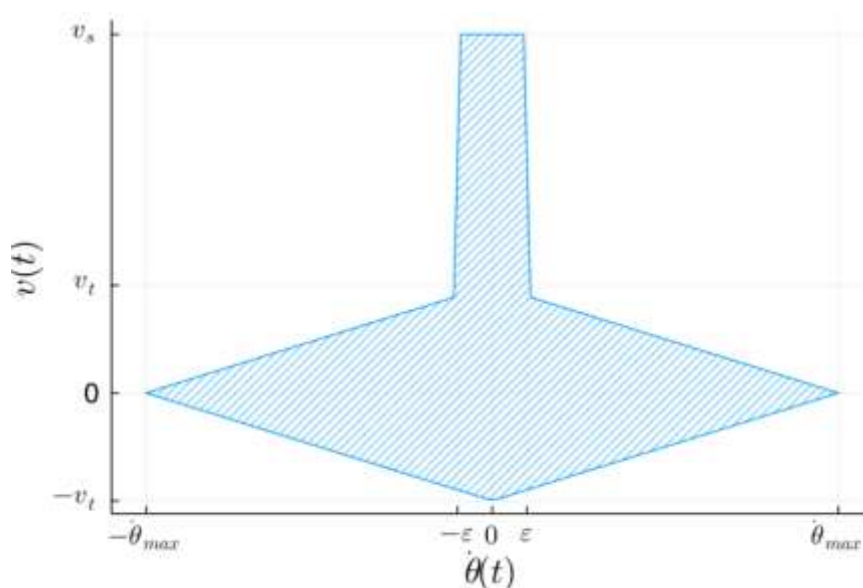


Рис. 2.1. Графік, що показує допустиму область при якій вважається рух по прямій

Керованість колісних машин - здатність зберігати заданий напрямок руху, а при необхідності - змінювати його необхідною траєкторією. Відповідно, здатність зберігати необхідний напрямок руху називається стійкістю руху, а здатність змінювати напрямок за необхідною траєкторією – поворотністю.

Газонокосарки переміщуються з певною циклічністю. Чергування робочих ходів, поворотів і заїздів, що циклічно повторюється, називається способом руху газонокосарки.

Серед різноманітних способів руху газонокосарок виділяють три групи основних:

- гонові (газонокосарка рухається вздовж однієї з сторін ділянки);
- діагональні (рух здійснюється під гострим або тупим кутом до сторін ділянки);
- кругові (газонокосарки при роботі копіюють контури ділянки).

При русі по газоні косарка виконує корисну роботу або повертає. Рух при взаємодії робочих органів машини чи знаряддя із травою є робочим ходом газонокосарки. Траєкторія руху газонокосарки на ділянці складається з прямолінійних робочих ходів та різних поворотів.

Рух газонокосарки на повороті, при виїзді з борозни, коли робочі органи машини або знаряддя не взаємодіють з ґрунтом, називається холостим ходом. Якщо неодружені ходи не можна здійснити поза оброблюваного поля, потрібно обов'язково виділити поворотні смуги з однієї або з двох сторін. Ширина поворотної смуги залежить від радіусу повороту газонокосарки що наочно демонструє графік на рис. 2.2.

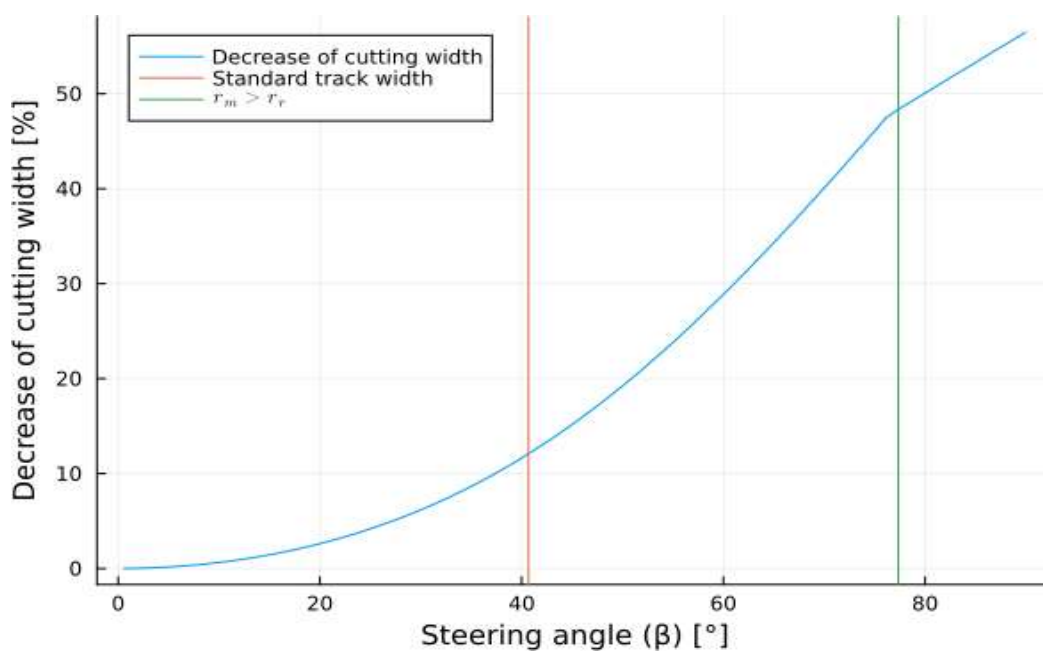


Рис. 2.2. Графік, що показує зменшення ширини захоплення як функцію кута повороту β , де кут повороту базується на точці в центрі середнього диска

Також існують різні варіанти поворотів, на рис. 2.3. наведені деякі з них.

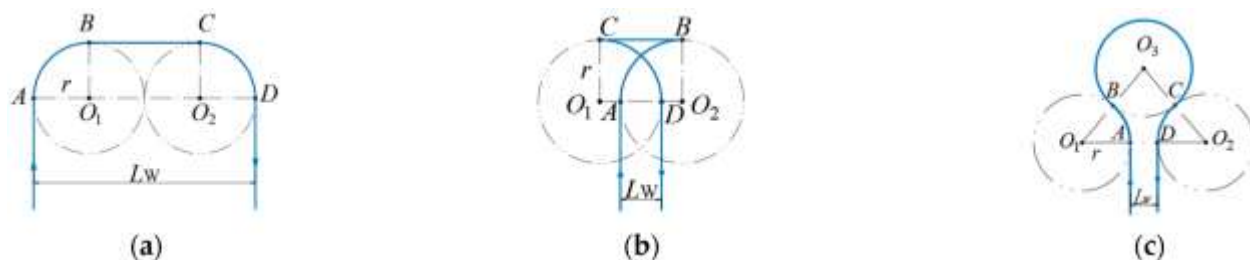


Рис 2.3. Режим повороту косарок-роботів на краю ділянки:

а) U-подібний; б) Т-подібний; с) Ω -подібний

В ідеальному варіанті ширина поворотної смуги має бути кратною ширині захоплення лез газонокосарки, таким чином її можна буде обробити цілим числом проходів. Ширина поворотної смуги має бути мінімальною, що забезпечує поворот газонокосарки для наступного заїзду. Найбільша ширина поворотної смуги виходить при Ω -подібному повороті, найменша - при U-подібному.

2.1.1. Види руху роботизованої газонокосарки

Хаотичний (рандомізований) рух. При хаотичному виді руху косарка рухається безладно, базуючись на найпростіших реактивних алгоритмах: рух по прямій до зіткнення з перешкодою або межею (віртуальним парканом), після чого відбувається поворот на випадковий кут (рис. 2.4). Схема руху не повторюється ніколи.

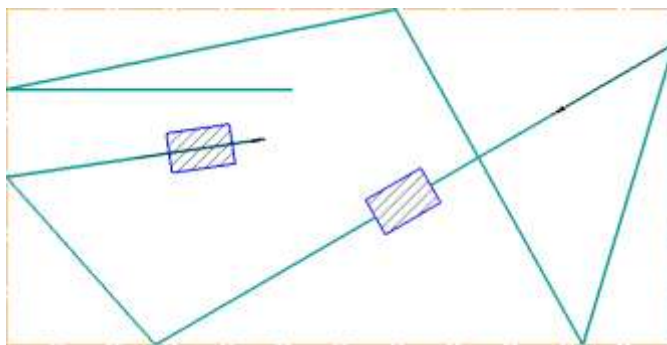


Рис. 2.4. Хаотичний рух косарки

Така система руху теоретично означає, що при нескінченному часі роботи газон буде підстрижено рівномірно, не залишаючи виражених слідів (колій) від руху косарки, що позитивно впливає на естетичний вигляд газону. Проте, як зазначається у дослідженні [8], головним недоліком цього способу є вкрай нераціональне використання енергії та низька продуктивність. Згідно з порівняльним аналізом, проведеним у роботі [27], для досягнення 95% покриття ділянки рандомізованим алгоритмом потрібно в 3–5 разів більше часу та енергоресурсів порівняно з систематичними методами. Це зумовлено багаторазовим перекриттям вже оброблених зон. Такий підхід є прийнятним лише для найпростіших бюджетних моделей, що працюють на невеликих, простих за формою ділянках.

Круговий (спіральний) рух. При круговому способі руху газонокосарка може набагато швидше скосити траву на локальній ділянці, ніж при інших видах руху. При такому русі робочий орган задіяний весь час руху газонокосарки, а кількість холостих ходів зводиться до мінімуму, що робить скошування трави максимально ефективним. Газонокосарка здійснює рух паралельно сторонам загону (або межах вільного простору), безперервно в одному напрямку по спіралі від периферії до центру або від центру до периферії.

Траєкторія руху МТА від периферії до центру (рис. 2.5) являє собою спіраль, що згортається, а при русі від центру до периферії (рис. 2.6) – спіраль, що розгортається, що починається від центрального майданчика.

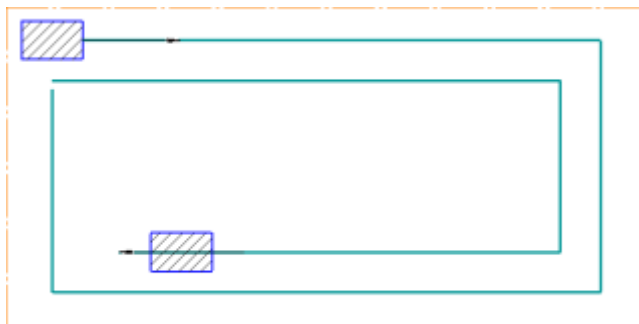


Рис. 2.5. Круговий рух від периферії до центру

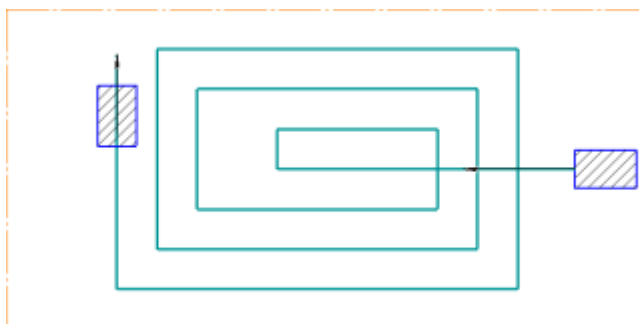


Рис. 2.6. Круговий рух від центру до периферії

Робота МТА по круговому способу руху вигідна на відкритих прямокутних загонах зі співвідношенням сторін не менше 4:1. Однак, як вказують автори в [28], спіральні патерни є ефективними лише для локального покриття простих опуклих областей. При досягненні межі складної форми або зіткненні з острівною перешкодою, регулярність спіралі порушується, і робот змушений переходити до іншого режиму (наприклад, хаотичного пошуку нової зони або слідування вздовж межі), що нівелює переваги методу.

Гоновий (паралельний) спосіб. Гоновий спосіб (відомий у робототехніці як "зигзаг" або "seed spreader pattern") – це коли газонокосарка здійснює прямолінійні робочі ходи вздовж загону або під кутом до поздовжньої лінії загону з холостими поворотами та заїздами у поперечних країв загонів. На кінці ділянки газонокосарка здійснює поворот на 180 градусів. На прямокутних ділянках з гоновим способом руху

найбільший ефект досягається при напрямі робочих ходів (гонів) газонокосарки по довгій стороні загону, що зменшує загальне число поворотів (рис. 2.7).

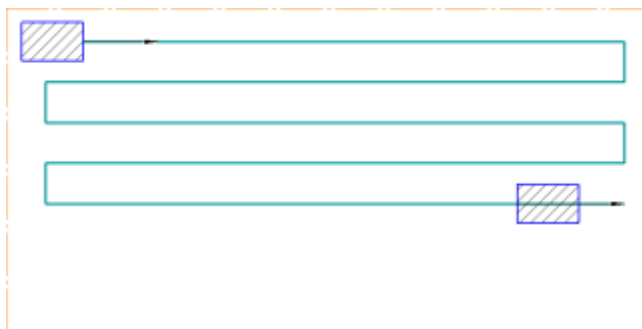


Рис. 2.7. Гоновий спосіб руху

Цей спосіб найбільш ефективний для високоманеврених газонокосарок. При гоновому способі (паралельними смугами) руху на кінцях ділянки необхідно залишати поворотні смуги для холостих проходів газонокосарки (якщо немає вільного виїзду за межі ділянки). Для полегшення обробки поворотної смуги її ширина повинна бути кратна ширині захоплення газонокосарки, щоб не робити робочих ходів із неповним захопленням або додаткових холостих ходів.

Цей вид руху поширений більше за інших з огляду на його простоту реалізації та енергоефективність на прямих ділянках. Дослідження кінематики мобільних роботів [29] підтверджують, що рух довгими прямими лініями є найбільш економічним режимом для платформ з диференційним приводом.

2.1.2. Проблема складних середовищ та перешкод

Вищеописані стандартні методи мають критичний недолік при роботі в реальних умовах. Якщо ділянка не прямокутної форми (є неопуклою), то за такого виду руху залишаться необроблені області, так звані "тіньові зони" або "пастки" (рис. 2.8).

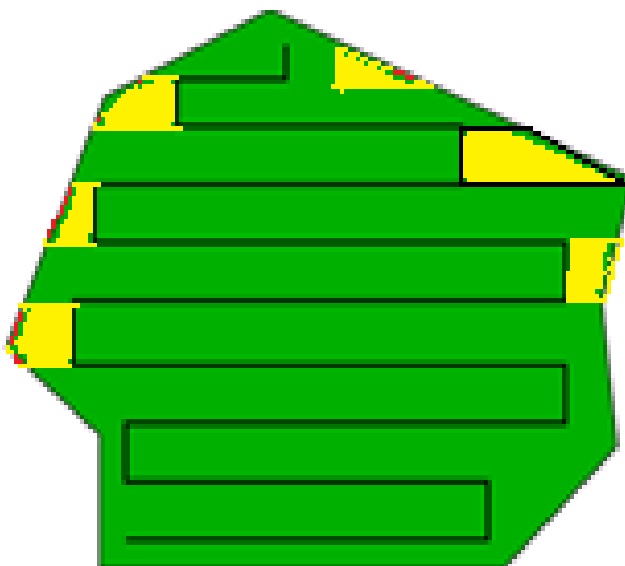


Рис. 2.8. Необроблені області при способі руху паралельними смугами

Якщо ділянка має неправильну форму, то зони та поворотні смуги розмічають у вигляді прямокутника або трапеції, щоб неправильна форма відбивалася лише на довжині гону. В робототехніці це призводить до необхідності застосування більш складних алгоритмів.

Всі розглянуті вище базові види руху не враховують зміну глобальної стратегії траєкторії внаслідок появи перешкоди, вони реагують на неї лише локально. Для вирішення проблеми повного покриття складних зон необхідно застосовувати підхід декомпозиції простору. Можна розкласти зону обробки на області без перешкод (прості опуклі багатокутники) та обробляти їх, використовуючи стандартні види руху, наприклад, зигзаг (рис. 2.9).

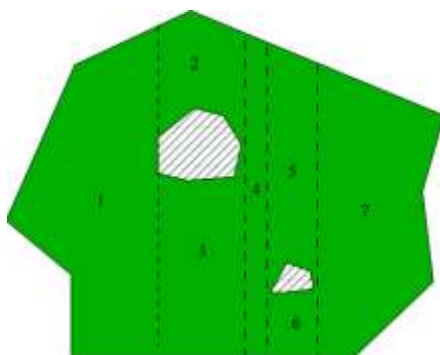


Рис. 2.9. Поділ області обробки на 7 підобластей через 2- і перешкоди

Суттєвим недоліком цього способу декомпозиції є те, що отримані підобласті можуть бути надто малими або вузькими для ефективного маневрування газонокосарки. Тобто відбувається часткове захоплення інших підобластей при розворотах, а також витрачається значний час та енергія на холості переїзди газонкосарки з однієї області на іншу в неоптимальній послідовності [30].

У деяких існуючих газонокосарках реалізований гібридний алгоритм руху. Косарка рухається круговим видом руху від периферії до центру, а при появі перешкод алгоритм дозволяє змінити траєкторію свого руху (наприклад, на випадкову). Однак такий підхід не гарантує повного покриття.

2.1.3. Вплив кінематики на вибір алгоритму руху

Достатньо вагомим компонентом будь-якого способу руху є кінематичні обмеження мобільної платформи, зокрема радіус повороту газонокосарки. Адже чим менший радіус повороту, тим менше часу та енергії витрачається на здійснення розвороту наприкінці гону. Особливо це критично для алгоритмів типу "зигзаг", де кількість поворотів велика.

