Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Розробка системи автоматизації для керування рухом групи роботів-маніпуляторів
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи АКТСІ-20-3

Демченко В.В.

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія

Керівник доц. Демська Н.П

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР _____ Невлюдов І. Ш.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ
Кафедра КІТАР
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
« 22 » квітня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Демченку Владиславу Владленовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи автоматизації для керування рухом групи роботів-маніпуляторів
Затверджена наказом по університету від 03.06.2024 р. № 545 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.06.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи використовуються складові компоненти системи: Модуль EV3, програмне середовище Webots

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ, обґрунтування актуальності роботи;
4.2 Визначення мети, предмету та об'єкту розробки;
4.3 Аналіз літературних джерел;
4.3 Симуляції групової роботи маніпуляторів;
4.4 Моделювання для групи однакових роботів;
4.5 Моделювання для групи різних груп роботів;
4.6 Аналіз результатів моделювання;
4.7 Питання забезпечення безпечних умов при моделюванні;
4.8 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Графічний матеріал у вигляді презентації – 12 арк. ф. А 4

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

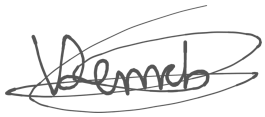
№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт-ка
1	Актуальність роботи, постановка задачі	22.04.24 – 30.04.24	виконано
2	Визначення мети, предмету та об'єкту розробки	01.05.24 – 08.05.24	виконано
3	Симуляції групової роботи маніпуляторів	09.05.24 – 14.05.24	виконано
4	Моделювання для групи однакових роботів	15.05.24 – 25.05.24	виконано
5	Моделювання для групи різних груп роботів	26.05.24 – 30.05.24	виконано
6	Аналіз результатів моделювання. Забезпечення безпечних умов при проведенні досліджень	31.05.24 – 04.06.24	виконано
7	Подання роботи на перевірку автоматизованою системою щодо дотримання академічної доброчесності	05.06.24 – 09.06.24	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	10.06.24 – 13.06.24	виконано
	Подання роботи на рецензію	14.06.24 – 16.06.24	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	17.06.24 – 20.06.24	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	21.06.2024	виконано

Дата видачі завдання 22.04.2024 р.

Студент _____ Демченко В.В.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Демська Н.П
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

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

23.06.2024  Владислав ДЕМЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 50 с., 1 табл., 20 рис., 1 дод., 13 джерел

РОБОТ, ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ, КЕРУВАННЯ, РОБОТ-МАНІПУЛЯТОР, ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ

Мета роботи – розробка та створення системи автоматизації для керування рухом групи роботів-маніпуляторів.

Об’єкт розробки – група роботів-маніпуляторів, призначених для виконання скоординованих завдань, це включає розробку технічних і програмних засобів для ефективного керування рухом.

Предмет розробки – технічні та програмні засоби, необхідні для створення та оптимізації системи автоматизації, зокрема механізми руху, сенсори для виявлення об'єктів, алгоритми обробки даних та системи керування.

У роботі було досліджено динаміку співпраці між групами простих, реактивних, автономних роботів, які беруть участь у спільному завданні з витягування ОМ.

Зокрема, розроблено імовірнісну модель для характеристики та прогнозування такої динаміки.

Було виявлено, що, представляючи експеримент як набір стохастичних подій з імовірностями, заснованими на простих геометричних міркуваннях, імовірнісна модель змогла забезпечити дуже хороше передбачення, як якісно, так і кількісно, динаміки співпраці як функції двох основних параметрів, вивчених в експерименті, кількості роботів і їх параметра часу захоплення.

ABSTRACT

Explanatory note: 50 p., 1 tabl., 20 pic., 1 applications, 13 sources

ROBOT, PHYSICAL MODEL, CONTROL, ROBOTIC ARM, SOFTWARE

The purpose of the work is to develop and create an automation system for controlling the movement of a group of robotic manipulators.

The object of development is a group of robotic manipulators designed to perform coordinated tasks.

The subject of development is hardware and software necessary for the creation and optimization of an automation system, including motion mechanisms, sensors for object detection, data processing algorithms and control systems.

The work investigated the dynamics of cooperation between groups of simple, reactive, autonomous robots participating in the joint task of extracting OM.

In particular, a probabilistic model has been developed to characterize and forecast such dynamics.

It was found that by representing the experiment as a set of stochastic events with probabilities based on simple geometric considerations, the probabilistic model was able to provide a very good prediction, both qualitatively and quantitatively, of the cooperation dynamics as a function of the two main parameters studied in the experiment, the number of robots and their capture time parameter.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 7
Вступ 8
1 Аналіз предметної області 10
1.1 Аналіз задач планування руху мобільних маніпуляторів 10
1.2 Аналіз робіт у галузі групового управління рухом роботів 12
1.3 Аналіз методів групового управління рухом роботів 13
1.4 Розподіл роботів у площині строю 15
1.5 Інструменти прогнозування колективної робототехніки 16
1.5.1 Моделювання 18
1.5.2 Контроль формування 18
1.5.3 Спільна маніпуляція 21
1.6 Завдання, які ставляться в роботі 23
2 Аналіз технічного завдання 26
3 Симуляції групової роботи маніпуляторів 31
3.1 Симуляції групової роботи маніпуляторів за допомогою Webots 31
3.2 Імовірнісна модель 32
3.2.1 Режим пошуку стіків 33
3.2.2 Інші режими та інші роботи 35
3.2.3 Перетворення ітерацій у часі 36
3.3 Результати моделювання 37
3.3.1 Моделювання для групи однакових роботів 37
3.3.2 Моделювання для групи різних груп роботів 42
3.4 Аналіз результатів моделювання 44
3.5 Забезпечення безпечних умов при проведенні досліджень 46
Висновки 47
Перелік джерел посилання 48
Додаток А Демонстраційний матеріал 50

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОМ – об’єкт маніпулювання;

РІ – ройовий інтелект;

ПК – персональний комп’ютер.

ВСТУП

Одним із способів підвищення продуктивності роботи команди роботів, без істотної зміни можливостей, є співпраця. Зокрема, коли співпраця досягається за допомогою механізмів з неявною комунікацією через навколишнє середовище, або за допомогою простих явних комунікаційних схем, таких як бінарна сигналізація, завдання, що виконується командою, може бути складнішим, а її продуктивність підвищеною без втрати автономії та відповідного збільшення складності на індивідуальному рівні [1].

В останні кілька років принципи управління ройового інтелекту (РІ) були успішно застосовані в ряді тематичних досліджень в колективній робототехніці: агрегації та сегрегації, розподіл роботи та розподіл завдань [2]. Існує багато застосувань, таких як: регулювання дорожнього руху, очищення відходів, спостереження, колективне навігування, спільне картографування, які до цього часу здійснювалися з використанням підходів, які не можуть бути класифіковані як РІ (або тому, що вони широко використовували глобальний зв'язок, мали централізоване управління, або використовували складні датчики), і для яких, підхід РІ дуже добре підійшов би через переваги, наведені вище [2].

Мета роботи – розробка та створення системи автоматизації для керування рухом групи роботів-маніпуляторів.

Об’єкт розробки – група роботів-маніпуляторів, призначених для виконання скоординованих завдань, це включає розробку технічних і програмних засобів для ефективного керування рухом.

Предмет розробки – технічні та програмні засоби, необхідні для створення та оптимізації системи автоматизації, зокрема механізми руху, сенсори для виявлення об'єктів, алгоритми обробки даних та системи керування:

– здійснити аналіз предметної області;

– проаналізувати задачі планування руху мобільних маніпуляторів;

– проаналізувати роботи у галузі групового управління рухом роботів;

– проаналізувати методи групового управління рухом роботів;

– проаналізувати принципи розподілу роботів у площині строю.

Пояснювальна записка виконано згідно з [3, 4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз задач планування руху мобільних маніпуляторів

Головною проблемою в плануванні руху є невизначеність притаманні контролю та сприйняттю робота. Включення невизначеності в планування може покращити якість обчислених планів, що призводить до набагато більш надійної роботи робота [5].

Планування в умовах невизначеності досягло значного прогресу за останні кілька років для мобільних роботів, але все ще значною мірою ігнорується для мобільних маніпуляторів.

Одна з ключових причин може полягати в тому, що більшість робіт зазвичай використовують консервативний підхід, який полягає в тому, щоб скласти руку до певної «безпечної конфігурації» та розглядати мобільний маніпулятор, по суті, як мобільного робота, де планувальники, розроблені для них, можуть безпосередньо використовуватися для вирішення проблем. Однак це дуже обмежуючий підхід, і він не працює в досить поширених сценаріях, коли мобільний маніпулятор не може рухатися від початку до мети без зміни конфігурації руки [6].

Планувальники, які враховують невизначеність для мобільних роботів, безпосередньо не застосовуються до мобільних маніпуляторів у таких сценаріях, оскільки врахування лише невизначеності базової пози недостатньо, оскільки це не гарантує безпечнішого шляху.

Тому, щоб отримати більш безпечний шлях для всього мобільного маніпулятора, слід застосувати більш комплексний підхід, наприклад, крім невизначеності базової пози, слід також враховувати вплив цієї невизначеності на рухи маніпулятора.

Якщо припустити, що рух маніпулятора сам по собі є досить точним (розумне припущення, враховуючи, що з’єднані кодери є досить точними),

невизначеність у положенні мобільної основи (яка може бути значною) має наслідки для безпеки (тобто зіткнення статус) рухів маніпулятора та завдання захоплення (роботизована рука).

Групуємо вплив невизначеності базової пози на двох рівнях:

а) рівень 1 – невизначеність базової пози розглядається лише для мобільних базових рухів і не переноситься на рух маніпулятора та завдання хапання;

б) рівень 2 – невизначеність базової пози транслюється в рух маніпулятора.

Розглянемо ефекти невизначеності як на рівні 1, так і на рівні 2.

Ієрархічний та адаптивний планувальник мобільного маніпулятора, який розумно планує як основу, так і руку, дозволяючи маніпулятору змінювати свою конфігурацію автономно (реконфігурація руки), коли це необхідно, якщо поточна конфігурація руки стикається з навколишнім середовищем, коли мобільний маніпулятор рухається за запланованим шляхом. Базові основні підпланувальники базувалися на вибірці: один для мобільної основи (у просторі базової пози), а інший для руки (у просторі конфігурації руки), з'єднані вільним чином. Планувальник отримав назву HAMP-U [7].

Він обмежено враховував лише невизначеність рівня 1 – припускає, що робот знаходиться в середній позиції (міра, представлена еліпсом невизначеності) і перевіряв зіткнення від середньої позиції до середньої позиції між двома вузлами.

Отже, якщо основа відхиляється від середнього положення під час виконання, може статися зіткнення. Хоча HAMP-U допоміг у створенні шляхів, які були дещо безпечнішими (з меншою ймовірністю зіткнень), ніж ті, що створені HAMP, він не був достатньо безпечним (запланований шлях для сценаріїв, які вимагають частих кроків реконфігурації руки, усе ще має більш ніж 40% шансів на зіткнення) [1].

Важливо відзначити, що включення рівня невизначеності 2 вимагає

вбудовування обчислень, пов’язаних з невизначеністю, на різних етапах планування шляху (розміщення зразків, їх з’єднання тощо), що, у свою чергу, вимагає дорогої операції перевірки тривимірних зіткнень, таким чином значно збільшує витрати на обчислення кінцевого планувальника.

Це одна з причин, чому планування в умовах невизначеності для мобільних маніпуляторів значною мірою ігнорує маніпулятора, і дослідники просто вибирають 2D-планування для мобільної бази.

Розробку надійного планувальника мобільного маніпулятора важко реалізувати для додатків у реальному часі, якщо не розглянути проблему великих обчислень, пов’язаних із плануванням мобільного маніпулятора. А аспект реального часу особливо важливий, особливо в невідомих середовищах, що передбачає повторне та почергове перепланування та дослідження (за допомогою датчиків) середовища [7].

HAMP вже уникає непотрібних 3D-перевірок зіткнень, спочатку перевіряючи 2D-проекційний відбиток основи з 2D-картою вартості (отриманою шляхом проектування 3D-даних діапазону від датчика до певної висоти), і лише якщо це без зіткнень, потім 3D-зіткнення виконується перевірка руки [7].

Однак, оскільки включення рівня невизначеності 2 значно збільшує кількість необхідних перевірок зіткнень, цього недостатньо, щоб скоротити час обчислення, і нам потрібно знайти додаткову ефективність.

