

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет навчально-науковий центр заочної форми навчання  
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Модель управління рухом «S-bots» - systems  
за допомогою супроводжуючого Drone

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КСМзм-21-1  
Негрей А.Ю.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність

123 «Комп'ютерна інженерія»

(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма

Комп'ютерні системи та мережі

(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Токарєв В.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський)

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(код і повна назва)

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

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерні системи та мережі  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студенту \_\_\_\_\_ Негрею Артему Юрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модель управління рухом «S-bots» - systems за допомогою супроводжувачого Drone

затверджена наказом по університету від “ 24 ” жовтня 2022 р. № 178Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13 грудня 2022р.

3. Вхідні дані до роботи 1) провести дослідження - математичної моделі управління рухом «S-bots» - systems за допомогою супроводжувачого Drone; 2) провести дослідження існуючих алгоритмів напрямку руху; 3) провести огляд алгоритмів пост-обробки вхідної інформації побудови карти території.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

1) огляд літератури за темою роботи;

2) аналіз предметної області;

3) вибір та обґрунтування методики дослідження;

4) проведення експериментальних досліджень;

5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Слайд-презентація – 23 слайдів

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

| Найменування розділу | Консультант<br>(посада, прізвище, ім'я, по батькові) | Позначка консультанта<br>про виконання розділу |      |
|----------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------|
|                      |                                                      | підпис                                         | дата |
|                      |                                                      |                                                |      |
|                      |                                                      |                                                |      |

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи                                                | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1 | Огляд літератури за темою роботи                                   | 25.10.22 - 11.11. 22           |          |
| 2 | Вибір та обґрунтування методики дослідження                        | 13.11. 22 - 18.04. 22          |          |
| 3 | Вибір інструментальних засобів                                     | 19.11. 22 - 28.11. 22          |          |
| 4 | Проведення експериментів                                           | 29.11. 22 - 02.12. 22          |          |
| 5 | Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи                       | 03.12. 22 -<br>06.12. 22       |          |
| 6 | Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист | 07. 12. 22 -<br>08.12. 22      |          |
| 7 | Подання кваліфікаційної роботи на рецензування                     | 09.12. 22 -<br>12.12. 22       |          |
|   |                                                                    |                                |          |
|   |                                                                    |                                |          |

Дата видачі завдання 24 жовтня 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Токарєв В.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 61 с., 26 рис., 1 дод., 14 джерел.

### АЛГОРИТМИ АУКЦІОНУ, КІНЦЕВІ АВТОМАТИ, «SWARM-BOT» SYSTEMS, WI-FI.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження моделі управління рухом «S-bots» - systems за допомогою супроводжуючого Drone.

Ця модель застосовується для швидкої доставки необхідних вантажів у постраждалих район за техногенної або природної катастрофи. Тому необхідно вирішити завдання збору інформації, побудови глобальної карти, планування глобальної траєкторії, а також руху «s-bots» вздовж спланованої траєкторії та перебудови «s-bots» для швидкого проходу чи обходу перешкод.

У кваліфікаційній роботі використовуються класичні методи теорії кінцевих автоматів, алгоритми аукціону для розподілу цілей між «s-bots», методи найменших квадратів, алгоритми пошуку A\*. Серія проведених комп'ютерних досліджень та напівнатурне моделювання підтвердили працездатність та правильність запропонованих алгоритмів.

## ABSTRACT

Master's thesis: 61 pages, 26 figures, 1 appendices, 14 sources.

AUCTION ALGORITHMS, FINITE MACHINES, "SWARM-BOT" SYSTEMS, WI-FI.

The purpose of the qualification work is the study of the S-bots – systems movement control model with the help of an accompanying Drone.

This model is used for quick delivery of necessary goods to the affected area due to man-made or natural disasters. Therefore, it is necessary to solve the tasks of collecting information, building a global map, planning a global trajectory, as well as the movement of s-bots along the planned trajectory and the restructuring of s-bots to quickly pass or bypass obstacles.

Classical methods of the theory of finite automata, auction algorithms for the distribution of goals between s-bots, least squares methods, and A\* search algorithms are used in the qualification work. A series of conducted computer studies and semi-natural modeling confirmed the workability and correctness of the proposed algorithms.