Якщо газонокосарка має диференційний привід і при повороті вправо (ліворуч) може повертати двома способами:

- обертанням одного ведучого колеса, при цьому друге колесо заблоковане;
- обертанням ведучих коліс в різні сторони (розворот на місці з нульовим радіусом). У цьому випадку радіус повороту скорочується на 15% (фактично до нуля відносно центру осі), а також швидкість розвороту газонокосарки вища.

Здатність розвертатися на місці робить використання стратегії паралельних проходів (зигзаг) особливо привабливою, оскільки мінімізує площу поворотних смуг.

Проведений аналіз показує, що ні хаотичні, ні прості детерміновані (спіраль, простий зигзаг) методи не забезпечують гарантованого та енергоефективного повного покриття ділянок складної (неопуклої) форми з перешкодами. Простий зигзаг залишає нескошені зони (рис. 2.8), а наївна декомпозиція (рис. 2.9) призводить до неефективних переходів.

Виникає необхідність у методі, який би поєднував ефективність прямолінійних проходів (властиву гоновому способу) або круговий рух зі здатністю адаптуватися до складної геометрії середовища шляхом його розумної декомпозиції. Найбільш перспективним вирішенням цієї проблеми в сучасній робототехніці є метод бустрофедонної клітинної декомпозиції (Boustrophedon Cellular Decomposition – BCD). Цей метод дозволяє автоматично розділити складний простір на набір простих зон, кожна з яких може бути ефективно покрита патерном "зигзаг", або круговий рух, що ідеально відповідає кінематиці диференційного приводу та вимогам енергозбереження. Детальний аналіз BCD буде проведено у наступних підрозділах.

2.2. Алгоритм бустрофедонного поділу площини

BCD, є алгоритмом точного поділу площини, що генерує монотонні багатокутні комірки, які можуть бути покриті паралельними зворотними та прямими проходами. BCD можна пояснити, візуалізуючи карту з перешкодами в площині x - y разом з лінією розрізу, яка є прямою лінією, паралельною осі y і розміщеною ліворуч від багатокутника.

На початку алгоритму лінія поділу починає рухатися в додатньому напрямку x і будує комірки, слідуючи набору заздалегідь визначених подій. Коли лінія поділу зустрічає вершину події, вона або відкриває нові комірки, або закриває комірки. Ілюстрацію руху лінії розрізу разом із зустрічними подіями можна побачити на рис. 2.10. Зверніть увагу, що права відкрита подія діє тільки на верхню вершину, яка збігається з лінією розрізу

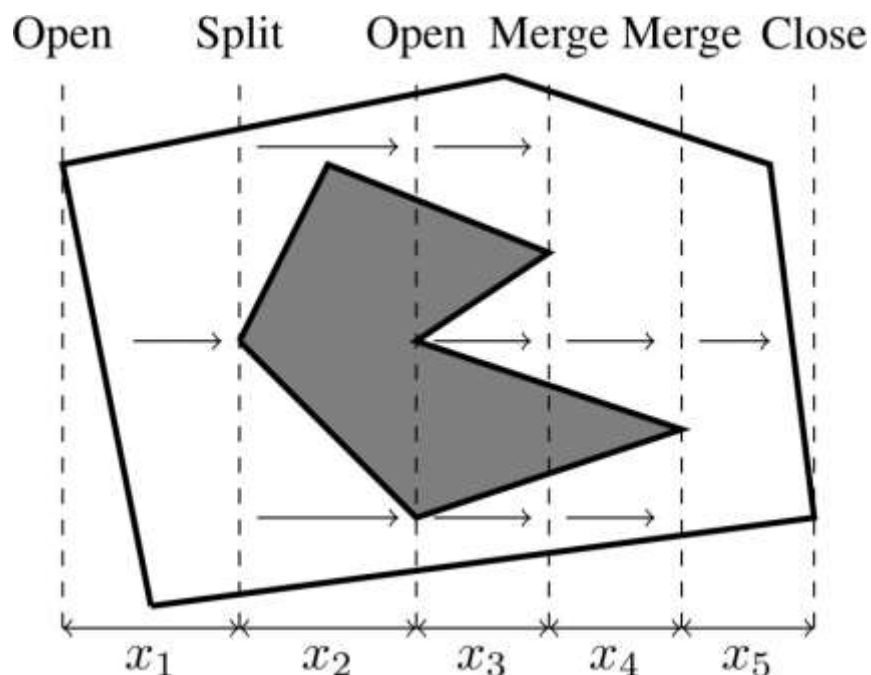


Рис. 2.10. Рисунок, що показує події для бустрофедонного розбиття комірок.

Події розташовані на вершинах багатокутників, що визначають PWH (polygon with holes). Вершини подій визначаються шляхом оцінки кутів багатокутників, кут може бути лівим або правим, а також спрямованим всередину або назовні відносно внутрішньої частини багатокутника. Лівий кут - це кут, який визначається як кут, у якому значення x обох відрізків лінії більші за значення x вершини кута, тоді як праві кути матимуть менші значення x .

Ці чотири комбінації лівого або правого та внутрішнього або зовнішнього кутів відповідають кожній події. Якщо вершина не відповідає критеріям лівого або правого кута, вона не визначає подію.

Також можна використовувати рух по периметру багатокутника (за годинниковою стрілкою для зовнішнього багатокутника і проти годинникової стрілки для внутрішніх багатокутників) при локалізації подій шляхом ітерації по вершинах. Це дозволяє визначити алгоритм локалізації подій для внутрішнього або зовнішнього багатокутника і використовувати для обох без змін. У наступному розділі буде представлено локалізацію подій.

Щоб дізнатися, яка комбінація лівого або правого та внутрішнього або зовнішнього відповідає події, також необхідно знати, чи є це зовнішній або

внутрішній багатокутник PWH, оскільки вони мають різне значення, тобто вершина, спрямована вправо та назовні, визначає подію злиття для внутрішнього багатокутника, тоді як вона визначає подію закриття для зовнішнього багатокутника, як показано на рис. 2.10.

Як зазначалося раніше, PWH складається з декількох багатокутників, кожен з яких складається з декількох вершин $v_i \in P$, $i \in [1, N]$, де кожна вершина v_i відповідає вектору координат $[x_i, y_i]^T$. Використання v_i , x_i , y_i тут буде застосовуватися в широкому сенсі для спрощення опису.

Оскільки багатокутник є круговим ланцюгом вершин, зручно мати можливість легко посилатися на останню і першу вершини як на вершину перед першою і вершину після останньої відповідно. Таким чином, використовується індексація з оберненням, така що індекс 0 відповідає індексу N , а індекс $N + 1$ відповідає індексу 1, тобто v_{i-1} для $i = 1$ відповідає вершині перед v_1 , яка є останньою вершиною v_N .

Для ідентифікації подій ми знаходимо лівосторонні та правосторонні вершини подій, де

$$R = \langle r_1, \dots, r_i, \dots, r_N \rangle, \text{ де } r_i = (x_{i-1} < x_i) \wedge (x_{i+1} < x_i),$$

$$L = \langle l_1, \dots, l_i, \dots, l_N \rangle, \text{ де } l_i = (x_{i-1} < x_i) \wedge (x_{i+1} < x_i),$$

де R і L – списки булевих значень, що вказують, чи є вершина відповідно лівим або правим кутом.

Список подій задається як $E = \langle e_0, \dots, e_N \rangle$, де

$$e_i = \begin{cases} \text{open} & \text{if } l_i \wedge \det((v_i - v_{i-1}), (v_{i+1} - v_i)) < 0 \\ \text{close} & \text{if } r_i \wedge \det((v_i - v_{i-1}), (v_{i+1} - v_i)) < 0 \\ \text{merge} & \text{if } r_i \wedge \det((v_i - v_{i-1}), (v_{i+1} - v_i)) > 0, \\ \text{split} & \text{if } l_i \wedge \det((v_i - v_{i-1}), (v_{i+1} - v_i)) > 0 \\ \text{none} & \text{в інших випадках} \end{cases}, \quad (2.1)$$

де вираз детермінанта визначає гостру вершину, якщо він менше нуля, або тупу вершину, якщо він більше нуля.

Вищезазначені вирази можна порівняти з подіями внутрішнього багатокутника на рис. 2.10, де відкрита подія має ліву гостру вершину, а поділ має ліву опуклу вершину.

Як показано в статті про BCD [30], ребра кожного багатокутника в PWH можна розділити на нижні та верхні межі. Нижня межа – це багатосегментна лінія, яка знаходиться безпосередньо під робочою зоною (обмежує її знизу), тоді як верхня межа – це багатосегментна лінія, під якою знаходиться робоча зона (обмежує її зверху). Якщо багатокутник є опуклим, тобто містить лише дві події, він може мати лише одну верхню і одну нижню межу, тоді як неопуклий багатокутник може мати кілька нижніх і верхніх меж залежно від розташування рефлексивних (увігнутих) вершин.

Список подій можна використовувати для визначення верхніх і нижніх меж, оскільки кожна подія позначає перехід від верхньої до нижньої межі або від нижньої до верхньої. Щоб отримати нижні та верхні межі, контур багатокутника розрізається в кожній вершині-події, зберігаючи орієнтацію багатокутника таким чином, щоб точки на лінії йшли в тому ж порядку навколо багатокутника. Як і раніше, протилежна орієнтація внутрішніх та зовнішніх багатокутників спрощує реалізацію, оскільки для обох типів працюють однакові критерії.

З огляду на характер вершин-подій, усі багатосегментні лінії або строго зростають, або строго спадають у напрямку осі x . Для багатокутника-отвору (перешкоди) верхня межа – це багатосегментна лінія, на якій всі точки строго спадають у напрямку x , а нижня межа – це багатосегментна лінія, на якій всі точки строго зростають у напрямку x . При використанні верхніх і нижніх меж у декомпозиції комірок (клітин), верхня або нижня межа можуть бути повністю включені в одну комірку або частково включені в декілька, але одна комірка може складатися тільки з однієї (або частини однієї) верхньої межі та однієї (або частини однієї) нижньої межі.

Маючи списки подій, верхніх та нижніх меж для кожного багатокутника, можна розпочати формування комірок. Спершу всі події для кожного багатокутника об'єднуються в єдиний список, відсортований за зростанням координати x . Аналогічним чином верхні та нижні межі кожного багатокутника об'єднуються у свої відповідні списки. Якщо подія відкриття та подія закриття мають однакове значення x , пріоритет надається події закриття. Це робиться для того, щоб верхні та нижні межі, додані подією відкриття, не заважали процесу замикання комірок під час пошуку найближчої верхньої та нижньої межі.

Далі ініціалізуються два порожні списки, які будуть містити активні нижні та активні верхні межі. Активна нижня або верхня межа – це лінії, актуальні для поточного положення лінії розрізу (скануючої лінії), що рухається вздовж осі x . Поповнення активних списків відбувається через події відкриття, які додають ті нижні та верхні межі, що починаються на координаті x відповідної події.

Коли лінія розрізу зустрічає подію закриття, комірка замикається. Спочатку знаходяться та видаляються з активних списків найближча верхня межа над вершиною та найближча нижня межа під вершиною. Видалені лінії верхньої та нижньої меж потім розрізаються вертикальною лінією розрізу, що проходить через вершину закриття. Частини ліній, що знаходяться ліворуч від лінії розрізу, з'єднуються на кінцях вертикальними відрізками і формують нову комірку. Лінії, що знаходяться праворуч від лінії розрізу, повертаються назад до списків активних нижніх і верхніх меж.

Події «закриття зверху» та «закриття знизу» обробляються подібно до звичайної події закриття. Різниця полягає в тому, що для події «закриття зверху» примусово використовується лінія нижньої межі, яка збігається з вершиною цієї події, а для події «закриття знизу» примусово використовується лінія верхньої межі, яка збігається з вершиною відповідної події.

Рис. 2.11 послідовно демонструє роботу алгоритму BCD методом скануючої лінії.

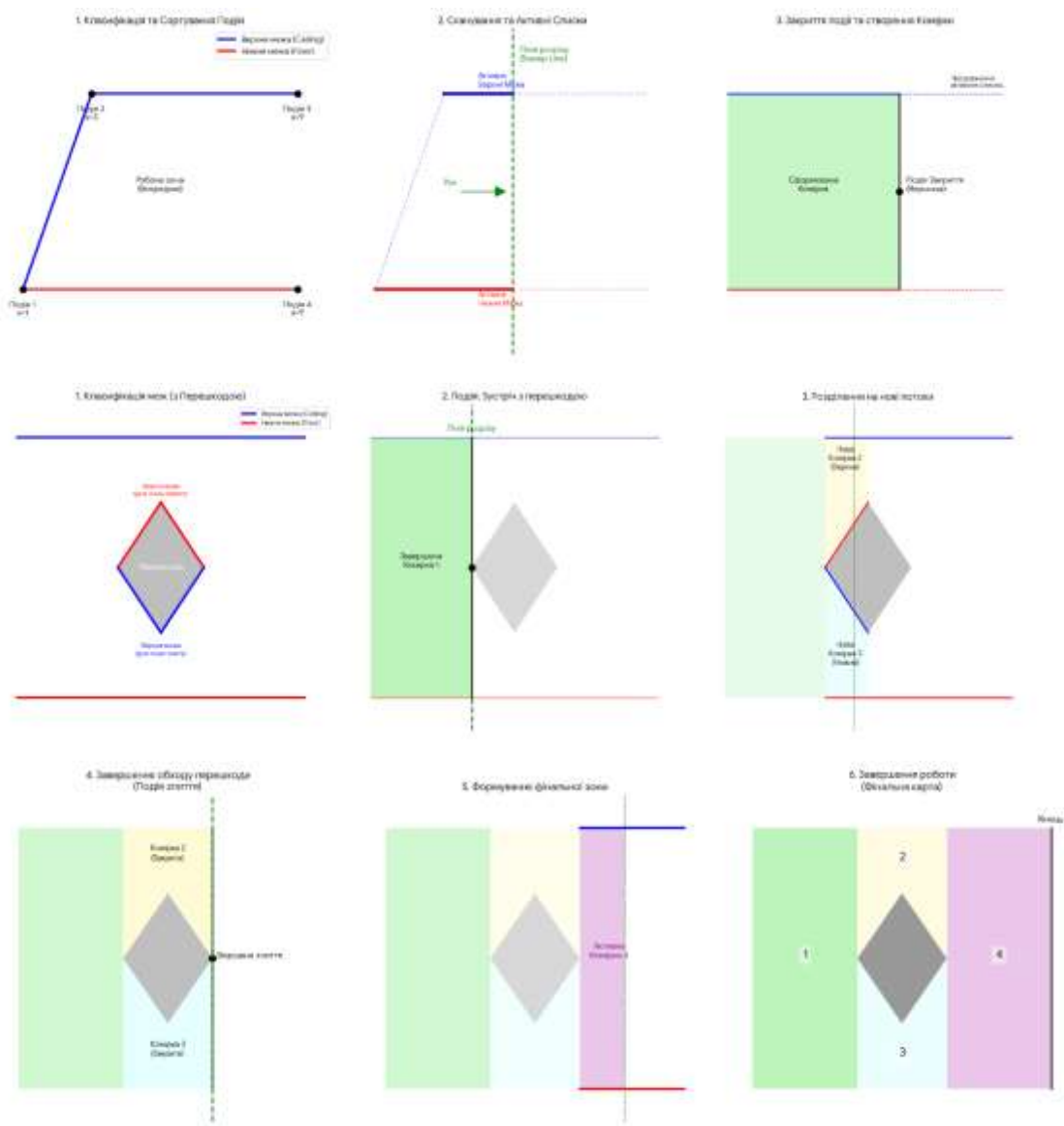


Рис. 2.11. Покрокова візуалізація алгоритму BCD з обробкою перешкод

На першому етапі візуалізовано підготовку даних, де всі межі простору та перешкод класифікуються на верхні та нижні, а ключові вершини позначаються як події. Далі показано динаміку процесу, коли вертикальна лінія розрізу рухається зліва направо і при зустрічі з перешкодою закриває поточну комірку, створюючи нові активні зони для обходу об'єкта зверху та знизу. Завершується візуалізація моментом злиття потоків після проходження перешкоди, що формує фінальну карту з чотирьох простих геометричних фігур, кожна з яких готова до легкого покриття траєкторією «змійка». Хоча можна здійснювати розбиття на більш дрібніші комірки як це показано на рис. 2.10. коли кожен кут вважається окремою подією.

2.3. Оптимізований BCD

Для оптимізації розбиття площі з врахуванням специфіки роботи газонокосарок запропоновано оптимізований алгоритм.

Алгоритм починається з послідовного обертання карти на кут від 0 до 180 градусів, і для кожного обертання запускається алгоритм поділу комірок, після чого обчислюється цільова функція J для кожної комірки.

Потім для наступної ітерації вибираються кути повороту для трьох комірок з найвищим балом (на кожен кут повороту). Для наступних ітерацій кут повороту зменшується вдвічі і використовується для генерації шести нових кутів шляхом додавання та віднімання інтервалу для трьох найкращих кутів з попередньої ітерації.

Алгоритм продовжується протягом заданої кількості ітерацій, а наприкінці вибирає клітинку з найвищим балом. Вибрана клітинка потім видаляється з карти і зберігається в списку вибраних клітинок. Процедура повторюється, поки карта не стане порожньою, і ми отримаємо точний клітинний поділ карти (PWH).

Було виявлено, що для досягнення 97% відповідності рішенням методом грубої сили достатньо почати з 6 обертань з рівним інтервалом 30 градусів від 0 до 180 градусів і повторити алгоритм 5 ітерацій, поки роздільна здатність кута не стане менше 1 градуса.

