

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(позначення документа)

Створення системи комунікації та взаємодії групи мобільних роботів

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи СТМм-22-2
Артур КАСПАР'ЯНЦ

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Володимир КАРТАШОВ

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Володимир КАРТАШОВ
(прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма "Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа"

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Каспар'янц Артуру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Створення системи комунікації та взаємодії групи мобільних роботів

затверджена наказом по університету від " 20 " 11 2023 р. № 1371 СТ

2. Термін подання студентом роботи 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

1. Розробка моделі передачі даних для роботизованого рою.

2. Розробка системи моделювання аналізу та передачі даних.

3. Оптимізація передачі даних для невеликої кількості роботів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

ВСТУП

1. Аналітичний огляд існуючих багатороботних систем (MRS)

2. Обмін даними для роботизованої групи

3. Впровадження зворотного зв'язку в групі мобільних роботів

4. Моделювання та експерименти

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

ДОДАТКИ

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій:

1. Постановка задачі; 2. Надихаючі моделі роботизовано поведінки; 3. Завдання роботизованих роїв; 4. Роботизовані проекти Swarm; 5. Обмін даними для роботизованої групи; 6. Формування охоплюючого дерева для роєвої робототехніки; 7. Аналіз зворотнього зв'язку в групі мобільних роботів; 8. Базовий сценарій поведінки роботизованої групи; 9. Структури моделювання; 10. Висновки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналітичний огляд існуючих багатороботних систем (MRS)	20.11.23–28.11.23	
2.	Обмін даними для роботизованої групи	21.11.23–28.11.23	
3.	Впровадження зворотного зв'язку в групі мобільних роботів	23.11.23– 02.12.23	
4.	Моделювання та експерименти	01.12.23–15.12.23	
5.	Графічна частина роботи	15.12.23–20.12.23	
6.	Перевірка керівником	20.12.23–24.12.23	
7.	Перевірка на академічний плагіат	24.12.23–26.12.23	
8.	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	27.12.23–31.12.23	

Дата видачі завдання 20.11.2023 р.

Студент _____ Артур КАСПАР'ЯНЦ
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Володимир КАРТАШОВ
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи має: 74 с., 30 рис., 1 табл., 2 додатки, 51 джерело.

МОБІЛЬНІ РОБОТИ, НАВІГАЦІЯ, ЛОКАЛЬНА НАВІГАЦІЯ, ОПТИЧНІ СИСТЕМИ, ЗОРОВІ ДАНІ, МІСЬКЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ПЕРЕШКОДИ

Об'єкт дослідження – система комунікації групи мобільних роботів.

Предмет дослідження – методи комунікації та взаємодії групи мобільних роботів.

Мета кваліфікаційної роботи – створення системи комунікації та взаємодії групи мобільних роботів.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, статистична обробка даних, аналіз геометрії антропогенних сцен.

Взаємодія груп робототехніки в густонаселеному просторі є однією з головних проблем управління мобільною робототехнікою. У даній роботі описано основний набір задач, які вирішуються для моделювання групової робототехнічної поведінки при розподіленому пошуку об'єкта (цілі) з паралельним відображенням. Навігаційна схема використовує оригінальну авторську систему технічного зору (TVS), засновану на принципах динамічної тріангуляції. Використовуючи необроблені дані TVS, були реалізовані правила нечіткої логіки стабілізації роздільної здатності для оптимізації обміну даними. Було модифіковано модель динамічної комунікаційної мережі та реалізовано передачу інформації методом зворотного зв'язку для обміну даними в центрі роботизованої групи. Для створення безперервної та енергозберігаючої траєкторії автори пропонують використовувати двоетапний метод постобробки планування траєкторії з

полігональною апроксимацією. Поєднання нашого колективного сканування TVS і модифікованого методу створення мережі динамічного обміну даними з модифікацією відомих методів планування маршруту може покращити планування руху та роботизовану навігацію на невідомій густонаселеній місцевості.

ABSTRACT

The explanatory note of the qualification work includes: 74 pages, 25 figures, 1 tables, 5 appendices, 51 sources.

MOBILE ROBOTS, NAVIGATION, LOCAL NAVIGATION, OPTICAL SYSTEMS, VISUAL DATA, URBAN ENVIRONMENT, OBSTACLES

The object of the research is the communication system of a group of mobile robots.

The subject of the research is the methods of communication and interaction of a group of mobile robots.

The goal of the qualification work is to create a system of communication and interaction for a group of mobile robots.

Research methods include theoretical analysis, numerical calculations, mathematical modeling, statistical data processing, analysis of the geometry of anthropogenic scenes.

The interaction of groups of robotics in densely populated spaces is one of the main problems in managing mobile robotics. This work describes the main set of tasks addressed to model group robotic behavior in distributed object (target) search with parallel mapping. The navigation scheme uses an original author's technical vision system (TVS) based on the principles of dynamic triangulation. Using raw TVS data, fuzzy logic rules for resolution stabilization were implemented to optimize data exchange. The model of a dynamic communication network was modified, and the information exchange using feedback was implemented for data exchange at the center of the robotic group. To create a continuous and energy-efficient trajectory, the authors propose using a two-stage post-processing method for trajectory planning with polygonal approximation. Combining our collective TVS scanning and a modified method of creating a

dynamic data exchange network with the modification of known route planning methods can improve motion planning and robotic navigation in unfamiliar densely populated areas.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

MRS – багатороботна система;

NFC - зв'язок на ближній відстані;

PIF – розповсюдження інформації зі зворотним зв'язком;

RG – роботизована група;

SLAM - одночастна локалізація та картографування;

SPB - мостове з'єднання найкоротшим шляхом;

STP - протокол остового дерева;

TVS - система технічного зору;

WiFi - бездротова локальна мережа;

БПЛА - безпілотний літальний апарат;

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	8
Вступ.....	10
1 Аналітичний огляд існуючих багатороботних систем (MRS).....	12
1.1 Надихаючі моделі роботизованої поведінки.....	13
1.2 Завдання впровадження роботизованого рою.....	16
1.3 Роботизовані проекти Swarm	18
1.4 Висновки до розділу	22
2 Обмін даними для роботизованої групи	24
2.1 Формування охоплюючого дерева для роєвої робототехніки.....	27
2.2 Спілкування на основі лідера.....	30
2.3 Висновки до розділу	34
3 Впровадження зворотного зв'язку в групі мобільних роботів	35
3.1 Аналіз зворотнього зв'язку в групі мобільних роботів	35
3.2 Результати впровадження.....	39
4 Моделювання та експерименти	46
4.1 Моделювання структури системи та групової поведінки.....	46
4.1.1 Базовий сценарій поведінки роботизованої групи	46
4.1.2 Структури моделювання	51
4.2 Аналіз характеристик роботизованої системи.....	54
4.3 Вплив обміну даними на планування шляху	55
4.4 Висновки до розділу	62
Висновки	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	66
Додатки.....	75
Додаток А.....	76
Додаток Б	84

ВСТУП

Загальною метою даної кваліфікаційної роботи є створення системи комунікації, взаємодії та передачі даних для мобільної однорідної роботизованої групи. Для цього використовується конфігурація динамічного мережевого графіка та 3D-лазерна система технічного бачення для створення тривимірної хмари точок середовища. Група роботів оснащена 3D лазерною системою технічного зору, яка під час руху має завдання відвідувати всі цікаві точки та створювати тривимірну хмару точок навколишнього середовища.

Конкретні цілі:

1. Розробка моделі передачі даних для роботизованої групи;
2. Розробка системи моделювання аналізу передачі даних;
3. Оптимізація передачі даних для невеликої кількості роботів;
4. Оцінка впливу передачі даних на роботизоване групове планування шляху;
5. Аналіз ефективності.

Система формування динамічної мережі, заснована на методі зміни лідера, здатна покращити обмін даними всередині роботизованої групи та покращити навігацію шляхом обміну раніше виявленими перешкодами іншими роботами в групі.

Цю методологію можна використовувати в поведінці мобільного робота та для створення навігаційної системи, яка дозволяє роботу вільно пересуватися в оточенні перешкод шляхом динамічної адаптації шляху відповідно до виявлених змін у середовищі.

Динамічна система створення мережі, заснована на методі зміни лідера, має потенціал для покращення обміну даними всередині роботизованої групи та розподілу результуючих функцій карти (перешкоди, виявлені інтегрованою системою технічного зору). Цю методологію можна

застосувати в мобільних роботах для покращення роботизованої навігації групи/рою. Отримавши дані від системи технічного зору, робот оновлює свою карту та надсилає інформацію іншим роботам.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ БАГАТОРОБОТНИХ СИСТЕМ (MRS)

Загалом, багатороботну систему можна охарактеризувати як набір роботів, що працюють в одному середовищі. Однак роботизовані системи можуть варіюватися від простих датчиків, що збирають і обробляють дані, до складних людиноподібних машин, здатних взаємодіяти з навколишнім середовищем досить складними способами [1-3]. Крім того, нелегко дати визначення рівня автономності, необхідного для робота, щоб вважатися суб'єктом, що діє в навколишньому середовищі, на відміну від простої машини, яка надає послуги оператору (принтер або навіть вимикач світла). У той час як ми обговорюємо кілька різних налаштувань Multi-Robot Systems, ми зосереджуємося насамперед на досить складних мобільних платформах, оснащених складними датчиками та приводами, здатними виконувати складні завдання. Ми можемо далі охарактеризувати підмножину MRS, яка розглядається в цій роботі, розглядаючи три основні аспекти:

- обґрунтування конструкції MRS;
- основні функціональні можливості та технології (апаратні та програмні), що використовуються при розробці MRS;
- завдання, які мають виконувати роботи, і передбачувані області застосування.

Вираз «ройовий інтелект», який зараз широко використовується в області роєвої робототехніки, відноситься до вищих можливостей рою агентів порівняно з його окремими особинами. Локальні події, викликані членами рою під час виконання завдання, перетворюються на глобальну поведінку, яка часто виходить за межі індивідуальних можливостей, аж до того, що багато колективних завдань можуть успішно виконуватися роботами, які явно не запрограмовані на виконання цих завдань. Кажуть, що

макроскопічна динаміка виникає внаслідок взаємодії членів рою між собою та з навколишнім середовищем.

В даний час використання ройових систем інтелекту можна знайти в дослідницьких роботах цивільних завдань, таких як автономні автомобілі, безпілотні літальні апарати (БПЛА) тощо. Завдяки науковим дослідженням, ройові інтелектуальні системи є поширеними та спеціалізуються на багатоцільових завданнях, які вимагають, щоб група роботів охоплювала різні типи невідомих середовищ (засмічена або пересічена місцевість, закриті приміщення тощо). У статтях такі роботизовані групи називають ройовою робототехнікою [4-6].

Ройова робототехніка є багатообіцяючою технологією, яку можна глибоко залучити в повсякденне життя людини. Як приклад автономних розумних транспортних засобів можна знайти у використанні Google [7], Tesla, Uber тощо. Зараз вони не такі доступні, але в майбутньому вони стануть значною частиною соціального життя від розумних міст і кампусів з автономними персональними транспортними засобами [8] до простого використання в розумних будівлях як двірників.

У цих питаннях є два основних завдання – навігація та зв'язок. Перший використовується для уникнення перешкод і переміщення до цільового місця, а другий – для того, щоб надати роботу інструмент для «розмови». Спілкування допомагає рою отримати більш повну та структуровану інформацію про оточення та покращити навігацію як окремих осіб.

У цьому розділі буде розглянуто рішення такої проблеми та розглянуто вплив обміну даними на планування шляху в умовах невідомого оточення.

1.1 Аналіз моделей роботизованої поведінки

Розвиток розподіленого штучного інтелекту [9-10] є предметом багатьох комплексних досліджень, що стосуються багатоагентних систем [11]. Моделі поведінки, які використовуються в таких системах, засновані на

аналізі групових дій соціальних тварин, таких як колонії бактерій, зграї риб, тварини, що пасуться, мурахи показано на (рис. 1.1). Індивіди мають примітивні здібності, але за наявності групи стають складною організацією з покращеними взаємодіями в середовищі, сигнальним зв'язком та обміном даними [12]. Природні рої базуються на простому наборі правил, які контролює кожен учасник. Завдяки спільним зусиллям однорідні групи можуть виконувати складні завдання.

Передача цього типу поведінки призвела до появи принципів ройового інтелекту ([13], [14]).



(а) Косяки риб



(б) Колонії мурах



(в) Пташині натовпи



(г) Люди

Рисунок 1.1 - Природні рої

Примати зазвичай демонструють складну взаємодію в групах, де вони можуть демонструвати різні соціальні взаємодії [15], впізнавати своїх

родичів [16], а деякі види можуть використовувати певні аспекти людської мови. Бактерії та їх колонії зазвичай функціонують як біоплівки, здатні спілкуватися між клітинами [17] і користуються перевагами розподілу обов'язків і колективного захисту [18]. Такий підхід надає колоніям бактерій вищу стійкість до антибактеріальних речовин порівняно з окремими бактеріями того ж виду.

Пташині зграї під час міграції можуть визначати місце призначення за чуттям і орієнтуватися за ознаками [19].

У мурах і бджіл, що живуть колоніями, спілкування в основному засноване на використанні феромонів [20]. Мурахи можуть планувати свій маршрут, залишаючи феромонний слід, який використовують інші мурахи, щоб знайти оптимальний маршрут [21]. Відповідно до концепції, запропонованої в [22], мурахи призначають завдання на основі їх попередньої ефективності пошуку їжі.

Коли кількість особин у групі збільшується, коник змінює тип руху з хаотичного на скоординований, щоб швидко передати спрямовану інформацію [23].

Зграї риб здатні уникати зіткнень під час плавання, аналізуючи рух своїх сусідів [24]. Зграї риб демонструють кращі навички пошуку їжі [25] та уникнення хижаків [26].

Люди, як показано в дослідженні Dyer et al. [27], можуть демонструвати групове лідерство без будь-якої вербальної комунікації чи інших явних сигналів. Така поведінка демонструє ієрархічну структуру з розподілом ролей. Зі зменшенням чисельності населення ускладнюється співпраця всередині групи, і кожна роль стає важливішою. У цьому випадку рій особин здатний ефективно вирішувати складні завдання, а окрема особина – ні.

1.2 Завдання впровадження роботизованого рою

Згідно з цим коротким аналізом природних роїв, роботизований рій може виконувати різноманітні завдання.

Нижче наведено кілька прикладів, відсортованих за рівнем складності в порядку спадання.

Навігація – робот повинен знайти місце розташування об'єкта, використовуючи свої сенсорні здібності та взаємодіючи з іншими роботами. У цьому випадку мета повинна досягатися окремим роботом (а не групою).

Пошук їжі - групі роботів необхідно знайти джерело їжі на основі вивчення поведінки мурах в колоніях. Проект [28] є важливим внеском у це завдання.

Мультифуражування є більш складним видом кормодобування. Роботизована група повинна знайти та зібрати різні типи об'єктів, а потім принести їх у певне місце для кожного типу об'єктів. Застосування цього завдання можна знайти на складах, під час рятувальних операцій, при очищенні небезпечних місць тощо.

Локалізація джерела запаху, розробка рішень для пошуку джерела запаху, яка описана в [29], робот використовує бінарний датчик запаху.

Колективне прийняття рішень — це дослідження різних аспектів колективного прийняття рішень, таких як [30] (прийняття рішень на основі моделі правила більшості), [31] (під час вибору бажаної роботи), [32] (у вибір місця), застосований для керування завданнями роя у зграї, створення шляхів, кластеризації тощо.

Кластеризація та сортування об'єктів подібні до завдань пошуку їжі, але метою є пошук і розміщення об'єктів поруч один з одним у середовищі.

Складання об'єкта – це завдання, яке вимагає фізичних зв'язків і взаємозв'язків між об'єктами для створення певної форми. У [33] приклад будівництва стіни за допомогою роботів, у [34] роботи намагалися з'ясувати, чи блок, який вони використовують, можна приєднати за допомогою

локального зв'язку, у [35] процес будівництва моделюється за допомогою блоків із прикріпленими світлодіодами.

Спільна маніпуляція – роботи повинні взаємодіяти з об'єктами, використовуючи прості правила поведінки, щоб уникнути централізованої координації. Прикладом можуть служити колонії мурашок.

Самозбірка — це завдання локальної взаємодії всередині групи, де роботам необхідно створити фізичний зв'язок один з одним. Приклади можна знайти в [36] (проект swarm-bots), автори [37] використовували s-bots із можливістю вирішувати, хто використовуватиме їх дескриптор для підключення до іншого s-bot. Самоскладання також відбувається під час уникнення вибоїн [38] і навігації в небезпечних зонах [39].