## ЗМІСТ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ<br>І ТЕРМІНІВ.....                   | 7  |
| ВСТУП .....                                                                                  | 8  |
| 1 СУЧАСНИЙ СТАН УПРАВЛІННЯ РУХОМ «S-BOTS» - SYSTEMS, ЩО<br>ВКЛЮЧАЄ DRONE.....                | 10 |
| 1.1 Основні характеристики «S-bots» - systems .....                                          | 10 |
| 1.2 Структура системи управління «s-bots» .....                                              | 13 |
| 1.2.1 Типи децентралізованого управління .....                                               | 15 |
| 1.3 Огляд систем взаємодії між «s-bots» та Drone .....                                       | 19 |
| 1.4 Постановка завдання дослідження.....                                                     | 27 |
| 2 МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ «S-BOTS» - SYSTEMS ЗА<br>ДОПОМОГОЮ СУПРОВОДЖУЮЧОГО DRONE.....      | 30 |
| 2.1 Опис моделі зіставлення карт місцевості у системі координат ведучого<br>«s-bot».....     | 30 |
| 2.2 Побудова глобальної карти з використанням візуальної інформації від<br>Drone .....       | 32 |
| 3 ПЛАНУВАННЯ ТРАЕКТОРІЇ РУХУ МОБІЛЬНОГО «S-BOTS» НА<br>ОСНОВІ ДАНИХ ОТРИМАНИХ ВІД DRONE..... | 40 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                | 46 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....                                                               | 47 |
| ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....                                     | 50 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ААУ – адаптивне автономне управління

БЗ – база знань

ІР – ідентифікатор регіону

МСО – мережа, яка самоорганізується

НМ – нейронна мережа

ТД – туман дій

УІД – унікальний ідентифікатор

## ВСТУП

В останні роки став актуальним новий напрямок «S-bots» - systems, який широко застосовується в областях, пов'язаних із ризиком для життя людини. Перевага «S-bots» - systems полягає в тому, що вони мають високу гнучкість і стійкість до збоїв, великий радіус дії, а розширений набір виконуваних функцій забезпечує високу ймовірність успішної реалізації поставлених завдань.

«S-bots» - systems, до складу яких входять Drone та мобільні «s-bots», можуть виконувати завдання охорони території, використовуватися в ході пошуково-рятувальних операцій, при прогнозі, збиранні врожаю та виявленні вогнищ і шкідників у сільському господарстві. Drone може забезпечити спостереження за широким районом, проте виявлення наземних цілей обмежено його швидкістю та висотою польоту. З іншого боку, мобільний «s-bot» може точно визначити місце наземних цілей, але його недоліком є невисока швидкість пересування.

Тому «картини сприйняття» Drone та мобільного «s-bot» доповнюють один одного. Drone стежить за перешкодами та мобільними «s-bots», фотографуючи їх за допомогою камери і передаючи мобільному «s-bot» глобальну карту, а мобільний «s-bot» може помітити реальні динамічні перешкоди, відсутні на глобальній карті. На основі цієї інформації може бути скориговано управління рухом мобільних «s-bots» у разі зовнішнього середовища, що змінюється.

На сьогоднішній день існують наступні варіанти взаємодії Drone та мобільних «s-bots»:

- управління рухом мобільних «s-bots» з використанням інформації, що отримується або від Drone, або від мобільного «s-bot»;
- планування руху мобільних «s-bots», що виконується заздалегідь і в процесі руху не враховує динамічну зміну середовища;

- топологія мобільних «s-bots» при русі не змінюється, «s-bots» є рівноправними і мають однакові характеристики.

Однак, на практиці мобільні «s-bots» повинні рухатися без апіорних знань про довкілля і виконувати побудову карт місцевості, при зміні зовнішнього неорганізованого середовища, наприклад, в результаті катастрофи або корекції поставленого завдання.

Тому розробка систем управління «S-bots» - systems, що включає Drone, є актуальним науково-технічним завданням.

## 1 СУЧАСНИЙ СТАН УПРАВЛІННЯ РУХОМ «S-BOTS» - SYSTEMS, ЩО ВКЛЮЧАЄ DRONE

### 1.1 Основні характеристики «S-bots» - systems

В умовах сучасного розвитку штучного інтелекту та «S-bots» - systems проблема управління «s-bots» стала одним з найважливіших завдань. «S-bots» - systems була визначена як новий підхід до координації дій великої кількості «s-bots» та натхненна спостереженням за соціальними комахами – мурахами та бджолами, які є типовими прикладами того, як велика кількість простих індивідуумів може взаємодіяти для створення колективних інтелектуальних систем (рисунок 1.1).