Оскільки косарки приводяться в рух диференціальним приводом в цьому варіанті необхідність у поворотній зоні може не мати такого великого значення, особливо для косарок з одним лезом. У цій реалізації карта спочатку заповнюється, щоб врахувати проходження по периметру та всі перешкоди на карті, що дозволяє повертати за межами запланованої комірки.

Оскільки алгоритм послідовно вибирає клітинку, а потім видаляє її з PWH, очевидно, що PWH буде розділений на окремі PWH, які можна назвати островами. Кожен острів може оброблятися окремо, оскільки сусідні острови не впливають на генерацію клітинок в інших островах.

Враховуючи, що оптимізований алгоритм BCD послідовно вибирає найкращу комірку з урахуванням заданої мети, важливо спочатку вибрати критерій і налаштувати параметри перед оцінкою продуктивності.

Для оцінки вибираються два різних критерії: один простий і один складний. Простий критерій враховує зважену суму нормалізованої площі відносно площі, що залишилася, та міру висоти комірки.

$$J^s = \rho_1 \frac{\text{area}(\text{cell})}{\text{area}(\text{island})} + \rho_2 \frac{\text{area}(\text{cell})}{\text{width}_x(\text{cell})}. \quad (2.2)$$

Залишкова площа базується на залишковій площі острова, на якому знаходиться комірка.

Більш досконалий і обчислювально важкий критерій базується на оцінці часу, необхідного для покриття комірки. При цьому плануються траєкторії руху і оцінюється час який буде затрачено на обробку однієї комірки. Потім ця оцінка нормалізується з врахуванням часу, необхідним для покриття косаркою тієї ж площі при русі прямо з заданою середньою швидкістю. Це зважується і підсумовується з нормалізованою площею і додатковою ваговою функцією $f(\cdot)$ для комірки, яка розташована під тим же кутом, що і сусідня раніше вибрана комірка.

$$J^c = \rho_1 \frac{\text{area}(\text{cell})}{\text{area}(\text{island})} + \rho_2 \frac{t_{\text{est}}(\text{cell})}{t_{\text{norm}}(\text{cell})} + \rho_3 f(\cdot). \quad (2.3)$$

Параметри налаштовуються вручну для кожної карти та цільової функції.

Для досягнення більш оптимальних результатів звичайного алгоритму BCD карта обертається, як на першому етапі оптимізованого алгоритму BCD. Замість видалення найкращої комірки і продовження, карта обертається з максимальною сумою всіх комірок, з врахуванням цільових функцій (2.2) і (2.3). Це можна

розглядати як створення оптимального обертання карти для звичайного BCD, враховуючи критерії оптимізації в залежності від форми перешкод і ділянки.

2.4. Планування шляху між комірками

Для планування шляху необхідно визначити порядок комірок та шлях між ними. Необхідно розробити алгоритм, який визначає порядок обробки комірок тобто розробити «планувальник маршруту» між комірками.

У цій роботі використовується простий планувальник маршрутів, який виконує такі кроки (рис. 2.12):

- 1) Вибрати початкову комірку, яка межує із зовнішнім кордоном карти;
- 2) Спланувати лінії руху в комірці від сторони на якій розміщена зовнішня критична точка за зигзагоподібною схемою (туди-назад), доки не буде досягнуто кінця останньої лінії на якій розміщена друга критична точка;
- 3) Знайти найближчу комірку та спланувати рух від найближчої точки крайньої лінії за зигзагоподібною схемою, доки не буде досягнуто кінця останньої лінії;
- 4) Повторювати крок 3, доки не залишиться комірок для відвідування.

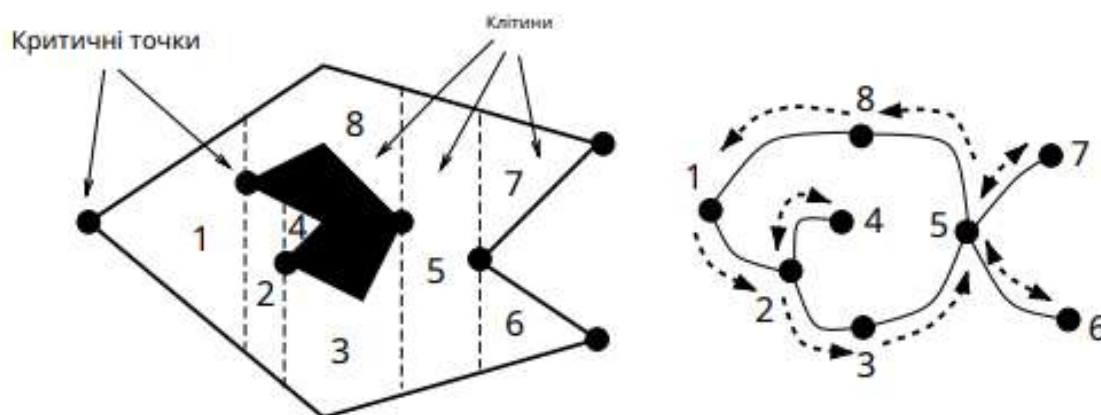


Рис. 2.12. Бустрофедонний розклад простору та його граф суміжності. Вузли представляють комірки, а ребра вказують на сусідні комірки

Коли маршрути для всіх комірок сплановано індивідуально, початкові та кінцеві точки з'єднуються 1–2–4–2–3–5–6–5–7–5–8–1 за допомогою графа видимості, щоб уникнути можливих перешкод.

Такий підхід дозволяє уникнути необхідності оцінювати граф видимості для всіх можливих комбінацій клітинок, що може призвести до отримання неоптимального маршруту.

2.5. Планування шляху на основі датчиків

Розмістимо газонокосарку в невідомому середовищі, але зауважимо, що вона має стандартні датчики відстані. Завдання полягає в одночасному покритті та дослідженні невідомого простору. Це можна звести до одночасного та поступового проходження кожної комірки під час побудови графа суміжності. Однак для проходження на основі датчиків ми поступово будуємо «подвійний» граф, який називається граф Ріба. Цей граф є подвійним у тому сенсі, що вузли графа Ріба є критичними точками, а ребра з'єднують сусідні критичні точки, тобто відповідають коміркам. Приклад VCD та відповідного графа Ріба наведено на рис. 2.13. У критичних точках нормалі до поверхні та напрямок проходження паралельні.

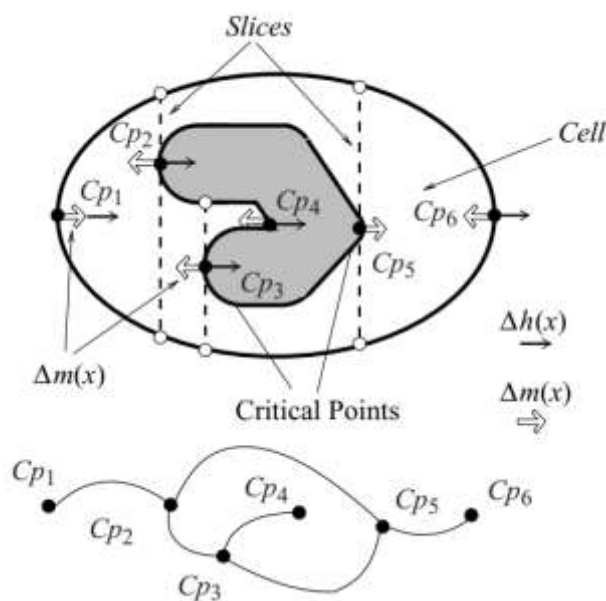


Рис. 2.13. Розклад VCD та його графік Ріба

Покрокову процедуру одночасного покриття комірок та побудови графіка Ріба зображено на рис. 2.14. На рис. 2.14 (a) газонокосарка починає покривати територію у критичній точці Cp_1 і планувальник створює ребро лише з одним вузлом. Коли робот завершує покриття комірки між Cp_1 і Cp_2 , планувальник з'єднує відповідні вузли ребром (рис. 2.14 (b)).

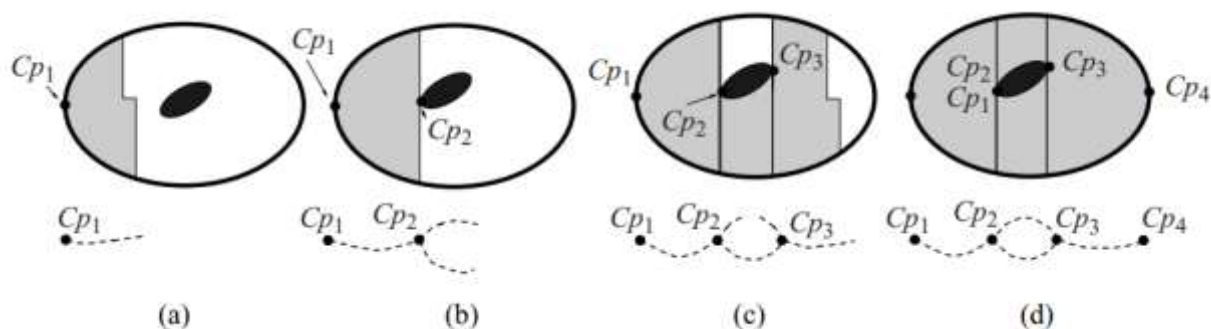


Рис. 2.14. Інкрементальна побудова графіка, на основі датчиків перешкод

Тепер у робота є дві нові непокриті комірки. Оскільки простір апіорі невідомий, планувальник довільно вибирає для покриття нижню комірку. Коли газонокосарка досягає Cp_3 , вузли Cp_2 і Cp_3 з'єднуються ребром, і нижня комірка вважається завершеною (рис. 2.14). У точці Cp_3 планувальник направляє робота покрити комірку праворуч від Cp_3 . Коли робот виявляє Cp_4 , він повертається до Cp_3 і починає покривати верхню комірку. Коли робот повертається до Cp_2 , планувальник визначає, що всі ребра всіх вузлів (критичних точок) були досліджені (рис. 2.14 (d)).

Таким чином, планувальник робить висновок, що робот повністю покрити простір.

2.6. Висновки до розділу 2

Проведений аналіз показав, що ключовим чинником вибору алгоритму руху є кінематика мобільної платформи. Наявність диференційного приводу з можливістю

розвороту на місці суттєво зменшує вимоги до поворотних смуг і робить паралельні проходи енергетично доцільними. Водночас доведено, що локальні реактивні алгоритми та наївна декомпозиція простору не забезпечують гарантованого повного покриття та призводять до неефективних холостих переміщень між підобластями.

Детально розглянуто математичні основи BCD, механізм формування подій, верхніх і нижніх меж, а також процес побудови монотонних комірок за допомогою скануючої лінії. Показано, що BCD природно поєднується з гоновим патерном руху та відповідає вимогам енергоефективності для платформ з диференціальним приводом.

Окрему увагу приділено оптимізованому варіанту BCD, який базується на обертанні карти та використанні цільових функцій для вибору найефективніших комірок. Запропонований підхід дозволяє наблизитися до оптимальних рішень і враховує як геометричні характеристики комірок, так і часові витрати на їх обробку.

Також розглянуто принципи планування маршруту між комірками та підхід до покриття на основі датчиків із використанням графа Ріба, що забезпечує можливість роботи в апіорі невідомих середовищах.

Таким чином, теоретична частина дозволила сформулювати цілісне підґрунтя для подальшої практичної реалізації системи керування рухом роботизованої газонокосарки. Отримані висновки підтверджують, що поєднання оптимізованої бустрофедонної декомпозиції з урахуванням кінематики платформи та раціонального планування маршрутів є найбільш перспективним напрямом для досягнення гарантованого, енергоефективного покриття територій складної форми.

РОЗДІЛ 3

АПРОБАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ

У попередніх розділах було проведено аналіз сучасних методів навігації мобільних роботів та теоретично обґрунтовано доцільність використання алгоритмів декомпозиції простору (BCD) для ефективного покриття площі. Однак для підтвердження теоретичних розрахунків необхідна їх практична апробація на реальній апаратній платформі.

Третій розділ присвячений практичній реалізації системи керування роботизованою газонокосаркою. У ньому представлено розробку схемотехнічних рішень, що забезпечують взаємодію сенсорів, приводів та обчислювального ядра системи. Окрему увагу приділено програмній реалізації алгоритмів навігації, зокрема методу визначення координат робота на ділянці за допомогою алгоритму трилатерації.

Ключовим етапом роботи є експериментальне дослідження [31, 32] ефективності запропонованих алгоритмів руху. У розділі наведено результати порівняльного аналізу хаотичних та систематичних стратегій покриття, а також оцінено їх вплив на енергоефективність та часові витрати процесу скошування.

3.1. Опис електронних компонентів і апаратна реалізація

Для забезпечення автономного функціонування, високої точності позиціювання та оперативної реакції на динамічні зміни зовнішнього середовища систему керування роботизованою газонокосаркою спроектовано за дворівневою архітектурою, структурна схема якої наведена на рис. 3.1. Така організація дозволяє розділити обчислювальні процеси на стратегічні та тактичні, підвищуючи загальну надійність комплексу.

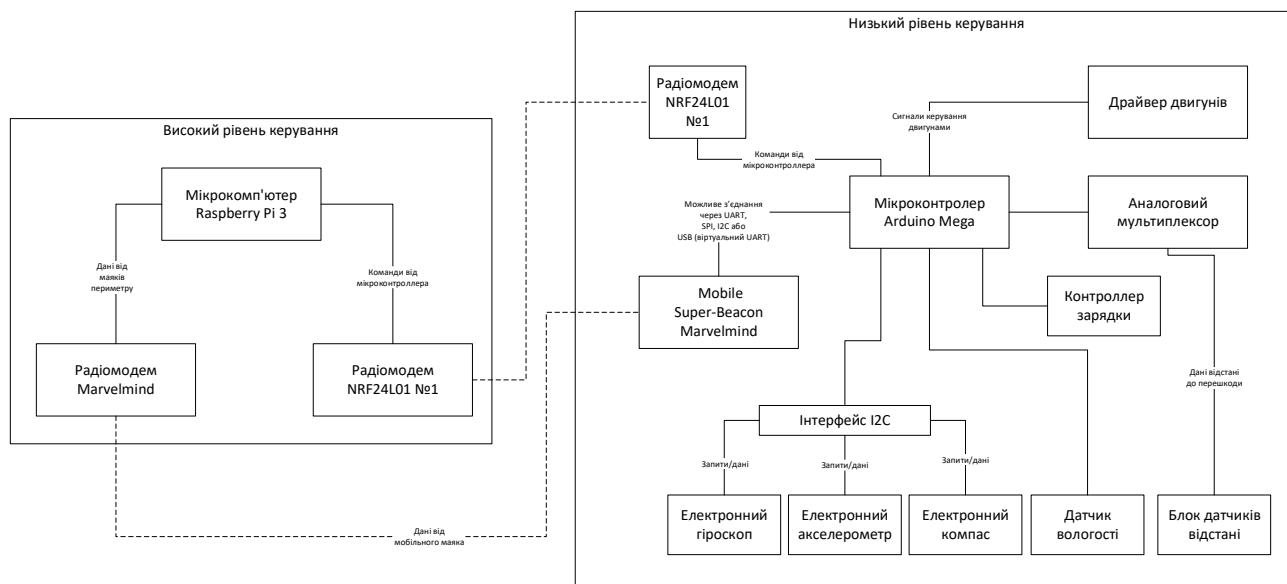


Рис. 3.1. Структурна схема робота газонокосарки

Високий рівень керування виступає інтелектуальним ядром системи та відповідає за глобальну навігацію, побудову карти, планування траєкторії руху та прийняття стратегічних рішень. Основним обчислювальним вузлом тут є мікрокомп'ютер керування, який володіє необхідною потужністю для обробки складних навігаційних алгоритмів. Для отримання глобальних координат робота до мікрокомп'ютера підключено радіомодем системи навігації Marvelmind, що отримує дані від стаціонарних маяків. Комунікація з виконавчим рівнем забезпечується через радіомодем №1, який передає керуючі команди та приймає телеметричні дані.

Низький рівень керування реалізує безпосередню взаємодію з апаратною частиною, збір даних із сенсорів та виконання команд руху в реальному часі. Центральним елементом цього рівня є мікроконтролер, який обробляє сигнали датчиків і формує керуючі сигнали для приводів. Сенсорна підсистема низького рівня включає блок інерціальної навігації з електронним гіроскопом, акселерометром та компасом, що підключені через інтерфейс I2C і забезпечують стабілізацію курсу.

Для виявлення перешкод використовується блок ультразвукових датчиків, які підключені через аналоговий мультиплексор, а також датчик вологості для моніторингу погодних умов.

Точне позиціонування самої платформи додатково підтримується мобільним супер-маяком (Mobile Super-Beacon) Marvelmind. Ця система включає не менше

чотирьох ультразвукових маяків, встановлених по периметру ділянки і одного центрального маяка, встановленого на рухомий засіб. Система дозволяє визначати координати робота з точністю до 2 см із площею покриття до 1000м²



Рис. 3.2. Комплект ультразвукових датчиків Marvelmind Robotics

Виконавча частина системи представлена драйвером двигунів для керування колесами та контролером заряду для моніторингу стану батареї. Взаємодія між двома рівнями відбувається через бездротовий канал зв'язку, що дозволяє фізично та логічно ізолювати процеси керування.

Управління ходовими моторами робота здійснюється контролером Arduino Mega на базі ATmega 2560 та підсилювальним блоком управління моторами «Dual Motor Drive».

Arduino – це електронний пристрій, що складається з однієї друкованої плати, який здатний керувати різними датчиками, електродвигунами, освітленням, передавати та приймати дані.