Взаємодія «людина-рій» — це завдання, спрямоване на підвищення продуктивності роєвої робототехніки шляхом обміну інформацією між людиною та роєм. Роль можна описати так: якщо людина має інформацію, яка може допомогти рою роботів досягти своєї мети, вона може поділитися нею, але це не можна інтерпретувати як пряме керування. У [40] автори запропонували метод, за допомогою якого ініціація прямого контролю над одним роботом може впливати на групу шляхом зміни поведінки робота. Подібний метод використовувався в [41], але з провідною системною реалізацією. Коллінг та ін. [42] запропонували методи перемикання поведінки робота та маніпулювання навколишнім середовищем, щоб змусити робота змінити свою поведінку.

Розгортання – група роботів автономно потрапляє в невідоме середовище, корисне для картографування.

Формування шляху - це процес формування колективного руху від точки до точки, мінімізуючи час, необхідний для досягнення пункту призначення. Ця роль зазвичай виконується в пошуку їжі та формуванні ланцюгів.

Координований рух використовується для координованого руху в спільному напрямку в модульних роботизованих конструкціях.

Зграя – це завдання утримання групи як компактної одиниці за допомогою сенсорних систем і зв'язку. Цей підхід береться з природної поведінки птахів, зграй риб тощо.

Морфогенез – роботам доручено створити певну форму, яка є продовженням самоскладання. Наприклад, роботи, прикріплені до конструкції, використовували світлодіоди для зв'язку, щоб повідомляти, як інші повинні бути прикріплені.

Агрегація — це завдання групування окремих роботів у спеціальному місці на основі спостережень за поведінкою видів тварин.

Розподіл завдань — це процес розподілу роботи всередині групи з метою підвищення ефективності виконання завдань.

Оцінка розміру групи — це завдання, яке використовується для координації рухів, самоскладання, морфогенезу тощо. Автори в [44] описують метод за умови використання розповсюдження інформації всередині групи за умови обмеженої можливості прямого спілкування.

Більш детальний огляд цих проблем та їх вирішення можна знайти в [45].

1.3 Роботизовані проекти Swarm

За останнє десятиліття відбулося збільшення можливостей малих і мобільних комп'ютерних пристроїв, що призвело до підвищеного інтересу до дослідницької теми робототехніки роїв. Проте багато проектів у цій сфері залишаються на стадії розробки або навіть моделювання. У 1980-х роках існували інші ініціативи щодо створення роботизованих груп, таких як SWARMS і ACTRESS. У цьому розділі ми розглянемо кілька існуючих проектів та їх концептуальний підхід.

Проект феромонної робототехніки на (рис. 1.2а) стартував у 2000 році. Основна концепція цього проекту полягає у використанні великої кількості маленьких роботів для вирішення різних завдань, досягаючи при цьому

ройової поведінки. У цьому проекті ідея феромонів була реалізована за допомогою маяків і датчиків, розміщених на роботах.

Проект iRobot Swarm зображено на (рис. 1.2б) розроблений Массачусетським технологічним інститутом (МТІ). Swarm включає понад 100 взаємодіючих роботів. Основною концепцією цього проекту є створення рішення для безпроблемної деградації роїв.

Навчальні роботи E-ruck на (рис. 1.2в) — це група компактних роботів, призначених для освітніх цілей, таких як навчання програмуванню, вивчення взаємодії людини і машини, аналіз сигналів і обробки зображень. Вони доступні за доступною ціною, мають просту структуру та розширюються.

Проект Kobot на (рис. 1.2г) включає мобільні роботизовані платформи, які оснащені ІЧ-далекомірною системою виявлення перешкод.

Проект Kilobot зображено на (рис. 1.2г) спрямований на створення колективного біхевіоризму з сотнями або більше особин у рої. Ці роботи легко збираються і можуть виконувати різні прості операції, такі як зарядка, переміщення, оновлення програм тощо.

I-Swarm показан на (рис. 1.2д) був розроблений в університеті Карлсруе в Німеччині. Цей рій складається з мікророботів, які мають здатність «думати разом» і впізнавати своїх родичів.

Мультироботні системи зображені на (рис. 1.2е) спочатку були розроблені в Університеті Альберти в Едмонтоні, США, і вивчають колективну поведінку роботів. У цьому університеті створюються різноманітні роботизовані системи (Multi-Robot Systems – MRS). Проект присвячений вивченню проблем колективного прийняття рішень.

Проект SwarmBot на (рис. 1.2є) створено компанією iRobot. Swarm використовує невеликих роботів, які можуть працювати разом, щоб виконувати певні завдання. Вважається, що SwarmBots можуть приєднатися до групи чисельністю до десяти тисяч і виконувати такі завдання, як пошук мін, дослідження невідомих територій (включаючи інші планети), виявлення шкідливих речовин тощо.

Проект Centibots зображено на (рис. 1.2ж) використовує невеликі роботи, які можуть ефективно працювати в групі та функціонувати автономно. Вони уникають використання централізованої системи управління. Призначення цих роботів – малювати замкнутий простір і виконувати різні завдання. Використовувана система розподілу ролей заснована на взаємодії і адаптується до мінливих обставин.

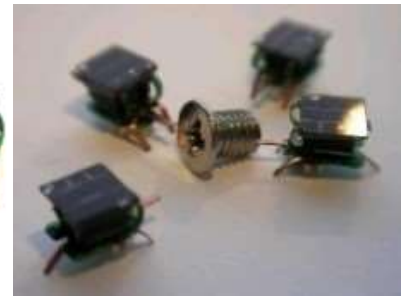
Проект Swarmanoid на (рис. 1.2з) вивчає поведінку різнорідних груп роботів. В одному дослідженні ця команда включала роботів на колесах, літаючого робота-шпигуна та робота-локомотора, які спільно знаходили об'єкт (книгу) і маніпулювали ним.

Еволюційні роботи зображені на (рис. 1.2и) були створені в Швейцарській лабораторії інтелектуальних систем (Ecole Polytechnique, Лозанна) під час «еволюції» досліджень роботів [28]. У процесі цього експерименту були вироблені гени роботів, які визначили їх поведінку. Група з 10 роботів змагалася за їжу, яка являла собою сяючий круг на одному кінці арени. Роботи взаємодіяли один з одним за допомогою світлових сигналів. Розвиток роботів у цих експериментах іноді призводив до того, що роботи навчилися обманювати своїх опонентів, випромінюючи «неправильне» світло, коли вони були поблизу джерела їжі.

Роботи-розвідники показані на (рис. 1.2і) були спеціально створені для розвідувальних завдань. Цей проект був розроблений в центрах розподілу робототехніки Університету Мінесоти в США і має високу технічну якість. Робот може ефективно працювати в команді і оснащений пристроєм, що нагадує автоматичний гранатомет, що дозволяє йому «стріляти». Мета робота – допомагати поліції та екстреним службам у проведенні небезпечних операцій.



(а) Феромонний робот (б) iRobot swarm project (в) Навчальний робот E-puck



(г) Проект Kobot

(г) Проект Kilobot

(д) Проект I-Swarm



(е) Багатороботні системи

(е) Проект SwarmBot

(ж) Проект Centibots



(з) Проект Swarmanoid (и) Роботи, що розвиваються (і) Робот-розвідник

Рисунок 1.2 - Робототехнічні проекти Swarm

1.4 Висновки до розділу

Беручи до уваги проекти, представлені в роботах [12], можна визначити наступні переваги в області ройової робототехніки:

- одночасна обробка – кожна особа в рої може виконувати свої завдання паралельно, що призводить до ефективного використання часу для досягнення спільної мети;
- гнучка масштабованість – додавання нових осіб до рою може відбуватися без необхідності вносити зміни в програмне або апаратне забезпечення;
- розширення функціональних можливостей – ройові робототехнічні системи здатні вирішувати завдання, що перевищують можливості окремих людей;
- відмовостійкість – роботизована система рою може продовжувати виконувати завдання, навіть якщо частина рою несправна. Це особливо корисно під час роботи в небезпечному середовищі;
- просторово розподілене зондування та дії – робототехнічна система рою може функціонувати як розподілена мережа для визначення території та виконання різноманітних дій;

Однак це можна пояснити кількома конкретними проблемами, які необхідно вирішити.

Ці проблеми включають:

- непередбачувана динаміка оточуючого середовища;
- обмежене та суперечливе розуміння оточуючого середовища;
- різноманітність способів досягнення мети, структур команди, ролей та інших факторів;
- складна модель поведінки командної роботи;
- труднощі, пов'язані з розподілом території рою та його локалізацією;

- проблеми зі зв'язком або обміном даними (структура мережі, протоколи тощо);
- втрата інформації та надлишкове зберігання.

Таким чином, у наступному розділі буде висвітлено ключові аспекти групової роботизованої поведінки, такі як бачення роботів у контексті одночасної локалізації та картографування (SLAM), планування маршруту, передача даних (комунікація) у групі та комплексне моделювання з подальшим аналізом.

2 ОБМІН ДАНИМИ ДЛЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ГРУПИ

Спілкування в робототехнічній групі є одним із головних завдань ройової робототехніки. Його реалізація допомагає розширити можливості рою за рахунок покращення завдань зі зграї, пошуку їжі, навігації тощо.

Комунікація працює чітко в більшості автономних роботизованих групових систем і здебільшого залежить від таких факторів, як оточення, розміри роботів, фінансові можливості розробки, обмеження проекту чи інші зовнішні фактори. Розмір робота безпосередньо впливає на можливе апаратне забезпечення, яке можна встановити, тому він збільшує різноманітність комунікаційних пристроїв, які можна використовувати під час розробки та покращує спілкування всередині групи. Як приклад зв'язку можна згадати bluetooth, бездротову локальну мережу (WiFi), зв'язок з використанням середовища (stigmergy).

Дивлячись на різні природні рої, можна помітити, що деякі з них не використовують повідомлення (голос) для спілкування. Однак ці рої все ще спілкуються між собою. Цей тип зв'язку називається стигмергією, коли рій використовує середовище для обміну даними. Наприклад, мурахи розміщують феромони, щоб вирішити завдання пошуку їжі та пошуку найкоротшого шляху. Мурахи починають слідувати найбільш пахучим шляхом і продовжують залишати свій феромон, через деякий час мурахи починають слідувати оптимальним шляхом. Для роботизованого рою стигмергія не настільки ефективна, більш поширеними способами обміну даними є Bluetooth, бездротова локальна мережа (WiFi) або інфрачервоний зв'язок [46].

Огляд інфрачервоного зв'язку має ряд переваг і недоліків. Для використання інфрачервоного зв'язку роботи повинні знаходитися в зоні прямої видимості один одного. Але ця технологія може бути використана для роїв, і відповідно до її специфіки роботи матимуть природний фільтр

інформації, яка надходить за межі їх групи. З іншого боку, інфрачервоний зв'язок також має свої переваги в застосуванні мікроробототехніки через низьке використання енергетичних ресурсів. Однак різні джерела світла можуть переривати передачу даних.

Для роботизованих груп середнього розміру використовується бездротовий зв'язок через локальну мережу. Тип зв'язку Bluetooth можна розташувати між інфрачервоним портом і локальною мережею відповідно до його розміру та діапазону. Bluetooth дає фундаментальні можливості спілкування між роботами. Кожному учаснику повинен бути присвоєний унікальний ідентифікатор. Зміст повідомлень може бути простим і складним. Прості повідомлення можуть містити такі команди, як «старт», «стоп» або деякі інші директиви, а складні повідомлення можуть містити додаткову описову інформацію про середовище або запити на надання списку операцій на основі можливостей робота. Повідомлення можна поширювати через роботизовану групу або рій за допомогою протоколу, подібного до основного дерева.

Існує два типи зв'язку, це може бути глобальна або локальна взаємодія. Під час глобального зв'язку отримане повідомлення містить локальну інформацію про відправника. У більшості випадків ця інформація марна. У ройовій або груповій робототехніці використовується локальний зв'язок. Цей тип комунікації бере свій початок у природі (хорошим прикладом є пастух, де локальна взаємодія допомагає пережити атаки хижаків, сигналізуючи своїм родичам рухом або звуками).

У свою чергу, локальне спілкування може бути прямим і непрямим. Прямі комунікації — це передача даних у групі в режимі реального часу. У цьому випадку робот надсилає повідомлення групі, і вони повинні негайно його обробити. Для прямого зв'язку можна використовувати з'єднання WiFi, bluetooth або більш примітивні види зв'язку, такі як світло і звук. Непрямі комунікації використовують різні типи носіїв, які можна використовувати для зберігання інформації з пізнім доступом (поштові служби). Наприклад, у

ройовій робототехніці це реалізується під час виконання завдання SLAM шляхом розміщення карти NFC (Near Field Communication) на виявленому орієнтирі (впровадження феромонів, які використовують мурахи).

Є кілька характеристик комунікації, які мають значний вплив на те, як вона може функціонувати, і які мають бути розроблені:

Діапазон зв'язку безпосередньо впливає на відстань між роботами для повного обміну даними. З іншого боку, велика дальність зв'язку може спричинити перешкоди в спілкуванні, через що кожному учаснику доведеться прослуховувати всі наявні повідомлення.

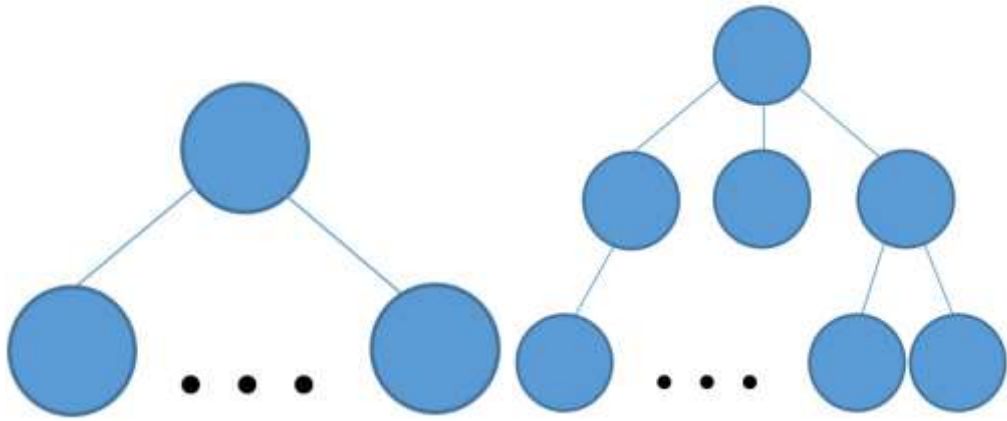
Комунікаційна зона в ідеальному корпусі охоплює всі 360°, цей випадок можливий, якщо на верхній частині робота існує лише один пристрій для передачі даних.

Довжина повідомлень також впливає на процес спілкування. У разі невеликих повідомлень мережа стає перевантаженою невеликими фрагментами даних і створює черги для обробки, з іншого боку, чим більше повідомлення, тим більше шансів на помилку.

Час поширення – це параметр, який відображає, скільки часу потрібно для розповсюдження даних/повідомлень у всій групі роботів/рою.

Кожна комунікаційна мережа має справу з перешкодами та іншими зовнішніми впливами. Наприклад, зовнішня бездротова локальна мережа або подібне до сонячного світла для інфрачервоного порту. Типи перешкод залежно від розташування та середовища можуть відрізнятися.

Дослідження розглядають дві моделі передачі даних: обмін інформацією з централізованим управлінням зображено на (рис. 2.1а) та стратегії централізованого ієрархічного контролю показано на (рис. 2.1б).



(а) Обмін інформацією з централізованим управлінням; (б) Обмін інформацією з використанням стратегій централізованого ієрархічного контролю

Рисунок 2.1 - Моделі передачі даних

У наступних розділах будуть представлені рішення для завдання передачі даних у ройовій робототехніці. Рішення базуються на протоколах Spanning Tree Protocol (STP) і Shortest Path Bridging (SPB) [47].

Протокол Spanning Tree Protocol – це каналний протокол. Основним завданням STP є усунення петель у топології довільної мережі Ethernet, у якій є один чи більше мережевих мостів, з'єднаних резервними з'єднаннями. STP вирішує цю проблему шляхом автоматичного блокування з'єднань, які наразі є зайвими для повного підключення комутаторів.

Shortest Path Bridging — це стандарт IEEE 802.1aq, це мережева технологія, яка спрощує побудову та конфігурацію мережі, використовуючи переваги багатошляхової маршрутизації.

2.1 Формування охоплюючого дерева для роевої робототехніки

Розглянемо загальний випадок рою, який можна запропонувати як спосіб формування мережі на основі створення остовного дерева. Алгоритм складається з семи кроків і включає використання класичних підходів. Етапи формування динамічної мережі для роботизованого рою наступні:

- побудувати повнозв'язний мережевий графік;
- використовуйте алгоритм Крускала для побудови мінімального остовного дерева;
- в отриманому дереві за допомогою алгоритму Флойда-Уоршалла отримати список усіх можливих маршрутів у мережі;
- розрахувати середню довжину маршруту для кожного вузла;
- виберіть вузол із найменшою середньою довжиною та налаштуйте його як вузол високого рівня;
- вузли з «одностороннім» підключенням, налаштовані як вузли низького рівня;
- інші вузли, налаштовані як вузли середнього рівня.