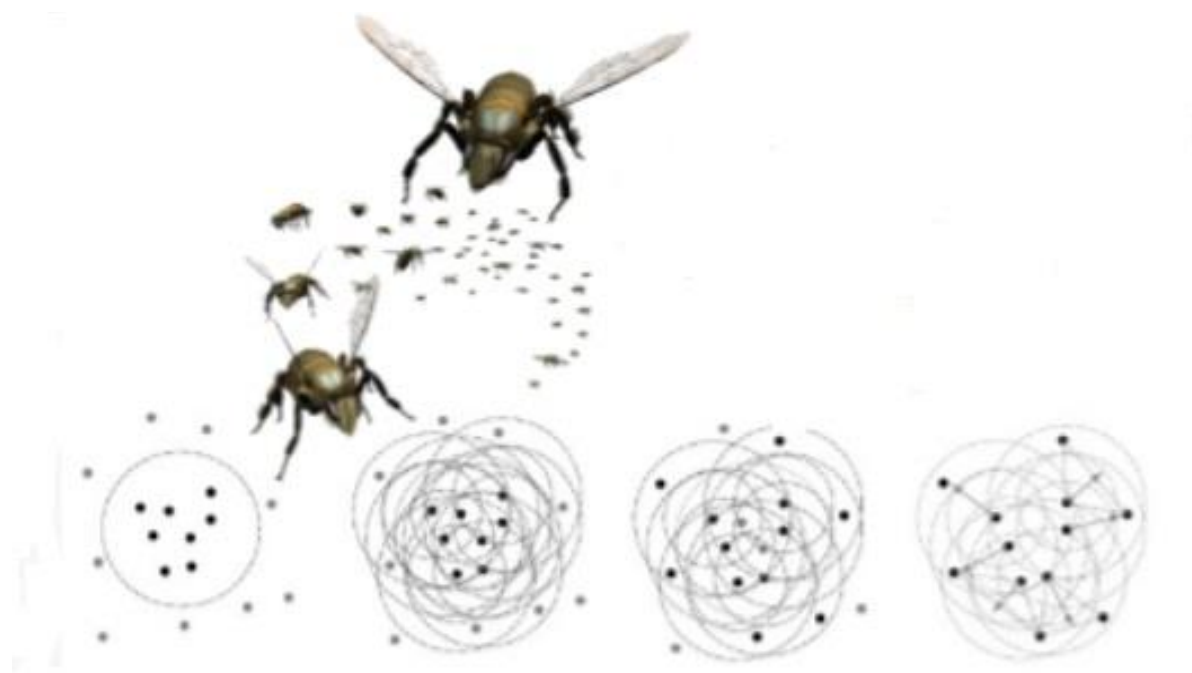


Рисунок 1.1 – Приклад роєвого інтелекту

Відомо, що соціальні комахи координують свої дії для виконання завдань, що виходять за межі можливостей окремого індивідуума, наприклад,

терміти будують великі та складні споруди, мурахи можуть колективно переносити великі вантажі, тощо. Такі можливості координації досі недоступні для сучасних груп «s-bots». Інакше висловлюючись, на системному рівні функціонування соціальних комах є надійним, гнучким і масштабованим, такі властивості визнані бажаними й у систем із кількома «s-bots». Основні характеристики «S-bots» - systems сформульовані наступним чином:

- кооперативність. Довільні «s-bots» спільно працюють для виконання поставленого завдання, яке або не може бути досягнуто «s-bot», або виконання його може бути покращено з використанням «s-bots» для підвищення ефективності;

- автономність. З урахуванням поставлених завдань «s-bots» повинні мати високий рівень автономії, внаслідок чого вони можуть самостійно планувати траєкторію, уникати зіткнень з перешкодами, а також змінювати стратегії управління при зміні навколишнього середовища;

- масштабованість. Структура «s-bots» повинна бути сформована так, щоб у будь-який час можливо було збільшити або зменшити їх кількість, тобто «s-bots» здатні здійснити координаційні механізми, які не впливають на дії «s-bots» при зміні її розмірів;

- локальність. Усі «відчуття» та комунікації є лише локальними. Ця особливість безпосередньо успадковується від природних роїв і застосовується в «S-bots» - systems, за аналогією з комахами, рибами та птахами не здатними до глобального сприйняття.

З точки зору розвитку «S-bots» – systems існує ще одна характеристика:

- надійність та гнучкість. «S-bots» - systems має таку здатність, як вміння вирішувати широкий спектр завдань у різних середовищах і впоратися з несправністю одного або декількох «s-bots» у процесі виконання завдання. Надійність забезпечується надмірністю групи. Хоча система управління одним «s-bot» має відносно високу ефективність, реалізація «координації» та

«співробітництва» між «s-bots» може посилити здібності та ефективність системи при виконанні складних завдань, і, в той же час, підвищити надійність «S-bots» - systems.

Так, у науковій літературі пропонується схема спільної роботи «s-bot», що включають Drone і групу наземних «s-bot». Схема автоматично відображає обстановку в міських районах за допомогою мобільних «s-bots» і надає в реальному часі дані та телеметрію для віддалених операторів. Використання Drone полегшує позиціонування наземних «s-bots».