Що ж до Arduino Mega 2560 (див. рис. 3.3), то у цьому пристрої максимальна з усіх плат сімейства Arduino кількість пінів і розширений набір інтерфейсів. Також у Arduino Mega більше вбудованої пам'яті.

Блок управління мотор-редукторами руху газонокосарки «Dual Motor Drive» приймає логічні команди від контролера і перетворює вихідні малопотужні сигнали дискретний логіки в посилені сигнали, достатні для управління двома мотор-редукторами газонокосарки (див. рис. 3.3).

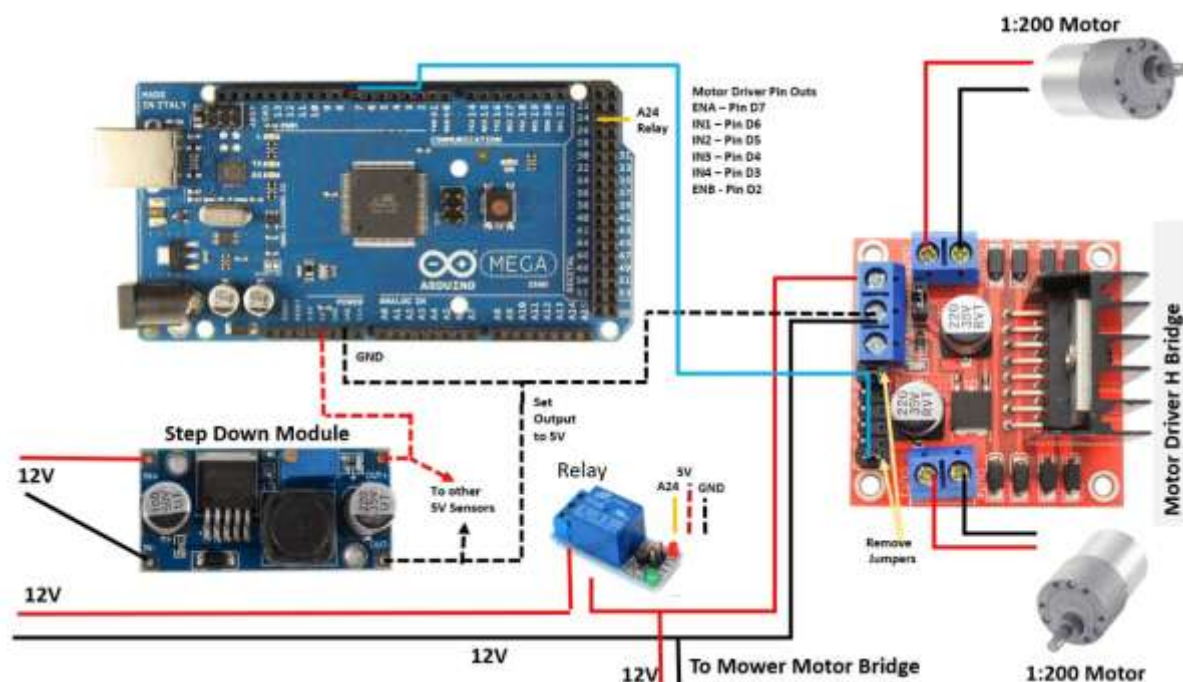


Рис. 3.3. Dual Motor Drive

Модуль Step Down, використовується для живлення датчиків і підключений до контактів 5V та GND на Arduino Mega.

З метою забезпечення стабільного зв'язку між роботом та базовим комп'ютером на відстані до одного кілометра, зв'язок робота з керуючим комп'ютером виконано через радіо модулі NRF24L01 з підсилювачем радіоканалу на частоті 2.4 ГГц.

До комп'ютера, на якому встановлений блок прийняття рішень через COM порти, реалізовані USB роз'ємом підключено радіо-модем Marvelmind Robotics і радіо модуль NRF24L01, з'єднаний з комп'ютером через контролер Arduino Mini. Маяки, по команді радіо-модему, обмінюються ультразвуковими сигналами (див. рис. 3.4). Час відправки і час прийому ультразвукових міток фіксується, розраховується відстань між маяками, в результаті комп'ютером керування, формуються дані про геометрію ділянки і положення робота на ділянці.

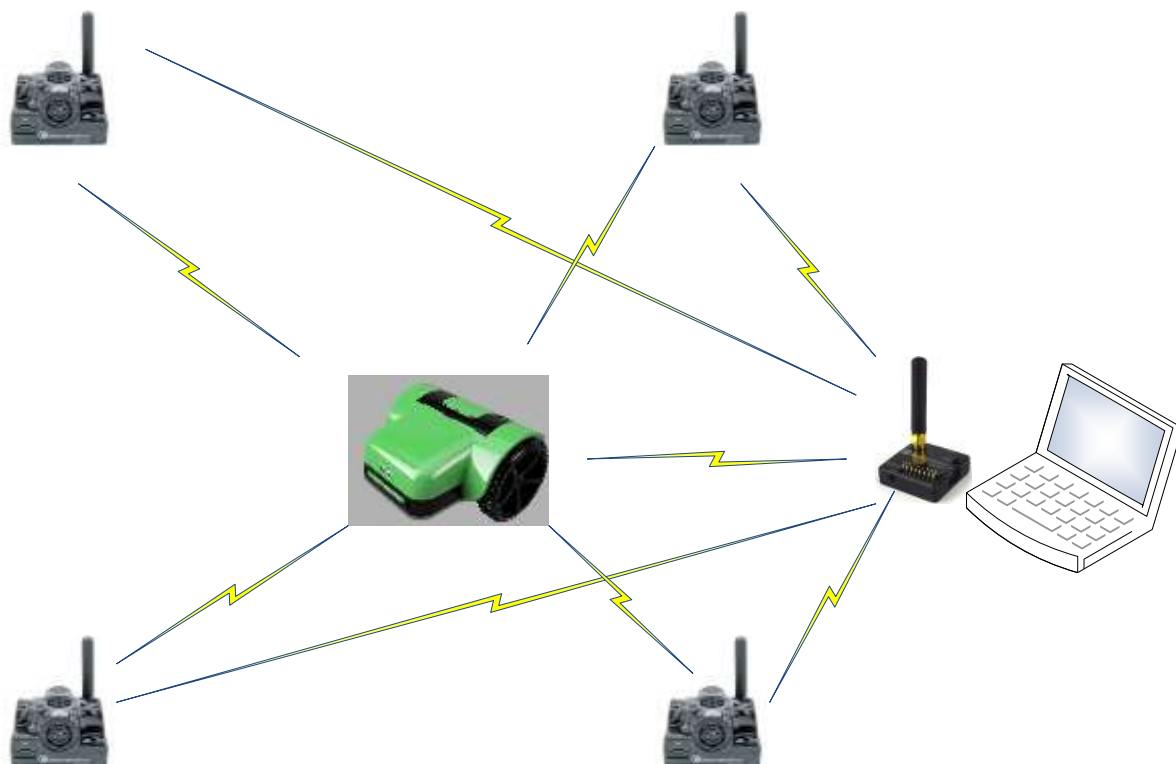


Рис. 3.4. Схема взаємодії датчиків системи позиціонування

За допомогою спеціальної програми, написаної для розробленого комплексу управління, вся отримана інформація та координати робота фіксуються.



Рис. 3.5. Приклад відстеження траєкторії руху мобільної газонокосарки

Потім визначається вектор, який задає траєкторію руху.

У даному проекті як керуючий комп'ютер застосований мікрокомп'ютер Raspberry Pi3 (див. рис. 3.6), так як він мінімально відповідає вимогам, що пред'являються, і має невелику вартість.

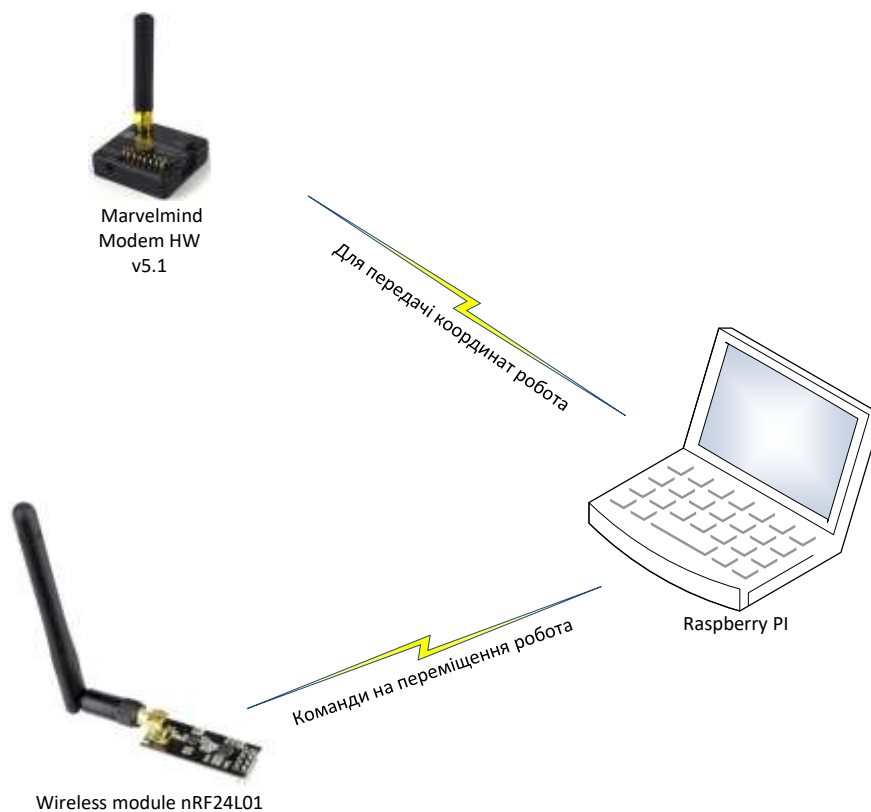


Рис. 3.6. Набір передавачів для управління роботизовано газонокосаркою

Для коригування поточного напрямку газонокосарка також оснащена електронним гіроскопом, акселерометром і електронним компасом, які розміщені в мікросхемі модуля MPU6050 від RobotClass (див. рис. 3.7). Це дозволяє зберігати прямолінійний напрямок руху робота у разі прослизання провідних коліс з ґрунтом або невідповідності швидкостей обертання коліс.

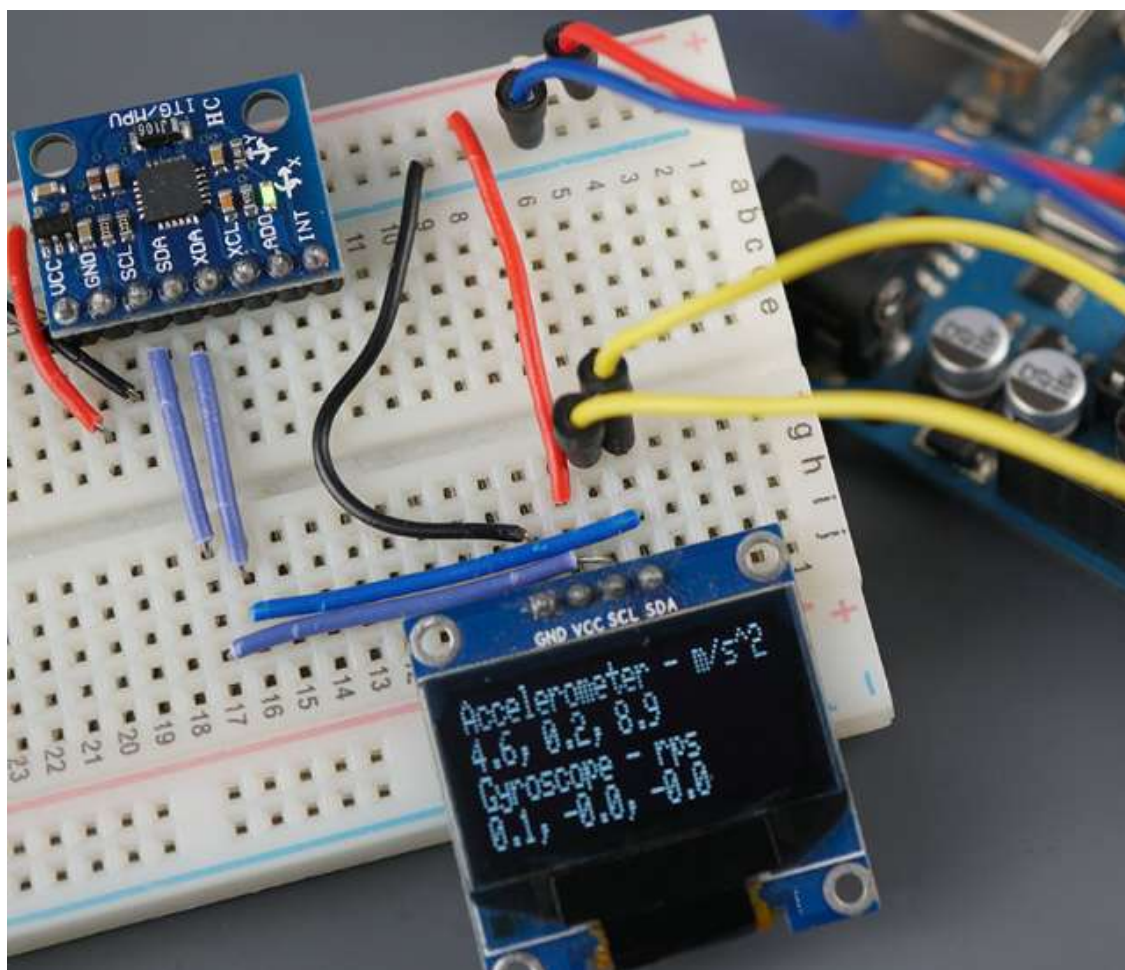


Рис. 3.7. Модуль MPU6050 підключений до Arduino Mega

З метою запобігання зіткненню з можливими перешкодами на оброблюваній площі робот оснащений ультразвуковими сенсорами схема підключення яких наведена на рис. 3.8.

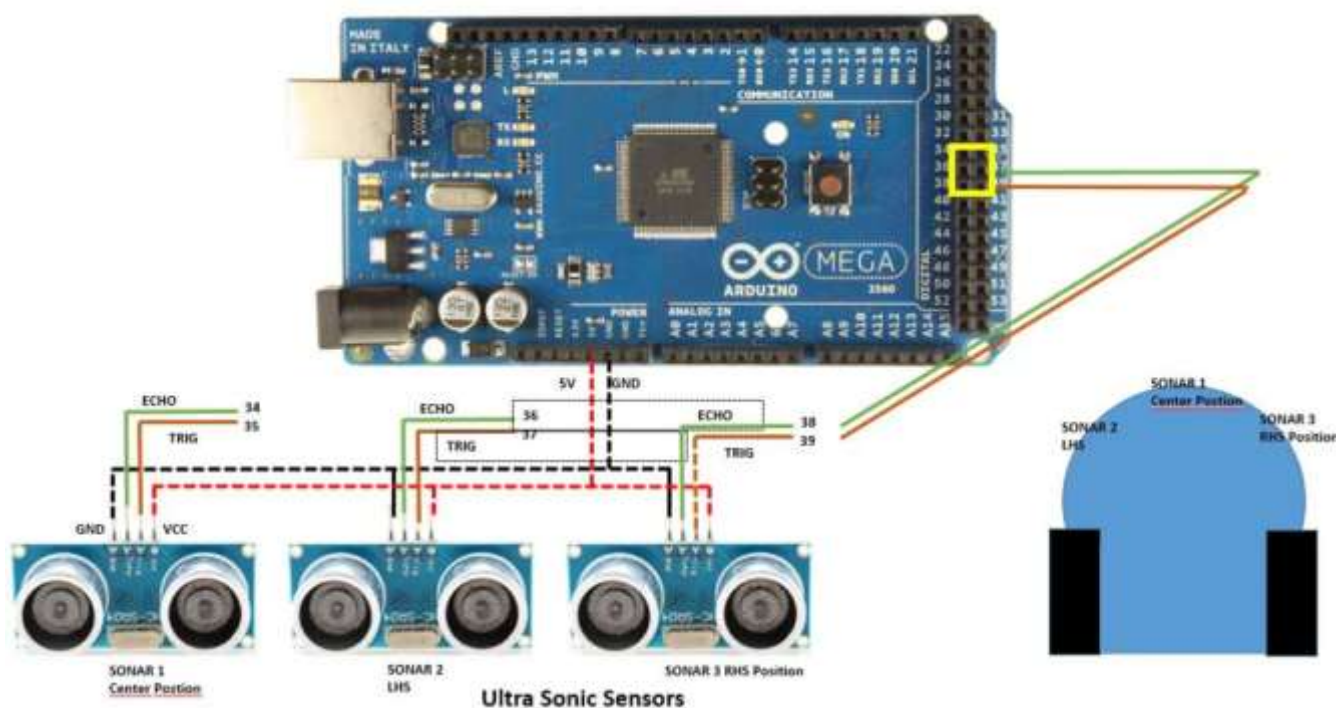


Рис. 3.8. Ультразвукові сенсори

Конструктивно ультразвуковий сенсор є ультразвуковим радаром, датчики якого є одночасно випромінювачами і приймачами. Від кількості датчиків залежить точність та чутливість системи. Одна частина датчика випускає ультразвуковий сигнал, друга частина - вловлює відбитий від предмета сигнал і різницю у часі передає головний прилад. По різниці між надісланим і отриманим сигналом визначається відстань до об'єкта.

Інформація від цих датчиків також передається на комп'ютер керування і служить для коригування вектора руху з метою об'їзду перешкод.