Застосовуючи цей метод, можна автоматично отримати обидва типи мережі (залежить від розміщення робота, кількості роботів у рої та сигналу мережі). В окремих випадках (рис. 2.2) в розрахунках розглядається відкритий простір без перешкод, тому використовувалися відстані між вузлами. У більш складних сценаріях відстані слід замінити рівнями сигналу бездротової мережі.

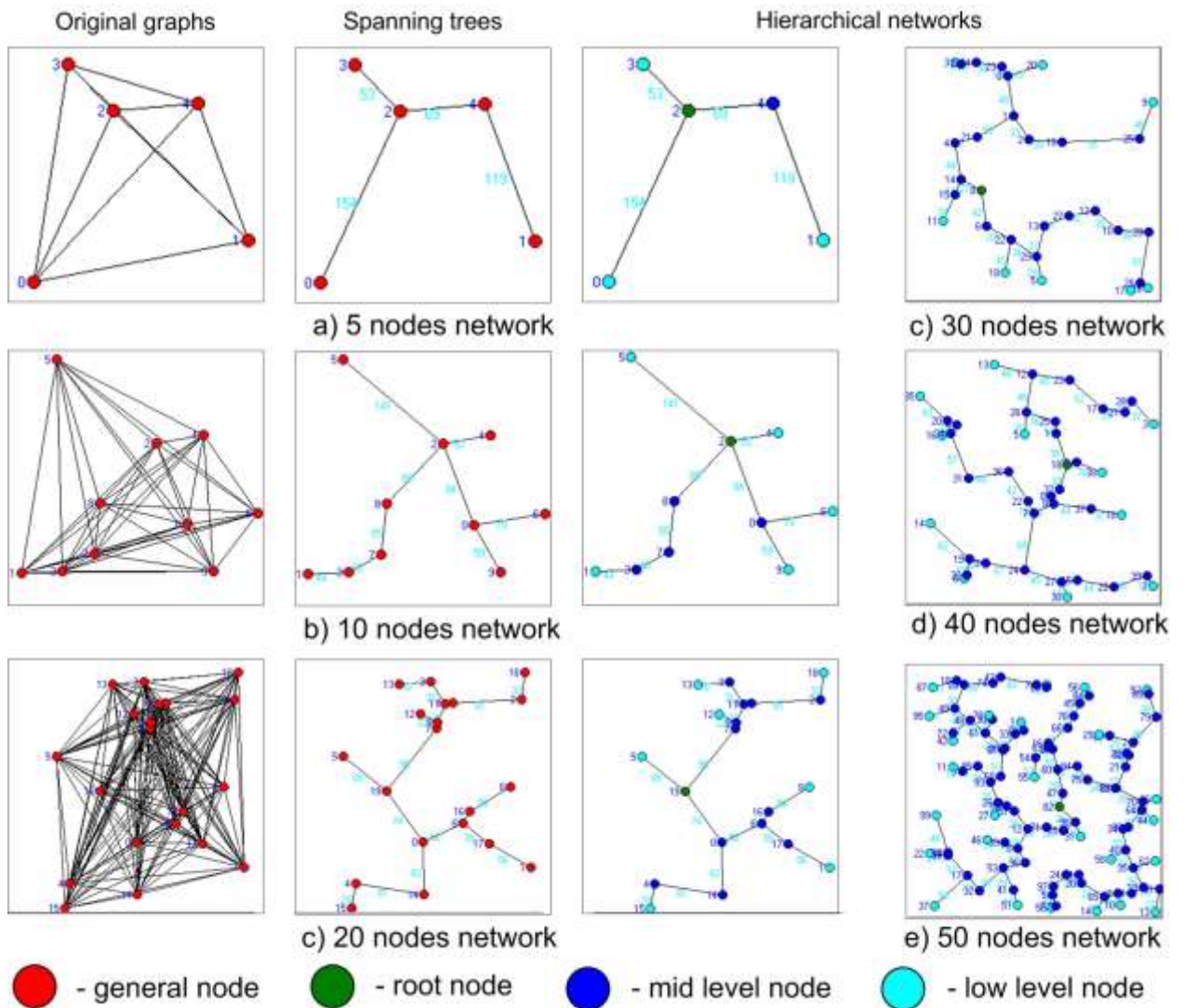


Рисунок 2.2 - Розрахункові мережі

Цей метод корисний для великого рою, але у випадку з невеликою групою можна використовувати методи, які включають більший контроль поведінки та вирішення кількох завдань одночасно.

Результати моделювання мережі від 1 до 50 вузлів із перехресною перевіркою зображено на (рис. 2.3).

Приклади оцінювання рівнів мережі на основі пошуку геометричного центру відображено на (рис. 2.4.)

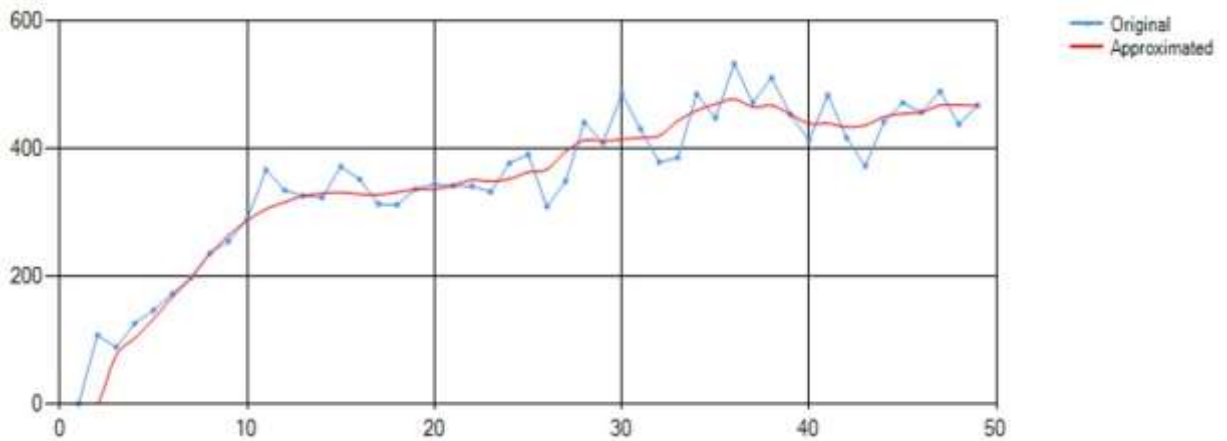
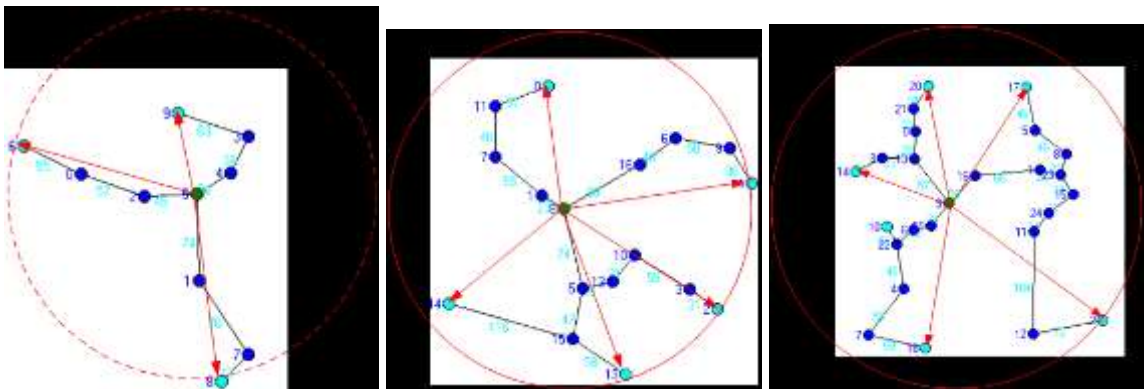


Рисунок 2.3 - Результати моделювання мережі: від 1 до 50 вузлів із перехресною перевіркою



(а) Приклад № 1 (б) Приклад № 2 (в) Приклад № 3

Рисунок 2.4 - Приклади оцінювання рівнів мережі на основі пошуку геометричного центру

2.2 Спілкування на основі лідера

Лідерство — одна з принципових особливостей ройової робототехніки — локальний характер взаємодії роботів між собою, а також робота з навколишнім середовищем. Ця взаємодія називається неявною комунікацією. Ідея полягає в тому, що кожна група роботів безпосередньо взаємодіє лише зі своїми сусідами в обмеженій зоні видимості. У такій системі роботи приймають власні рішення про те, як діяти далі, на основі деяких простих правил локальної взаємодії.

У методі «слідуй за лідером» [49] вважається, що в групі є апіорі визначений лідер, який задає цей рух. Умови локальної взаємодії можуть бути самими різними: від суто формальних до дуже екзотичних. Наприклад, правила шкільного руху за моделлю пружин і амортизаторів. Компонентна модель «Пружина» визначає тяжіння особин до лідера (а не один до одного), а «Амортизатори» – відштовхування від лідера. З іншого боку, є варіант, який дозволяє визначити лідера для вирішення задачі узгодженого руху.

Однією з моделей, яка описує організацію локально взаємодіючих роботів, є статичний рій [48]. Вона характеризується відсутністю даного центру управління і являє собою якусь фіксовану мережу – набір агентів. Основними властивостями статичного рою є активність, локальні взаємодії та функціональна неоднорідність. Тому буде розглянуто методику розподілу ролей на основі завдання вибору лідера. Під терміном «Лідер» ми будемо розуміти центральний вузол обміну даними (робот на короткий проміжок часу стане сервером для зберігання та маркування даних). Для вибору лідера роботи будуть використовувати процес голосування. Кожного робота можна описати як набір параметрів:

$$R = (I, L, E, N) \quad (2.1)$$

де I – ідентифікатор робота, L – ідентифікатор проголосованого лідера, E – оцінка лідера L (кількість голосів, які необхідно віддати за лідера), N – список з'єднань, доступних для робота (його сусідів).

Процес голосування на початковому кроці відбувається наступним чином: кожен робот оцінює своїх сусідів на роль лідера за набором попередньо визначених його характеристик; кожна з цих характеристик має свою вагу; за допомогою функції належності робот вибирає сусіда з найбільшим значенням.

Для значення голосування буде реалізована лінгвістична змінна $e =$ "оцінка робота". Його цінність базується на шкалі $M =$ «дуже низький»,

«низький», «середній», «високий», «дуже високий» або може мати цифровий еквівалент $M=1, 2, 3, 4, 5$. Після голосування буде створено багато альтернатив для E , тому він матиме наступний вигляд:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \quad (2.2)$$

де e_i – альтернативний «кандидат» a_i , а n – кількість видимих сусідів. Для оцінки робота пропонуються такі характеристики: 1) оточення: c_1 = «кількість сусідів, оцінюваних для кандидата»; 2) територіальні: c_2 = «відстані до сусідів або рівні сигналів»; 3) статус: c_3 = «фізичний стан робота». Кожна з цих характеристик оцінюється голосуючим роботом для кожного з її сусідів:

$$C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ik}\} \quad (2.3)$$

де c_j – характерне значення i -го «кандидата» при $j=1..k$. Кожна з характеристик має свою вагу:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\} \quad (2.4)$$

де j -та характеристика ваги $\sum w_i = 1$, Оцінка i -х сусідів використовується за такою формулою:

$$e_i = \sum_{j=1}^k w_j c_{ij} \quad (2.5)$$

Щоб визначити значення лінгвістичної змінної, ми використовуємо три типи функцій приналежності (рівняння 2.6 – 2.8), де загальний вигляд представлено на рис. 2.5.

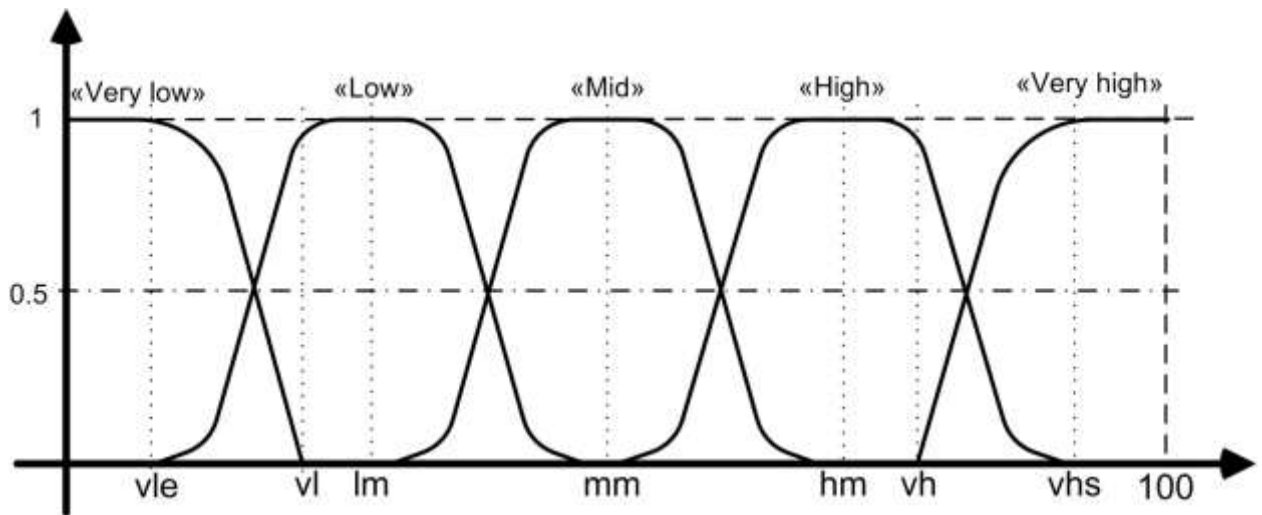


Рисунок 2.5 - Функції належності

$$f_{vl}(e_i) = \begin{cases} 1, x < vle \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{e_i - vle}{vl - vle} \pi\right), vle \leq x \leq vl \\ 0, x > vl \end{cases} \quad (2.6)$$

де vle — поріг, до якого функція належності дорівнює «1», vl — поріг, після якого функція належності дорівнює «0».

$$f_{vh}(e_i) = \begin{cases} 1, e_i < vhs \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{e_i - vhs}{vhs - vh} \pi\right), vh \leq e_i \leq vhs \\ 0, e_i > vhs \end{cases} \quad (2.7)$$

де подібно до рівняння 3,6 vhs — це поріг для «1», а vh — для «0».

$$f_{gb}(e_i) = \frac{1}{1 + \left|\frac{e_i - c}{a}\right|^{2b}} \quad (2.8)$$

де c — середня частина функції належності, a — значення, при якому $f_{gb}(c + a) = 1$ і $f_{gb}(c - a) = 1$, b — значення плавного регулювання функції.

2.3 Висновки до розділу

В цьому розділі визначені ключові аспекти комунікації в ройовій робототехніці, зокрема в контексті розширення можливостей рою в завданнях зі зграї, пошуку їжі та навігації. Розглядаються вплив різних факторів, використання різних засобів комунікації та аспекти розміру робота на комунікаційні можливості.

Аналізуються характеристики комунікації, включаючи діапазон, комунікаційну зону, довжину повідомлень та час поширення, а також розглядаються можливі перешкоди та вплив зовнішніх факторів. Представлені моделі передачі даних з використанням протоколів STP і SPB.

Додатково, висвітлено метод формування охоплюючого дерева для рою роботів, який використовує алгоритми побудови мережі та оцінки рівнів мережі. Виділено аспекти локального лідерства та описано модель статичного рою з методом розподілу ролей через голосування.

Цей розділ закріплює та об'єднує висновки з різних аспектів комунікації в ройовій робототехніці, демонструючи широкий спектр методів та підходів для оптимізації спілкування в робототехнічних групах.

3 ВПРОВАДЖЕННЯ ЗВОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ГРУПІ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

3.1 Аналіз зворотнього зв'язку в групі мобільних роботів

У випадку, коли деяку інформацію потрібно передати між усіма роботами в групі, деякі з них (роботів) повинні бути повідомлені про завершення передачі. Це завдання поширення інформації зворотного зв'язку (PIF – розповсюдження інформації зі зворотним зв'язком) формулюється так: підмножина утворюється роботами, які знають повідомлення M (однакове для всіх роботів), яке слід поширювати, тобто всі роботи повинні приймати M . Певні процеси повинні бути повідомлені про завершення передачі, необхідно зробити сповіщення про особливу подію, і це можна зробити лише тоді, коли всі процеси вже отримали M . Сповіщення в PIF-алгоритмі можна розглядати як повернення (OK) подія.