Таким чином, «S-bots» - systems має суттєві переваги в порівнянні з функціонуванням «s-bot»:

- «s-bots» мають кращий просторовий розподіл;
- «s-bots» можуть досягти кращої продуктивності системи;
- «s-bots» можуть забезпечити надійність за рахунок об'єднання даних та обміну інформацією між «s-bots»;
- використання «s-bots» може бути простіше і дешевше, ніж використання потужного «s-bot» (складного та дорогого) для виконання завдання;
- гнучкість, масштабованість та універсальність «s-bots» з різними здібностями поєднуються і посилюються для вирішення складної задачі, і один або кілька «s-bots» можуть вийти з ладу, не впливаючи на завершення завдання.

Проектування структури системи управління «s-bots» значно впливає на надійність і масштабованість «S-bots» - systems. «S-bots» - systems складається з гомогенних «s-bots» або гетерогенних «s-bots». У гомогенних командах «s-bots» можливості окремих членів ідентичні, фізичні структури можуть бути не однаковими. У гетерогенних командах «s-bots» можливості членів різні, тому гетерогенні «s-bots» можуть використовуватися для виконання специфічних завдань. Як правило, розробка структури системи управління «s-bots» є складним завданням.

## 1.2 Структура системи управління «s-bots»

Існують два підходи до вирішення цього завдання:

- централізоване управління;
- децентралізоване управління.

Централізоване управління може будуватися як єдине або ієрархічне (рисунок 1.2).

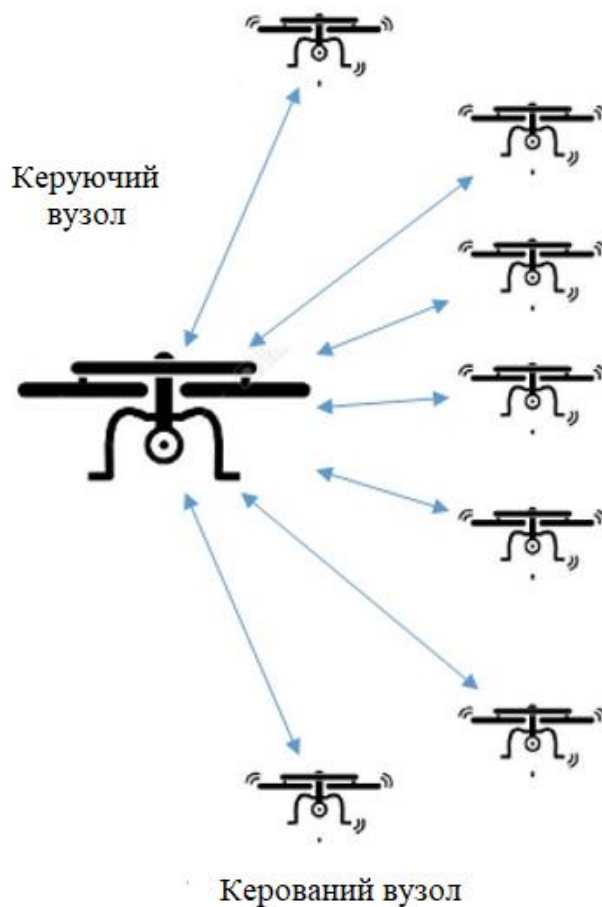


Рисунок 1.2 – Приклад централізованого управління

Система єдино початкового управління полягає в наявності в групі одного або кількох центрів, які являють собою або стаціонарний пристрій управління, або ведучий «s-bot». Центр управління пов'язаний з кожним «s-bots» групи безпосередньо, він планує завдання та відсилає команди

управління. До переваг системи єдиного початкового управління слід віднести простоту її організації та, відповідно, алгоритмізації. Однак дана система має і ряд істотних недоліків, наприклад, якщо в системі збільшується число «s-bot», тоді центр управління повинен формувати планування дій для кожного «s-bot», наслідком чого є тривалий час прийняття рішень. Для усунення цього недоліку використовується система ієрархічного управління, в якій на першому рівні знаходиться «командир», що керує кількома підлеглими, а підлеглі є командирами другого рівня, і так далі, аж до нижнього «s-bot», що виконує своє завдання. Система ієрархічного управління масштабується набагато краще, ніж система єдиного управління. Однак, її недоліком є складність відновлення ієрархії після збоїв «s-bot», що знаходяться на верхніх рівнях дерева управління, тобто ускладнення структури управління може призводити до значних збоїв у передачі команд від верхнього до нижніх рівнів. Централізоване управління нестійке до збоїв зв'язку та інших непередбачуваних ситуацій і, отже, має низьку живучість. Як правило, централізоване управління застосовується у разі обмеженої кількості «s-bots», що діють у відомих та незмінних умовах, наприклад, в автономній логістиці.