1.2 Аналіз робіт у галузі групового управління рухом роботів

Аналіз робіт у галузі групового управління рухом роботів показує, що в даному напрямку дослідження націлені на вирішення проблем групового планування траєкторій, формування та підтримки строю.

Серед підходів, які використовуються для вирішення зазначених завдань, можна виділити метод штучних потенційних полів, які навчаються системи на базі штучних нейронних мереж, методи мультиагентного

управління, методи еволюційних обчислень, логічного висновку та методи, що базуються на використанні природних аналогій.

Метод потенційних полів [8] є одним з найпоширеніших, проте він має на увазі картографування області функціонування і має проблему попадання в локальні мінімуми. Крім того, метод потенційних полів вимагає застосування додаткових прийомів, що дозволяють враховувати змінні швидкості та прискорення об'єктів середовища.

Інтелектуальні системи, що навчаються, демонструють високий потенціал у завданнях управління рухом. Останні досягнення в цій галузі пов'язані з нейронними мережами глибокого навчання [9], які успішно вирішують завдання класифікації в системах технічного зору та управління.

Разом з тим слід зазначити, що нейронні мережі глибокого навчання вимагають наявності великих об'ємів навчальних вибірок і тривалого навчання для досягнення необхідної надійності. У зв'язку з недостатньо високою надійністю в системах управління нейронні мережі зазвичай використовуються в поєднанні з традиційними регуляторами.

Мультіагентні технології [9] також часто застосовуються для побудови систем групового управління мобільними роботами, оскільки вони дозволяють організовувати взаємодію об'єктів за умов можливих конфліктів, конкуренції, протидії. Мультіагентні технології у тому чи іншому вигляді застосовуються під час вирішення завдань управління у невизначених і конфліктних середовищах.

Еволюційні алгоритми, що добре зарекомендували себе при вирішенні завдань багатовимірної оптимізації, останнім часом набули актуальності у вирішенні завдань групового управління мобільними роботами. Це пов'язано з появою систем групового управління, що включають сотні і тисячі мобільних роботів.

1.3 Аналіз методів групового управління рухом роботів

Численні результати проведених досліджень вказують на ефективність гібридизації різних алгоритмів і методів у задачах планування та управління рухом роботів [10]. Зокрема, гібридизація методів при вирішенні завдань планування шляху призводить до збільшення інтегрального критерію якості до 50 %. У зв'язку з цим у роботі розробляються гібридні алгоритми управління рухом у тривимірному середовищі в умовах невизначеності.

Пропонується система планування та управління рухом, в якій присутні як реактивна складова [6], так і інтелектуальна. Ці дві складові доповнюють один одного і дозволяють функціонувати в середовищі, апріорна карта якого відсутня.

Структура системи планування та управління мобільного робота в невизначеному динамічному середовищі представлена на рис. 1.1 [8].

Блок планування руху на основі навігаційних даних *(y, x)* та даних про становище перешкод $y_П$ формує бажану траєкторію руху ψ_{tr}. Блок управління рухом формує вектор управління *u* виконавчими механізмами, які впливають на мобільного робота.

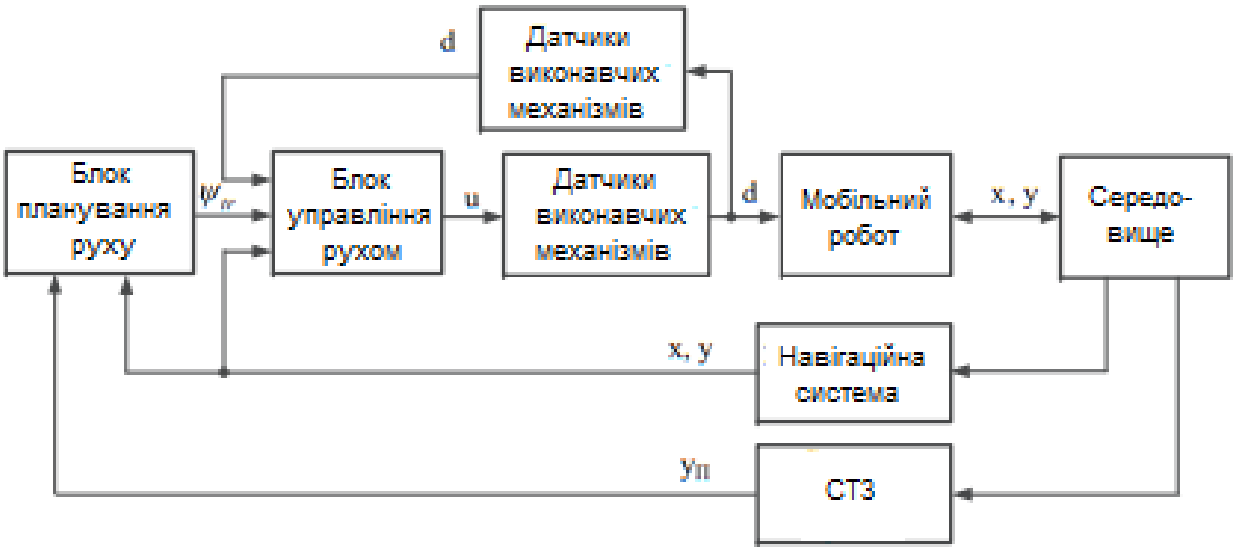


Рисунок 1.1 – Структура системи планування та управління мобільного робота в невизначеному динамічному середовищі

Для прикладу: є тривимірна прямокутна область, обмежена координатами *(L1, L2, L3)* (рис. 1.2), що містить точкові перешкоди $П_i$, розташування яких заздалегідь невідоме.

Перешкоди $П_i$ можуть переміщатися зі шматково-постійними швидкостями.

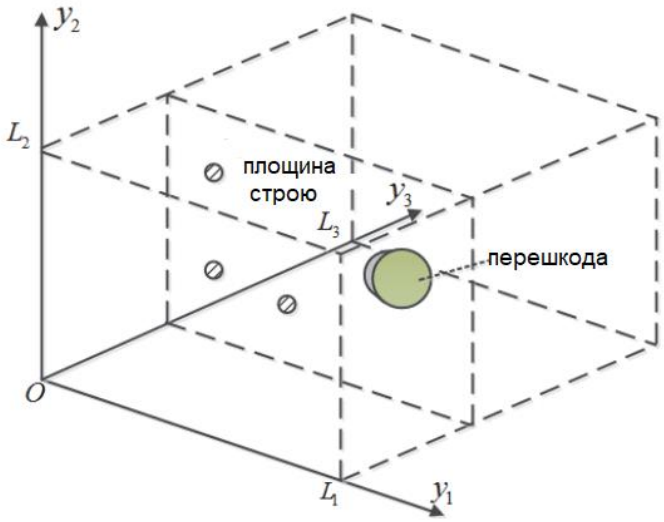


Рисунок 1.2 – Завдання обстеження області групою роботів

Мобільні роботи оснащені навігаційною системою, яка визначає їх положення в нерухомій системі координат.

Роботи групи також оснащені системою технічного зору, яка визначає поточне положення перешкод і інших об'єктів, і системою зв'язку.

1.4 Розподіл роботів у площині строю

Розглядається сукупність роботів і перешкод, виявлених системами технічного зору. Назвемо таку сукупність узагальненою групою рухомих об'єктів. Розв'язання задачі розподілу роботів у площині ладу можна поділити на три основні етапи [2].

На першому етапі виробляються об'єкти (роботи чи перешкоди), що знаходяться на мінімальній відстані до меж прямокутної області. Як

зазначені межі можуть використовуватися або вершини прямокутників, або їх ребра. Наприклад, на рис. 1.3 представлений варіант формування додаткових перешкод на основі координат об'єктів, що знаходяться найближче до кордонів прямокутної області. Ці об'єкти позначені рис. 1.3 хрестиками [1].

При цьому точки перетину перпендикулярів від найближчих об'єктів до меж прямокутної області також вважаються об'єктами узагальненої групи (перешкодами). Таким чином, узагальнена група включає мобільні роботи, перешкоди всередині прямокутної області і додаткові перешкоди на межах області [7].

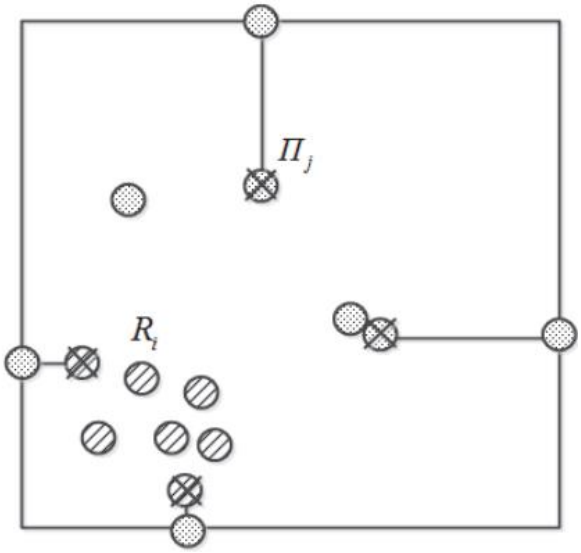


Рисунок 1.3 – Формування перешкод на кордонах області

При використанні як межі області функціонування вершин прямокутника, виділення найближчих об'єктів не проводиться. До узагальненої групи рухомих об'єктів включаються чотири перешкоди з координатами зазначених вершин.

На другому етапі здійснюється кластеризація об'єктів узагальненої групи, що включає роботів і перешкоди. Для здійснення кластеризації використовується механізм тріангуляції.

Зокрема, може бути використана тріангуляція Делоне, що володіє відомими перевагами [11]. При тріангуляції враховуються всі об'єкти – і

роботи, і перешкоди.

1.5 Інструмент прогнозування колективної робототехніки

Однією з головних труднощів при проектуванні ефективних роботизованих команд є проблема характеристики і прогнозування того, як на поведінку групи впливають апаратні та програмні характеристики індивідів, що утворюють групу. Особливо це стосується великих груп роботів, керованих повністю розподіленим способом. Оскільки витрати на обладнання високі, а експерименти з реальними роботами забирають багато часу, найкорисніше мати інструменти прогнозування, які дозволяють, наприклад, визначити оптимальну кількість роботів або оптимальні параметри керування для оптимальної роботи команди, перш ніж встановлювати всі деталі експериментальної установки [12].

Одним з популярних підходів є використання детального моделювання на основі датчиків, яке максимально реалістично моделює характеристики датчиків і виконавчих механізмів роботів, включаючи кінематичні шуми, а також особливості навколишнього середовища. Незважаючи на те, що ці типи симуляції корисні, вони мають ті незручності, що вони забирають багато часу як для розробки, так і для запуску, коли група роботів велика .

Крім того, кількість параметрів, що розглядаються цими типами моделювання, настільки велика, що потім важко виділити ті, які дійсно відіграють вирішальну роль у продуктивності команди [8].

1.5.1 Моделювання

Для прикладу розглянемо групу з 3 неголономних мобільних роботів і описуємо контролери, які використовують кооперативну схему локалізації, отриману раніше [12].

По-перше, ми припустимо, що роботи планарні і мають два незалежних

входу. Це означає, що ми повинні обмежити закони керування роботом тими, які регулюють два виходи [10].

По-друге, ми припускаємо, що роботам присвоєно мітки від 1 до 3, які обмежують вибір законів керування.

Робот 1 (тут позначений як R1) є лідером групи та слідує траєкторії, згенерованій планом високого рівня *g(t)* ∈ *SE(2)*. Ми приймаємо просту кінематичну модель для неголономних роботів. Кінематика і-го робота задана формулою:

$$\dot{x}_i = v_i \cos\theta_i, \quad \dot{y}_i = v_i \sin\theta_i, \quad \dot{\theta} = \omega_i \tag{1.1}$$

де $\boldsymbol{x}_i \equiv (x_i, y_i, \theta_i) \in SE(2)$, v_i та ω_i відповідно лінійна та кутова швидкості. Більшість комерційно доступних роботів не дозволяють безпосередньо керувати силами чи крутними моментами. Натомість вони включають контролери двигунів, які дозволяють специфікацію v_i та ω_i. Тому ми будемо розглядати їх як наші вхідні дані [12].

На рисунку 1.4 показуємо геометрію конфігурації з трьох роботів.