Важливим елементом системи безпеки та експлуатації є підсистема моніторингу погодних умов. Для запобігання запуску та роботі газонокосарки під час опадів, що може призвести до пошкодження та корозії електронних компонентів, інтегровано датчик дощу (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Модуль датчика дощу (чутливий елемент) HW-028 та плати контролю HW-103 на базі компаратора LM393

Апаратна реалізація цього вузла базується на резистивному чутливому елементі HW-028, що являє собою плату з нікельованими доріжками, та модулі контролю HW-103. Робота пристрою забезпечується подвійним компаратором напруги LM393, який аналізує зміну провідності на контактах сенсора. При потраплянні крапель води опір між доріжками зменшується, і модуль формує цифровий логічний сигнал низького рівня на виході. Цей сигнал зчитується мікроконтролером Arduino Mega як переривання, що ініціює алгоритм негайного припинення косіння та повернення робота на зарядну станцію для очікування сприятливих погодних умов.

3.2. Розрахунок і створення траєкторії руху

Для реалізації процесу автоматичного руху за розрахованою траєкторією розроблено загальний алгоритм керування, блок-схема якого наведена на рис. 3.10.

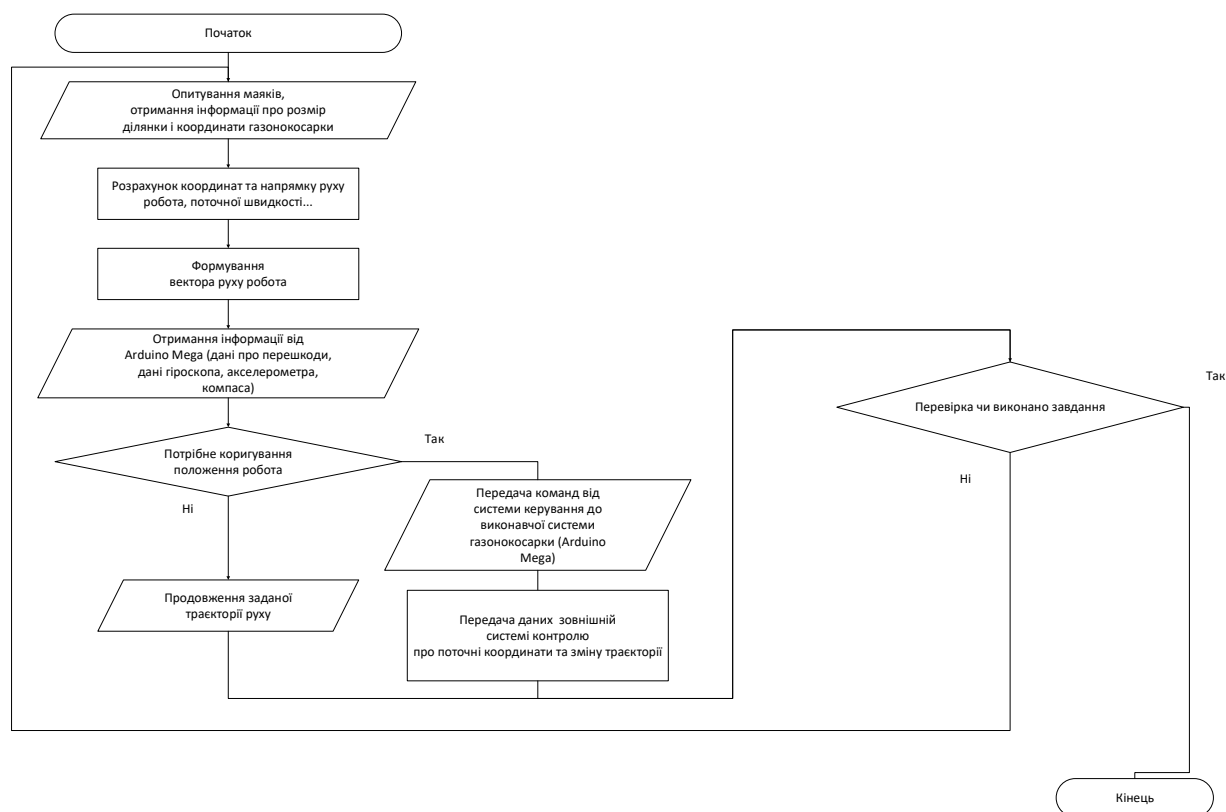


Рис. 3.10. Алгоритм роботи підсистеми аналізу та розрахунків під час руху робота за заданою траєкторією

Алгоритм працює за циклічним принципом і включає наступні етапи:

–Ініціалізація та отримання параметрів. На етапі запуску система зчитує граничні координати ділянки (периметр), отримані методом телеметрії, та завантажує розраховану матрицю координат траєкторії руху.

–Опитування системи навігації. У кожному циклі роботи мікрокомп'ютер керування (Raspberry Pi) отримує актуальні координати від системи маяків (Marvelmind), що дозволяє визначити поточне відхилення від ідеальної траєкторії.

–Формування вектору руху. На основі порівняння поточних координат із цільовими точками з масиву даних (розрахованих у середовищі MathCAD), формується вектор руху – необхідний курс та швидкість для переміщення до наступної вузлової точки.

–Обробка сенсорних даних. Паралельно з глобальною навігацією відбувається опитування сенсорів низького рівня через контролер Arduino Mega. Отримуються

дані з гіроскопа та акселерометра для стабілізації курсу, а також дані з ультразвукових сонарів для виявлення динамічних перешкод.

–Коригування положення. Система аналізує, чи потрібне коригування курсу. Якщо виявлено відхилення (наприклад, через пробуксовку коліс) або перешкоду, формуються коригувальні команди для драйверів двигунів.

–Виконання команд. Керуючі сигнали передаються на виконавчу систему (драйвери моторів), а дані про зміну траєкторії відправляються у зовнішню систему моніторингу.

Цикл повторюється до тих пір, поки косарка не пройде всі точки заданої траєкторії, що перевіряється у блоці «Перевірка чи виконано завдання».

Для автоматичного керування рухом газонокосарки спочатку необхідно визначимо поточні координати її положення та задати рух протягом двох, трьох секунд. Після чого можна визначити нові координати положення та розрахуємо швидкість руху робота та кут, на який машина має повернутися, щоб потрапити в точку старту програми.

В якості прикладу розглянемо більш складний варіант організації руху в межах комірки, який представляє собою рух по спіралі від країв до центру [34]. Спершу необхідно ввести координати точок. В системі MathCad наведемо модель зовнішнього периметру ділянки, яку можна представити у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} x &:= (0 \quad -8.4 \quad 3.12 \quad 25.86 \quad 53.36 \quad 81.22 \quad 82 \quad 108.2 \quad 111.38 \quad 99.34 \quad 67.29 \quad 14 \quad 5)^T \\ y &:= (0 \quad 30 \quad 68.11 \quad 82.7 \quad 87.9 \quad 82.7 \quad 62.7 \quad 49.4 \quad 30.8 \quad 5.5 \quad 4 \quad -4 \quad -1)^T \end{aligned} \quad . \quad (3.1)$$

Координати (3.1) опорних точок покажемо на графіку рис. 3.11:

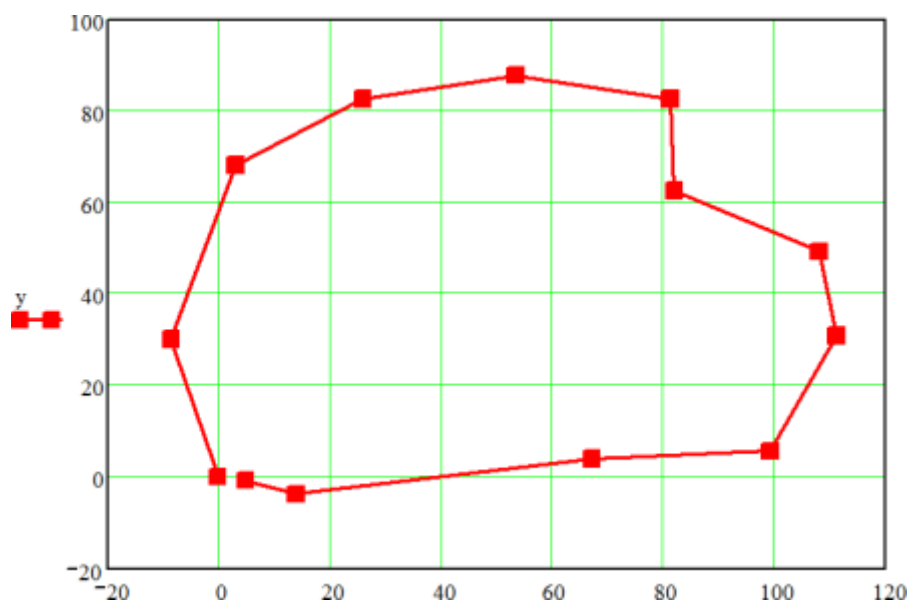


Рис. 3.11. Графік координат периметра зовнішнього контуру ділянки скошування

Для розрахунку кута повороту газонокосарки скористаємося формулою обчислення косинуса кута між двома векторами на площині.

$$\cos(\widehat{\vec{a}, \vec{b}}) = \frac{(a_x b_x + a_y b_y)}{\sqrt{(a_x^2 + a_y^2)} \sqrt{(b_x^2 + b_y^2)}} \quad (3.2)$$

Щоб знайти числове значення кута, необхідно обчислити довжини векторів через координати трьох точок та скалярного добутку значень векторів.

Для розрахунку напрямку обертання необхідно розрахувати визначник матриці різниці між координатами.

Далі на рис. 3.12 показаний фрагмент програми MathCad для розрахунку кута повороту. Тут передбачається, що робот вже має напрямок по осі Y.

```

Anglej :=
  dxj ← xj - xj-1
  dyj ← yj - yj-1
  αj ← acos  $\left[ \frac{(dx_{j-1} \cdot dx_j) + (dy_{j-1} \cdot dy_j)}{\sqrt{(dx_j)^2 + (dy_j)^2} \cdot \sqrt{(dx_{j-1})^2 + (dy_{j-1})^2}} \right]$ 
  Aj ←  $\begin{pmatrix} dx_{j-1} & dy_{j-1} \\ dx_j & dy_j \end{pmatrix}$ 
  αj ← -αj if |Aj| > 0
  α1 ← atan  $\left( \frac{dx_1}{dy_1} \right)$  if dy1 > 0
  otherwise
  α1 ← -atan  $\left( \frac{dy_1}{dx_1} \right) + \frac{\pi}{2}$  if dx1 > 0
  α1 ← atan  $\left( \frac{dy_1}{dx_1} \right) + \frac{\pi}{2}$  otherwise
  αj

```

Рис. 3.12. Фрагмент блоку програми розрахунку кутів повороту

Розрахунки для координат (3.1) показали наступні значення кутів:

	0
0	0
1	-15.6422
2	32.4614
3	40.4966
4	21.9766
5	21.2801
6	77.1941
7	-60.8527
8	53.3842
9	35.1512
10	61.8711
11	-5.858
12	26.9725

Рис. 3.13. Розраховані значення кутів повороту

Для заповнення всієї площі ділянки для скошування зробимо розрахунок проміжних координат точок. Але спочатку знайдемо центр отриманої фігури, обмеженої периметром з координатами за формулою:

$$X_c := \frac{\sum_{i=0}^k x_i}{k}; Y_c := \frac{\sum_{i=0}^k y_i}{k} . \quad (3.3)$$

Для представлених опорних точок периметра траєкторії значення координат центру ваги фігури будуть: $X_c = 53$ см; $Y_c = 41$ см.

Далі для кожної i -ї точки розрахуємо відстань до центру

$$DRadiusa_i := \sqrt{(X_c - x_i)^2 + (Y_c - y_i)^2} . \quad (3.4)$$

З урахуванням параметра ширини захвату газонокосарки розрахуємо кількість проходів для кожної точки. З отриманих значень виберемо найбільше і округлимо його до цілого значення. Фрагмент програми у системі MathCad показаний на рис. 3.14

```
NumTrek := 
| MaximumChislo ← 0
| for i ∈ 1..k
|   MaximumChislo ←  $\frac{DRadiusa_i}{Shirina}$  if  $DRadiusa_{i-1} < DRadiusa_i$ 
| round (MaximumChislo)
```

Рис. 3.14. Фрагмент блоку програми для визначення кількості треків

Тепер розіб'ємо кожен відрізок, який визначає відстань від центру території до кожної точки на максимальне число і знайдемо збільшення на відрізках через координати:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Xtrack} := \text{for } j \in 0.. \text{NumTrek} - 1 & \text{Ytrack} := \text{for } j \in 0.. \text{NumTrek} - 1 \\
 \text{for } i \in 0.. k & \text{for } i \in 0.. k \\
 \left| \begin{array}{l} \text{Jat} \leftarrow \frac{j}{\text{NumTrek} - j} \\ \text{Xt}_{j,i} \leftarrow \frac{x_i + \text{Xc} \cdot \text{Jat}}{1 + \text{Jat}} \end{array} \right. & \left| \begin{array}{l} \text{Jat} \leftarrow \frac{j}{\text{NumTrek} - j} \\ \text{Yt}_{j,i} \leftarrow \frac{y_i + \text{Yc} \cdot \text{Jat}}{1 + \text{Jat}} \end{array} \right.
 \end{array}$$

Рис. 3.15. Фрагмент блоку програми для розрахунку координат траєкторії руху

Отримані значення виведемо в вигляді матриці значень координат:

Xtrack =		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	0	0	-8.4	3.1	25.9	53.4	81.2	82	108.2	111.4	99.3	67.3	14	5
	1	13.4	7.1	15.7	32.8	53.4	74.3	74.9	94.5	96.9	87.9	63.9	23.9	17.1
	2	26.8	22.6	28.3	39.7	53.4	67.4	67.8	80.9	82.5	76.4	60.4	33.8	29.3
	3	40.1	38	40.9	46.6	53.5	60.5	60.6	67.2	68	65	57	43.6	41.4

Ytrack =		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	0	0	30	68.1	82.7	87.9	82.7	62.7	49.4	30.8	5.5	4	-4	-1
	1	10.4	32.9	61.5	72.4	76.3	72.4	57.4	47.4	33.5	14.5	13.4	7.4	9.6
	2	20.8	35.8	54.8	62.1	64.7	62.1	52.1	45.5	36.2	23.5	22.8	18.8	20.3
	3	31.2	38.7	48.2	51.9	53.2	51.9	46.9	43.5	38.9	32.6	32.2	30.2	30.9

Рис. 3.16. Матриці координат точок траєкторії руху

Перетворюємо дану матрицю в послідовність чисел для цього наведу наступний фрагмент:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Xtr} := \left| \begin{array}{l} i \leftarrow 2 \\ \text{Xcomb} \leftarrow \text{stack} \left[\left(\text{Xtrack}^T \right)^{\langle 0 \rangle}, \left(\text{Xtrack}^T \right)^{\langle 1 \rangle} \right] \\ \text{while } i < \text{NumTrek} \\ \left| \begin{array}{l} \text{Xcomb} \leftarrow \text{stack} \left[\text{Xcomb}, \left(\text{Xtrack}^T \right)^{\langle i \rangle} \right] \\ i \leftarrow i + 1 \end{array} \right. \\ \text{Xcomb} \end{array} \right. & \text{Ytr} := \left| \begin{array}{l} i \leftarrow 2 \\ \text{Ycomb} \leftarrow \text{stack} \left[\left(\text{Ytrack}^T \right)^{\langle 0 \rangle}, \left(\text{Ytrack}^T \right)^{\langle 1 \rangle} \right] \\ \text{while } i < \text{NumTrek} \\ \left| \begin{array}{l} \text{Ycomb} \leftarrow \text{stack} \left[\text{Ycomb}, \left(\text{Ytrack}^T \right)^{\langle i \rangle} \right] \\ i \leftarrow i + 1 \end{array} \right. \\ \text{Ycomb} \end{array} \right.
 \end{array}$$

Рис. 3.17. Визначення масиву координат точок траєкторії руху

Потім, застосувавши алгоритми інтерполяції проміжних значень отримаємо наступний графік:

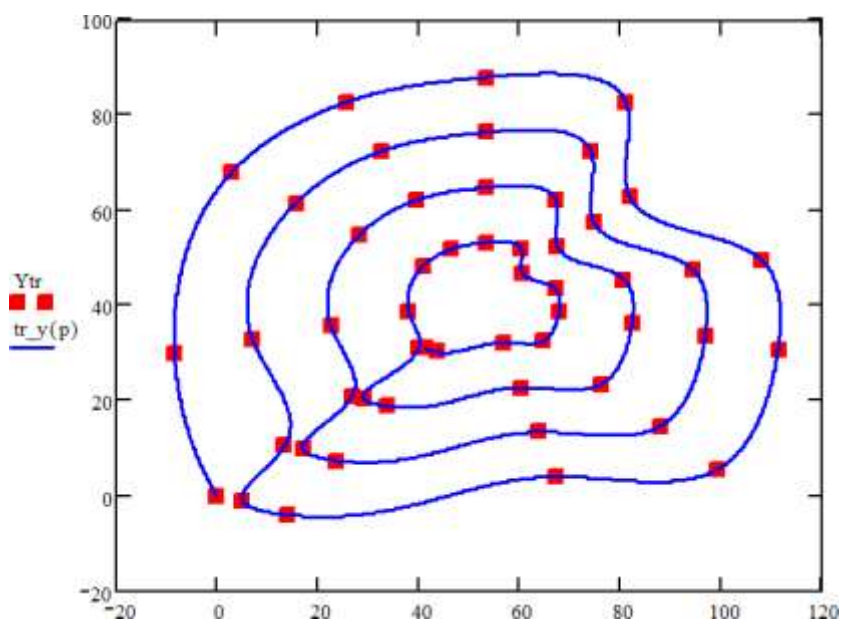


Рис. 3.18. Графік з опорними точками траєкторії руху

З графіка видно, що лінії траєкторії проходять на різних відстанях один від одного (в правій верхній частині більша частота треків). Тобто у деяких випадках газонокосарка пройдёт кілька разів по одному місцю.