В якості PIF-алгоритму можна використовувати будь-який хвильовий алгоритм. Наприклад, нехай A — хвильовий алгоритм. Щоб використовувати A як PIF-алгоритм, ми беремо роботів, спочатку знаючи, що M є ініціатором A . Інформація M додається до кожного повідомлення A . Це можливо тому, що за побудовою початкові A знають M спочатку, а послідовники не надсилають повідомлення, доки не отримають принаймні одне повідомлення, тобто поки не отримають M . Коли відбуваються події повернення (OK), кожен процес знає M , і подію повернення (OK) можна вважати необхідною подією повідомлення в PIF –алгоритм [50].

Раніше було розглянуто дві моделі передачі даних: обмін інформацією з централізованим управлінням, який зображено на (рис. 2.1а) та стратегії централізованого ієрархічного контролю показано на (рис. 2.1б). При використанні стратегії централізованого керування роботизованою групою R кожен робот r_i ($i = 1, 2, \dots, N$) групи передає дані про свій стан та отриману

інформацію про навколишнє середовище в центральний керуючий пристрій (вибраний робот). за процесом оцінки.

Ієрархічна стратегія централізованої мережі керування між роботами може бути представлена шарами. Рівні можна розділити на три типи: верхній рівень – це єдиний центральний пристрій керування, який об'єднує дані та ініціює зворотне поширення; середній рівень — це група керуючих пристроїв для пересилання своїх даних і даних з нижчих рівнів (рівнів) на верхній рівень. Нижчий рівень може спілкуватися тільки з елементами середнього рівня, надсилаючи дані та приймаючи дані після злиття.

Метод зміни лідера можна спростити для розподілу шарів у групі. Для визначення мережевих ролей буде реалізовано лінгвістичну змінну p = "шаблон шару". Він використовує шкалу трьох рівнів M = «нижній шар», «середній шар», «верхній шар». Відповідно, багато альтернатив P можна представити у такому вигляді:

Для визначення значення лінгвістичної змінної відображено на (рис. 3.1) використовуємо три типи функцій приналежності, де екстремальні значення («Низький рівень» і «Верхній рівень») визначатимуть Z -подібні (3.1) і S -подібних (3.2) функцій, ступінь приналежності до значення «Середнього рівня» базується на трапецієподібній функції належності (3.3) (наведено загальні формули).

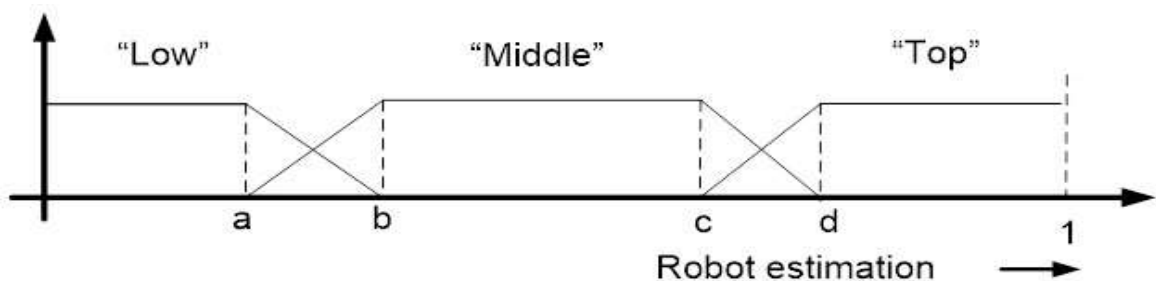


Рисунок 3.1 - Функції для визначення мережевого рівня

$$f_{low} = \left\{ \begin{array}{l} 1, e_i \leq a \\ \frac{b-e_i}{b-a}, a < x \leq b \\ 0, x > b \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

$$f_{top} = \left\{ \begin{array}{l} 0, e_i \leq c \\ \frac{e_i-a}{b-a}, c < e_i \leq d \\ 1, x > d \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

$$f_{top} = \left\{ \begin{array}{l} 0, e_i \leq c \\ \frac{e_i-a}{b-a}, c < e_i \leq d \\ 1, x > d \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

$$f_{top} = \left\{ \begin{array}{l} 0, e_i \leq a \\ \frac{e_i-a}{b-a}, a < e_i \leq b \\ 1, b < e_i \leq c \\ \frac{d-e_i}{d-c}, c < e_i \leq d \\ 0, e_i > d \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

де e_i – оцінка i -го робота, має такий вигляд

$$e_i = \sum_{j=1}^k w_j c_{ij} . \quad (3.5)$$

З точки зору нечіткої логіки, це можна описати за допомогою наступного типу правил IF – THEN:

IF робот оцінює вищий рівень,

THEN рівень мережі дорівнює хосту

IF робот оцінює середній рівень,

THEN рівень мережі ДОРІВНЮЄ рівню 1

IF оцінка робота Є низький рівень,

THEN рівень мережі ДОРІВНЮЄ рівню 2

де «NET HOST» – робот стає хостом для передачі даних (верхній рівень), «NET LVL 1» і «NET LVL 2» для визначення рівня мережі для зв'язку (середній і низький рівні) і n – оператор фіксації.

Схематичне зображення PIF для поточного випадку наведено на рис. 3.2.

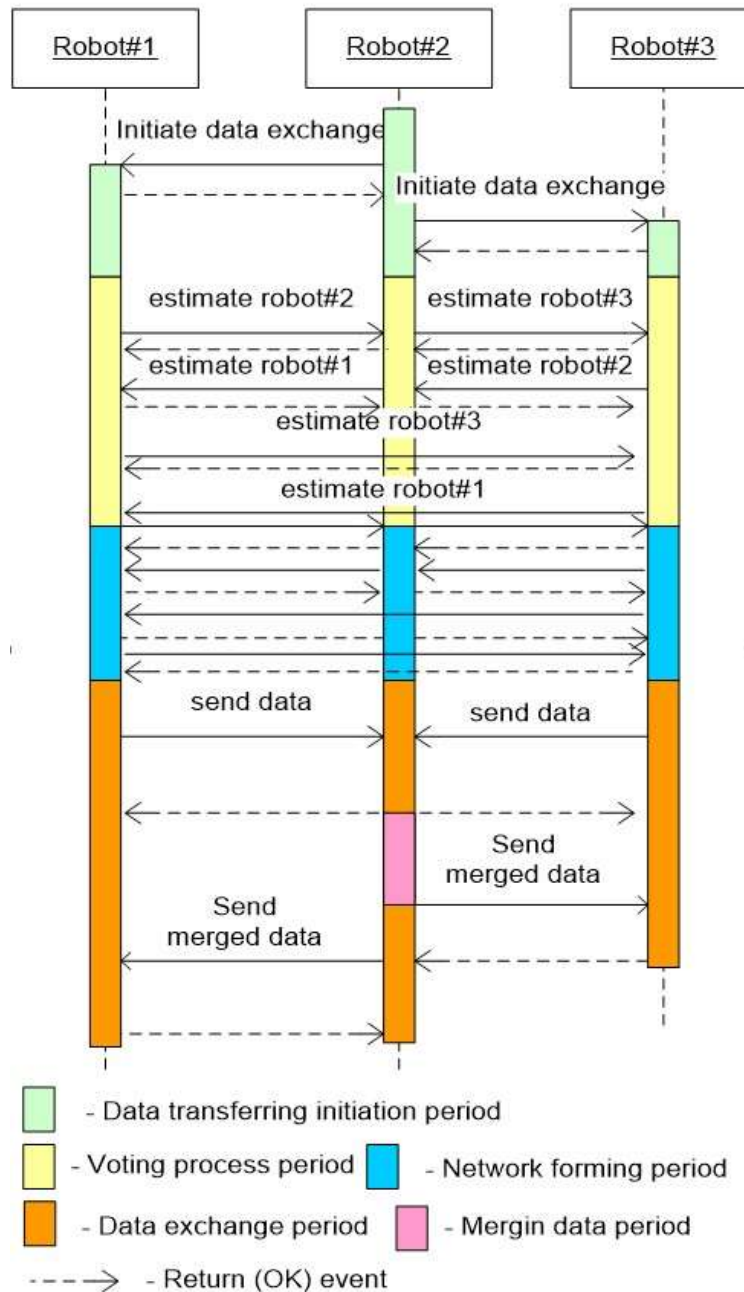


Рисунок 3.2 - Дані мережі про середовище (діаграма послідовності)

Період ініціації передачі даних знаходиться в стані, коли один із роботів у групі надсилає повідомлення іншим, щоб розпочати передачу

даних, і відбувається, коли: 1) роботу потрібні додаткові дані для подальшої навігації, або 2) робот зібрав достатню частину інформації з TVS, який, здається, передається іншим у групі. Період процесу голосування використовується для оцінки кожного робота в групі. Складання каналів передачі даних відбувається на етапі формування мережі. Період обміну даними використовується для обміну накопиченими даними відповідно до топологічної структури мережі. Після цього відбувається злиття даних. Останні два періоди мають плаваючий час залежно від кількості даних, накопичених кожним роботом.

3.2 Результати впровадження

При використанні стратегії централізованого керування групою роботів R кожен робот групи передає інформацію про свій стан, збирає інформацію про навколишнє середовище в центральному пристрої керування та отримує команди від центрального пристрою керування (рис. 3.3). У групі з N роботів, де кожен робот передає на центральний пристрій керування повідомлення розміром K_{out} і приймає команди розміром K_{in} , обсяг переданої інформації буде:

$$I = N(K_{in} + K_{out}) \quad (3.6)$$

Таким чином, навантаження на канал зв'язку прямо пропорційно кількості роботів у групі.

Щоб не моделювати таку систему, розглянемо випадок $N = 5$ (де n – кількість роботів) у двох станах – коли всі роботи мають хороший зв'язок із сервером наведено на (рис. 3.3) і коли робот №1 і робот №2 мають погане з'єднання, що спричиняє втрату пакета показано на (рис. 3.7). Моделювання базується на теорії черги, коли інформація про перешкоду, знайдену роботами, надсилається на сервер для подальшої обробки.

Моделювання в MATLAB було виконано протягом 500 секунд для всіх випадків і дало наступні результати, представлені на наступних малюнках: рис. 3.4 показує нам загальну кількість надісланих запитів на обробку та оброблених запитів від усіх п'яти пристроїв, пояснюючи їх різницю оскільки частина запитів дублюється; На рис. 3.5 показано час очікування в обробці запиту (кількість часу, необхідного для обробки наступного запиту сервером) (Час очікування для робота №1, Час очікування для робота №2 тощо); На рис. 3.6 показано моделювання для другого випадку, коли поганий сигнал на сервер викликає втрату запитів (різниця між надісланими запитами на обробку та отриманими запитами).

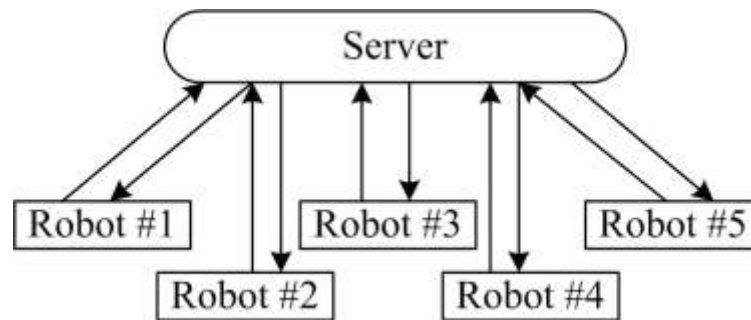


Рисунок 3.3 - Обмін інформацією з централізованим управлінням

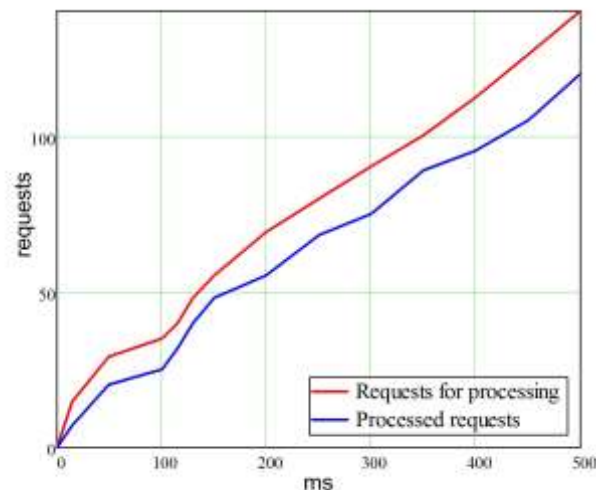


Рисунок 3.4 - Загальна кількість надісланих та оброблених запитів

Така втрата даних створює проблеми в русі роботів і збільшує час виконання завдання. Тому потрібно змінити структуру мережі.

При використанні ієрархічної стратегії централізованого управління центральний керуючий пристрій підпорядковується ієрархії роботів верхнього рівня, кожен з них підпорядковується декільком роботам ієрархії нижчого рівня зображено на (рис. 3.5 представляє ієрархію для нашого випадку).

Такі складні схеми управління вимагають дуже високої продуктивності комунікацій, оскільки всі роботи, крім найнижчого рівня ієрархії, взаємодіють з роботами нижнього та верхнього рівнів ієрархії. Інформація про переміщення через приймачі робота може бути оцінена як:

$$I = n(k_{in} + k_{out}) + K_{in} + K_{out} \quad (3.7)$$

де n кількість роботів на нижчому рівні ієрархії; k_{in} - це кількість інформації у вхідних повідомленнях від робота нижчого рівня ієрархії; k_{out} - кількість інформації у вихідних повідомленнях для робота нижчого рівня ієрархії.

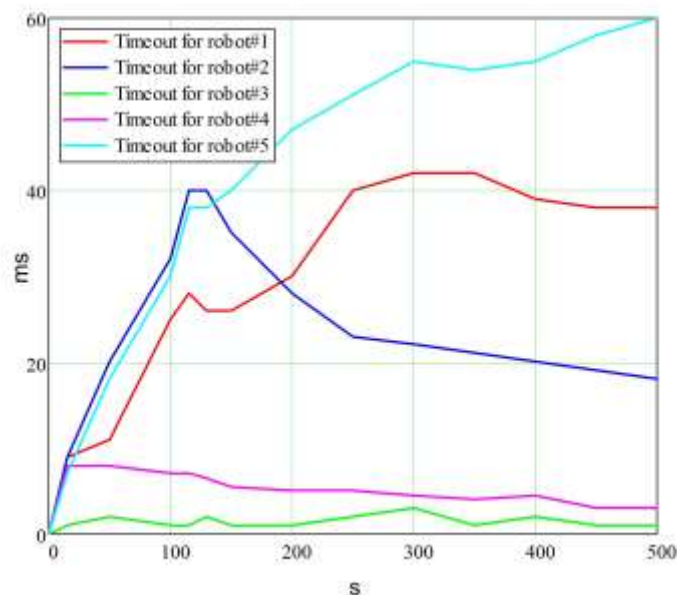


Рисунок 3.5 - Час очікування в обробці запиту

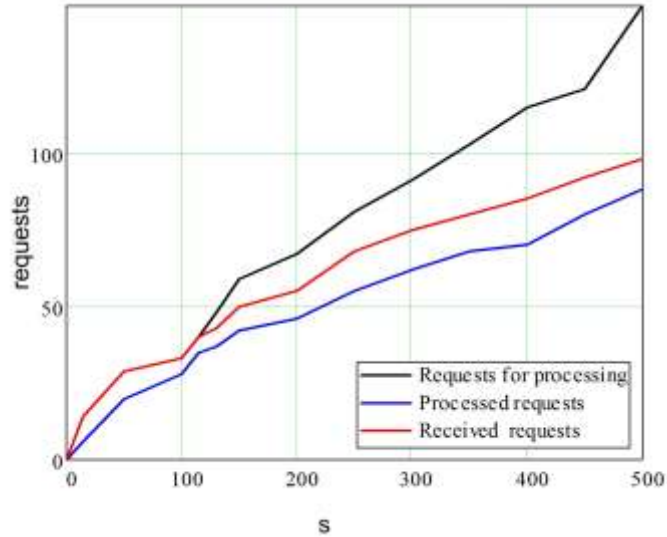


Рисунок 3.6 - Загальна кількість надісланих, отриманих та оброблених запитів із втратою сигналу

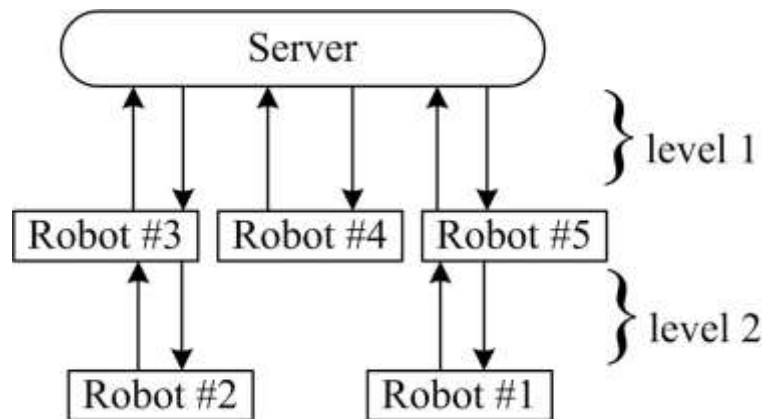


Рисунок 3.7 - Обмін інформацією за допомогою стратегій централізованого ієрархічного управління (показано 2 рівні)

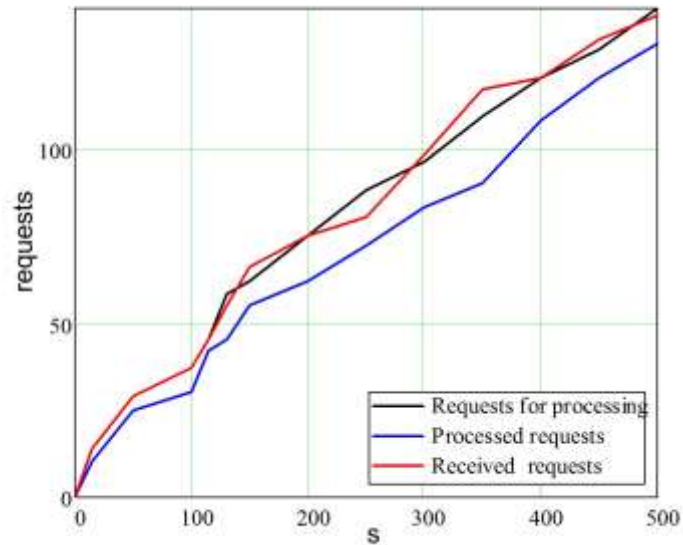


Рисунок 3.8 - Загальна кількість надісланих, отриманих і оброблених запитів із втратою сигналу за допомогою централізованого ієрархічного контролю

Цей рій роботів обробляє та передає геометричні дані нашого оригінального TVS, які є достатньо точними та природно представляють інформацію про оточення рою в тій же декартовій системі. Це значно спрощує прийняття рішень для навігації. Рішення динамічного обміну даними підтримується середнім тайм-аутом обробки запиту, який наприкінці моделювання призупиняється до часу виявлення перешкоди нашим TVS (0,039 с в обох випадках структури мережі представлено на (рис. 3.5-3.9)).