Децентралізоване управління, на відміну від централізованого, не має «командира» або стаціонарного пристрою управління і всі «s-bots» є рівними та автономними. Кожен «s-bot» діє з урахуванням свого оточення, він знає про присутність інших «s-bots» і може локально зв'язатися з ними, тому вихід з ладу або знищення будь-якого з них не призводить до виходу з ладу всієї групи в цілому. Перевага децентралізованого управління полягає в тому, що система є масштабованою і стійкою до збоїв, оскільки ведучий «s-bot» не відповідає за управління будь-яким іншим «s-bots», і тому рішення може здійснюватися швидко, в реальному масштабі часу і з урахуванням зміни ситуації у середовищі. Однак у системі децентралізованого управління важко домогтися глобальної узгодженості пристроїв, що входять у її склад, оскільки цілі верхнього рівня повинні включатися в локальне управління кожним «s-bot». Крім того, недоліком децентралізованої системи є складність її алгоритмізації,

оскільки при розробці алгоритмів необхідно розуміти завдання та чітко планувати дії «s-bot», які призводять до найкращого рішення з точки зору всієї групи.

### 1.2.1 Типи децентралізованого управління

Децентралізоване управління може бути двох типів:

- колективне;
- зграйне.

Колективне управління в децентралізованій системі означає, що кожен s-bot має можливість обмінюватися з іншими інформацією з метою оптимізації групових дій (рисунок 1.3).

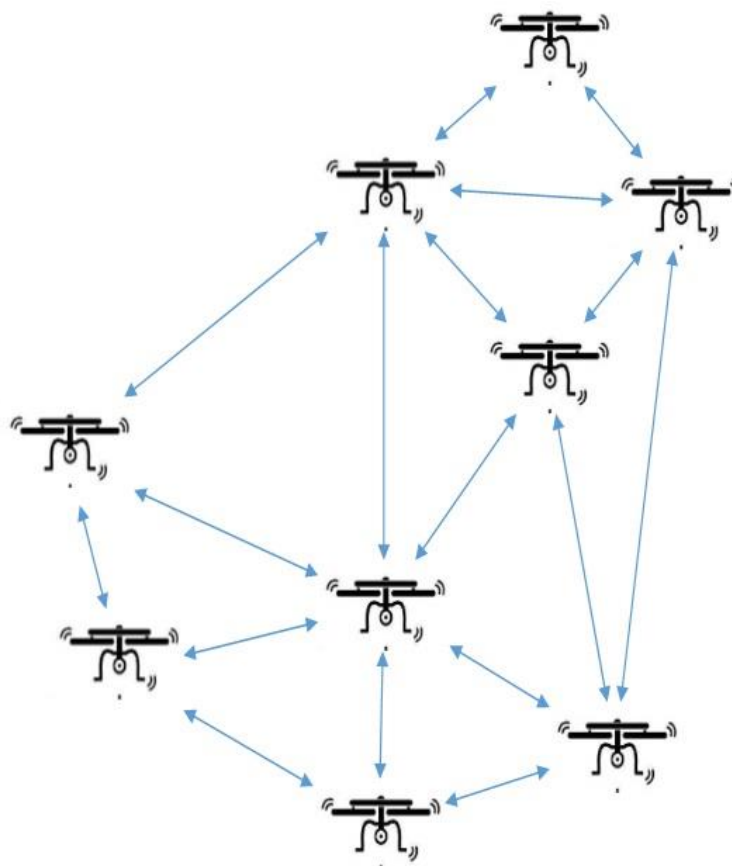


Рисунок 1.3 – Приклад децентралізованого колективного управління

Подібна стратегія управління використовується в спортивних командних іграх, при вирішенні завдань пошуку та охорони та інших.

Зграйна стратегія управління базується на поведінці у природному середовищі тварин, які можуть кооперуватися один з одним для виконання складних завдань (рисунок 1.4).

В одній із наукових праць сформульовано три прості правила:

- розподіл;
- вирівнювання швидкостей;
- згуртованість – для моделювання поведінки окремих птахів.

На їх основі розроблено велику кількість алгоритмів для оптимізації управління «s-bots». Наприклад, група вчених під керівництвом Додонова А.Г. досліджували спосіб зграйного управління Drone у тривимірному просторі на основі модифікованих правил Рейнольдса.