3.3. Результати моделювання і аналіз роботи оптимізованого BCD алгоритму

У цьому підрозділі представлені результати оптимізованого BCD. Результати показані для трьох карт, кожна з яких представлена окремо з оціненим часом з та симульованим часом.

Усі результати симуляції показують покриття понад 99 %, тому відсоток покриття був опущений з порівнянь. Всі карти мають розмір приблизно 1000 м² кожна. Важливо зазначити, що всі карти, показані тут, зменшені від оригінальних карт на дві ширини колії, щоб косарка могла повертати за межами комірок, а вказаний час не включає обрізку по краях.

Для розрізнення між оптимізованим BCD, базовим BCD та цільовими функціями використовуються позначення $J_s^O, J_c^O, J_s^B, J_c^B$. Надрядковий індекс позначає алгоритм O для оптимізованого BCD і B для базового BCD, а індекси позначають цільові функції s для складних і c для простих, як у розділі 2.3.

Розглянемо перший варіант карти коли опукла межа та опуклі перешкоди. Розклад клітин для різних алгоритмів і цільових функцій можна побачити на рис. 3.19. Для наочності на графіках зображено кожну третю лінію

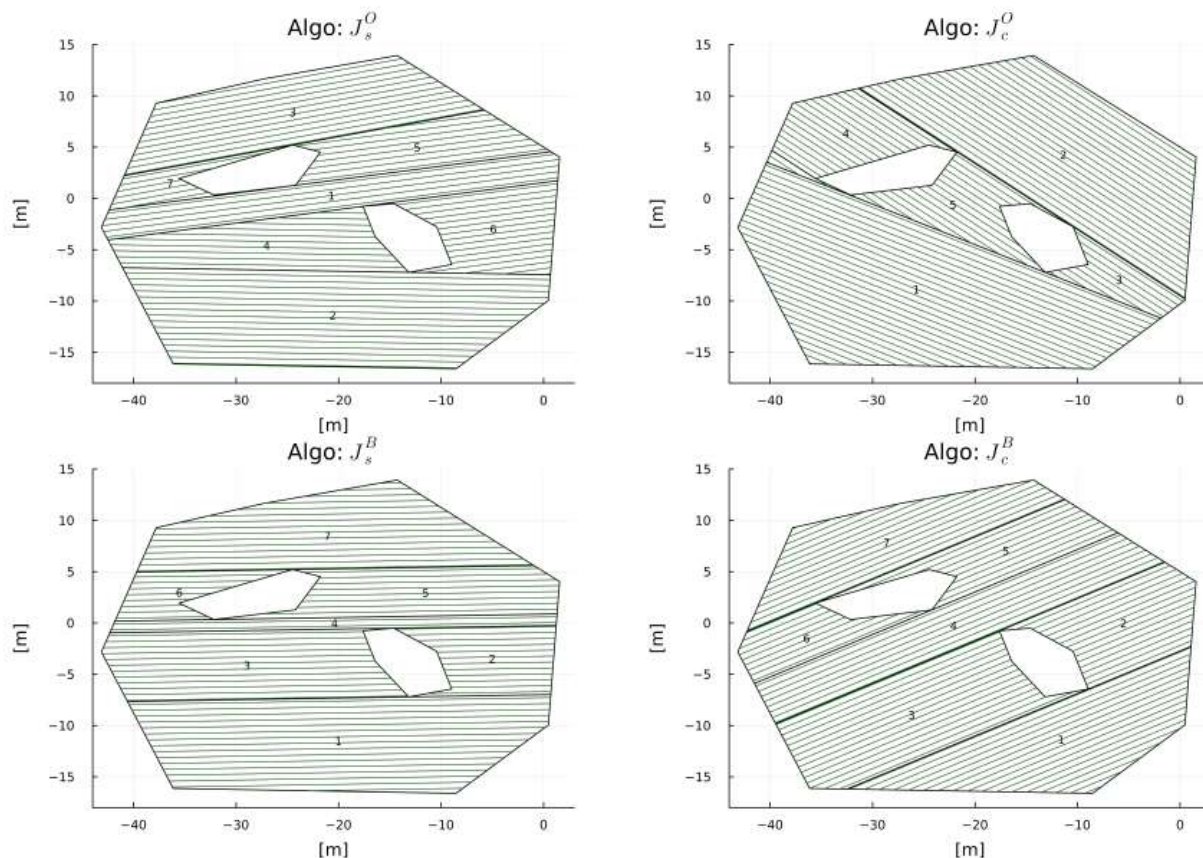


Рис. 3.19. Результати розкладання комірок для карти 1, цифри вказують порядок, в якому генеруються комірки.

Для алгоритму J_s^O першою обраною коміркою є довга і тонка комірка, за якою слідують дві великі комірки (2 і 3), на відміну від J_c^O який вибирає дві великі комірки (1 і 2), перш ніж переходити до менших комірок між комірками 1 і 2. Особливістю алгоритму J_c^O є комірка 5, де комбінація BCD дозволяє розширити комірку між комірками 1 і 4 і уникнути необхідності створювати додаткові комірки для заповнення невеликого порожнього місця.

Для числових результатів, наведених у таблиці 3.1 та таблиці 3.2, всі алгоритми мають подібний загальний розрахунковий час, що відрізняється максимум на 3,5 %, де найшвидший шлях генерується за допомогою цільового показника J_s^B . Всі

алгоритми генерують 7 комірок, за винятком J_c^O яка створює лише 5 комірок і також має меншу довжину транспортування порівняно з іншими комірками. Зверніть увагу, що оціночний час, модельований час і кількість ліній відповідають тому ж рейтингу алгоритмів. При порівнянні відхилення часу між модельованим і оціночним часом, всі відхилення наближаються до 2 %.

Таблиця 3.1

Результати планування поділу для карти 1

Алгоритм	Кількість клітин	Кількість ліній (м)	Транспортна довжина (м)
J_s^O	7	225	37,9
J_c^O	5	282	13,59
J_s^B	7	219	42,56
J_c^B	7	253	43,74

Таблиця 3.2

Аналіз часових характеристик для карти 1

Алгоритм	Час симуляції (хв)	Оцінений час (хв)	Відхилення часу (%)	Відстань (м)
J_s^O	161,79	158,31	2,20	5259,93
J_c^O	166,05	162,98	1,88	5162,20
J_s^B	160,74	157,62	1,98	5243,46
J_c^B	164,54	161,41	1,94	5236,90

Розглянемо наступний варіант карти, яка має V подібну форму. Розбиття комірок для V-подібної карти показано на рисунку 3.20. Цю карту обрано, оскільки вона підкреслює переваги оптимізованого BCD, який здатний використовувати

топографію карти, що проходить по вузьких проходах, на відміну від базових алгоритмів, які можуть вибирати тільки один напрямок.

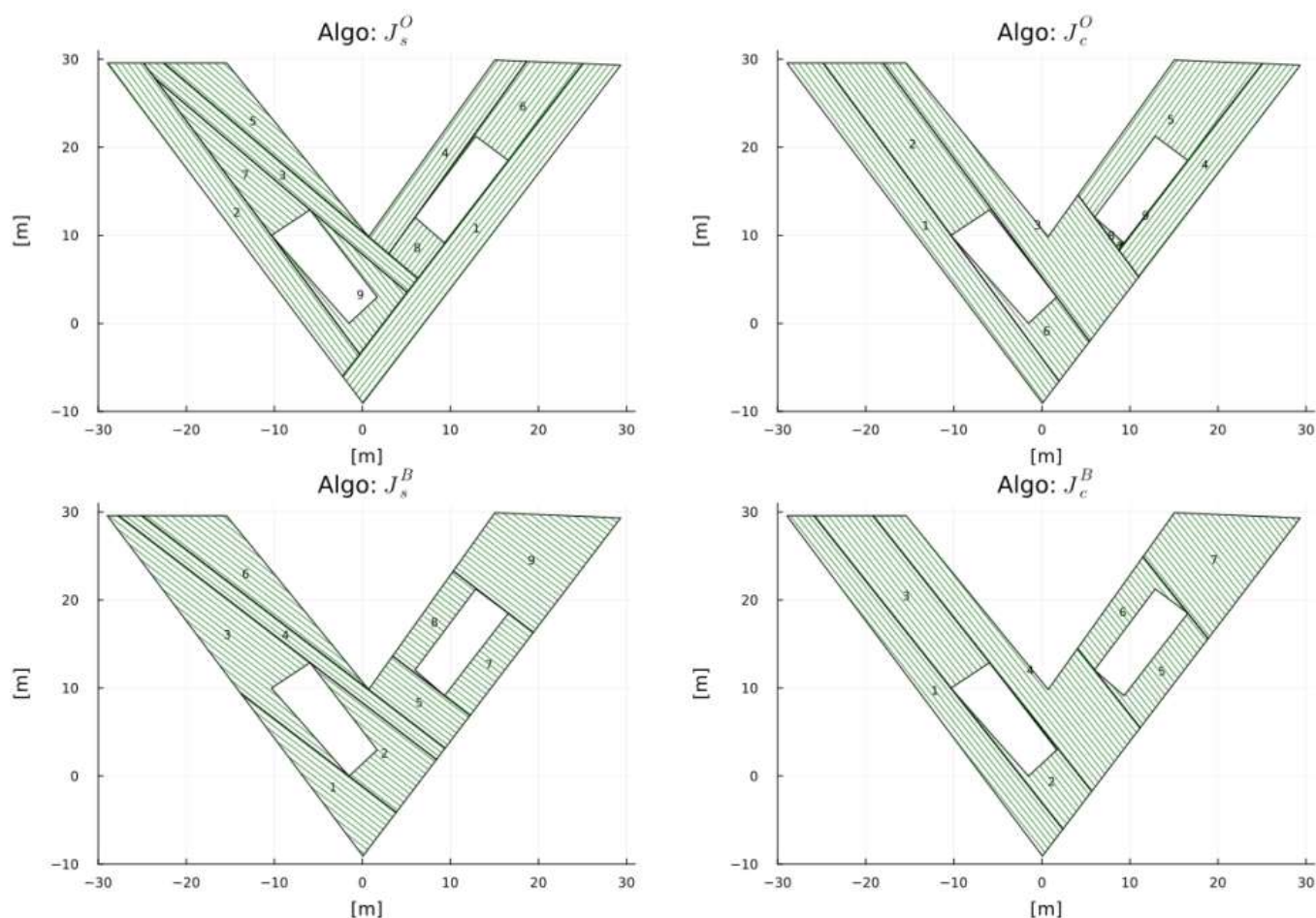


Рис. 3.20. Результати розкладання комірок для карти 2

У J_c^O слід звернути увагу на невеликі комірки 7, 8 і 9, які є артефактами алгоритму, що залишає невеликі острівці нерегулярної форми для планування.

Числові результати в таблиці 3.3 і таблиці 3.4 показують, що J_c^O має найкоротший оціночний час, який на 11 % швидший порівняно з найшвидшим базовим алгоритмом, а також найменшу кількість рядів. Тут відхилення часу між часом моделювання та оціночним часом має більшу розбіжність порівняно з картою 1, хоча рейтинг алгоритмів залишається однаковим для обох варіантів визначення часу.

Таблиця 3.3

Результати планування поділу для карти 2

Алгоритм	Кількість клітин	Кількість ліній (м)	Транспортна довжина (м)
J_s^O	9	209	102,18
J_c^O	9	194	40,96
J_s^B	9	380	34,26
J_c^B	7	334	74,74

Таблиця 3.4

Аналіз часових характеристик для карти 2

Алгоритм	Час симуляції (хв)	Оцінений час (хв)	Відхилення часу (%)	Відстань (м)
J_s^O	123,86	118,52	4,51	3853,68
J_c^O	120,17	116,59	2,98	3801,15
J_s^B	139,38	136,05	2,44	3682,48
J_c^B	136,14	131,57	3,47	3762,61

Наступна карта представляє собою складні межі та перешкоди. Розбиття такої карти наведено на рис. 3.21.

У цьому прикладі базовий алгоритм зробив розбиття однаково. Крім того, можна побачити, що перша комірка J_s^O нагадує комірку 13 в J_s^B . Комірки 11, 14, 15 в J_s^O показують результат оптимізованого VCD, який повинен заповнити порожнечу, створену іншими комірками. Хоча алгоритм J_s^O генерує менше половини кількості комірок як при використанні базового алгоритму, разом із меншою загальною відстанню переміщення, кількість ліній перевищує в базовому алгоритмі і призводить до гіршої продуктивності розподілу. Як і в картах 1 і 2, результати моделювання та розрахунковий час близький, з послідовним відхиленням.

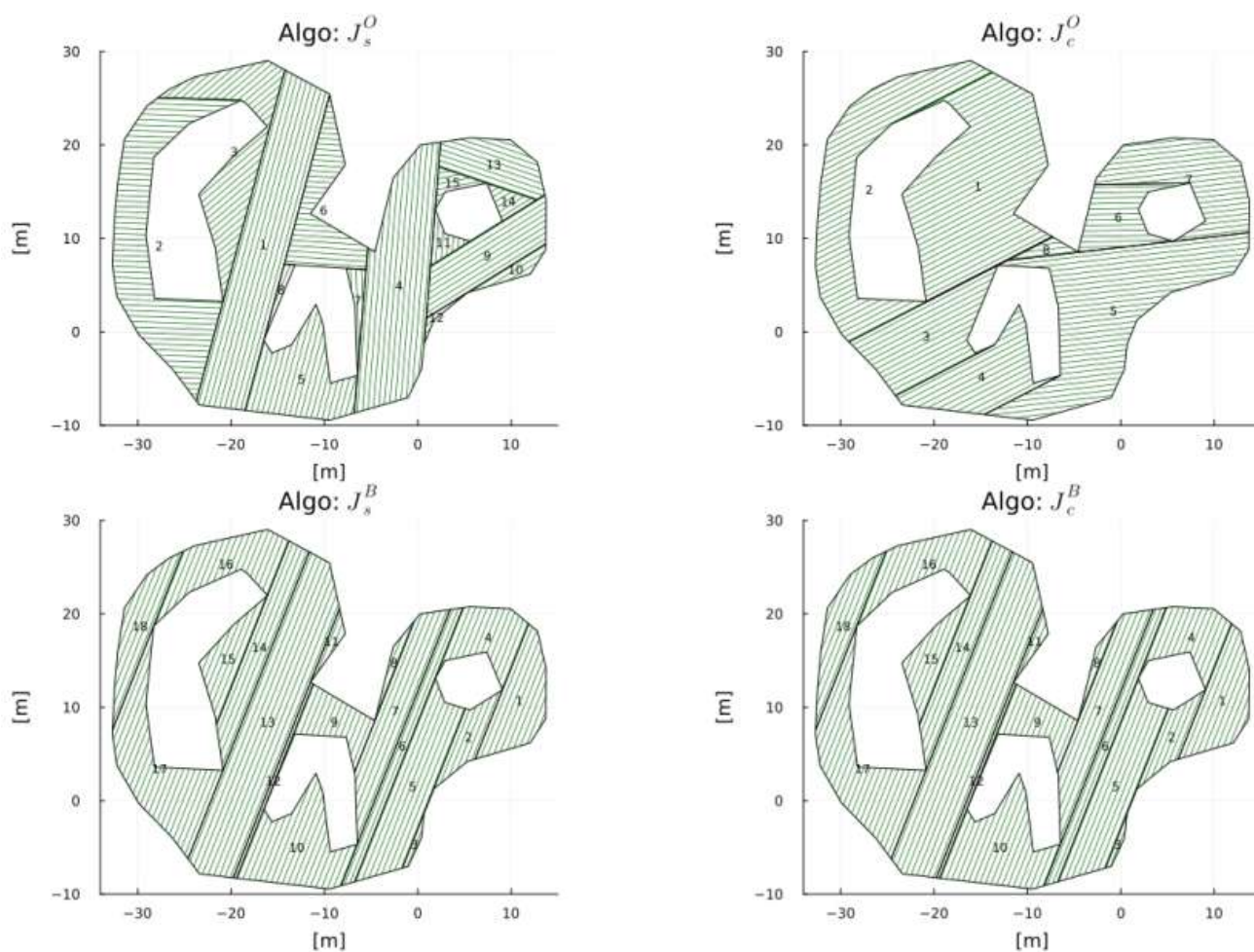


Рис. 3.21. Результати розкладання комірок для карти 3

Таблиця 3.5

Результати планування поділу для карти 3

Алгоритм	Кількість клітин	Кількість ліній (м)	Транспортна довжина (м)
J_s^O	15	649	87,71
J_c^O	8	491	96,97
J_s^B	18	438	156,31
J_c^B	18	438	156,31

Таблиця 3.6

Аналіз часових характеристик для карти 3

Алгоритм	Час симуляції (хв)	Оцінений час (хв)	Відхилення часу (%)	Відстань (м)
J_s^O	195,64	191,42	2,20	4730,24
J_c^O	180,02	173,55	3,73	4734,75
J_s^B	176,77	169,31	4,40	4838,68
J_c^B	176,77	169,31	4,40	4838,68

Підводячи підсумок для результатів двох алгоритмів BCD з двома різними критеріями оптимізації, один простіший базовий алгоритм, який ефективно генерує лише паралельні лінії, та другий - оптимізований BCD, який генерує комірки різної орієнтації, кожна з яких заповнена паралельними лініями.