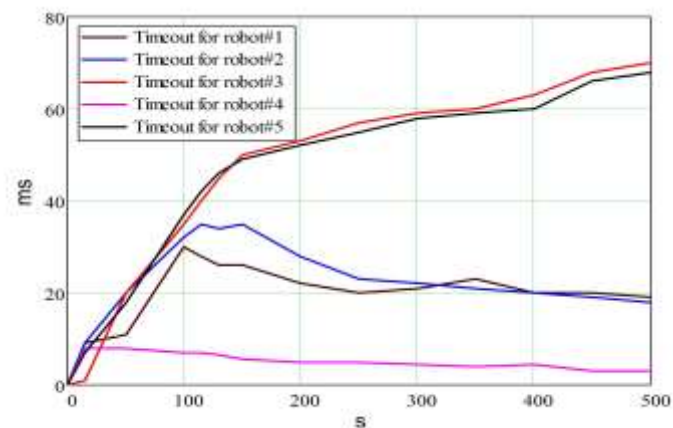


Рисунок 3.9 - Загальна кількість надісланих, отриманих і оброблених запитів із втратою сигналу за допомогою централізованого ієрархічного контролю

Впроваджена нами система зміни лідера покращує процес передачі даних шляхом динамічної зміни моделі мережі від централізованого керування до централізованого ієрархічного контролю та назад.

Результати впровадження нашої системи показані на рис. 3.10 шляхом порівняння кількості оброблених запитів до та після впровадження системи, яка змінила лідера.

Такий підхід дозволяє збільшити швидкість руху групи роботів і скоротити час виконання ними завдань.

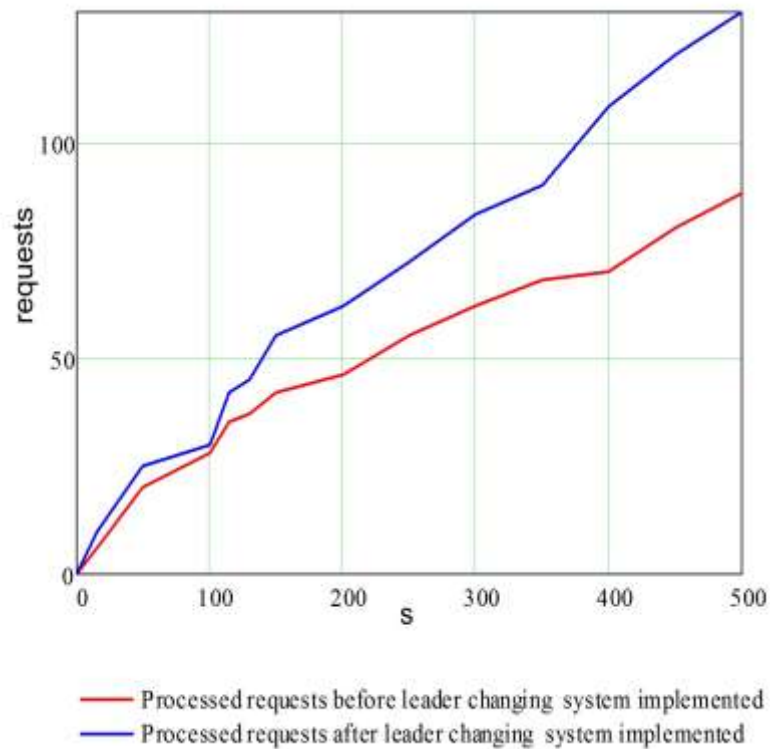


Рисунок 3.10 - Порівняння кількості оброблених запитів до та після впровадження системи зміни лідера

Запропонований метод формування мережі динамічного обміну даними розширює потенціал нашого нового TVS. Він поєднує здатність навігації одного робота з хмарною загальною базою знань у групі роботів для підвищення ефективності підрахунку мертвих.

3.3 Висновки до розділу

Запропоновані методи дозволяють усунути топологічні петлі в мережі передачі даних у групі роботів. Повністю підключений графік реальної мережі з високою ймовірністю призводить до нескінченних повторів одних і тих же повідомлень у групі, при цьому пропускна здатність мережі майже повністю зайнята цими марними повторами. У цих умовах формально мережа може продовжувати працювати, але на практиці її продуктивність стає настільки низькою, що може призвести до повного збою мережі. Таким чином, запропоновані методи забезпечують повне поширення інформації всередині групи та сприяють покращенню координації рухів роботизованої групи шляхом обміну інформацією про відсутні сектори.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ

4.1 Моделювання структури системи та групової поведінки

4.1.1 Базовий сценарій поведінки роботизованої групи

Ройова робототехніка - це новий підхід до організації мультироботних систем. На відміну від традиційних підходів до багатороботних систем, які використовують централізовані або ієрархічні системи керування та зв'язку для синхронізації поведінки роботів, ройова робототехніка базується на децентралізованому підході. У цьому методі бажана колективна поведінка виникає в результаті локальної взаємодії між роботами та їх середовищем. Цей підхід базується на самоорганізованій колективній поведінці, яка надихається, а в деяких випадках навіть моделюється на інтелекті роя, подібному до того, що спостерігається у соціальних комах.

Потенціал ройової робототехніки значний. Будь-яке завдання, пов'язане з розвідкою, вивченням, збором, порятунком або будь-якими іншими фізично розподіленими об'єктами, можна виконати за допомогою ройової робототехніки. Ключовою перевагою цього підходу є його стійкість, яка проявляється кількома способами. По-перше, роботи всередині рою спочатку представлені як група схожих агентів без конкретних завдань, але коли рій розгортається, вони можуть організуватися для виконання певної роботи. По-друге, ройовий підхід демонструє високу толерантність до збоїв окремих агентів. По-третє, ройова система має децентралізоване управління, тобто немає спільних точок збою чи інших недоліків.

Визнання ефективності ройової робототехніки вимагає вирішення різноманітних надзвичайно складних завдань, таких як розробка алгоритму, впровадження та тестування, аналіз і моделювання.

Створення алгоритму є викликом для розробників, які мають вирішити завдання проектування фізичної моделі (апаратна частина) та поведінки (логічна/програмна частина) окремих агентів. Це включає створення можливості для внутрішнього спілкування всередині рою, взаємодії з оточенням і здатності взаємодіяти один з одним, коли це необхідно. Тільки таким чином можна досягти очікуваної колективної поведінки.

Впровадження та тестування вимагає створення експериментальної інфраструктури в лабораторії. Експерименти на цьому етапі проводяться за допомогою моделювання.

Аналіз та моделювання включають моделювання поведінки роботизованого рою з урахуванням складності параметричної оптимізації та перевірки через стохастичне нелінійне походження. Такі моделі, звичайно, є невід'ємною частиною розробки ігор безпеки для реальних програм.

У цьому розділі розглядаються можливі стратегії вирішення кожної з перерахованих вище проблем та їх реалізація з урахуванням вибору машинного зору, методів передачі (зв'язку) даних і систем навігації.

На основі завдань, викладених у попередніх розділах, можна побудувати концептуальну схему поведінки роботизованої групи, яка представлена на (рис. 4.1). Концепція поведінки включає такі основні етапи:

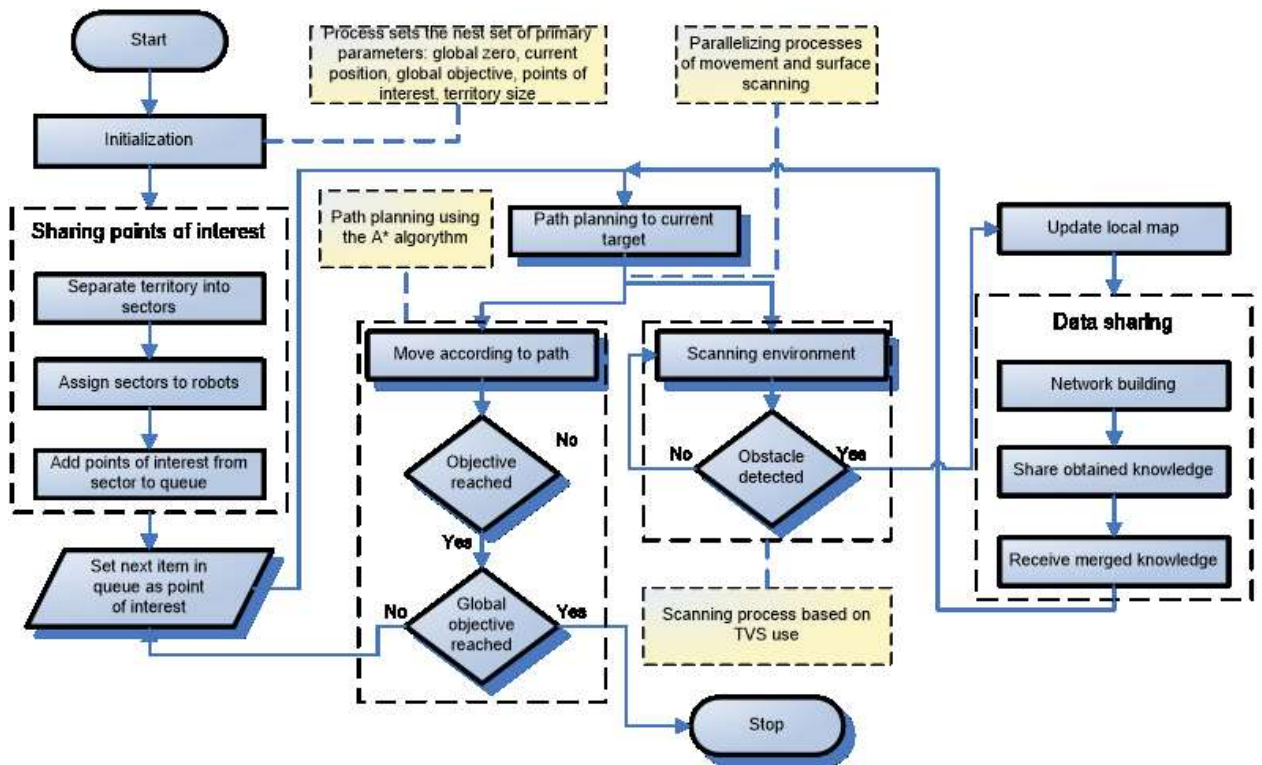


Рисунок 4.1 - Модель поведінки роботизованої групи

Ініціалізація - це початкова фаза алгоритму поведінки, де кожен робот встановлює значення основних параметрів за замовчуванням. Деякі з цих параметрів попередньо визначаються людиною-оператором і служать константами, наприклад розмір групи роботів, рельєф місцевості та його розміри, обмеження швидкості, роздільна здатність, радіуси зони точності та цільові місця (автоматично або вручну визначені точки інтересу). Інші параметри встановлюються роботами окремо, наприклад глобальний нуль і поточна позиція.

Спільний доступ до цікавих місць передбачає, що на етапі ініціалізації кожен робот має список цікавих місць. У цьому контексті застосована логіка розподілу місцевості (розділеної на n секторів) між агентами або роботами (всього n роботів) у групі. Об'єкти, які належать до i -го сектора, додаються до черги для відвідування i -м роботом.

Наступні три фази алгоритму виконуються одночасно.

Планування маршруту включає процеси навігації, локалізації та планування руху. На цьому етапі робот обчислює шлях за допомогою алгоритму A^* між поточною позицією та наступною точкою інтересу в черзі.

Сканування навколишнього середовища передбачає використання роботом системи 3D технічного зору для отримання декартових координат. Цей процес також передбачає оновлення існуючої карти, що зберігається в пам'яті робота, шляхом створення оболонок на матричному представленні карти.

Фаза спілкування передбачає участь групи роботів в обміні даними та об'єднанні інформації. Роботи взаємодіють, щоб покращити свої знання про навколишнє середовище, використовуючи дані, надані їхніми «товаришами по команді».

Відповідно до алгоритму, який представлений (рис. 4.1) можна розробити комплексне рішення роботизованої групи та представити його у вигляді псевдокоду зображеного на (рис. 4.2).

```

foreach  $r_i$  in  $G$ 
  Initialize  $v_i$ ,  $a_i$  and  $l_i$  for robot
  Initialize map  $M = [t_{1l}, \dots, t_{1a}; \dots; t_{bl}, \dots, t_{ba}]$ 
end foreach
Split  $T$  in  $s$  parts  $\rightarrow T = \{t_1, \dots, t_s\}$ 
Generate secondary objectives locations
 $X_i = [x_{i1}, \dots, x_{im}]$  for each robot  $r_i$  in  $G$ 
 $X_i$  add  $x_m \rightarrow X_i = [x_{i1}, \dots, x_{in}, x_{im}]$ 
while  $x_m$  not reached
  foreach  $r_i$  in  $G$ 
    if received data exchange request then
      Initiate DataExchange (Algorithm 1)
    end if
    get frame  $F$  from TVS
     $F = [f_{1l}, \dots, f_{1r}; \dots; f_{ql}, \dots, f_{qr}]$ 
    foreach  $f$  in  $F$ .
       $c \leftarrow C(f, \text{dimensions}(M))$ 
       $M(c) \leftarrow$  not walkable
    end foreach
     $obstacle \leftarrow D(\{x_i, y_i, z_i\}, F)$ 
    if  $obstacle \leq Z_{low}$  then
       $\{v_i, a_i\} \leftarrow \{S_{low}, R_{low}\}$ 
    end if
    if  $Z_{low} < obstacle \leq Z_{avg}$  then
       $\{v_i, a_i\} \leftarrow \{S_{avg}, R_{avg}\}$ 
    end if
    if  $Z_{avg} < obstacle \leq Z_{high}$  then
       $\{v_i, a_i\} \leftarrow \{S_{high}, R_{high}\}$ 
    end if
    Initiate DataExchange
     $path \leftarrow A(T, x_{ij})$ 
    if  $x_{ij}$  is reached then
       $x_{ij} \leftarrow$  pull ( $X_i$ )
    end if
  end foreach
end while

```

Рисунок 4.2 - Базовий алгоритм роботизованої групи (псевдокод)

Поведінку групи роботів для системи моделювання можна описати за допомогою наступного набору змінних:

1. Роботизована група: $G = r1, \dots, rs$;
2. Розмір групи: c ;
3. Рельєф місцевості: T ;
4. Розміри місцевості: d ;
5. Швидкість і обмеження: $Slow, Savg, Shigh$;
6. Роздільна здатність: $Rlow, Ravg, Rhigh$;
7. Радіуси зон точності: $Zlow, Zavg, Zhigh$;
8. Локації основних цілей: xm ;
9. Розташування вторинних цілей $Xi = [xi1, \dots, xin]$;
10. Функція пошуку шляху: $A(T, xij)$, де $T = t1, \dots, ts$;
11. Функція відстані до перешкоди: $D(li, F)$, де F – кадр, отриманий від TVS;
12. Функція TVS для відображення координат: $C(x,y,z, b,a)$, де x,y,z – декартова координата з TVS, b,a – розміри карти;

Він розглядає початкову групу роботів G . Кожен робот описується набором декартових координат, швидкістю v_i та точністю сканування (роздільною здатністю) a_i . Для кожного робота алгоритм ініціалізує ці змінні та карти (рядки 1-4). Далі з урахуванням розмірів місцевості карта розбивається на рівні сектори (рядок 5). Кожен із роботів створює рядок другорядних цілей X_i для свого сектора (для оптимального планування траєкторії) і додає головну ціль xm у кінець рядка. Поки робот не досягне головного пункту призначення в черзі, він повторюватиме рядки 10-34. Робот безперервно забезпечує зворотній зв'язок, щоб ініціювати процес обміну даними (рядки 11-13), і бере участь у процесі, якщо такий обмін запитується. Отримавши кадр візуальних даних від TVS (рядки 14-15), він дивиться на кожну точку кадру та визначає як непрохідні всі відповідні комірки на карті (рядки 16-19).