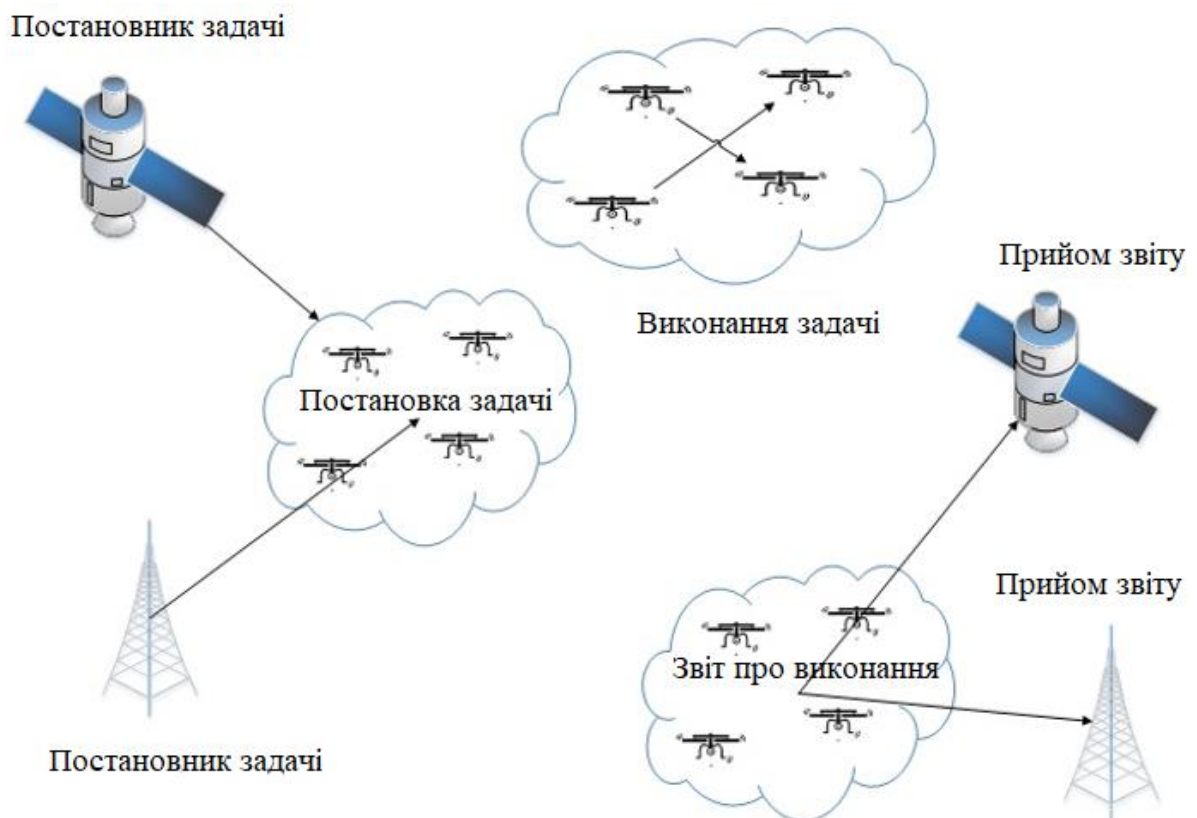


Рисунок 1.4 – Приклад децентралізованого зграйного керування

Гібридне керування. Структура подібних систем включає декілька рівнів:

- інтелектуальний, на якому реалізується інтерфейс оператора та приймаються рішення про проведення операцій з урахуванням інформації про довкілля;
- стратегічний рівень, на якому планується та формується поведінка нижчестоящих рівнів;
- тактичний рівень, що видає сигнали управління «s-bots» з урахуванням необхідної поведінки, і транслює команди їх стану на вищий рівень;
- виконавчий рівень, що безпосередньо управляє рухом «s-bots».

З точки зору автономності, стратегія управління кожним елементом системи включає рівень планування, де приймаються команди від тактичного рівня системи, плануються завдання з урахуванням даних, отриманих від датчиків, передаються команди управління та стану виконавчих пристроїв; рівень управління, який відстежує виконання послідовності завдань та посиляє команди стану системи на верхній рівень; та рівень поведінки, що взаємодіє з пристроями та датчиками «s-bot». Крім того, кожен рівень системи управління окремих «s-bots» може взаємодіяти з іншими «s-bot».

Таким чином, у системі гібридного управління кожен елемент групи самостійно визначає свої дії на основі інформації про мету, що стоїть перед групою, про ситуацію в середовищі на попередньому проміжку та в даний момент часу, про попередні та поточні стани та дії інших «s-bots» групи.

Стратегія управління поєднує локальне управління з високорівневими підходами до управління для реалізації надійності та здатності впливу на дії всієї групи за допомогою досягнення глобальних цілей.

Розглянемо приклади розробки та використання «s-bots» з урахуванням сформульованих вище структур управління та актуальних напрямів у сучасних проектах «s-bots». Одним із актуальних додатків є застосування «s-bots» у завданнях моніторингу та аерофотозйомок. Так, в одній науковій

роботі використовується група Drones для прогнозування врожайності, виявлення очагів шкідників та інших аномальних зон у сільському господарстві (рисунок 1.5), де наведено приклад рішення задачі картування посівів у порівнянні з традиційним підходом, коли оператор керує окремим Drone, задаючи область моніторингу.