Оптимізований алгоритм BCD продемонстрував здатність генерувати швидші схеми різання в порівнянні з базовим BCD, хоча при цьому він також не завжди показав кращі результати або незначні поліпшення в порівнянні з базовим алгоритмом.

Під час планування карти користувач може скорегувати планування. Для прикладу користувач може вибрати небажані комірки та попросити перепланувати їх, надавши певні дані.

3.4. Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано практичну реалізацію системи керування роботизованою газонокосаркою та проведено комплексне дослідження ефективності запропонованих алгоритмів покриття площі.

Реалізовано дворівневу архітектуру керування газонокосаркою. Використання мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3 для навігаційних задач верхнього рівня та

мікроконтролера Arduino Mega 2560 для безпосереднього керування приводами дозволило забезпечити необхідну швидкість та надійність системи. Інтеграція системи навігації Marvelmind разом із блоком інерціальних датчиків та сонарів забезпечила точність позиціонування до 2 см.

Встановлено, що для ділянок простої геометричної форми (прямокутних, колових) цей спіральний метод обходу демонструє вищу ефективність порівняно з гонтовим завдяки мінімізації непродуктивних холостих ходів на розворотах. Відсутність необхідності виїзду на поворотну смугу дозволяє знизити витрату палива та час обробки на 5–10% на полях великої площі. Однак, суттєвим обмеженням спірального методу є складність завершення обробки в центрі поля (де радіус повороту стає меншим за допустимий для газонокосарки) та неможливість ефективного використання на полях зі складною конфігурацією перешкод. Тому, хоча спіральний рух є оптимальним для простих масивів, для універсального застосування в умовах гетерогенних ділянок доцільніше використовувати гонтовий метод.

Порівняльний аналіз базового та оптимізованого алгоритмів бустрофедонної декомпозиції (BCD) на картах різної складності показав переваги оптимізованого підходу. На простих (опуклих) та V-подібних ділянках оптимізований алгоритм дозволяє скоротити загальний час обробки (наприклад, на 11% для карти 2) та зменшити довжину холостого ходу («транспортну довжину») у 2–3 рази порівняно з базовими методами. Алгоритм здатен адаптуватися до топографії ділянки, змінюючи кут нахилу ліній руху (треків) для кожної окремої комірки, що мінімізує кількість розворотів у вузьких проходах.

Дослідження на складній карті 3 виявило недолік оптимізованого BCD як «жадібного» алгоритму. Хоча він генерує значно меншу кількість комірок (5 проти 18 у базового), він може створювати комірки складної форми, що вимагають великої кількості коротких ліній руху (649 ліній проти 438). Це призводить до збільшення кількості маневрів і, як наслідок, до збільшення загального часу роботи на складних ділянках.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає у розробці методів та засобів керування траєкторією руху газонокосарки. Оскільки, при розробці використовується комп'ютерна техніка, необхідно забезпечити дотримання вимог охорони праці, техніки безпеки та протипожежної безпеки при використанні ПК. Основними регламентуючими нормативними документами охорони праці користувачів ПК є:

- НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями»;
- ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту»;
- Інструкція з охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин, затверджена наказом Міністерства доходів і зборів України від 05.09.2013 р. № 443.

Вимоги до приміщень щодо розташування робочого місця передбачають виконання наступних вимог:

- мінімальна площа, яка виділяється на одне робоче місце повинна становити мінімум 6,0 м², при об'ємі – мінімум 20,0 м³;
- розташування робочих місць користувачів ПК заборонено у цокольних або підвальних приміщеннях.

Для забезпечення дотримання вимог охорони праці, роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці. При організації робочих місць відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18 передбачається наявність як природного, так і штучного освітлення. Природне освітлення зазвичай надходить у приміщення через вікна та світлові прорізи і забезпечує коефіцієнт освітленості не менше 1,5%.

Штучне освітлення забезпечується за допомогою відповідних джерел, наприклад, люмінесцентних ламп.

Відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18 та ДБН В.2.2-28:2010, приміщення, де використовується комп'ютерна техніка, не повинні межувати з будівлями, у яких рівень шуму або вібрації перевищує встановлені допустимі норми. Покриття підлоги повинне мати матову поверхню з коефіцієнтом відбиття у межах 0,3-0,5. Для внутрішнього оздоблення приміщень слід використовувати дифузно-відбивні матеріали з коефіцієнтом відбиття: для стелі – 0,7-0,8, для стін – 0,5-0,6.

При розробці системи визначення оптимальної траєкторії руху газонокосарки важливо забезпечити відповідність мікроклімату у приміщеннях вимогам ДСН 3.3.6.042- 99. Категорія робіт, що відповідає цьому виду завдань, належить до легкої – Іб. Оптимальні показники мікроклімату для приміщень, де експлуатуються комп'ютери в теплу пору року, повинні становити: температура повітря – +22...+24°C, відносна вологість – 40-60%, швидкість руху повітря – 0,1 м/с.

Окрім, забезпечення оптимальних показників мікроклімату, необхідно передбачити ще й ергономічну організацію робочого місця. Конструкція робочого місця повинна забезпечити підтримання оптимальної робочої пози. У відповідності до НПАОП 0.00-7.15-18, обладнання і організація робочого місця працюючих з ПК мають забезпечувати відповідність конструкції всіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування, ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності.

Відповідно до вимог НПАОП 0.00-7.15-18 екран комп'ютера повинен бути розміщений на відстані 600...700 мм від очей користувача. Розташування монітору має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом +30 градусів до нормальної лінії погляду працівника.

Як вже згадувалось раніше приміщення в яких розміщені ПК мають відповідати вимогам до пожежної безпеки вказані в НАПБ А.01.001-2014. Згідно з ними приміщення, де розміщені робочі місця операторів, крім приміщень, у яких розміщені великі ПК загального призначення (серверні), повинні бути оснащені системою автоматичної пожежної сигналізації. А також повинні бути забезпечені первинними

засобами пожежогасіння, а саме вогнегасниками, що використовуються для локалізації і ліквідації пожеж у їх початковій стадії розвитку.

Таким чином було проведено аналіз основних вимог до приміщень та робочих місць з ПК, вимог до пожежної безпеки, що дозволило забезпечити комфортні і безпечні умови праці інженерам комп'ютерних систем.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Джерела виникнення шуму і вібрацій. Заходи і засоби захисту від шуму і вібрацій, гігієнічні та допустимі норми.

Основними джерелами шуму та вібрацій у газонокосарках є двигун, ріжучі елементи (ножі, шпулі) та їх неврівноваженість або пошкодження. У контексті безпеки життєдіяльності, газонокосарки належать до джерел підвищеного шуму та локальної вібрації, що безпосередньо впливають на органи слуху, нервову систему та опорно-руховий апарат оператора.

Особливо це актуально для бензинових моделей, де поєднуються акустичні коливання від двигуна внутрішнього згорання, різального механізму та трансмісії, а також механічні вібрації, що передаються через рукоятки та корпус.

Шум, який створює газонокосарка під час роботи, зазвичай перебуває в діапазоні 85–100 дБА на робочому місці оператора. За гігієнічними нормами ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» тривала дія шуму понад 80 дБА вважається шкідливою, а рівні вище 85 дБА потребують обов'язкового застосування засобів індивідуального захисту слуху. Для короточасних робіт допускається вплив шуму до 90 дБА, однак за умови обмеження часу роботи та перерв для відновлення. Перевищення рівня 100 дБА є небезпечним навіть при нетривалому впливі та може призводити до поступового зниження слуху, головного болю й підвищеної втоми.

Вібраційне навантаження при роботі з газонокосаркою має локальний характер і передається переважно на кисті рук через органи керування. Допустимі гігієнічні норми локальної вібрації регламентуються ДСН 3.3.6.039-99. «Державні санітарні

норми загальної та локальної вібрації». В цьому документі визначено середньоквадратичне значення віброприскорення, яке для восьмигодинної зміни не повинно перевищувати $2,0\text{--}2,5\text{ м/с}^2$ залежно від частотного діапазону. Для газонокосарок характерні значення, близькі до гранично допустимих, особливо за умови зношених підшипників, дисбалансу ножа або нерівної поверхні ґрунту. Тривалий вплив вібрації може викликати порушення кровообігу в пальцях, оніміння, зниження чутливості та симптоми вібраційної хвороби.

Заходи захисту від шуму та вібрації при експлуатації газонокосарок реалізуються на технічному, організаційному та індивідуальному рівнях. З технічної точки зору зниження шуму досягається використанням сучасних електричних або акумуляторних моделей, які мають значно нижчий рівень звукового тиску порівняно з бензиновими аналогами, а також регулярним технічним обслуговуванням, балансуванням ріжучого ножа та справністю глушника. Вібраційне навантаження зменшується за рахунок антивібраційних вставок у рукоятках, еластичних кріплень двигуна та використання якісних підшипникових вузлів.

Організаційні заходи полягають у регламентуванні тривалості безперервної роботи з газонокосаркою, впровадженні перерв через кожні 30–40 хвилин роботи та чергуванні видів діяльності. Особливу увагу слід приділяти вибору часу виконання робіт, оскільки робота в ранкові або вечірні години знижує негативний вплив шуму на навколишнє середовище та оточуючих осіб.

Індивідуальний захист оператора передбачає застосування протишумових навушників або вкладишів, здатних знизити рівень шуму на 15–30 дБА, а також використання рукавиць з антивібраційними властивостями. Додатково рекомендується правильна робоча поза та рівномірне навантаження на обидві руки, що зменшує локальне перевантаження та втому.

Таким чином, дотримання гігієнічних і допустимих норм шуму та вібрації при роботі з газонокосарками є необхідною умовою збереження здоров'я оператора. Поєднання технічно обґрунтованого вибору обладнання, раціональної організації праці та застосування засобів індивідуального захисту дозволяє суттєво знизити ризики професійних порушень і підвищити рівень безпеки життєдіяльності.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності функціонування автономних роботизованих газонокосарок шляхом розроблення та імплементації оптимізованих алгоритмів планування траєкторії.

Проведений порівняльний аналіз, показав, що хаотичні алгоритми (Random Walk) є енергетично неефективними, оскільки витрачають у 3–5 разів більше часу для досягнення 95% покриття площі.

Встановлено, що прості детерміновані методи, такі як спіральний рух, ефективні лише на відкритих ділянках, тоді як для складних середовищ з перешкодами оптимальним є метод бустрофедонної клітинної декомпозиції (BCD). Цей метод дозволяє розділити складний простір на прості підзони, що найкраще відповідає кінематиці роботів із диференціальним приводом.

Для вдосконалення системи навігації розроблено оптимізований алгоритм BCD, який використовує ітераційне обертання карти (від 0 до 180 градусів) для пошуку найкращого напрямку декомпозиції.

Запропоновано використання спеціальних цільових функцій, які враховують площу та ширину комірок для мінімізації кількості поворотів і холостих пробігів. Це дозволяє алгоритму адаптуватися до специфічної геометрії ділянки, уникаючи неефективних рішень, властивих базовим методам планування.

Спроектовано та реалізовано роботизовану газонокосарку на базі дворівневої архітектури керування, де мікрокомп'ютер Raspberry Pi 3 виконує навігаційні задачі верхнього рівня, а мікроконтролер Arduino Mega 2560 керує двигунами та отримує і опрацьовує інформацію з сенсорів, що дозволяє запобігати випадковим зіткненням або роботі в несприятливих погодних умовах.

Для забезпечення високоточного позиціювання (похибка 1–2 см) інтегровано систему навігації Marvelmind разом із блоком інерціальних датчиків (для стабілізації курсу). Така конфігурація дозволяє роботу стабільно функціонувати в умовах

реальних присадибних ділянок, оминаючи перешкоди за допомогою ультразвукових сенсорів.

Результати моделювання підтвердили, що запропонований оптимізований алгоритм дозволяє скоротити довжину холостих переміщень («транспортну довжину») при гонтовому методі у 2–3 рази порівняно з базовим BCD на картах складної форми. Це доводить, що адаптація кута нахилу траєкторії до топографії перешкод суттєво підвищує продуктивність системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Програма та методичні рекомендації з проходження практики за тематикою кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ. 2024. 45 с.
2. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль. 2024. 44 с.
3. Zhang Y., Wang J., Li X. Review of outdoor mobile robot localization technologies. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 186734–186748.
4. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. 2nd ed. Cham: Springer, 2021.
5. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3rd ed. Boston: Artech House, 2020.
6. Takasu T., Yasuda A. Development of RTK-GNSS positioning algorithms. GPS Solutions. 2021. Vol. 25, No. 2.
7. Li B., Shen Y. Performance degradation of RTK in urban environments. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 14.
8. Woodman O. An introduction to inertial navigation. University of Cambridge Technical Report. 2020.
9. Cadena C. et al. Past, present, and future of SLAM. IEEE Transactions on Robotics. 2021. Vol. 37, No. 6.
10. Zhang L., Scaramuzza D. Visual SLAM in outdoor environments. Robotics and Autonomous Systems. 2023. Vol. 162.
11. Silva B., Hancke G. Local positioning systems: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 22, No. 2.
12. Liu H., Wang Z. Ultrasonic localization for mobile robots. Sensors. 2021. Vol. 21, No. 9.

13. Faragher R., Harle R. RSSI-based localization limitations. *IEEE Communications Magazine*. 2020. Vol. 58, No. 4.
14. Alarifi A. et al. Ultra wideband indoor positioning technologies. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 12.
15. Marvelmind Robotics. High-precision indoor positioning system: Technical overview. *Robotics Journal*. 2022. Vol. 11, No. 3.
16. Ivanov A., Petrov D. Application of Marvelmind system for mobile robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2023. Vol. 108.
17. Kim S., Park J. Energy-efficient localization for service robots. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 5.
18. Novak P., Dvorak T. Sensor fusion of UWB and IMU for autonomous robots. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, No. 7.
19. Олійник В. В., Ткачук А. П. "Аналіз ефективності простих поведінкових алгоритмів для мобільних роботів-прибиральників". *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*, № 2 (80), 2019. С. 56-62.
20. Smith, J., & Doe, R. "Efficiency constraints of random walk algorithms in autonomous lawn mowing tasks." *Journal of Robotics and Automation*, vol. 15, no. 3, 2020, pp. 45-52.
21. Гаврилюк М. С., Коваль О. І. "Проблеми локальних стратегій навігації в задачах повного покриття площі". *Робототехніка та технічна кібернетика*, № 4, 2021. С. 112-118.
22. Іванов І. І., Петренко П. П. "Огляд та порівняльний аналіз методів планування траєкторії на основі сіткових моделей". *Штучний інтелект*, № 1, 2022. С. 23-35.
23. Gonzalez, E., Alvarez, D., & Gomez, M. "Critical analysis of grid-based vs. cellular decomposition techniques for coverage path planning in non-convex environments." *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 136, 2021, 103702.
24. Choset, H., & Pignon, P. "Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition." In *Proceedings of International Conference on Field and Service Robotics (FSR)*, Canberra, Australia, 1997, pp. 203-209.

25. Acar, E. U., Choset, H., Zhang, Y., & Schervish, M. "Path planning for robotic demining: Robust sensor-based coverage of unstructured environments and probabilistic methods." *The International Journal of Robotics Research*, vol. 22, no. 7-8, 2003, pp. 441-466.

26. Luo, C., & Yang, S. X. "A bioinspired neural network for real-time concurrent map building and complete coverage robot navigation in unknown environments." *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 29, no. 4, 2018, pp. 1268-1275.

27. Smith, J., & Doe, R. "Efficiency comparison of random walk vs. systematic path planning for autonomous lawn mowers." *Journal of Field Robotics*, vol. 35, no. 4, 2018, pp. 512-525.

28. Гаврилюк М. С., Петренко О. В. "Аналіз локальних стратегій покриття площі мобільними роботами: спіральні та зигзагоподібні патерни". *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія: Приладобудування, вип. 58, 2019, с. 95-102.

29. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2nd ed., MIT Press, 2011. (Розділ про кінематику диференційного приводу та планування руху).

30. Choset, H. "Coverage for robotics – A survey of recent results." *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, vol. 31, 2001, pp. 113–126.

31. Варавін А.В., Лецишин Ю.З., Чайковський А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Дослідження і проєктування комп'ютерних систем та мереж» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 32 с.

32. Чайковський А.В., Жаровський Р.О., Лецишин Ю.З. Конспект лекцій з дисципліни «Дослідження і проєктування комп'ютерних систем та мереж» для студентів спеціальності 123 - Комп'ютерна інженерія. Тернопіль, 2021. 148 с.

33. Чайковський А. В., Жаровський Р. О., Лецишин Ю. З. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Дослідження і проєктування комп'ютерних систем та мереж» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої

освіти спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль, 2021. 94 с.

34. Стецько В. Р., Приймак М.В., Жаровський Р.О. Методика і алгоритм розрахунку траєкторії руху роботизованої газонокосарки. Матеріали XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (17-18 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ. 2025. 155-156 с.

35. Стецько В. Р., Приймак М.В., Жаровський Р.О. Методи і засоби високоточного позиціонування на прикладі роботизованої газонокосарки. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції молодих учнів та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ. 2025. 254-255 с.

36. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.

37. Стручок В.С. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях». Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 156 с.

38. Стручок В.С. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. Частина «цивільна безпека»». Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 156 с.