Після виявлення перешкоди (рядок 20) алгоритм використовує роздільну здатність і контроль швидкості на основі розміру точної зони (рядки 21-29). Потім робот ініціює обмін даними, щоб оновити та поділитися своїми знаннями про середовище (рядок 30) з іншими членами групи, отримуючи маршрут до поточного пункту призначення в черзі (рядок 31). Якщо поточна ціль досягнута, робот видаляє наступну з черги (рядки 32-34).

4.1.2 Структури моделювання

Перш ніж приступити до практичної реалізації складних механічних систем, важливо пройти дві фази: теоретичне обґрунтування та реалістичне моделювання. Створення цифрової моделі всієї системи істотно впливає на загальну ефективність проекту. Процес моделювання дозволяє зменшити кількість помилок при розробці, покращити вихід системи з урахуванням змін умов навколишнього середовища, зменшити вартість технічних проблем. Серед інших переваг моделювання:

- зниження витрат на виготовлення роботів;
- ефективне управління ресурсами та діагностика вихідного коду;
- моделювання різних альтернатив;
- перед впровадженням робота його компоненти можуть бути протестовані;
- моделювання можна виконувати поетапно, що є перевагою для складних проектів;
- визначення життєздатності системи;
- сумісність з широким спектром мов програмування.

Однак у моделюванні є і мінуси. Програма може лише симулювати модель поведінки робота на основі попередньо визначених правил і не враховуватиме фактори, які не були передбачені на етапі розробки. Реальний досвід може представляти більше сценаріїв, ніж обчислювальна модель.

На сьогодні платформи моделювання включають багато інструментів і функцій, які можуть забезпечити моделювання, наближене до реального життя. Більшість цих платформ використовують різні мови програмування, такі як C/C++, а також алгоритмічні мови LabVIEW, MATLAB та інші. У цьому розділі наведено огляд кількох популярних платформ моделювання.

Player/Stage — це проект, який зараз розробляє три програмні платформи, пов'язані з робототехнікою. Він включає мережевий робот-сервер Player, середовище моделювання роботів Stage-2D і середовище моделювання роботів Gazebo-3D. Заснований у 2000 році Брайаном Геркі, Річардом Воганом і Натаном Кенігом в Університеті Південної Каліфорнії, Лос-Анджелес, проект широко використовується в дослідженнях і освіті робототехніки.

UberSim — симулятор, призначений для швидкого тестування перед завантаженням програми у футбольного робота. Він використовує фізичний механізм ODE (Open Dynamics Engine). Програмне забезпечення підтримує спеціальних роботів і датчиків.

USARSim — симуляція пошуку та порятунку в містах. На основі Unreal Engine 2.0. Може інтерфейсуватися з Player і працювати в операційних системах Windows, Linux і MacOS.

Breve — це середовище тривимірного моделювання для розподілених систем штучного життя. Моделі поведінки визначаються за допомогою Python. Як і UberSim, Breve використовує фізичний механізм ODE та OpenGL для тривимірного графічного представлення.

V-REP — корисний 3D симулятор для навчального процесу, він дозволяє моделювати складні системи, окремі датчики, механізми тощо.

Webots — програмний продукт швейцарської компанії Cyberbotics. Він забезпечує підтримку різних мов програмування, таких як C/C++, Java, Python, URBI та MATLAB. Крім того, він сумісний із програмним забезпеченням сторонніх виробників через TCP/IP.

Gazebo може імітувати складні системи та різні сенсорні компоненти. Це корисно для проектування роботів, які взаємодіють, наприклад піднімають або хапають предмети, штовхають і виконують дії, які вимагають розпізнавання та локалізації в просторі.

ARGoS — це модульний багатомоторний тренажер для гетерогенної роєвої робототехніки. Система може використовувати приблизно 10 000 колісних роботів у режимі реального часу під час моделювання.

TeamBots — багатоагентна симуляційна програма для роботів, яка дозволяє створювати багатоагентні системи управління в динамічних середовищах з візуалізацією. Ви можете розробити та реалізувати свою систему керування в програмі моделювання, а потім перевірити свою систему керування в реальній мобільній роботі.

Для теоретичного обґрунтування представлених питань розроблено програмне забезпечення для моделювання та взаємодії роботизованої групи, яке базується на фреймворку Unity 5 – мультиплатформенному движку з різними функціями та інструментами. Програма розроблена на мові програмування C+ в інтегрованому середовищі розробки (IDE) MonoDevelop for Windows 10. Функціонал програмного забезпечення видно на (рис. 4.3) включає три режими роботи: «Без загальних знань», «Раніше відома територія» та «З загальними знаннями». Перші два режими використовують лише частину системи прийняття рішень для планування маршруту та уникнення перешкод. Третій режим реалізує повний процес прийняття рішень. Усі вони надають дані про стан навколишнього середовища та кожного робота в будь-який момент.

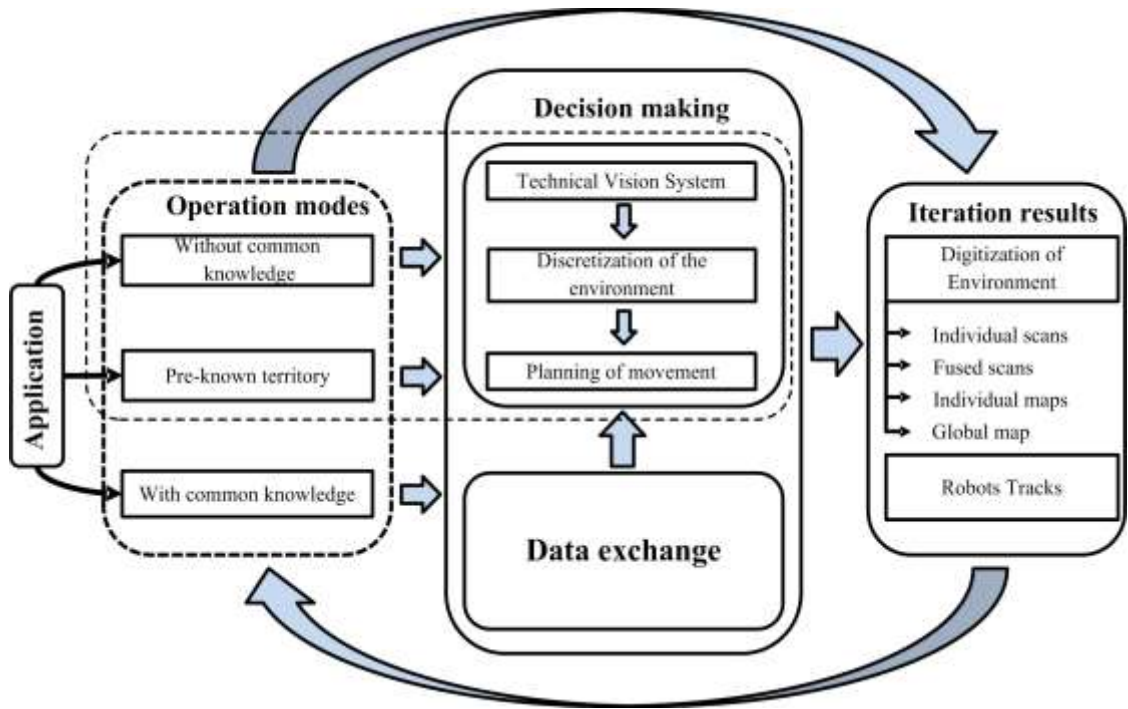


Рисунок 4.3 - Структура системи

4.2 Аналіз характеристик роботизованої системи

Роботизовану систему можна охарактеризувати за допомогою ряду параметрів, таких як швидкість обертання, швидкість руху, поточне положення та орієнтація в просторі. Крім того, враховується цільове розташування, а також система прийняття рішень, яка зображена на(рис. 4.4).

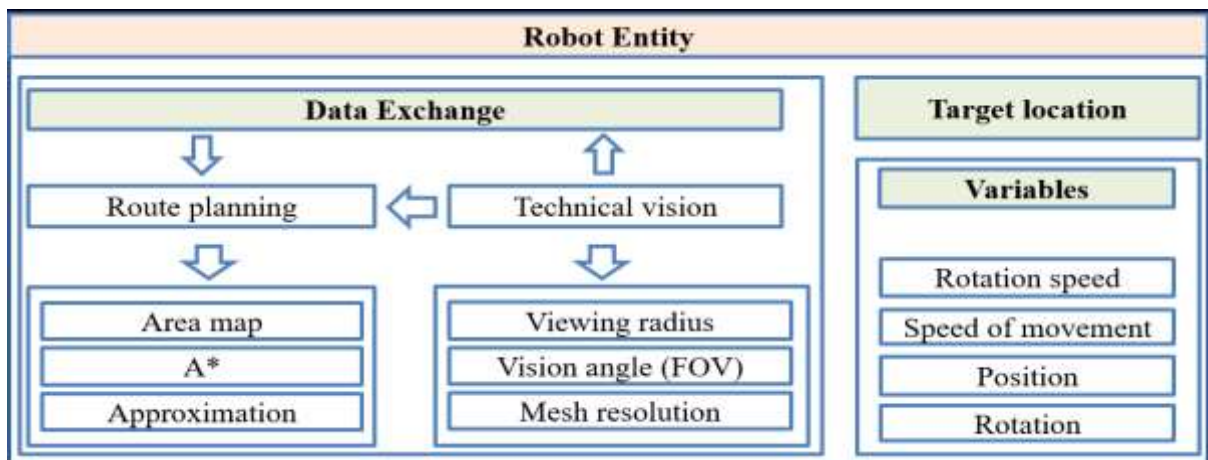


Рисунок 4.4 - Характеристики роботизованої системи

У процесі моделювання використовувалися чотири різні випадкові сцени, показані на рис. 4.6. Результати моделювання будуть описані в наступному розділі.

У процесі моделювання використовувалася група з трьох роботів, оснащених Pioneer 3-AT і TVS можна побачити на (рис. 4.5). Ця роботизована платформа була розглянута в попередній роботі, де також надано опис кінематики платформи.

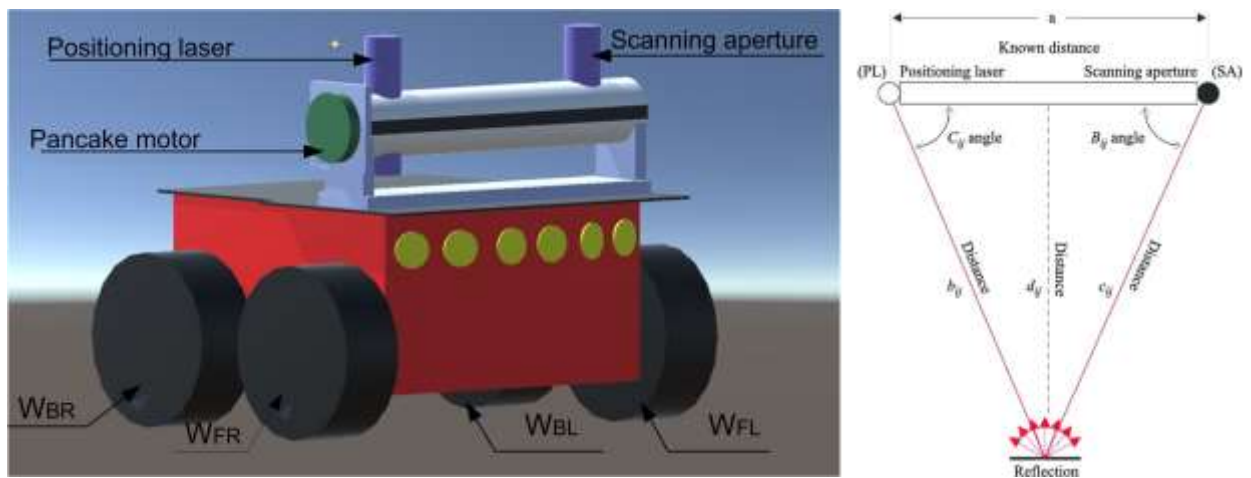
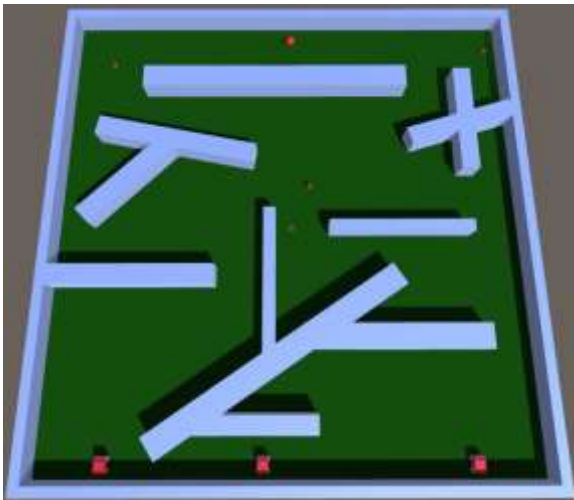


Рисунок 4.5 - Мобільна роботизована платформа Pioneer 3-AT

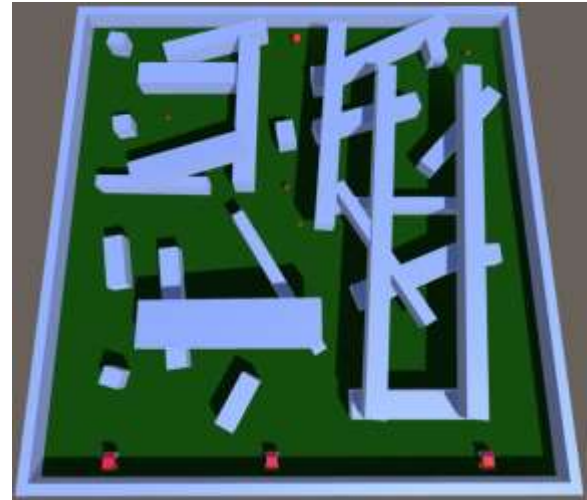
4.3 Вплив обміну даними на планування шляху

Для отримання результатів було створено три сценарії для кожної сцени. У першому сценарії роботи рухалися незалежно один від одного (без обміну знаннями та даними) – «без загального знання». У другому сценарії («із загальними знаннями») три роботи об'єднували отриману інформацію та використовували загальні знання про місцевість для планування шляху (реалізований метод обміну даними). В останньому сценарії група рухалася з картою місцевості – «з попередньо відомою територією». У кожному сценарії роботи повинні були досягти своїх особистих цілей, а потім досягти спільної точки.

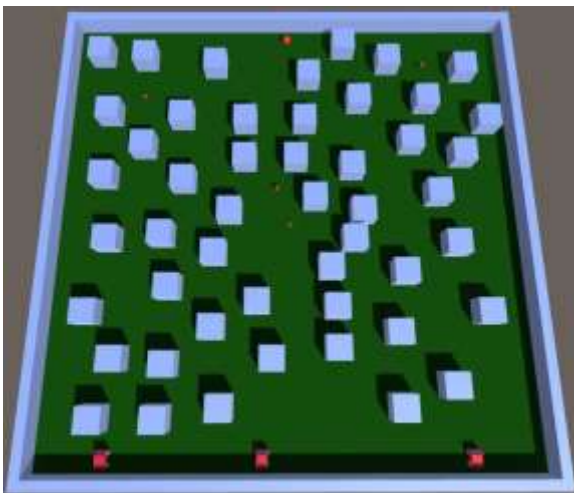
Для моделювання було використано чотири різні сцени захарашеного середовища можна побачити (рис. 4.6). Перші дві сцени (рис. 4.6а і рис. 4.6б) представляють закрите середовище лабіринту з довільно розташованими стінами. Різниця між ними полягає в тому, що в другій сцені використовується другий рівень стін, розміщений поверх першого. Третя сцена (рис. 4.6в) показує закрите середовище для захарашеного складу, а остання сцена (рис. 4.6г) показує офісну будівлю після стихійного лиха.