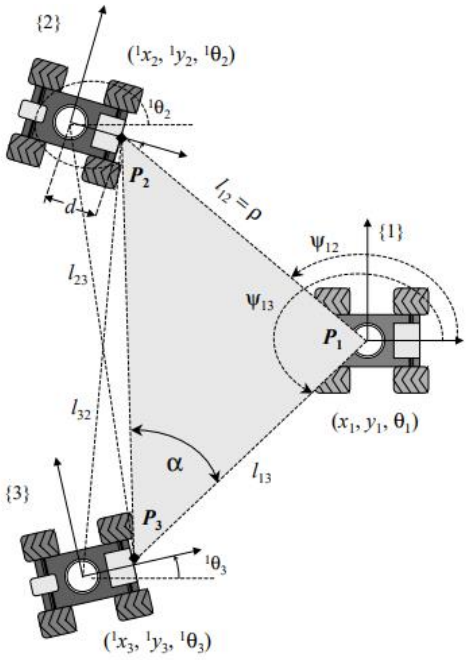


Рисунок 1.4 – 3-роботна геометрія управління пластом

Щоб підтримувати відносні відстані та орієнтації, ми представляємо два контролери, і виводимо третій контролер, який мотивується вищим кооперативним локалізатором [9].

1.5.2 Контроль формування

Початкові експерименти з управління пластом мали на меті перевірити реалізацію динамічної локалізації та відповідний підхід до керування [8].

У результаті на першому етапі експериментів розглядалися стабільні утворення, що йдуть по траєкторіях прямих ліній або поступових дуг. Відеодані з цих випробувань були записані за допомогою каліброваної камери [12].

Це дозволило записувати та аналізувати в автономному режимі дані про місцезнаходження пласта разом із оцінками положення локалізатора. Результати репрезентативного випробування можна знайти на рис. 1.5 -1.6.

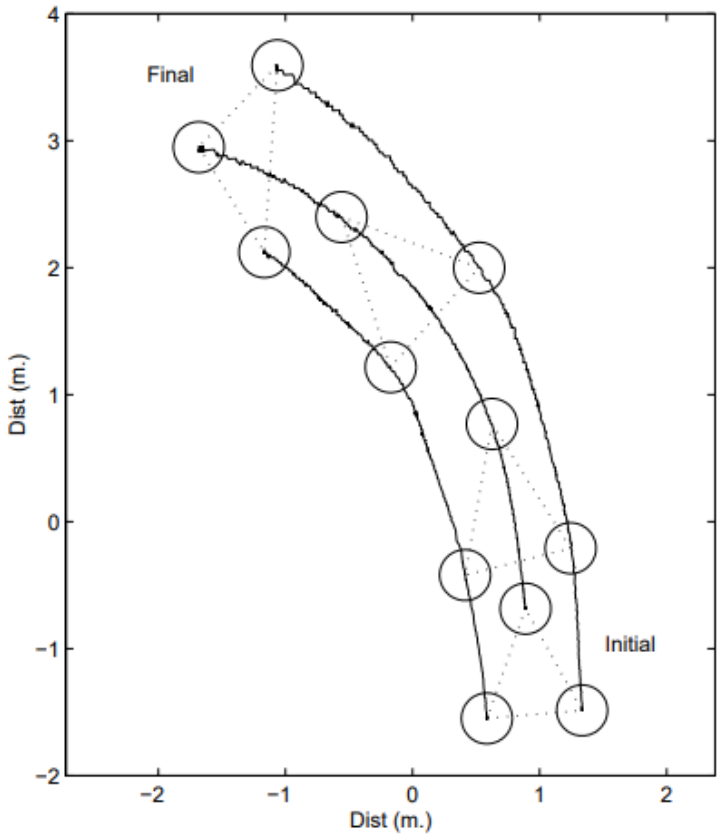


Рисунок 1.5 – Проста траєкторія для трикутної форми

У цьому випробуванні бажаною формацією був рівнобедрений трикутник, де обидва слідувачі зберігали відстань 1,0 м від лідера та відстань 0,7 м. На рисунку 1.5 показана фактична траєкторія формування на площині землі. На рисунку 1.6 порівнюються виміряні відстані від лідера до слідуючого з відстанями, розрахованими локалізатором. Результати здебільшого задовільні, із середньою різницею поділу 3,2% і 5,5% для лівих і правих слідуючих, відповідно. Розриви в даних локатора викликані пошкодженими даними зображення в результаті віддаленої передачі відео. Типові показники пошкодження зображення становили 15-20% для кожного робота, залишаючи періоди часу, коли локалізація була неможливою [12].

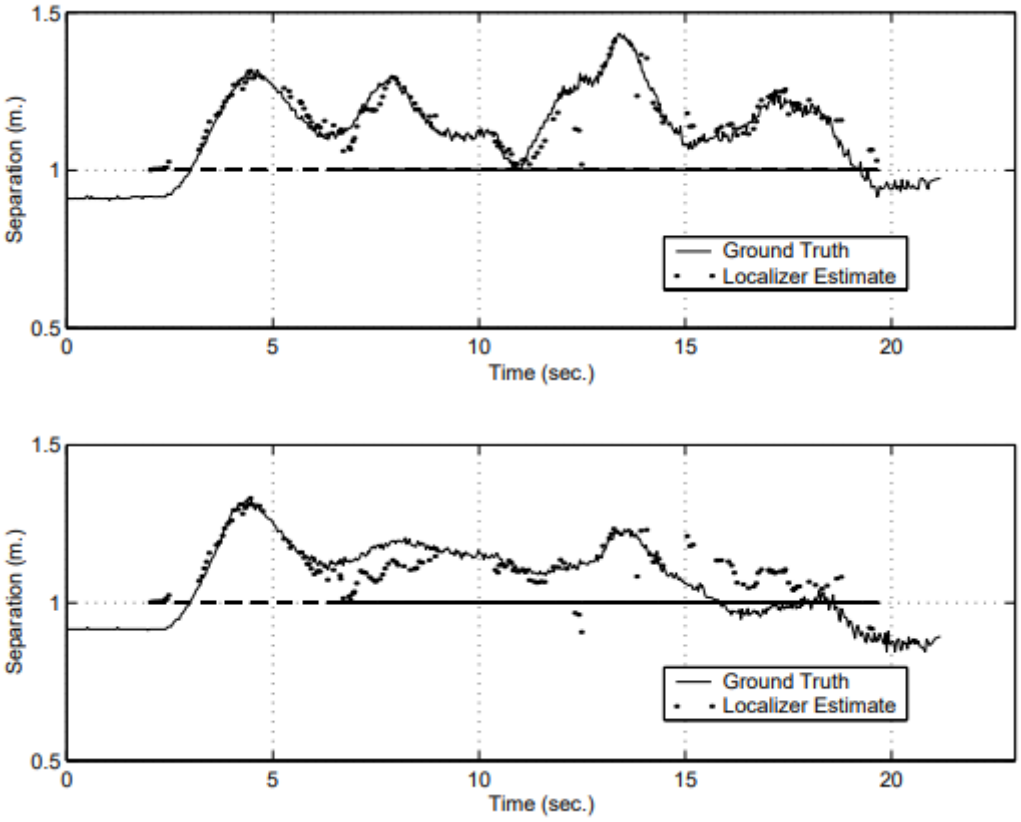


Рисунок 1.6 – Відстані поділу слідуючих: фактичні та оцінки локалізації

Фактична відстань завжди більша за бажану під час руху, оскільки ми використовуємо контролер із чистим зворотним зв’язком. Можна включити компонент прямої подачі, або прописавши план усім роботам, або

дозволивши послідовникам оцінити швидкість лідера [10].

Наші попередні експерименти з розширеним фільтром Калмана для оцінки швидкості [11] показали покращену продуктивність. Зараз ми знаходимося в процесі інтеграції нелінійних контролерів прямого зв'язку з використанням оцінки швидкості [9], щоб отримати кращу продуктивність відстеження помилок.

Після перевірки цієї концепції було вивчено додаткові форми для дослідження надійності запропонованої структури. Це включало різні орієнтації формування, відстані поділу тощо. Результати залишалися відповідними результатам, отриманим у попередніх прогонах, як показано на рис. 1.7, де послідовники зберігали відносну позу до лідера, який рухався по круговій траєкторії. Точки даних, відсутні в лівій частині малюнка, перебували поза полем огляду камери, розташованої зверху [9].

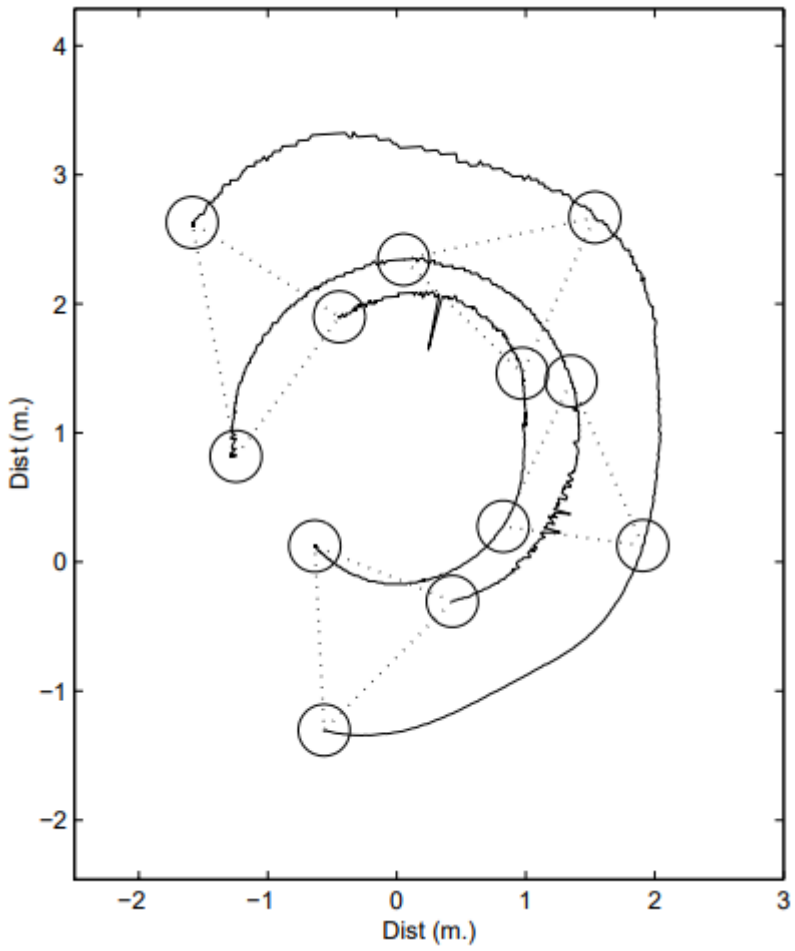


Рисунок 1.7 – Кругова траєкторія для трикутної форми

1.5.3 Спільна маніпуляція

Здатність підтримувати задану форму дозволяє роботам «захоплювати» об’єкти всередині себе та «текти» формацією, гарантуючи транспортування об’єкта в потрібне положення [12].

Маючи можливість спільно локалізувати та підтримувати формування, ми продовжили застосовувати ці дві сприятливі технології до програми маніпулювання. Було проведено дві серії експериментів з використанням коробки як об’єкта, яким потрібно маніпулювати. В обох випадках початкова конфігурація команди являла собою трикутну формацію, зосереджену навколо коробки, і мета полягала в тому, щоб протікати зараз обтяженою формацією вздовж траєкторії, створеної лідером. Однак його випробування відрізнялися щодо формування. Під час першої серії випробувань формування було розслабленим, дозволяючи розділити передню частину коробки та провідного робота [12]. Для другого прикладу було використано обмежувальну формацію, де коробка контактувала з усіма трьома роботами під час формування потоку. Кілька зображень із зразкового циклу останнього випадку наведено на рис. 1.8.

Рисунок 1.8 – Демонстрація розподіленої маніпуляції

Незважаючи на те, що ця стратегія керування не враховує зміни в положенні об’єкта, формація зазвичай успішно виконувала завдання маніпулювання на випробуваних траєкторіях [8].

Як і очікувалося, обмежений випадок допускав менший бічний рух об’єкта щодо потоку пласта. Хоча ці експерименти не є вичерпним дослідженням кооперативної маніпуляції, вони демонструють потенційну можливість локалізації та контролю формування на основі кооперативного зору [12].

1.6 Завдання, які ставляться в роботі

Для роботи використовуємо симуляцію, засновану на імовірнісній моделі, яка значно простіша в реалізації та швидша, ніж симуляція на основі датчиків, і при цьому може передбачити групову поведінку, зокрема коефіцієнт співпраці (кількість успішних співробітництв у часі), з однаковою точністю.