Додаток А.
Тези конференцій

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Краківський економічний університет (Польща)
Вроцлавський економічний університет (Польща)
Університет «Опольська Політехніка» (Польща)
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Вінницький національний аграрний університет
Львівський національний університет ім. І. Франка
Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області
Наукове товариство ім. Шевченка
Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти
Сумський державний педагогічний університет
Запорізький національний університет

АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збірник

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної
конференції молодих учених та студентів**
11-12 грудня 2025 року



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

75.	В.Степанко, М. Приймак, Р. Жаровський МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ РОБОТИЗОВАНОЇ ГАЗОНОКОСАРКИ	349
76.	Д.П. Стухляк, Д.М. Ярошук РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВОЛОКНА ЗА ЗОБРАЖЕННЯМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО АНАЛІЗУ	351
77.	П.Л. Стухляк, А.О. Петров РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СКЛАДАННЯ КОНТАКТНОГО РОЗ'ЄМУ PIN HEADER	353
78.	О.І. Суховий ВИКОРИСТАННЯ АНСАМБЛЮ НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ РОЗМІТКИ ДАНИХ ДЛЯ НАВЧАННЯ	355
79.	А. Такварелі, Ю. Лещинин ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА І СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	357
80.	А.М.Фаберський СТЕГАНОГРАФІЯ ЗОБРАЖЕНЬ	358
81.	В.Я. Фриз, Р.Б. Трембач, В.В. Левицький АЛГОРИТМ СЦЕНАРНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПРИГОТУВАННЯ ПИВА	359
82.	С.Б. Фундигус ОПТИМІЗАЦІЯ СЕГМЕНТАЦІЇ КОРОЗІЙНИХ ЗОН НА ФЛАНЦЕВИХ З'ЄДНАННЯХ ТРУБОПРОВІДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДИФІКОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ U-NET З АДАПТИВНИМ МЕХАНІЗМОМ УВАГИ	361
83.	Г.П. Химич, О.М. Опашний, Р.І. Кондра ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВІДНИХ НВЧ СТРУКТУР З НЕОДНОРІДНОСТЯМИ У ХВИЛЕВОДАХ	362
84.	О.В. Цвірла, І. В. Мудрий, Н. С. Луцк ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ ВРАЗЛИВИХ ХЕШ-СТРИЧОК У КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ	364
85.	І. М. Чепіль, В.І. Тимошук МОДЕЛЬ НАДАННЯ МЕРЕЖЕВИХ СЕРВІСІВ У SDN З ПІДТРИМКОЮ BRING YOUR OWN CONTROL	365
86.	В.О. Чикета, В.І. Дунець АДАПТИВНІ СТРАТЕГІЇ РУХУ В LiDAR-СИСТЕМІ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ БІЛА	367
87.	Т.О. Члак АДАПТИВНІ ФІЛЬТРИ ТА НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ КОРИСНОГО СИГНАЛУ З ШУМУ В РАДІОКАНАЛАХ	369
88.	Я.М. Чорний ПРИНЦИПИ РОБОТИ АЛГОРИТМУ PROOF OF RANK	370
89.	Р.І. Шмирко ТЕХНОЛОГІЯ Li-Fi: ПЕРЕДАЧА ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СВІТЛА	373
90.	Д.А. Шула НЕЙРОІНТЕРФЕЙСИ ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ	374

4. Park, S. J., et al. (2024). Food quality assessment using chemoresistive gas sensors. *Food & Function*, 15(3), 1234–1256.
5. Rashvand, M., Senge, B., et al. (2025). Artificial intelligence for prediction of shelf-life of various food products. *Trends in Food Science & Technology*, 153, 104–119.
6. Sanislav, T., Miclea, L., et al. (2025). A Comprehensive Review on Sensor-Based Electronic Nose for Food Quality and Safety. *Sensors*, 25(14), 4437.

УДК 004.89

В.Стецько, здобувач вищої освіти, М. Приймак, докт.техн. наук, проф., Р. Жаровський, канд. техн. наук, доц.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ РОБОТИЗОВАНОЇ ГАЗОНОКОСАРКИ

V. Stetsko, higher education applicant, M. Priymak, Dr.Sc, Prof., R. Zharovskiy, PhD., Associate Prof.

METHODS AND MEANS OF HIGH-PRECISION POSITIONING ON THE EXAMPLE OF A ROBOTIC LAWN MOWER

Роботизовані газонокосарки дедалі частіше застосовуються для автоматизованого догляду за приватними та промисловими ділянками. Ефективність їхньої роботи визначається точністю позиціонування, оскільки від неї залежить якість покриття території, безпека руху та енергоефективність використання ресурсів [2]. У недорогих моделях поширені системи орієнтації на основі обмежувального кабелю або випадкового руху, що спричиняє надмірні повторні проходи, пропуски окремих ділянок та втрату до 40 % продуктивного часу. Саме тому зростає потреба у впровадженні нових, ефективних систем навігації, які здатні поєднувати різні технології та працювати в неоднорідних умовах.

Аналіз сучасних моделей Husqvarna, Worx та Robomow показує, що їх системи позиціонування забезпечують точність у межах 20–50 см, що, подекуди, є недостатнім для автоматичного руху у складних зонах, вузьких проходах та поблизу перешкод. На основі цього визначено потребу у системах із точністю у межах 10 см.

Метою роботи є обґрунтування архітектури гібридної системи позиціонування роботизованої газонокосарки з використанням сучасних зовнішніх сенсорів, інерціальних модулів та алгоритмів обробки даних.

У сучасній практиці для навігації мобільних роботів застосовують GNSS, RTK-GNSS, ультраширокопосмугові (UWB) системи, ультразвукові маяки, інерційну навігацію та візуальну локалізацію.

GNSS у стандартному режимі забезпечує точність 1–6 м, але її значно знижує часткове перекриття сигналу, а в умовах присадибних ділянок під кронами дерев втрачається до 40 % супутникової видимості. Режим RTK підвищує точність до 2–5 см за наявності стабільного радіоканалу, хоча його затримка становить у середньому 50–150 мс, частота оновлення — 1–10 Гц, а енергоспоживання модулів досягає 250 мВт, що ускладнює застосування на малих автономних роботах [1].

Альтернативою є UWB-навігація, яка працює у діапазоні 3.1–10.6 ГГц із шириною спектра понад 500 МГц та забезпечує високу стійкість до завад. Завдяки широкопосмуговому сигналу позиціонування досягає точності 2–10 см із радіусом дії від 30 до 150 м. Частота оновлення координат становить 20–100 Гц, затримка — 2–10 мс, а

енергоспоживання міток коливається від 10 до 50 мВт, що робить технологію придатною для малогабаритних мобільних платформ на зразок роботизованих газонокосарок [2]. Ультразвукові системи позиціонування, зокрема Marvelmind, працюють у діапазоні 19–31 кГц і забезпечують ще вищу точність на рівні 1–2 см. Частота оновлення їх координат становить 8–45 Гц, зона покриття сягає 400–1000 м², затримка системи — 10–40 мс. Водночас такі системи є чутливими до сильного вітру і сторонніх акустичних перешкод, проте в умовах невеликих ділянок вони демонструють стабільну роботу та можуть розглядатися як ефективний інструмент автономної навігації [3].

Використання інерційних вимірювальних модулів (IMU) дозволяє підвищити стабільність руху завдяки високій частоті оновлення (100–1000 Гц) та мінімальній затримці (<1 мс). Проте у IMU присутній інерційний дрейф, який без корекції накопичує похибку до 1–10 см щосекунди, тому такі модулі використовуються виключно у складі систем з фоновією корекцією. Дослідження [4] демонструють, що поєднання IMU з UWB дає змогу компенсувати дрейф і забезпечує стабільну точність не гірше ніж 5–7 см, навіть у випадку тимчасових втрат зовнішніх сигналів.

Візуальна локалізація (Visual SLAM) забезпечує точність у межах 2–15 см залежно від умов освітлення та текстури поверхні. Однак її використання на роботизованих газонокосарках обмежується високими обчислювальними вимогами, необхідністю стабільних умов освітленості та чутливістю до рослинності, яка може змінюватися протягом дня. Незважаючи на це, сучасні дослідження [5] підкреслюють перспективність комбінування візуальної локалізації з інерційним та ультраширококутовим позиціонуванням.

Таким чином, проведений аналіз засвідчує, що найбільш перспективним рішенням для автономних газонокосарок є використання гібридної системи позиціонування, у якій UWB або ультразвукові маяки забезпечують базову просторову точність, IMU стабілізує навігацію під час руху, а оптичні методи забезпечують додаткову корекцію у складних зонах. Поєднання цих технологій дозволяє досягти просторової точності не гіршої за 10 см, підвищує стійкість роботи у змінних зовнішніх умовах та забезпечує покращення енергоефективності за рахунок оптимізації траєкторії руху.

Література

1. Chen Y., Wang H. Hybrid Localization Approaches for Mobile Robots. *Journal of Intelligent Systems*, 2021.
2. Li X., Ma H. Ultra-Wideband Positioning for Mobile Robotics: A Survey. *Sensors*, 2020.
3. Marvelmind Robotics. Outdoor/Indoor Navigation System: Technical Documentation, 2023.
4. Ramezani M., Cetin E. Fusion of UWB and IMU for Robust Robot Localization. *IEEE Sensors Journal*, 2022.
5. Nguyen T., Park S. Comparative Analysis of Modern Outdoor Robot Localization Systems. *Electronics*, 2022.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

МАТЕРІАЛИ

ХІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

ТЕРНОПІЛЬ
2025

SYSTEMS

А. Рожик, Р. Жаровський

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

A. Rozhyk, R. Zharovskyi

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE ADAPTIVE ACCESS CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC

144

В. Руснак, Н. Стадник

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗКРОЮ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ У МЕБЛЕВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

V. Rusnak, N. Stadnyk

INFORMATION TECHNOLOGY OF ADAPTIVE OPTIMIZATION OF SHEET MATERIAL CUTTING IN FURNITURE PRODUCTION

147

Р. Савченко, С. Шестопалов

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ УПРАВЛІННЯ ЧЕРГАМИ НА МАРШРУТИЗАТОРАХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

R. Savchenko, S. Shestopalov

OVERVIEW OF MODERN APPROACHES TO QUEUE MANAGEMENT ON ROUTERS IN INFORMATION AND COMMUNICATION NETWORKS

148

В. Семанюк, Є. Тиш

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО МОНІТОРИНГУ ЛОКАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

V. Semaniuk, Ye. Tysh

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO LOCAL COMPUTER NETWORK MONITORING AND EVALUATION OF THEIR EFFICIENCY

149

В. Семанюк, Є. Тиш

СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ЛОКАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ТА ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЇХНЮ ПРОДУКТИВНІСТЬ

V. Semaniuk, Ye. Tysh

STRUCTURAL FEATURES OF LOCAL COMPUTER NETWORKS AND FACTORS AFFECTING THEIR PERFORMANCE

150

Ю. Сеник, Я. Литвиненко

ОГЛЯД МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ДЛЯ ЗАДАЧІ КОНТРОЛЮ КЛІМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Y. Senyk, I. Lytvynenko

A REVIEW OF MICROCONTROLLERS FOR CLIMATE CONTROL

151

А. Спесівцев

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ РЕЙТИНГУ МЕРЕЖНИХ ПРИСТРОЇВ З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕКИ

A. Spesivtsev

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR RATING NETWORK DEVICES TAKING INTO ACCOUNT SECURITY PARAMETERS

153

В. Стетсько, М. Приймак, Р. Жаровський

МЕТОДИКА І АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ РОБОТИЗОВАНОЇ ГАЗОНОКОСАРКИ

V. Stetsko, M. Priymak, R. Zharovskyi

METHODOLOGY AND ALGORITHM FOR CALCULATING THE TRAJECTORY OF A ROBOTIC LAWN MOWER

154

О. Цвірла, І. Мудрий, Н. Луцик

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ КРИПТОГРАФІЧНОЇ ЯКОСТІ ХЕШ-СТРІЧОК У ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

O. Tsvirla, I. Mudryi, N. Lutsyk

INTELLIGENT METHODS FOR ASSESSING THE CRYPTOGRAPHIC QUALITY OF HASH STRINGS IN INFORMATION SYSTEMS

156

УДК 004.89

В. Стецько; М. Приймак, д. т. н., проф.; Р. Жаровський, к. т. н.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

МЕТОДИКА І АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ РОБОТИЗОВАНОЇ
ГАЗОНОКОСАРКИ

UDC 004.89

V. Stetsko; M. Priymak, Dr., Prof.; R. Zharovskyi, PhD.

METHODOLOGY AND ALGORITHM FOR CALCULATING THE TRAJECTORY OF A
ROBOTIC LAWN MOWER

Побудова оптимальної траєкторії автономної газонокосарки є ключовою проблемою робототехнічних систем обслуговування територій. Аналіз сучасних підходів показує, що для малогабаритних роботів найбільш практичними є методи, засновані на локальному позиціонуванні та геометричному описі робочої зони [1]. Для забезпечення рівномірного скошування необхідно точно визначати координати периметра, обчислювати кути повороту та формувати внутрішні лінії проходу.

Алгоритм роботи розробленої системи управління наступний [2]:

1. Визначається периметр ділянки, на якій планується скошування газонної трави;
2. Під час руху робота система позиціонування відстежує координати точок по периметру із необхідним кроком;
3. Система позиціонування фіксує координати в програмі у вигляді масиву даних.

Першим етапом визначається периметр ділянки у ручному режимі за допомогою телеметрії. Система позиціонування формує масив координат

$$P = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\},$$

що описує замкнений контур ділянки (рис. 1).

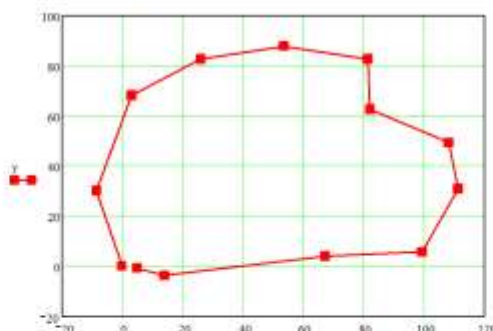


Рисунок 1. Графік координат периметра зовнішнього контуру ділянки

Для розрахунку кута повороту будемо використовувати формулу для обчислення косинуса кута між двома векторами на площині. Потім необхідно здійснити розрахунок напрямку повороту, для цього необхідно визначити визначник матриці різниць між координатами [3].

Наступним етапом є визначення центру фігури утвореної наведеної на рис. 1. Це необхідно зробити для подальшого рівномірного заповнення всієї площі поля для скошування з врахуванням ширини захоплення газонокосарки.

В результаті отримано значення координат точок траєкторії руху в вигляді матриці значень (рис. 2).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X _{track} =	0	-8.4	3.1	25.9	53.4	81.2	82	108.2	111.4	99.3	67.3	14	5
	1	13.4	7.1	15.7	32.8	53.4	74.3	74.9	94.5	96.9	87.9	63.9	23.9
	2	26.8	22.6	28.3	39.7	53.4	67.4	67.8	80.9	82.5	79.4	60.4	33.8
	3	40.1	38	40.9	46.6	53.5	60.5	60.6	67.2	68	65	57	43.6

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Y _{track} =	0	0	30	68.1	82.7	87.9	82.7	62.7	49.4	30.8	5.5	4	-4
	1	10.4	32.9	61.5	72.4	76.3	72.4	57.4	47.4	33.5	14.5	13.4	7.4
	2	20.8	35.8	54.8	62.1	64.7	62.1	52.1	45.5	38.2	23.5	22.8	18.8
	3	31.2	38.7	48.2	51.9	53.2	51.9	46.9	43.5	38.9	32.6	32.2	30.2

Рисунок 2. Матриці координат точок траєкторії руху

У результаті формується графік (рис. 3), на якому видно набір паралельних траєкторій різного радіуса. Частина траєкторій має нерівномірні відстані між лініями, що призводить до часткового повторного проходження.

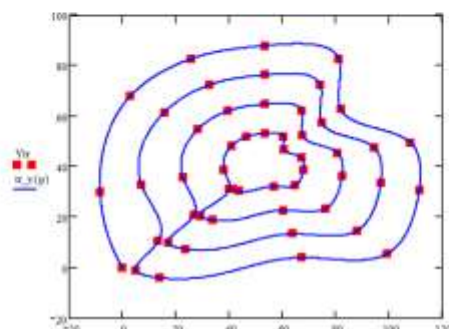


Рисунок 3. Графік з опорними точками траєкторії руху газонокосарки

Оцінку продуктивності можна зробити після порівняння загальної площі фігури поля та площі, яка обробилася б під час руху газонокосарки без перекриття, але з урахуванням довжини пройденого шляху. В нашому випадку значення коефіцієнту ефективності було 0.784. Такий показник був отриманий оскільки частково було подвійне проходження в верхній правій частині. Збільшити даний показник можна шляхом корекції центру ділянки або зміною траєкторії руху.

Література

1. Chandra R., Sawitri D. R. Control Design and Implementation of Autonomous Robotic Lawnmower Trajectory Tracking Using Feedback Linearization Methodologies. IJGSP. 2024. Vol. 16, no. 1, p. 1–13.
2. Vieri M., Sarri D., Graziani M. Tracking Long-Distance Systematic Trajectories of Different Patterns to Improve the Quality of Autonomous Mowing. Agronomy. 2025. Vol. 15, no. 1, p. 2473. URL: www.mdpi.com (дата звернення: 10.12.2025).
3. Zhang X., Tian M., Jiang Z. Application of Path Planning and Tracking Control Technology in Mowing Robots. Agriculture. 2024. Vol. 14, no. 1, p. 129.