(а) Сцена №1



(б) Сцена №2



(в) Сцена #3



(г) Сцена #4

Рисунок 4.6 - Сцени, які використовуються для моделювання

Для всіх сценаріїв було виконано 100 симуляцій у кожній сцені. Кожна симуляція починається з тих самих початкових параметрів (положення, швидкість, точність сканування, основні та вторинні цілі) роботів у початковій точці. Результати моделювання та зібрані дані показані на рис. 4.7.

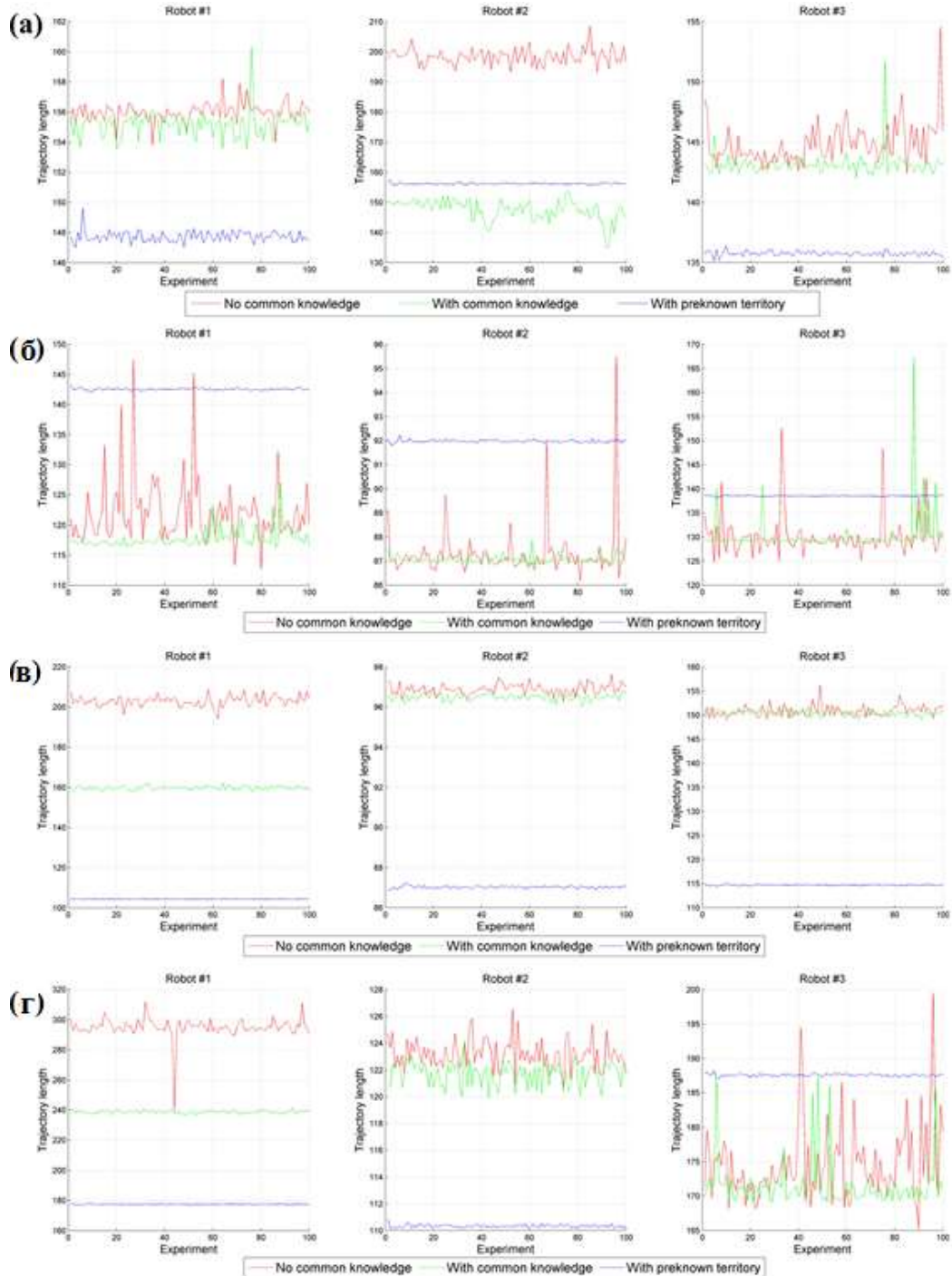


Рисунок 4.7 - Довжина траєкторій

Аналізуючи отримані результати, можна побачити, що є відхилення в довжині траєкторій кожного робота в усіх трьох сценаріях (табл. 4.1). Наприклад, для робота № 1 на рис. 4.7б у випадку «немає загальновідомих» відхилень становить 4,32%. Це означає, що для кожної ітерації симуляції робот вибирав різні шляхи для досягнення своїх цілей. Загалом його середній маршрут залишається незмінним. Однак у деяких випадках, які показані як високі піки на рис. 4.7б, маршрут значно відрізняється від середньої довжини маршруту.

Можна відзначити ще одне спостереження: попереднє знання території не завжди призводить до скорочення довжини траєкторії. Це можна побачити на рис. 4.7а (робот № 2), рис. 4.7б (робот №1, робот №2, робот №3), рис. 4.7г (робот №3) для випадку «з попередньо відомою територією».

Ці два спостереження, згадані вище, є результатом особливостей використаного алгоритму A^* та невизначеності щодо невідомої території. Відповідно до принципу використання TVS, як уже зазначалося в розділі 2, для розрахунку мертвих зон було обрано алгоритм A^* . Його евристичний характер і структура забезпечують адекватне рішення для наших потреб у плануванні маршруту. Алгоритм матриці орієнтації вирішує проблему дискретного відображення, яка використовується для розрахунку мертвих зон робота, і має кілька переваг. Наприклад, швидке перетворення координат, отриманих з TVS, на карту планування шляху зменшує потребу в подальшій обробці хмари точок з TVS для відображення у випадку обміну даними та дозволяє швидше обчислення, порівняно, наприклад, із алгоритмом Дейкстри [51].

Введення загальної бази знань допомагає зменшити відхилення траєкторій і наблизити їх до оптимального рішення (за винятком окремих аномалій, таких як піки на рис. 4.7а і рис. 4.7б, пов'язані з роботом # 3 у сценарії «із загальними знаннями»). Система TVS виявляє будь-які відхилення на траєкторії роботів, головним чином через порядок виявлення перешкод.

Результати моделювання наведені в таблиці. 4.1 та на рис. 4.8. Порівнюючи усереднені відстані, отримані під час моделювання, можна побачити, що використання загальної бази знань має переваги в усіх сценах. Результати показують, що роботизована група (RG) із реалізованим методом обміну даними має середню довжину групової траєкторії менше 6,2% (табл. 4.1, Сцена №1) до 10% (табл. 4.1, Сцена №4), порівняно з відстані окремих траєкторій автономних роботів (при використанні негрупового руху). Групова довжина траєкторії визначається як сума окремих траєкторій. Шляхом масштабування результатів для окремих роботів у групі можна досягти покращення довжини траєкторій до рівня 21,3% (табл. 4.1 Сцена № 3,Робот№1).

Тепер очевидно, що використання методу обміну даними для злиття індивідуальних знань у загальні позитивно впливає на роботизоване групове пересування та розрахунок. Виникає інше питання: яка ефективність окремих роботів у групі при розрізанні місцевості у разі розосередженого початкового розміщення (розділу місцевості).

Найважливіша мета цього дослідження – запропонувати найкраще рішення поставленої проблеми. Рис. 4.7 загалом показує, що наше рішення (зелений графік, застосовуючи загальні знання, отримані шляхом об'єднання сканованих даних від n членів групи) завжди пропонує відповідне рішення щодо планування шляху, яке іноді навіть може бути кращим, ніж «майже ідеальний випадок», коли конфігурація середовища попередньо відома (окремий випадок б) на рис. 4.7. Цей випадок відповідає практичній ситуації, коли реальна сцена захарашена сумішшю безперервних і невеликих перешкод, випадково розташованих у розглянутому кадрі.

Таблиця 4.1 - Порівняння результатів планування руху (використані нормалізовані одиниці каркаса на відстані)

	Scene #1			Scene #2			Scene #3			Scene #4		
	Соло	Група	Співвідн ошення	Соло	Група	Співвідн ошення	Соло	Група	Співвідн ошення	Соло	Група	Співвідн ошення
Робот №1	155.99	155.17	0.0053	122.02	117.7	0.035	202.97	159.72	0.213	295	238.6	0.19
Робот №2	198.46	172.68	0.13	87.28	87.07	0.002	96.9	96.5	0.0042	123.2	121.7	0.012
Робот №3	147.76	143.16	0.0312	149.69	130.46	0.13	150.83	150.45	0.0025	174.6	171.6	0.018
Всього	502.21	497.86	0.062	359.0	335.32	0.066	450.71	406.67	0.098	592.8	531.9	0.1

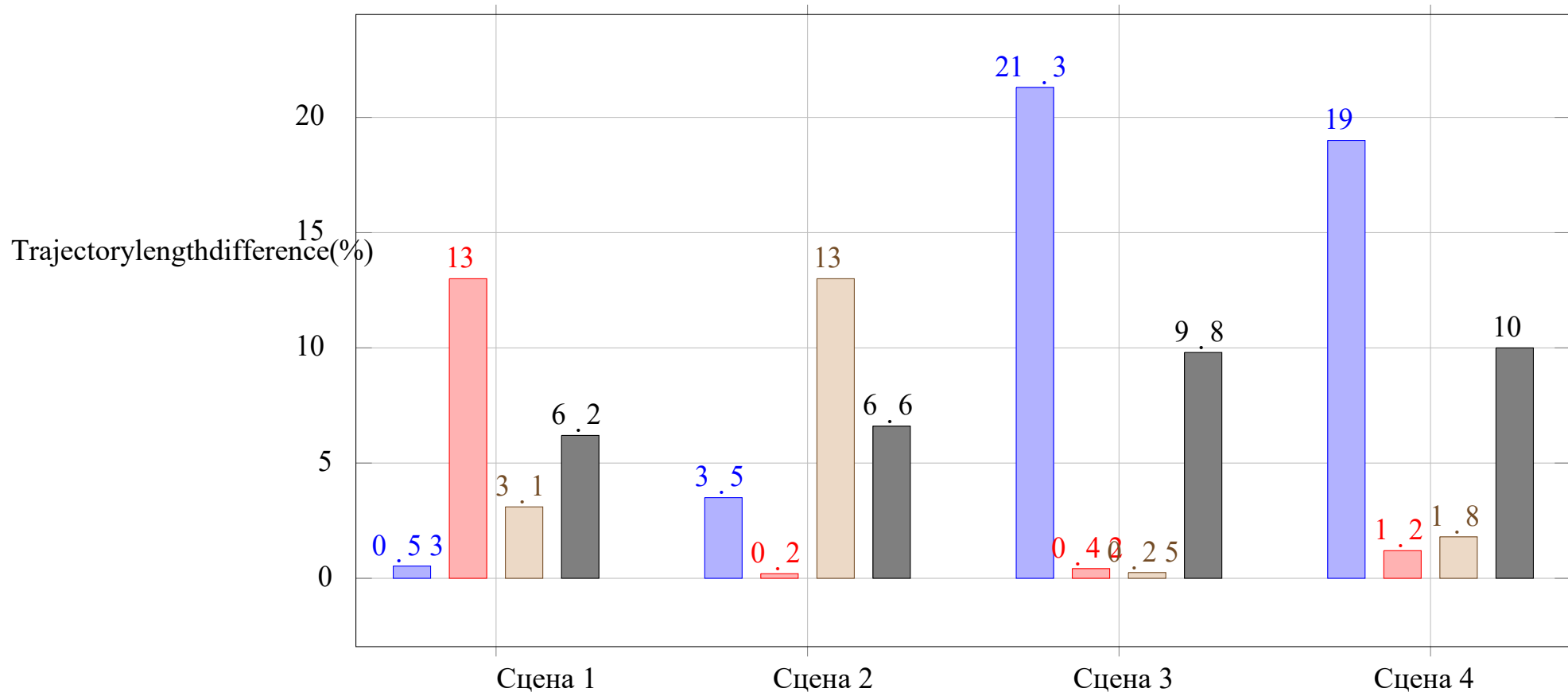


Рисунок 4.8 Порівняння довжини траєкторії для кожної зі сцен у відсотках

На нашу думку, такий варіант найбільш імовірний у реальному житті для розглянутої задачі. Більш того, в розглянутій задачі існування попередньо відомого середовища (обстеження після катастроф) практично неможливо. Отже, ми вважаємо цю обставину одним із вагомих отриманих внесків у нашому дослідженні.

Щодо обґрунтування такої несподіваної поведінки нашого алгоритму, можна зазначити наступне. Пошук A^* (на заздалегідь відомій території) в інформатиці та математиці — це алгоритм пошуку першого найкращого збігу на графі, який знаходить маршрут з найменшою вартістю від однієї вершини (початкової) до іншої (цільової, кінцевої). Окрема Сцена №2 на рис. 4.7б демонструє цей принцип: у випадку «З попередньо відомою траєкторією» алгоритм не розглядає весь можливий набір траєкторій, а зупиняється на першому довільному отриманому прийнятному рішенні (за природою будь-яких евристичних алгоритмів), тобто роботи використовують не найближчий шлях, а перший найкращий збіг, який існував на карті в поточному середовищі. Однак такий висновок, заснований лише на симуляційному аналізі, не може бути остаточним, оскільки його підтвердження потребує реальних експериментів, оскільки будь-яке складне явище в реальному житті може мати багато пересічних причин або підкомпонентів.

4.4 Висновки до розділу

Ройова робототехніка, заснована на принципах децентралізованого підходу та самоорганізованої колективної поведінки, виявляється інноваційним методом для розв'язання різноманітних завдань у сфері мультироботних систем. Зазначений підхід дозволяє досягати бажаної колективної поведінки шляхом локальної взаємодії між роботами та їхнім оточенням, що імітує природний інтелект роя.

Потенціал ройової робототехніки є значущим у завданнях розвідки, дослідження, збору даних та інших фізично розподілених об'єктів, завдяки

стійкості, толерантності до збоїв та децентралізованому управлінню. Однак вирішення проблем цієї галузі вимагає значних зусиль у розробці алгоритмів, інфраструктури для тестування та експериментів.

Подальше дослідження та експерименти у напрямку розробки концептуальної схеми поведінки роботизованої групи можуть призвести до ще більшого розвитку та оптимізації ройової робототехніки для різних практичних застосувань.

У сфері планування маршруту використання комплексного підходу, що включає навігацію, локалізацію та планування руху, з основою на алгоритмі A^* , дозволяє досягати динамічного та ефективного планування маршруту в реальному часі.

Щодо моделювання, воно є важливим етапом в розробці робототехнічних систем, дозволяючи планувати, тестувати та вдосконалювати їхні функції перед практичною реалізацією. Незважаючи на переваги, важливо враховувати, що моделі лише симулюють поведінку роботів на основі попередньо визначених правил і можуть не враховувати всі фактори реального досвіду.

Зазначені платформи моделювання, такі як Player/Stage, UberSim, USARSim, Breve, V-REP, Webots, Gazebo, ARGoS, та TeamBots, використовують різні підходи та мови програмування для створення моделей роботів та їх поведінки. Програмне забезпечення на базі фреймворку Unity 5 також виявляється важливим інструментом для вивчення та тестування різних режимів роботи в різних умовах навколишнього середовища.

Отже, розглянуті аспекти ройової робототехніки та моделювання є ключовими для подальшого розвитку та впровадження інновацій у галузі робототехніки.

Була проведена характеристика роботизованої системи за допомогою різних параметрів, включаючи швидкість обертання, швидкість руху та орієнтацію в просторі. Моделювання включало чотири випадкові сцени з

групою з трьох роботів, обладнаних Pioneer 3-AT і TVS. Отримана інформація слугує основою для подальшого вивчення та аналізу результатів.

Дослідження впливу обміну даними на планування шляху виявило три сценарії для роботів в різних середовищах та використання чотирьох сцен захищеного середовища для моделювання. Результати показали, що обмін інформацією та використання загальних знань призводить до скорочення довжини траєкторій роботів, покращуючи ефективність навігації у різних сценаріях.