У кваліфікаційній роботі досліджується алгоритм децентралізованого управління стройовим та роєвим рухами «s-bots» з використанням модифікованих правил К. Рейнольдса.

Використання зображень від Drone значно ефективніше, ніж знімки від супутникових систем, оскільки роздільна здатність та частота знімків безпосередньо впливають на точність розрахунків. В результаті досліджень виник новий напрямок – кооперація Drones та наземних «s-bots» для виконання моніторингу, боротьби зі шкідниками або збору врожаю.

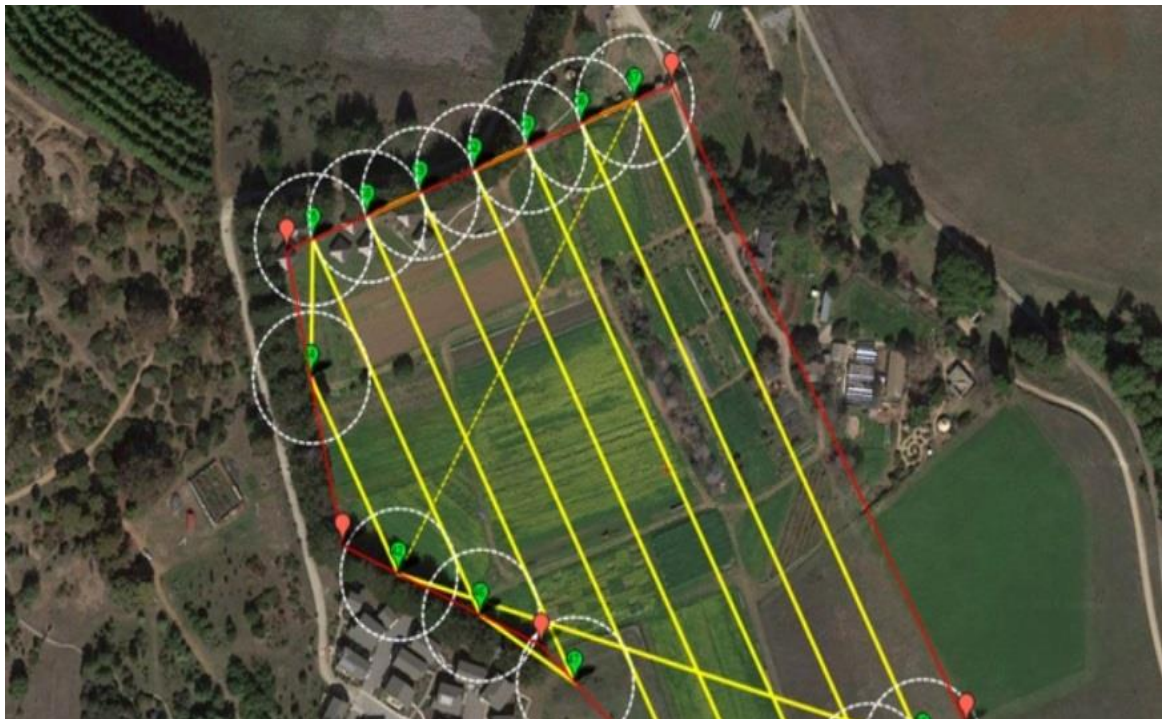


Рисунок 1.5 – Приклад аерофотозйомок та планування польоту Drones під час обстеження поля

### 1.3 Огляд систем взаємодії між «s-bots» та Drone

Ще один напрямок використання «s-bots» при пошуково-рятувальних операціях. Мета такого напрямку – побудова модульної системи управління «s-bots», планування послідовності процесів порятунку та складу команди, призначеної для пошуку та порятунку тих, хто вижив при землетрусах (рисунок 1.6). Система містить два типи «s-bots» – Drones для створення станцій повітряного зв'язку, вирішення завдань збору інформації та виконання пошуково-рятувальних операцій при землетрусах, а також наземні «s-bots», які виявляють постраждалих, надають їм допомогу та забезпечують їх евакуацію із небезпечних зон. З урахуванням особливостей розв'язуваних завдань на різних рівнях управління «s-bots» реалізовані централізовані та децентралізовані стратегії розподілу. Однією з важливих проблем «s-bots» – є управління рухом наземних s-bots на основі візуальної інформації від Drone. При вирішенні завдань транспортування вантажів та патрулювання території існує стратегія управління рухом «s-bots» у строю типу «конвой» з використанням ієрархічного управління (рисунок 1.7).