Ідея імовірнісної моделі полягає в тому, що при використанні простих реактивних автономних роботів і розподіленої схеми управління колективний маніпулятивний експеримент є, по суті, стохастичним процесом, заснованим на простих геометричних міркуваннях.

Імовірнісна модель представляє групу роботів як набір паралельних процесів, які замість обчислення траєкторій та сенсорної інформації представляють такі дії, як стискання ОМ або зіткнення з іншим роботом, як стохастичні події.

Порівняно з іншими методами, побудова імовірностної моделі, має багато переваг. По-перше, вона може бути успішно застосована до експерименту з колективним маніпулюванням, в якому завдання потребує суворої співпраці між роботами, де для досягнення успіху в завданні потрібна просторова та часова координація. Це вимагає, серед іншого, введення ймовірностей, які залежать не тільки від поточного

стану середовища (як для задач кластеризації), але і від поточного стану інших роботів.

По-друге, в той час як контролери були фіксовані, імовірнісна модель може бути використана для детального кількісного дослідження впливу різних параметрів контролера роботів на поведінку групи.

По-третє, вона може розглядати як гетерогенні, так і однорідні групи роботів.

По-четверте, вона працює у випадку (співпраця з використанням явної сигналізації), в якому поточна методологія показує свої обмеження, і для якого передбачення моделі повинні бути скориговані за допомогою двох додаткових вільних параметрів, таких як відповідність результатам, отриманим за допомогою реальних роботів і симуляцій на основі датчиків.

Згідно ТЗ необхідно провести три серії експериментів для кількісного дослідження впливу варіацій імплементацій контролерів роботів та кількості роботів на групову поведінку, зокрема, на коефіцієнт співпраці між роботами, тобто кількість ОМ, успішно вийнятих із землі з плином часу.

У першому варіанті досліджуємо випадок з однорідними групами роботів, тобто групами, в яких всі роботи ідентичні з апаратної та програмної точки зору.

У другому варіанті перевіряємо, чи може введення гетерогенності на рівні параметрів контролерів покращити продуктивність команди порівняно з однорідними групами.

Третій проводиться тільки за допомогою Webots і імовірнісної моделі, де аналізується вплив простої схеми сигналізації серед роботів.

Експеримент проводиться на круглій арені (діаметром 80 см), обмеженій стіною. Чотири отвори, розташовані по кутах квадрата з краями 30 см, містять подовжені об’єкти маніпулювання (ОМ) (довжиною 15 см, діаметром 1,6 см), які знаходяться над землею висотою на 5 см (рис. 1.9).

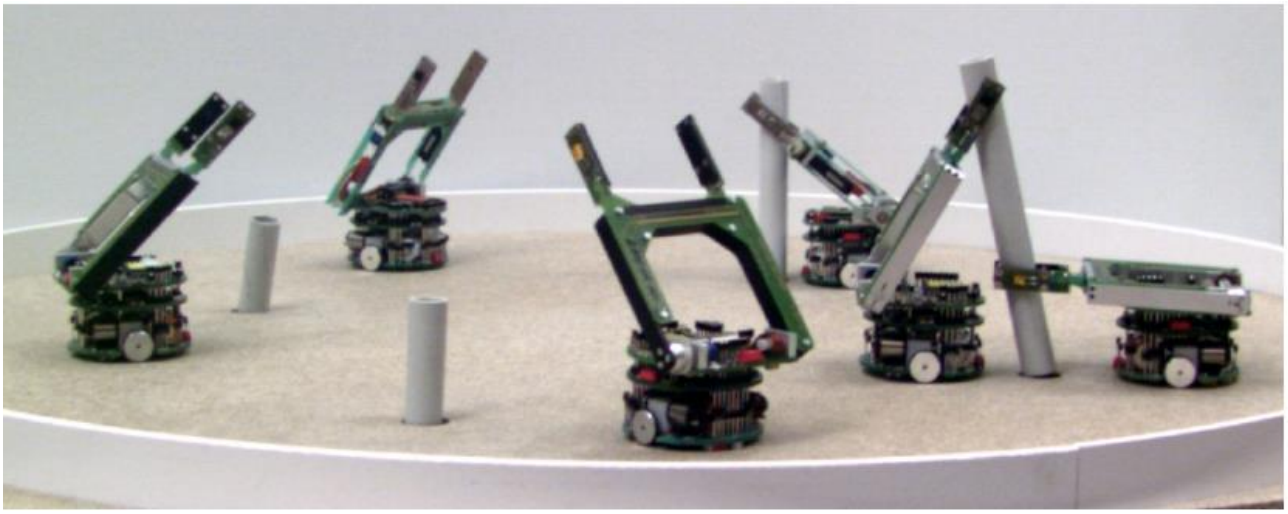


Рисунок 1.9 – Фізична установка для експерименту
з витягуванням ОМ

Групи від 2 до 6 роботів Khepera, оснащені захватами, використовуються для витягування ОМ із землі. Через їхню тонкість ОМ можна відрізнити від стіни та від інших роботів за допомогою шести фронтальних ІЧ-датчиків наближення Khepera. Два хепери необхідні для того, щоб витягнути ОМ повністю з землі.

Таким чином, потрібна співпраця, коли перший робот виймає ОМ наполовину з землі, поки другий робот не наблизиться до ОМ з протилежного напрямку і повністю не підніме його.

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Більшість сучасних роботів-маніпуляторів програмується за допомогою контролерів. Контролер – це пристрій управління і контролю процесами системи, в якій він встановлений [5].

Контролер перетворює код в керуючі сигнали і видає на зовнішні пристрої. З зовнішніх пристроїв він отримує дані про робочі процеси і умовах навколишнього середовища, за допомогою чого здатний самостійно контролювати деякі дії системи. Метод програмування робота-маніпулятора залежить безпосередньо від його призначення [5].

Розглянемо приклад програмування навчальної моделі робота-маніпулятора LEGO MINDSTORMS Education EV3. Розгляд частини програмування даної моделі є актуальним у даній магістерській дисертації, так як сконструйована модель робота-маніпулятора та його програмування має навчальну мету, та призначено для використання у вищих навчальних закладах з метою навчання студентів робототехніці та її програмуванню.

Отже, приведемо короткі теоретичні відомості з технічних характеристик модуля EV3 та його визначення. Модуль EV3 – це програмований інтелектуальний контролер, який контролює і управляє датчиками і моторами (рис. 2.1)

Рисунок 2.1 – Модуль EV3

Технічні характеристики модуля EV3:

– процесор – ARM9;

– FLASH пам'ять – 16 мегабайт;

– оперативна пам'ять – 64 мегабайт;

– операційна система – Linux;

– слот розширення SD;

– USB 2.0 (підтримує USB Host, тобто можна підключити до WiFi);

– Bluetooth 2.1;

– 4 порти на вхід і 4 порти на вихід;

– динамік.

Програмування на контролері EV3 дозволить легко і швидко освоїти етапи складання програм і тестів для робота завдяки простому інтерфейсу і готовим програмним блокам (компонентам). Для програмування робота-маніпулятора LEGO MINDSTORMS Education EV3 компанією LEGO було розбролене спеціальне програмне середовище, в якому вже міститься все необхідне для програмування та контролю роботаманіпулятора [12].

Поведінка робота визначається простою програмою з ручним кодуванням, що складається з циклу через кілька функціональних блоків (рисунок 2.2).

Поведінка за замовчуванням полягає в тому, щоб шукати ОМ, тобто рухатись по арені по прямій лінії, поки щось не буде виявлено фронтальними датчиками наближення, в цьому випадку робот повертається в бік виявленого об'єкта і починає процедуру виявлення [12].

Процедура виявлення полягає в взятті декількох сенсорних зразків одного і того ж об'єкта, при цьому робот включається сам один раз вліво і один раз вправо. ОМ розпізнається з перешкод (стіни або інших роботів), якщо в рамках цих вимірювань кількість датчиків наближення не перевищує двох. Багаторазові вимірювання дозволяють збільшити просторову роздільну

здатність і фільтрувати шум, що призводить до ідеального розрізнення стіків і запобігає, зокрема, помилковому сприйняттю рухомих роботів за ОМ.

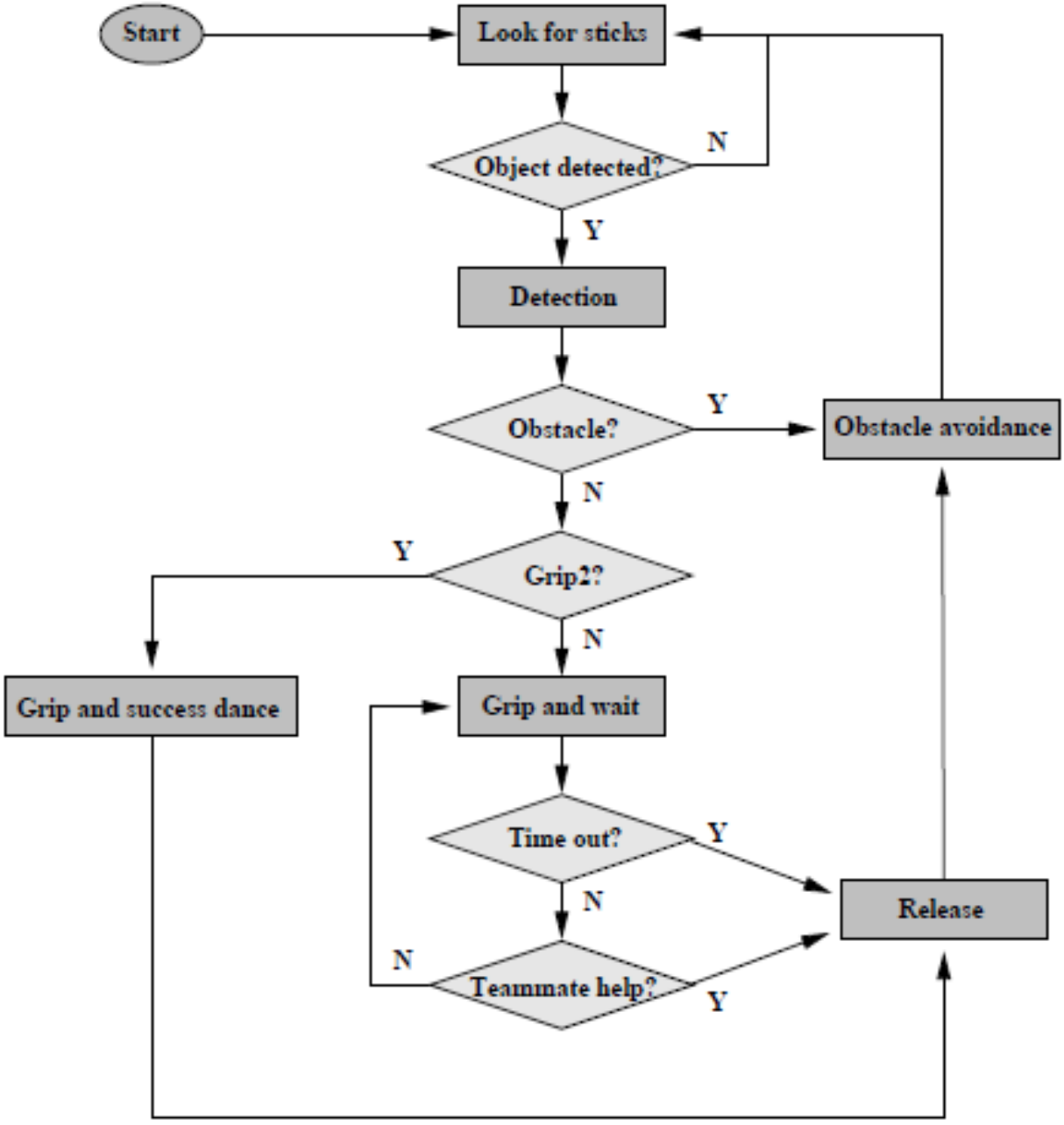


Рисунок 2.2 – Блок-схема контролера роботів

Якщо виявлений об'єкт є перешкодою, робот відвертається від нього, виконує обхід перешкод протягом декількох секунд і повертається до процедури пошуку ОМ.

Якщо об'єктом є ОМ, робот відступає на задану відстань (кілька сантиметрів), хапає ОМ і тягне її вгору. Під час витягування робот може визначити, чи інший робот вже тримає той самий ОМ, вимірявши швидкість підйому важеля захвату.