Загальна тенденція вказує на перевагу використання обміну даними та загальної бази знань у груповому русі роботів. Результати цього дослідження можуть служити основою для подальших робіт у галузі робототехніки та оптимізації планування маршрутів.

ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі було встановлено та реалізовано систему комунікації, взаємодії та передачі даних для мобільної роботизованої групи, базуючись на конфігурації динамічного мережевого графіка та 3D-лазерній системі технічного бачення. Група роботів, оснащена 3D лазерною системою, працює в режимі реального часу, відвідуючи цікаві точки та створюючи тривимірну хмару точок навколишнього середовища.

Спроековано та реалізовано модель передачі даних для роботизованої групи, розроблено систему моделювання та аналізу передачі даних. Проведена оптимізація передачі даних для ефективності при роботі з невеликою кількістю роботів, що дозволяє підвищити продуктивність системи.

Вивчено вплив передачі даних на групове планування шляху роботів та проведено аналіз ефективності використаної методології. Система динамічної мережі, базована на методі зміни лідера, була успішно впроваджена для поліпшення обміну даними та навігації групи, роблячи їх більш адаптивними до змін у середовищі.

Дослідження відкриває можливості застосування розробленої методології в мобільних роботах для покращення роботизованої навігації в різноманітних умовах середовища. Дана кваліфікаційна робота може мати важливий внесок у сферу робототехніки та вивчення групової поведінки роботів у реальному часі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Lindner, L., Rodriguez-Quinonez, J. C., FloresFuentes, W., Hipolito, J. N. (2019). Software Advances using n-agents Wireless Communication Integration for Optimization of Surrounding Recognition and Robotic Group Dead Reckoning. *Programming and Computer Software*, 45(8), 557-569.
2. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Lindner, L., Flores-Fuentes, W., Rodriguez-Quinonez, J. C., Mercorelli, P. (2020). Influence of data clouds fusion from 3D real-time vision system on robotic group dead reckoning in unknown terrain. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(2), 368-385.
3. O.Yu. Sergiyenko, M.V.Ivanov, V.V.Tyrsa, V.M.Kartashov, M.Rivas-Lopez, D.HernandezBalbuena, W. Flores-Fuentes, J.C. Rodriguez-Quinonez, J.I. Nieto-Hipolito, W. Hernandez, A. Tchernykh, Data transferring model determination in robotic group, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 83, 2016, Pages 251-260
4. Lars Lindner, Oleg Sergiyenko, Moises Rivas-Lopez, Daniel Hernandez-Balbuena, Wendy Flores-Fuentes, Julio C. Rodriguez-Quinonez, Fabian N. Murrieta-Rico, Mykhailo Ivanov, Vera Tyrsa, Luis C. Basaca-Preciado, (2017) "Exact laser beam positioning for measurement of vegetation vitality", *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, Vol. 44 Issue: 4, pp. 532-541
5. Mykhailo Ivanov, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Vladimir Kartashov, Yelizaveta Tolstykh,
6. MoisesRivas-Lopez, Daniel Hernandez Balbuena, Paolo Mercorelli, Julio Rodriguez - Quinonez, Wendy Flores-Fuentes, Lars Lindner, "Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3d TVS" 2017 Radar. Satellite Navigation. Radiomonitoring, Kharkov, 2017, pp. 55-60.

7. Mykhailo Ivanov, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Vladimir Kartashov, Wilmar Hernandez, Sergiy Sheiko, Marina Kolendovska, Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS, IEEE, IECON 2018.
8. Ivanov, M.V., Sergiyenko, O.Y., Tyrsa, V.V., Lindner, L., Rodriguez-Quinonez, J.C., FloresFuentes, W., Nieto Hipolito, J. I. (2019). Wireless integration to optimize environmental recognition and calculate the trajectory of a group of robots. Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS, 31(2), 67-82.
9. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Mercorelli, P., Hernandez, W., Tyrsa, V., Hernandez-Balbuena, D., Iryna, T. (2019, June). Effective informational entropy reduction in multi-robot systems.
10. Teme based on real-time TVS. In 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1162-1167).
11. O. Sergiyenko, V. Kartashov, M. Ivanov, D. Hernandez-Balbuena, V. Tyrsa and J. I. NietoHipolito, "Transferring model in robotic group,"2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Santa Clara, CA, 2016, pp. 946-952.
12. L. Lindner, Oleg Sergiyenko, Moises Rivas-Lopez, Mykhailo Ivanov, Julio C. RodriguezQuinonez, Daniel Hernandez-Balbuena, Wendy Flores-Fuentes, Vera Tyrsa, Fabian N. Murrieta-Rico, Paolo Mercorelli, "Machine vision system errors for unmanned aerial vehicle navigation," 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 2017, pp. 1615-1620.
13. Miguel Reyes-Garcia, Lars Lindner, Moises Rivas-Lopez, Julio C. Rodriguez-Quinonez, Wendy Flores-Fuentes, Mykhailo Ivanov, Fabian N. Murrieta-Rico, Alexander Gurko, Viktor Melnik, Reduction of Angular Position Error of a Machine Vision System using the Digital Controller LM629, IEEE, IECON 2018.

14. Reyes-Garcia, M., Sergiyenko, O., Ivanov, M., Lindner, L., Rodriguez-Quinonez, J. C., Hernandez-Balbuena, D., Murrieta-Rico, F. N. (2019, June). Defining the Final Angular Position of DC Motor shaft using a Trapezoidal Trajectory Profile. In 2019 IEEE 28 th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1694-1699).
15. Hernandez, W., Mendez, A., Ballesteros, F., Gonzalez-Posada, V., Jimenez, J. L., Tyrsa, V., Ivanov, M. Quezada-Sarmiento, P. A. (2019, October). A method of image classification by using multidimensional scaling. In IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Vol. 1, pp. 5559-5565).
16. A Comparative Example Between The Use Of Pca And Mds For Image Classification / Hernandez, W., Mendez, A., Flor-Unda, O., Camejo, I.M., Kolendovska, M.// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17 June 2020 до 19 June 2020; Volume 2020-June, June 2020, № 9152565, Pages 1353-1358.
17. Algorithm For Generating Refined Frequency Estimates In Atmospheric Radio Sounding Systems / Kartashov V., Hernandez W., Hernandez-Balbuena D., M. Kolendovska, Konovalenko O., Melnyk V.// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17 June 2020 до 19 June 2020; Volume 2020-June, June 2020, № 9152562, Pages 79-82.
18. Application of Fast Frequency Shift Measurement Method for INS in Navigation of Drones / D. Avalos-Gonzalez, D.H. Balbuena, V. Tyrsa, V.M. Kartashov, M. Kolendovska, S. Sheiko, O. Sergiyenko, V. Melnyk, F.N. Murrieta-Rico // IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – P. 3159–3164.
19. Avalos-Gonzalez, D., Sergiyenko, O., Hernandez-Balbuena, D., Tyrsa, V., Kartashov V.M., V., Rivas-Lopes, M., Murrieta-Rico, F.N. Constraints

- definition and application optimization based on geometric analysis of the frequency measurement method by pulse coincidence// Measurement: Journal of the International Measurement Confederation (USA). 2018, V.126. P. 184-193.
20. Book "Control and Signal Processing Applications for Mobile and Aerial Robotic Systems", Hardback - Advances in Computational Intelligence and Robotics English. Edited by Oleg Sergiyenko, Moises Rivas-Lopez, Wendy Flores-Fuentes, Julio Cesar Rodríguez-Quíñonez, Lars Lindner. Editorial IGI Global, Hershey, United States, January 2020, 340 páginas. ISBN10 152259924X, ISBN13 9781522599241.
21. Cesar Sepulveda-Valdez ; Oleg Sergiyenko ; Vera Tyrsa ; Wendy Flores-Fuentes ; Julio César Rodríguez-Quíñonez ; Fabian Natanael Murrienta-Rico ; Jesús Elías Miranda-Vega ; Paolo Mercorelli ; Marina Kolendovska. "Geometric analysis of a laser scanner functioning based on dynamic triangulation," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17 - 19 of June 2020, pp. 1398-1403, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152268.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152268>
22. Cuauhtémoc Mariscal-García; Wendy Flores-Fuentes; Daniel Hernández-Balbuena; Julio C. Rodríguez-Quíñonez ; Oleg Sergiyenko. "Classification of Vehicle Images through Deep Neural Networks for Camera View Position Selection," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1376-1380, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152440.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152440>
23. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision/ O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quíñonez, IGI Global, 2016; 341p.
24. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission, /Oleynikov, V., Zubkov, O., Kartashov, V., ...Sheiko, S., Babkin, S.//2019 IEEE International

- Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019 - Proceedings, 2019, pp. 175-178.
25. Features of acoustic noise of small unmanned aerial vehicles / Semenets, V.V., Kartashov, V.M., Leonidov, V.I. //Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz* and *Radiotekhnika*), 2020, 79(11), pp. 985-995.
26. Geometric Analysis Of A Laser Scanner Functioning Based On Dynamic Triangulation /Sepulveda-Valdez, C., Sergiyenko, O., Tyrsa, V, Mercorelli, P., Kolendovska, M.// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17 June 2020 до 19 June 2020; Volume 2020-June, June 2020, № 9152268, Pages 1398-1403
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152255>
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9161870>
27. I. Y. A. Corpus, L.Lindner, O.Sergiyenko. "Transimpedance Amplifier for Laser Scanning System Range Extension," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1421-1426, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152487.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152487>
28. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Mercorelli, P., Hernandez, W.c, Rodriguez Quinonez, J.C.d, Katashov V., Kolendovska, M., Iryna, T. Effective informational entropy reduction in multi-robot systems based on real-time TVS. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2019-June, 8781209, pp. 1162-1167.
29. Jonathan J. Sanchez-Castro ; Julio C. Rodríguez-Quiñonez ; Luis R. Ramírez-Hernández ; Guillermo Galaviz ; Daniel Hernández-Balbuena ; Gabriel Trujillo-Hernández ; Wendy Flores-Fuentes ; Paolo Mercorelli ; Wilmar Hernández-Perdomo ; Oleg Sergiyenko ; Félix Fernando González-Navarro. "A Lean Convolutional Neural Network for Vehicle Classification," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial

- Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1365-1369, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152274.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152274>
30. Lindner, L., Sergiyenko, O., Rivas-López, M., (...), Gurko, A., Kartashov, V.M. Machine vision system for UAV navigation; IEEE, 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC, 2016; pp.1–6. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841356.
31. M. Ivanov, O. Sergiyenko, V. Tyrsa, P. Mercorelli, V. Kartashov, W. Hernandez, S. Sheiko, M. Kolendovska. Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS // Proceedings of 44th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON).. -2018. – Washington DC, USA. -S. 3187-3192. . ISBN 978-1-5090-6683-4/18/.
32. Murrieta-Rico, F.N., Petranovskii, V., Galvan, D.H., Sergiyenko, O., Yocupicio-Gaxiola, R.I., De Dios Sanchez-Lopez, J. Phase effect in frequency measurements of a quartz crystal using the pulse coincidence principle. 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 185-190, 9152255, DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152255.
33. Oleksandr Sotnikov, Vladimir Kartashov, Oleksandr Tymochko, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Wendy Flores-Fuentes. Methods for Ensuring the Accuracy of Radiometric and Optoelectronic Navigation Systems of Flying Robots in a Developed Infrastructure. Chapter 16// Machine Vision and Navigation; Springer, Cham. pp.537–578. Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes, Wendy, Mercorelli, Paolo. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2_16.
34. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time/Kartashov, V., Oleynikov, V., Zubkov, O., Sheiko, S.// 2019 International Conference on Information and Telecommunication

- Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2019 - Proceedings, 2019, 9165362//.
35. Principles Of Construction And Assessment Of Technical Characteristics Of Multi-Frequency Atmospheric Sodar In The Humidity Measurement Mode / Kartashov, V.M., Sidorov, G.I., Sheiko, S.A., Kolendovskaya, M.M., Sergienko, O.Yu. // Telecommunications And Radio Engineering (English Translation Of Elektrosvyaz And Radiotekhnika), 2020, ISSN Print: 0040-2508, ISSN Online: 1943-6009, DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i4.50, p. 323-333.
 36. Research Of The Uncertainty Of Measurement Frequencies And Definitions Of The Frequency Signal In The Waveguide With Respect To Power / Semenets, V.Zakharov, I. Serhienko, M., Kartashov, V.M., Kolendovska, M., Hernandez, W., Hipolito, J.I.N., Tyrsa, V.// 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2019; Lisbon Congress CenterLisbon; Portugal; 14 October 2019 до 17 October 2019; CFP19IEC-ART; Код 155980, Volume 2019-October, October 2019, № 8927203, Pages 4674-4679.
 37. Spatial-Temporal Processing Of Acoustic Signals Of Unmanned Aerial Vehicles /Kartashov V.M., Oleinikov V.N., Zubkov O.V., Sheiko S.A., Kolendovska M.M.// Telecommunications And Radio Engineering (English Translation Of Elektrosvyaz And Radiotekhnika), 2020, ISSN Print: 0040-2508, ISSN Online: 1943-6009, DOI: 10.1615/Telecomradeng.v79.i9.40, p. 769-780.
 38. Stereoscopic Vision Systems In Machine Vision, Models, And Applications (Book Chapter)/ Ramírez-Hernández, L.R., Rodríguez-Quiñonez, J.C., Castro-Toscano, M.J., Kolendovska, M., Murrieta-Rico, F.N.// Machine Vision And Navigation, 2019 Machine Vision and Navigation30 September 2019, Pages 241-265.
 39. Strelkova T., Kartashov V., Lytyuga A., Strelkov A. Theoretical Methods of Images Processing in Optoelectronic Systems. Chapter 16. // Biometrics:

- Concepts, Methodologies, Tools, and Applications; Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez. (341p.), IGI Global, 2017; pp. 361-381. DOI: 10.4018/978-1-5225-0983-7.ch016.
40. Strelkova T., Kartashov V., Lytyuga A., Strelkov A. Theoretical Methods of Images Processing in Optoelectronic Systems. Chapter 6// Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision; Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez. (341p.) – USA, Herhey, IGI Global, 2016; pp.180-205.
41. Sytnik O., Kartashov V. Methods and Algorithms for Technical Vision in Radar Introscopy. Chapter 13// Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications. IGI Global, 2019; pp. 373-391.
42. The Use of Factorization and Multimode Parametric Spectra in Estimating Frequency and Spectral Parameters of Signal/Semenets, V., Kartashov, V., Sergiyenko, O., Rodriguez-Quinonez, J.C., Flores-Fuentes, W.//IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2020, 2020-June, p. 215-219.
43. Unda, O.F., Hernandez, W., Vargas, O., Mendez, A., Sergiyenko, O., Tyrsa, V. Construction of a robotic platform of differential type for first-year students of electronic engineering, 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2020, 24-26 de junio de 2020, Sorrento, Italia, pp. 538-543, 9161870, DOI: 10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161870.
44. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles/Kartashov, V., Oleynikov, V., Koryttsev, I., ...Babkin, S., Selieznov, I.//Proceedings - 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020, 2020, p. 377-380.
45. V. Semenets; Vladimir Kartashov ; Oleg Sergiyenko; Vyacheslav Tikhonov ; Paolo Mercorelli ; Sergiy Sheiko ; Nataliya Chmelarova. "The Use of

Factorization and Multimode Parametric Spectra in Estimating Frequency and Spectral Parameters of Signal," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 215-219, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152238.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152238>

46. Wilmar Hernandez ; Alfredo Mendez ; Omar Flor-Unda ; Vicente Gonzalez-Posada ; Jose Luis Jimenez ; Oleg Sergiyenko ; Julio C. Rodriguez-Quiñonez ; Mykhailo Ivanov ; Ivan Menes Camejo ; Marina Kolendovska. "A comparative example between the use of PCA and MDS for image classification," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1353-1358, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152565.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152565>

47. Карташов В.М. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы; Харьков: ХНУРЭ, 2014. 312 с.

48. Карташов В.М., Олейников В.Н., Колендовская М.М., Тимошенко Л.П., Капуста А.И., Рыбников Н.В. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов// Радиотехника. (Харьков). 2020. Вып. 201; С.120-129.

49. Карташов В.М., Посошенко В.А., Цехмистро Р.И., Тимошенко Л.П., Колендовская М.М. Методы ориентации, навигации и контроля мобильных робототехнических платформ// Радиотехника. (Харьков). 2019. Вып. 199. С. 38-44.

50. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи. Навч. посібник. Х.: Сміт, 2009. 448 с.

51. Офіційний сайт бази даних візуальних новел. [Електронний ресурс]

URL: <https://vndb.org/v?f=&o=a&p=12&s=rel> (дата звернення: 17.05.2022).