Якщо висота ОМ нижча, ніж 5 см, робот припускає, що ОМ вільний (жоден інший робот його не тримає), називаємо такий захват *grip 1*. Якщо висота вища, робот припускає, що інший робот вже тримає цей ОМ, і тому «гальмує» висоту. Такий захват називається *grip2*.

Коли працює *grip 1*, він утримує ОМ наполовину над землею і відпускає її, коли або тривалість захоплення перевищує параметр часу захоплення (що потім розглядається як невдала співпраця), або інший робот приходить, щоб захопити ОМ, як *grip2* (рис. 2.3).

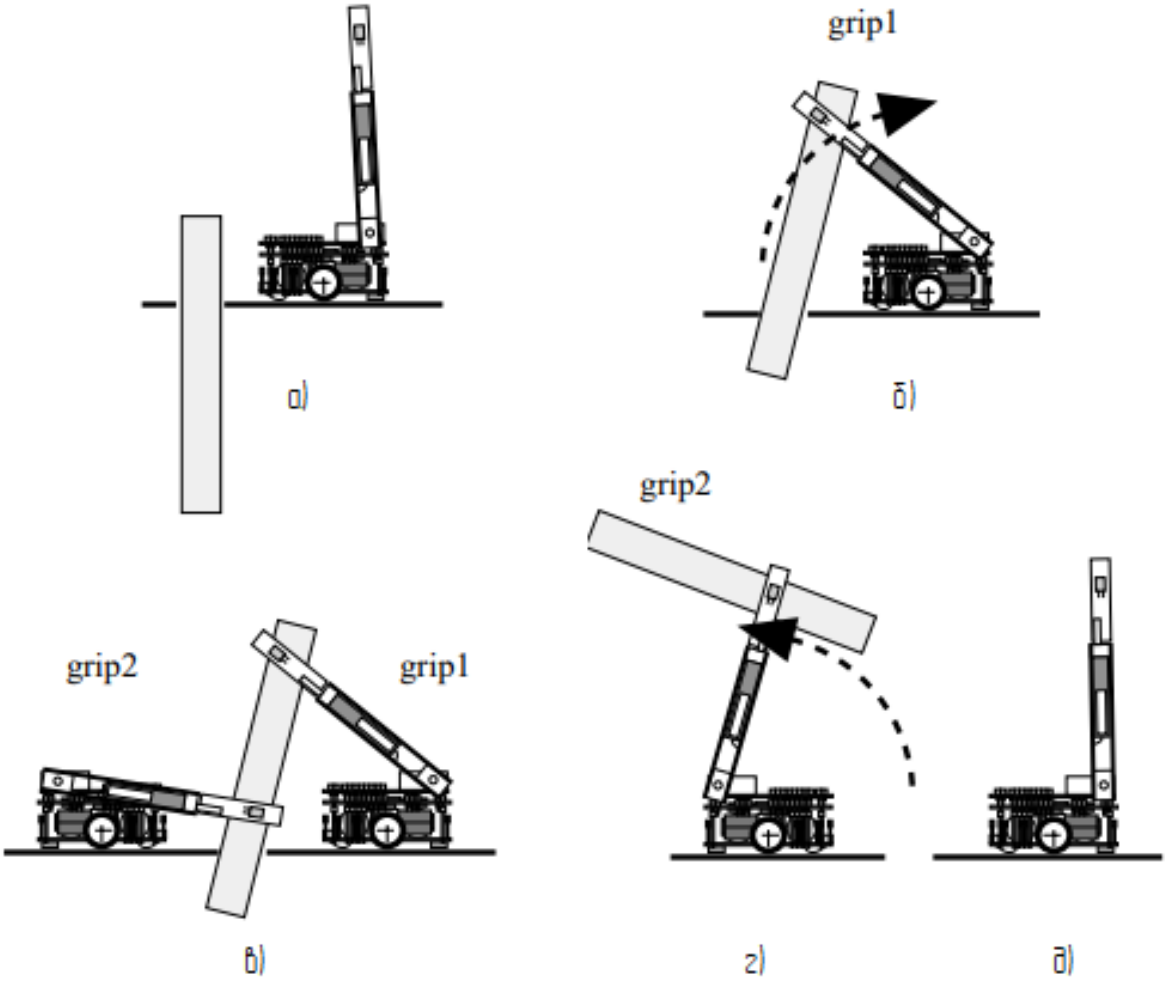


Рисунок 2.3 – Спільна послідовність.

Робот може визначити, коли інший робот робить *grip2*, оскільки сила, яку цей робот прикладає до джойстика, призводить до незначного підвищення положення його руки порівняно із запрограмованим положенням руки. Після того, як ОМ відпускається, робот відвертається, виконує обхід перешкод протягом декількох секунд і повертається до процедури пошуку ОМ.

Таким чином, параметр часу захоплення відповідає максимальній тривалості, яку робот чекатиме з піднятим ОМ, з моменту, коли датчик висоти захвату вкаже, що захват повністю піднятий. Цей параметр відіграє першорядну роль у визначенні кількості успішних колаборацій.

Коли робот робить *grip2*, витягування ОМ гальмується до тих пір, поки робот, який робить *grip1*, не відпустить хват. Рука в кінцевому підсумку досягає запрограмованого положення, що відповідає повному підняттю ОМ з землі.

Щоб відзначити успішну співпрацю, виконується рух рукою вгору-вниз. Аналогічно до *grip1*, робот відпускає ОМ (який, після кожного експерименту, необхідно замінити в отворі) і продовжує шукати ОМ.

Через спосіб розпізнавання ОМ (тобто лише за їх товщиною), ОМ, який тримає один робот, можна розпізнати лише при наближенні з протилежного боку, під певним кутом (приблизно 125 градусів).

У цьому випадку робот, який тримає ОМ, знаходиться досить далеко, щоб його не виявили фронтальні датчики наближення. При інших кутах зближення і ОМ, і робот виявляються і тому все приймається за перешкоду.

Це обмежує ймовірність співпраці, але гарантує, що другий робот наближається до ОМ під кутом, що дозволяє йому схопити ОМ, не заплутуючись із першим роботом.

3 СИМУЛЯЦІЇ ГРУПОВОЇ РОБОТИ МАНІПУЛЯТОРІВ

3.1 Симуляції групової роботи маніпуляторів за допомогою Webots

Для того, щоб більш систематично дослідити динаміку співпраці, застосовуємо експеримент у Webots, 3D-симуляторі роботів Khepera. Симулятор обчислює траєкторії та сенсорний вхід роботів на арені, що відповідає фізичній установці (рис. 3.1).

Симуляція є достатньо точною для того, щоб контролери могли бути перенесені на реальних роботів без змін, а поведінка роботів була дуже схожою на поведінку реальних роботів.

Середній коефіцієнт прискорення для цього експерименту з 5 роботами між Webots і реальним часом становить близько 15 с. на робочій станції Ultra Sun1.

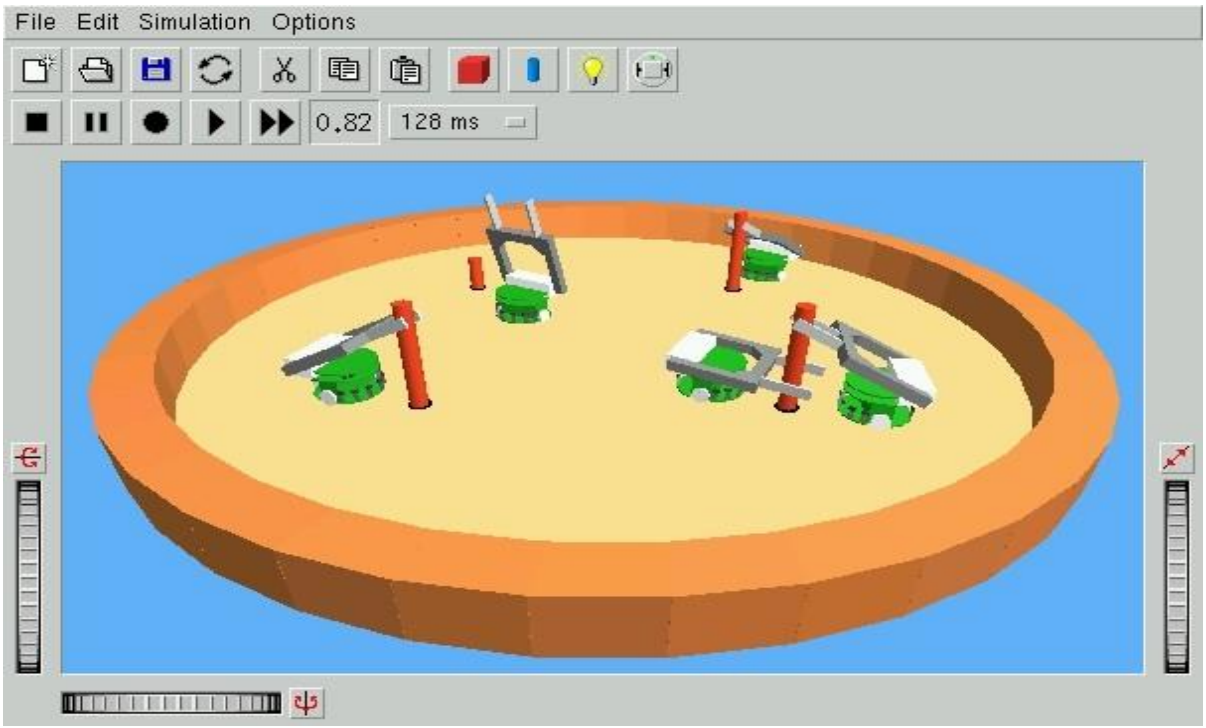


Рисунок 3.1 – Реалізація експерименту в Webots, 3D-симуляторі роботів Khepera

3.2 Імовірнісна модель

Центральна ідея імовірнісної моделі полягає в описі експерименту як серії стохастичних подій з імовірностями, заснованими на простих геометричних міркуваннях. Стани роботів визначаються програмою з точно такою ж структурою, як і у контролерів реальних роботів (рисунок 1.4), але замість обчислення детальної сенсорної інформації та траєкторій роботів зміна станів визначається кидком гральних кісток (рисунок 3.2).

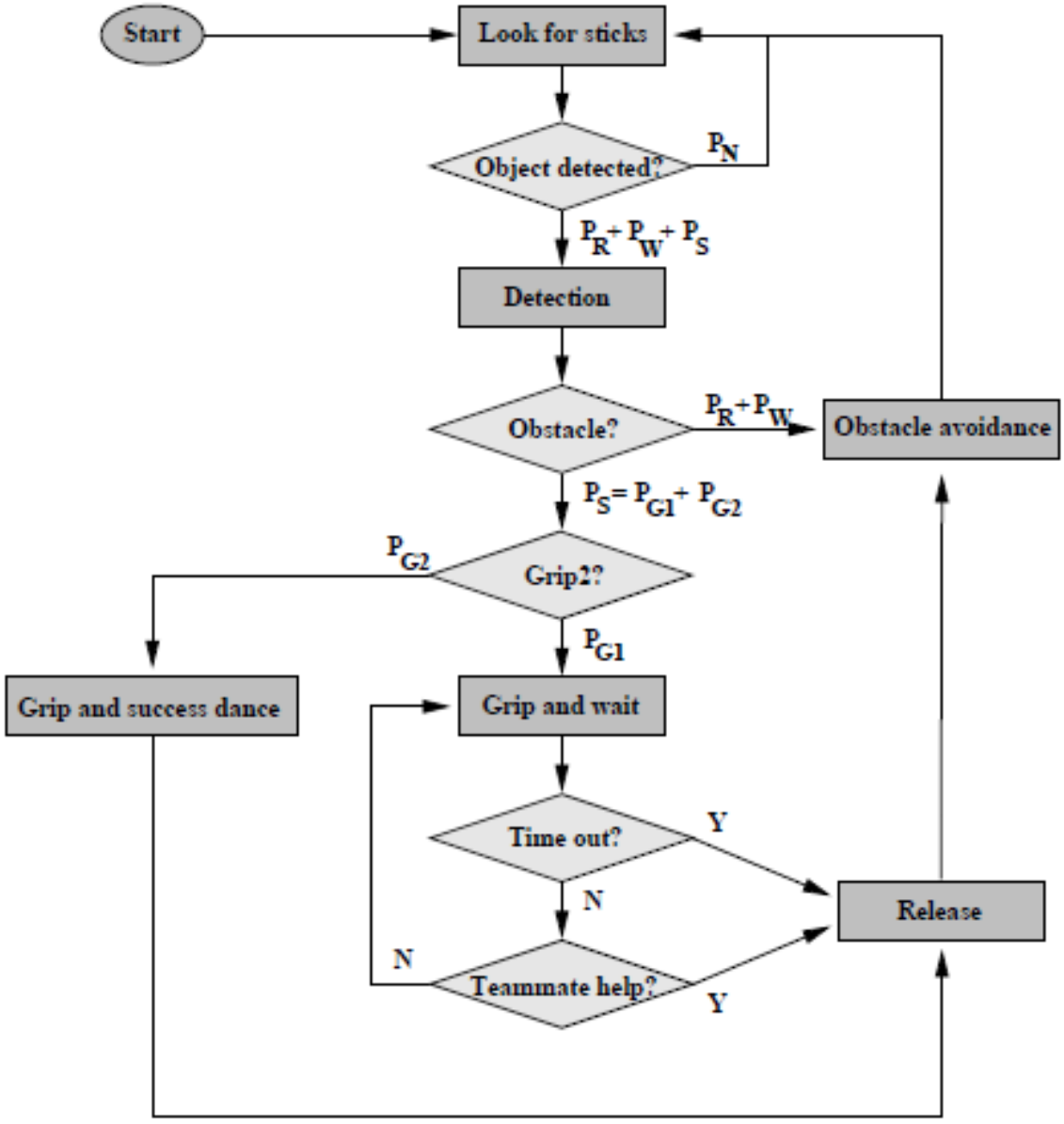


Рисунок 3.2 – Блок-схема контролера роботів у імовірнісному моделюванні

Іншими словами, імовірнісний характер взаємодій під час експерименту фіксується перетворенням детермінованих операторів гілок реальних контролерів робота/вебота в імовірнісних операторів гілок у ймовірнісній моделі гілок.

3.2.1 Режим пошуку стіків

Як тільки робот знаходиться в режимі пошуку ОМ, у нього на кожній ітерації буде ймовірність того, що він нічого не зустріне P_N, P_W зіткнеться зі стіною, P_R зіткнеться з роботом і P_S знайде ОМ.

Стіки можна розрізняти ті, які доступні для *grip1* P_{G1} (якщо вони вільні) і ті, які доступні для *grip2* P_{G2} (якщо їх тримає інший робот), з чого $P_S = P_{G1} + P_{G2}$.

Ці різні ймовірності залежать від відповідних областей виявлення різних елементів на арені, A_W для навколишньої стіни, A_R одного робота і A_S одного ОМ (рис. 3.3) відносно площі всієї арени A_A.

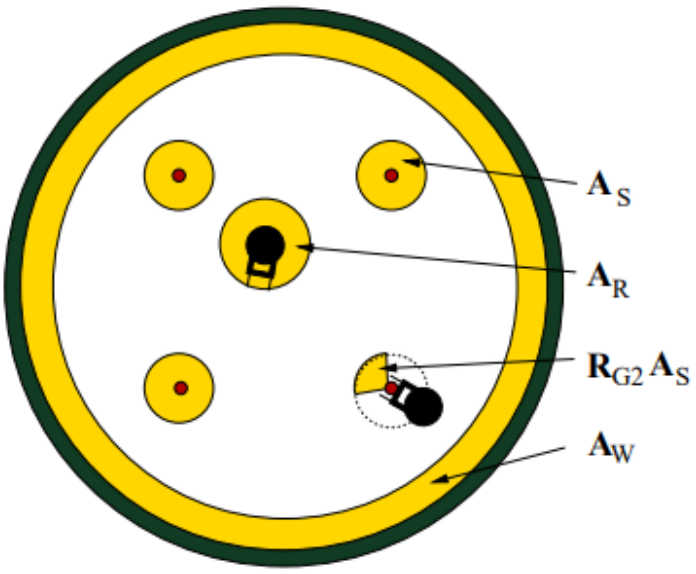


Рисунок 3.3 – Геометричні аспекти, що враховуються для обчислення ймовірностей

Ці зони виявлення, у свою чергу, залежать від фізичних розмірів кожного елемента, особливостей його поверхні (наприклад, відбивної

здатності ІЧ-випромінювання), діапазону датчиків роботів та параметрів контролера, що використовуються в процедурі виявлення. Ці ділянки вимірюються з відповідних відстаней виявлення за допомогою реальних роботів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Параметри, що використовуються в імовірнісній моделі

Параметр	Значення
Радіус арени	40,0 см
Ширина виявлення робота (W_R)	14,0 см
Швидкість робота (V_R)	8,0 см/сек
Дальність виявлення стіни	6,0 см
Дальність виявлення робота	10,0 см
Дальність виявлення ОМ	6,4 см
Співвідношення кутів для *grip2* (R_{G2})	35%
Тривалість однієї ітерації	1,15 сек
Час виявлення зіткнення з ОМ	10,0 сек (9 ітерацій)
Тривалість руху після захоплення	6,0 с (5 ітерацій)
Тривалість обходу перешкод	1с (1 ітерація)
Тривалість перешкод	2 с (2 ітерації)

В табл. 3.1 відстані виявлення робота та джойстика задаються від центру (робота) до центру (об'єкта). Тривалість інтерференції – це час, втрачений роботом для розпізнавання іншого робота як перешкоди і відвернення від нього.

Ймовірності P_N, P_R, P_{G1} і P_{G2} також залежать від поточного стану середовища, тобто від кількості роботів N_R і кількості ОМ, доступних для *grip1* N_{G1} і для *grip2* N_{G2} (де $N_{G1} + N_{G2} = N_S$, загальна кількість ОМ):

$$P_W = A_W / A_A \tag{3.1}$$

$$P_R = N_R \cdot A_R/A_A \quad (3.2)$$

$$P_{G1}(t) = N_{G1}(t) \cdot A_S/A_A \quad (3.3)$$

$$P_{G2}(t) = N_{G2}(t) \cdot R_{G2} \cdot A_S/A_A \quad (3.4)$$

$$P_N(t) = 1 - (P_W + P_R + P_{G1}(t) + P_{G2}(t)) \quad (3.5)$$

Змінні, які змінюються з часом під час експерименту, позначаються їх залежністю від поточної ітерації t. Зауважте, що P_{G2} обчислюється з урахуванням того, що ОМ, доступний для *grip2* (тобто який утримується іншим роботом), розпізнається лише при наближенні до нього під кутом у співвідношенні R_{G2} (приблизно 35%, рисунок 3.3).

Ймовірності, визначені (3.1–3.5), ґрунтуються на наступних припущеннях:

– роботи переміщаються по арені з рівномірним розподілом (тобто вони не мають тенденції залишатися довше або коротше в одній частині арени);

– ОМ розташовані на достатній відстані, щоб бути доступними з усіх боків.

3.2.2 Інші режими та інші роботи

Варто зауважити, що рівень опису блок-схем як контролера робота, так і імовірнісного процесу довільно визначається експериментатором. Рівень вибирається таким чином, щоб поведінкові стани, які не чинять прямого впливу на розглянуті метрики (тобто в даному експерименті – коефіцієнт співпраці), просто підсумовувалися в блоках, тривалість реального часу яких враховується в імовірнісному модель.

Наприклад, коли робот знаходиться в режимі виявлення, уникнення перешкод, захоплення або відпускання, його поведінка заморожується на

фіксовану кількість ітерацій (що відповідає часу, виміряному реальним роботом) в одному з цих станів.

Вся симуляція полягає в тому, щоб запустити кілька процесів, описаних на рисунку 3.2 в паралелі, з одним процесом на робота, при цьому відстежуючи стан навколишнього середовища (тобто $N_{G1}(t)$ і $N_{G2}(t)$, кількість ОМ, доступних для *grip1* і для *grip2* відповідно).

Різні процеси для різних роботів впливають один на одного опосередковано, модифікуючи $N_{G1}(t)$ і $N_{G2}(t)$, а також безпосередньо, коли відбувається співпраця: коли робот робить *grip2*, випадковим чином вибирається один з роботів, який робить *grip1*, щоб відпустити ОМ, який він тримає.

3.2.3 Перетворення ітерацій у часі

Відповідність між ітераціями в імовірнісному моделюванні та часом у реальному експерименті отримується шляхом зв'язування кількості ітерацій та часу, необхідного для систематичного охоплення всієї арени в імовірнісній симуляції та в реальному експерименті відповідно.

У імовірнісному моделюванні $N = A_A/A_S$ ітерації будуть потрібні для систематичного пошуку ОМ (тобто без проходження двічі однієї позиції), тоді як це займе тривалість $T = A_A/(V_R \cdot W_R)$ в реальному експерименті, де V_R and W_R середня швидкість руху вперед і ширина виявлення. Тому тривалість однієї ітерації відповідає $A_S/(V_R \cdot W_R)$ (у цьому випадку 1,15 секунди, див. таблицю 3.1).

Використовуючи цей коефіцієнт відповідності, можна перевести різні тривалості, які з’являються в реальному експерименті, такі як час захоплення, тривалість уникнення перешкод і тривалість процедури виявлення, у кількість ітерацій. Оскільки програма вимагає мало обчислень, вона дуже швидка (принаймні в 300 разів швидше, ніж Webots).

Всі вони були виміряні за допомогою систематичних тестів з двома реальними роботами в навколишньому середовищі. Тому ця імовірнісна модель не має вільних параметрів.

3.3 Результати моделювання

В даному підрозділі наведено результати кількох експериментів, реалізованих на трьох різних рівнях: фізична установка, Webots та імовірнісне моделювання.

У першому наборі експериментів вплив параметра часу захоплення на швидкість співпраці перевіряється з однорідними групами роботів, тобто групами однакових роботів (однаковим апаратним забезпеченням і однаковим контролером). Ці експерименти також оцінюють, наскільки добре імовірнісна модель описує динаміку співпраці.

У другій серії експериментів досліджуємо, чи можна збільшити рівень співпраці, використовуючи групи гетерогенних, а не однорідних роботів. Неоднорідність вводиться на програмному рівні, коли роботи відрізняються один від одного параметром часу захоплення.

Нарешті, в третій серії експериментів, які проводяться тільки з Webots і з імовірнісною моделлю, досліджуються переваги простої схеми зв'язку – спрямованої сигналізації.

3.3.1 Моделювання для групи однакових роботів

Проведено кілька експериментів для того, щоб кількісно оцінити вплив кількості роботів і параметра часу захоплення на динаміку співпраці, зокрема на швидкість співпраці.

Всі роботи мають абсолютно однаковий контролер – популяція однорідна – і експерименти проводяться в одному і тому ж середовищі (фіксований розмір і фіксована кількість ОМ).

Загалом здійснюється 20 заїздів з групами від 2 до 6 роботів та часовими параметрами, що дорівнюють 5, 30, 100 та 500 секунд. Кожен пробіг тривав приблизно 20 хвилин (час розрядки батарей). З Webots вплив параметра часу перевіряється більш систематично, параметри часу варіюються від 5 до 1000 секунд.

Кожен забіг триває 30 хвилин (лімітований час) і повторюється 5 разів. Нарешті, в імовірнісній моделі параметр часу змінюється від 5 до 1000 секунд з кроком 5 секунд, а кожен 30-хвилинний прогін (змодельований час) повторюється 100 разів.

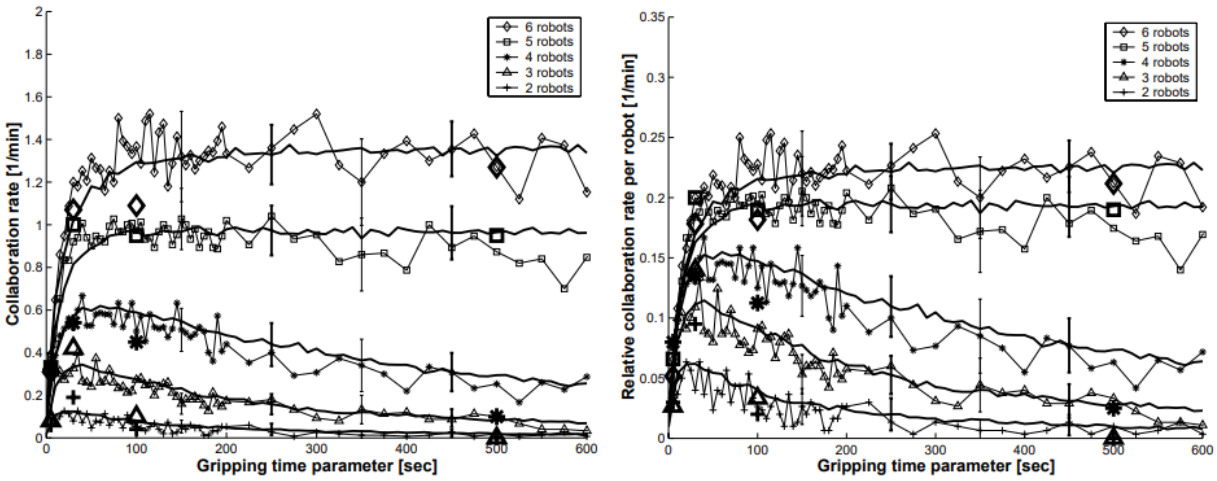
Вибір повторення прогону різну кількість разів в залежності від реалізації (відповідно, один раз, 5 або 100 разів), обумовлений істотними відмінностями в (реальному) часі, необхідному для виконання кожного прогону в кожній реалізації.

На рис. 3.4 представлені результати різних прогонів та проілюстровано вплив параметра часу захоплення на швидкість співпраці та відносну швидкість співпраці на робота (тобто кількість колаборацій за певний проміжок часу, в яких бере участь один робот, роблячи з *grip1* або *grip2*).

Цікаво, що це збільшення є надлінійним, тобто, збільшення кількості роботів не тільки збільшує глобальну продуктивність групи (загальний коефіцієнт співпраці, рисунок 3.4, а), але й продуктивність кожного окремого працівника (коефіцієнт співпраці на робота, рисунок 3.4, б). Однак, як і слід було очікувати, збільшення кількості роботів в кінцевому підсумку призведе до зниження рівня співпраці через перенаселеність і надмірне втручання.

По-перше, результати з трьома різними реалізаціями представляють хорошу відповідність якісно і кількісно.

Зокрема, майже всі коефіцієнти співпраці з реальними роботами знаходяться в межах одного стандартного відхилення середніх значень, отриманих або за допомогою Webots, або за ймовірнісною моделлю (два стандартних відхилення на максимумі).



а) б)

а) швидкість співпраці як функція часу захоплення в однорідних групах роботів; б) відносний коефіцієнт співпраці на одного робота

Рисунок 3.4 – Вплив параметра часу захоплення на швидкість співпраці та відносну швидкість співпраці на робота

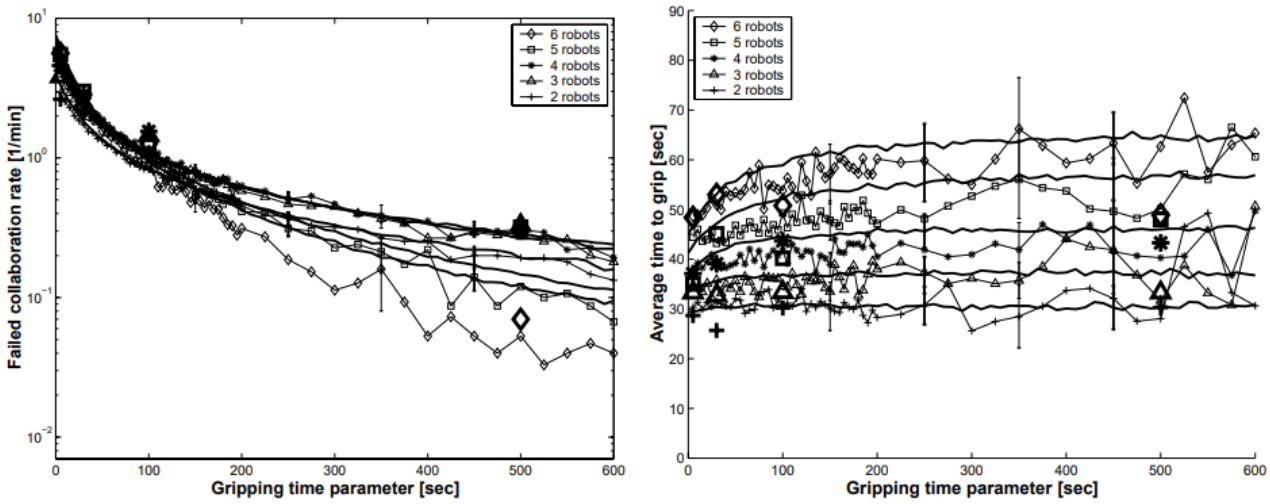
Для Webots це означає, що сенсорний симулятор точно відтворює сенсорну інформацію та траєкторії реальних роботів. Для імовірнісної моделі показано, що, хоча вона дуже проста, вона включає в себе основні характеристики, що визначають динаміку співпраці. Імовірнісна модель і Webots також представляють дуже хорошу кількісну узгодженість.

Незважаючи на те, що усереднені дані є більш плавними з імовірнісною моделлю, ніж з Webots – це саме середнє значення 100 прогонів замість 5 – вони мають дуже схожі стандартні відхилення, і їх середні значення ± одне стандартне відхилення завжди перекриваються для всіх розмірів груп і всіх часових параметрів захоплення.

На рисунку 3.5 видно, що імовірнісна модель також правильно прогнозує частоту невдалих спільних дій і середній час, протягом якого робот знаходить і хапає ОМ.

Для певного розміру групи частота невдалих спільних дій зменшується майже експоненціально з параметром часу захоплення, тоді як середній час пошуку та захоплення ОМ залишається приблизно постійним.

По-друге, отримані результати демонструють важливість впливу параметра часу захоплення на швидкість співпраці. Як можна було інтуїтивно передбачити, існує різне співвідношення між швидкістю співпраці та параметром часу залежно від співвідношення між кількістю роботів та кількістю стіків.



а) б)

а) рівень невдалої співпраці з однорідними групами роботів;
б) середній час пошуку та захоплення палиці однорідними групами роботів

Рисунок 3.5 – Частота невдалих спільних дій і середній час, протягом якого робот знаходить і хапає ОМ

На рис. 3.5 великі поодинокі маркери відповідають результатам із реальними роботами, пов’язані малі маркери – із симулятором Webbots, а базові безперервні лінії – із ймовірнісним моделюванням. Смуги похибок відповідають ± стандартним відхиленням результатів з імовірнісною моделлю (більш товсті стовпчики) і з Webot (тонкі лінії). Відповідність між Webbots і ймовірнісною моделлю з одного боку та реальними роботами з іншого боку менш хороша для груп із 5 і 6 роботів із параметром часу захоплення, що дорівнює 500 с. Це пов’язано зі

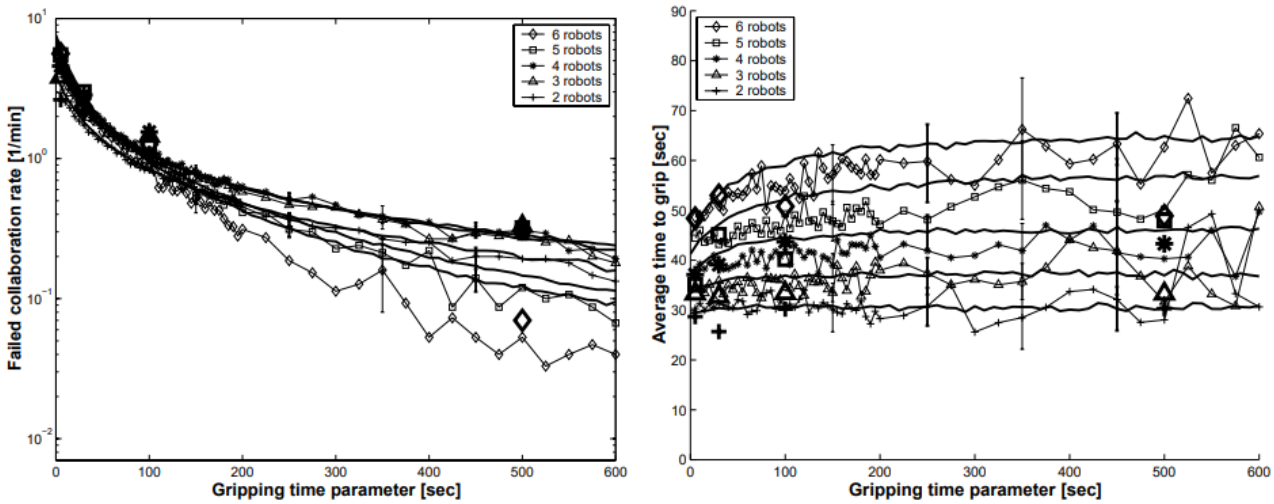
статистичним артефактом, який зникне, коли буде проведено більше запусків із реальними роботами.

Коли роботів більше, ніж ОМ, швидкість співпраці монотонно зростає з параметром часу захоплення, поки не вийде плато, що відповідає оптимальному темпу співпраці. Іншими словами, в цьому випадку хорошою стратегією для робота, який тримає в руках ОМ, дуже довго чекати, поки інший робот подасть руку, тому що завжди буде доступний як мінімум один «вільний» робот. І навпаки, коли роботів менше, ніж ОМ, дуже довге очікування стає поганою стратегією, оскільки кілька роботів втрачають час, тримаючи різні стіки.

Наприклад (крайній випадок), нескінченний параметр часу захоплення призведе до нульового рівня співпраці, коли всі роботи в кінцевому підсумку постійно тримають інший джойстик. Тому, коли роботів менше, ніж стіків, важливо налаштувати параметр часу захоплення, наприклад, оптимізувати швидкість співпраці.

На рис. 3.6 показано, що імовірнісна модель також правильно прогнозує частоту невдалих спільних дій і середній час, за який робот знайде та схопить ОМ. Для заданого розміру групи частота невдалої співпраці зменшується майже експоненціально з параметром часу захоплення, тоді як середній час пошуку та захоплення палиці залишається приблизно постійний.

Результати також показують, що, принаймні з групами до 6 роботів, швидкість співпраці значно зростає зі збільшенням кількості роботів, незалежно від часу захоплення Великі поодинокі маркери відповідають результатам з реальними роботами, пов'язані малі маркери з тими, хто використовує симулятор Webots, а базові безперервні маркери – з тими, хто використовує ймовірнісну симуляцію.



а) б)

а) рівень невдалої співпраці з однорідними групами роботів; б) середній час пошуку та захоплення ОМ однорідними групами роботів

Рисунок 3.6 – Частота невдалих спільних дій і середній час, за який робот знайде та схопить ОМ

Похибки відповідають ± стандартним відхиленням результатів з імовірнісною моделлю (товстіші стовпчики) і з Webot (тонкі лінії). З міркувань наочності показуються лише деякі смуги похибок, а результати показуються лише для часових параметрів захоплення до 600 секунд.

Великі поодинокі маркери відповідають результатам із реальними роботами, пов’язані малі маркери – із симулятором Webbots, а базові безперервні лінії – із ймовірнісним моделюванням. Смуги похибок відповідають ± стандартним відхиленням результатів з імовірнісною моделлю (більш товсті стовпчики) і з Webot (тонкі лінії). Зверніть увагу, що листування між Webots і імовірнісна модель, з одного боку, і реальні роботи, з іншого боку, менш хороші для груп із 5 і 6 роботів із параметром часу захоплення, що дорівнює 500 сек. Це пов’язано зі статистичним артефактом, який зникне, коли буде проведено більше запусків із реальними роботами.

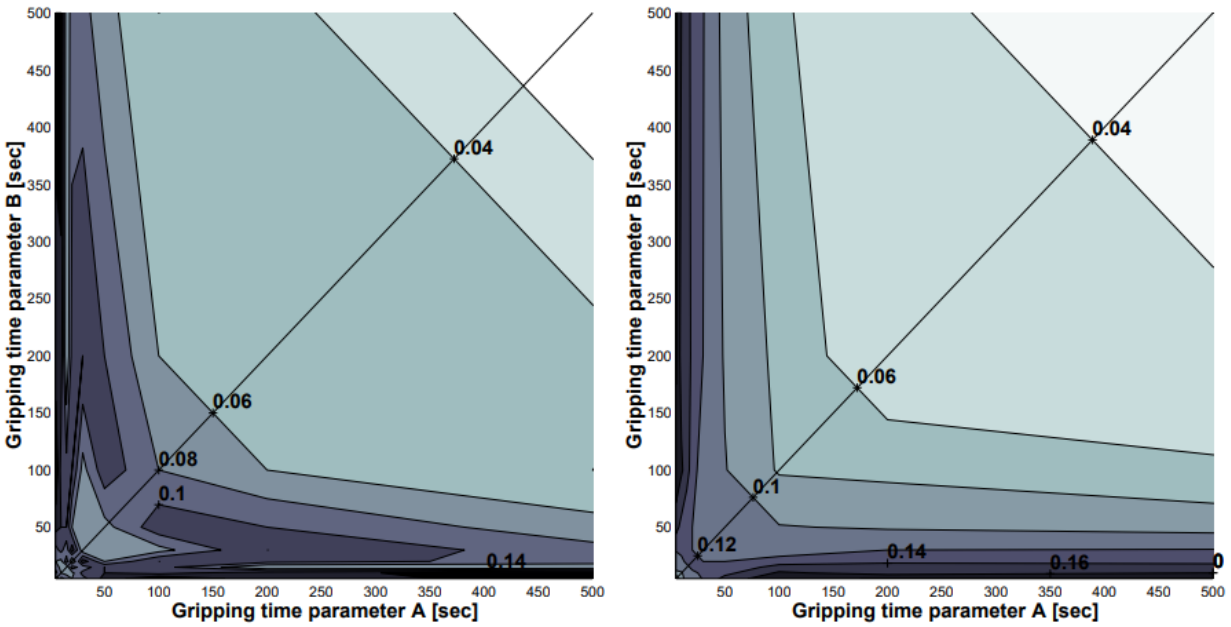
3.3.2 Моделювання для групи різних груп роботів

У наведених результат, п.п. 3.3.1, використовувалися групи роботів з ідентичними контролерами. Для того, щоб з'ясувати, чи може гетерогенність збільшити швидкість співпраці групи роботів заданого розміру, ми провели серію експериментів, в яких роботи в групі мають різні часові параметри захоплення. Таким чином, неоднорідність знаходиться на програмному рівні і стосується тільки одного параметра.

Експерименти в основному проводилися з Webots і імовірнісною моделлю, з групами від 2 до 6 роботів. Часові параметри варіюються від 5 до 1000 секунд у приблизно геометричній прогресії (5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 200, 500 і 1000 секунд).

Для того, щоб зменшити кількість можливих комбінацій різних часових параметрів серед групи роботів, групи розбиваються на 2 підгрупи із заданим параметром часу для кожної підгрупи. Перевірено всі можливі комбінації часових параметрів між двома підгрупами (55 прогонів). Кожен прогін триває 30 хвилин (змодельований час) і повторюється 5 разів у Webots і 100 разів у ймовірнісній моделі.

Для експериментів з реальними роботами було доступно лише 6 роботів. Імовірнісна модель передбачає, що збільшення швидкості співпраці залишається суперлінійним для груп до 7 роботів, а потім стає майже лінійним для груп до 11 роботів (рис. 3.7, а). Модель також передбачає, що максимальний коефіцієнт співпраці досягається з групами з 11 роботів, а потім швидко знижується для більших груп через надмірне втручання між роботами (рис. 3.7, б).



а) б)

а) результати за допомогою симулятора Webots; б) результати з імовірнісним моделюванням

Рисунок 3.7 – Швидкість співпраці як функція часу захоплення в гетерогенній популяції двох роботів

Для групи з 13 роботів ймовірність зробити захоплення дорівнює нулю в імовірнісному моделюванні ($P_{G1} = P_{G2} = 0$) тому що ймовірність підхопити іншого робота, P_R, стає рівним одиниці (загальна площа виявлення групи з 13 роботів дійсно охоплює всю площу арени).

Зауважимо, що для цієї останньої ситуації імовірнісна модель, ймовірно, переоцінює цей ефект інтерференції порівняно з експериментами з реальними роботами, оскільки, якщо арена не надто переповнена, невеликі рухи всередині групи роботів все ще можуть дозволити, потенційно, деяким роботам бути достатньо ізольованими, щоб успішно стискати ОМ час від часу (тобто P_{G1} і P_{G2} не є строго нульовими).

На обох графіках (рис. 3.7) діагональна лінія відповідає коефіцієнту співпраці в однорідних групах роботів (параметр часу A = параметр часу B).

3.4 Аналіз результатів моделювання

Основним результатом цих експериментів є те, що гетерогенність може покращити швидкість співпраці, коли роботів менше, ніж ОМ. Наприклад, у випадку груп з 2 роботів (рисунок 3.6) оптимальна швидкість співпраці в гетерогенній групі (параметр часу захоплення A = 5 с, а параметр часу захоплення B = 500 с) приблизно на 50% краща, ніж при однорідній популяції (параметр часу захоплення = 30 с).

З групами з 2 або 3 роботів, тобто коли кількість роботів менша за кількість стіків, оптимальна співпраця дійсно досягається, коли одна група роботів має дуже малий параметр часу захоплення, а інша - великий (тобто темні області, близькі до горизонтальної та вертикальної осей на рис. 3.7.

Це можна розглядати як останню групу, що спеціалізується на формуванні хвата1 (і в очікуванні руки), а перша - на виконанні хвата2, з короткими хватами без очікування. У трьох початкових експериментах ми протестували подібну спеціалізацію з групами від 2 до 4 справжніх хеперів.

Групи були розділені на 2 підгрупи з часовими параметрами захвату 5 і 500 секунд. Хоча ці одиничні прогони ні в якому разі не є статистично значущими, збільшення оптимального рівня співпраці на 45% в порівнянні з однорідною групою також спостерігалося в групі з 2 роботів, в той час як для груп з 3 і 4 роботів не було значного збільшення.

Як показано на рис. 3.8, який узагальнює відмінності оптимальної співпраці між однорідними і гетерогенними групами, переваги гетерогенності зникають, коли число роботів перевищує число ОМ. У цьому випадку оптимальна стратегія полягає в тому, щоб усі роботи довго чекали, як тільки вони знайшли ОМ, подібно до однорідних груп.

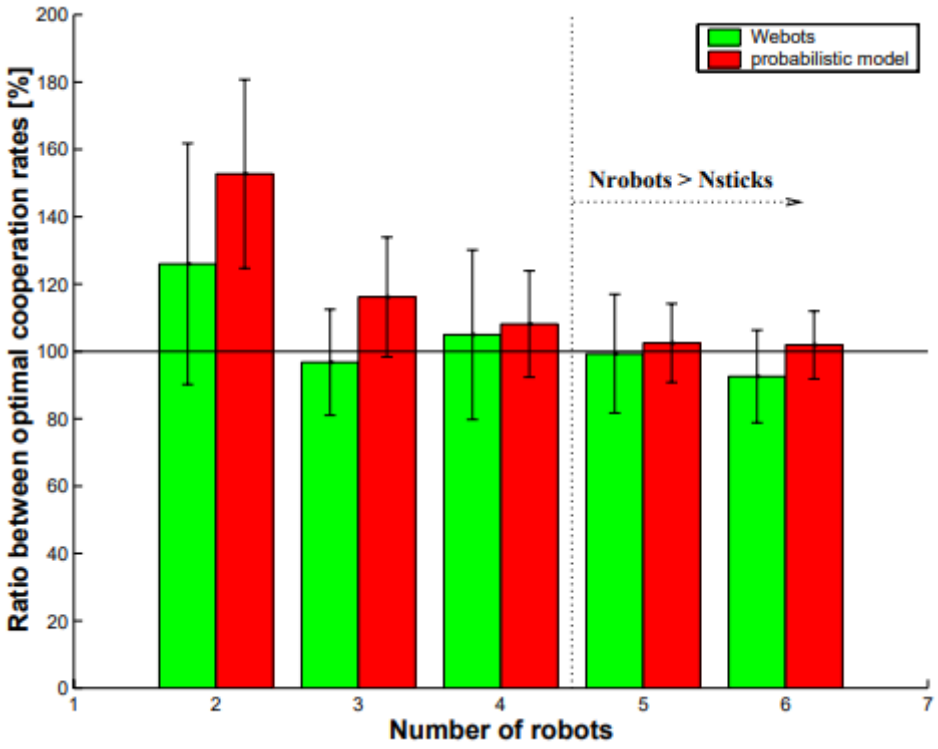


Рисунок 3.8 – Співвідношення оптимальних швидкостей співпраці між гетерогенними та однорідними групами роботів

Величина похибок відповідає поширенню стандартних відхилень різних прогонів з оптимальним параметром часу захоплення(s): $\Delta(A/B) = \Delta A/\bar{B} + \Delta B/\bar{A}$, де $\Delta(A/B)$ — розмір смуги похибки, ΔA і $\bar{A}$ - стандартне відхилення і середнє значення неоднорідних пробігів з оптимальними параметрами часу зчеплення; ΔB і $\bar{B}$ - це стандартне відхилення і середнє значення однорідних прогонів з оптимальним параметром часу захоплення.

3.5 Забезпечення безпечних умов при проведенні досліджень

Під час роботи проведення експериментів робота велась на ПК. Для забезпечення безпечних умов виконувались наступні вимоги [13]:

– робоче місце повинно бути охайним, на ньому не повинно бути сторонніх речей;

– необхідно постійно витримувати правильну поставу – не нахилятись близько до поверхні екрана, не згинати, тримати руки без напруження;

– після 15-20 хв роботи або при відчутті втоми виконайте комплекс вправ для очей і для зняття м’язового напруження;

– не намагатися самостійно усунути перебої в роботі комп’ютера;

– не торкатись задніх стінок монітора та системного блока, не чіпати дротів живлення;

– акуратно вставляти і виймати змінні носії;

– не торкатись екрана монітора руками (це забруднює його і порушує антиблікове покриття);

– категорично забороняється знімати кришки корпусів пристроїв комп’ютера, самостійно приєднувати і від’єднувати пристрої комп’ютера.

Після закінчення роботи необхідно прибрати своє робоче місце та вимкнути комп’ютер або закінчіть сеанс роботи [13].

ВИСНОВКИ

У роботі було досліджено динаміку співпраці між групами простих, реактивних, автономних роботів, які беруть участь у спільному завданні з витягування ОМ.

Зокрема, розроблено імовірнісну модель для характеристики та прогнозування такої динаміки.

Було виявлено, що, представляючи експеримент як набір стохастичних подій з імовірностями, заснованими на простих геометричних міркуваннях, імовірнісна модель змогла забезпечити дуже хороше передбачення, як якісно, так і кількісно, динаміки співпраці як функції двох основних параметрів, вивчених в експерименті, кількості роботів і їх параметра часу захоплення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ijspeert, A. J., Martinoli, A., Billard, A., & Gambardella, L. M. (2001). Collaboration through the exploitation of local interactions in autonomous collective robotics: The stick pulling experiment. *Autonomous Robots*, *11*, 149-171.

2. Adhikari, S. (2021). *Study of Scalability in a Robot Swarm Performance and Demonstration of Superlinear Performance in Conveyor Bucket Brigades and Collaborative Pulling*. The University of Toledo.

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. М. Цимбал, О. В. Токарєва, А. І. Бронніков. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 66 с.

4. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.

5. Feola, L., & Trianni, V. (2022). Adaptive strategies for team formation in minimalist robot swarms. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *7*(2), 4079-4085.

6. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.

7. Робототехнічні системи: проєктування і моделювання [Електронний ресурс]: навч. Посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» /М. М. Поліщук, М.М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 41,6 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с.

8. Sandakalum, T., & Ang Jr, M. H. (2022). Motion planning for mobile manipulators-a systematic review. *Machines*, *10*(2), 97.

9. Xia, F., Li, C., Martín-Martín, R., Litany, O., Toshev, A., & Savarese, S. (2021, May). Relmogen: Integrating motion generation in reinforcement learning for mobile manipulation. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 4583-4590). IEEE.

10. Su, Y., Li, J., Jiao, Z., Wang, M., Chu, C., Li, H., ... & Liu, H. (2023, October). Sequential manipulation planning for over-actuated unmanned aerial manipulators. In *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 6905-6911). IEEE.

11. Li, Q., Mu, Y., You, Y., Zhang, Z., & Feng, C. (2020). A hierarchical motion planning for mobile manipulator. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, *15*(9), 1390-1399.

12. Kwa, H. L., Kit, J. L., & Bouffanais, R. (2021). Tailoring Exploration and Exploitation in Multi-Agent Systems with Short-Term Memory and Limited Social Interaction. In *2021 International Workshop on Agent-Based Modelling of Human Behaviour (ABMHuB)*.

13. Стиценко Т.Є., Пронюк Г.В., Сердюк Н.М., Хондак І.І. «Безпека життєдіяльності»: навч. посібник / Т.Є Стиценко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк, І.І. Хондак. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 336 с