Рисунок 1.6 – Приклад конфігурації системи

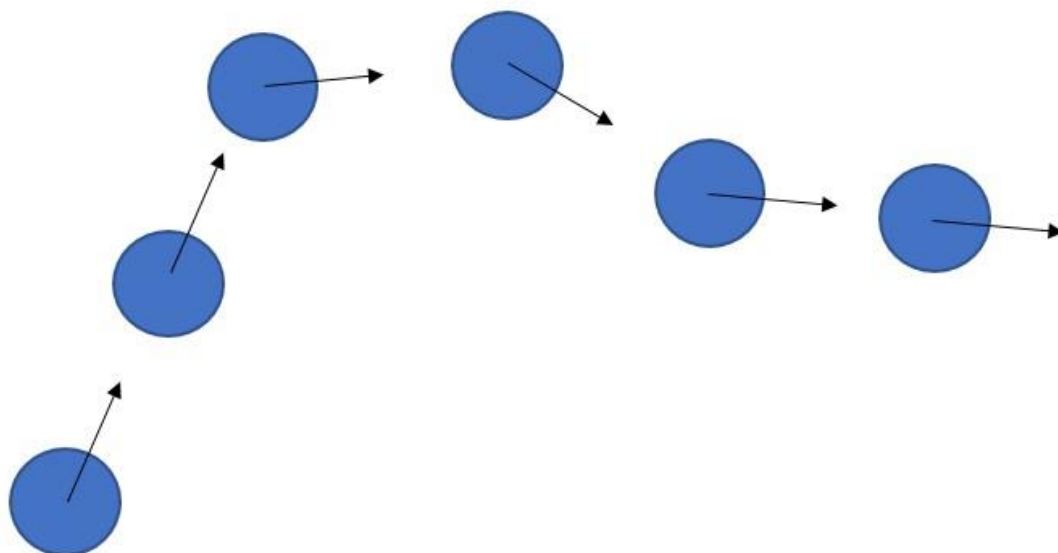


Рисунок 1.7 – Приклад руху «s-bots» у строю типу «конвой»

Існує стратегія управління рухом "s-bots", коли "s-bot" необхідно увійти в стрій (рисунок 1.8).

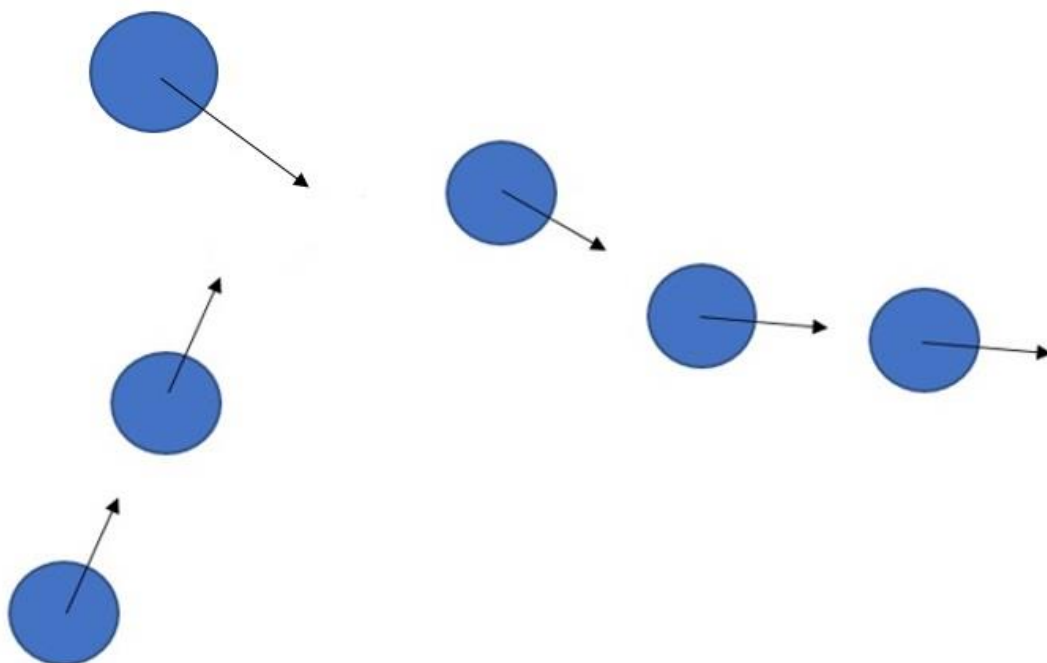


Рисунок 1.8 – Приклад руху «s-bots» коли «s-bot» необхідно увійти до строю

Існує стратегія управління рухом "s-bots", коли "s-bot" необхідно вийти зі строю (рисунок 1.9).

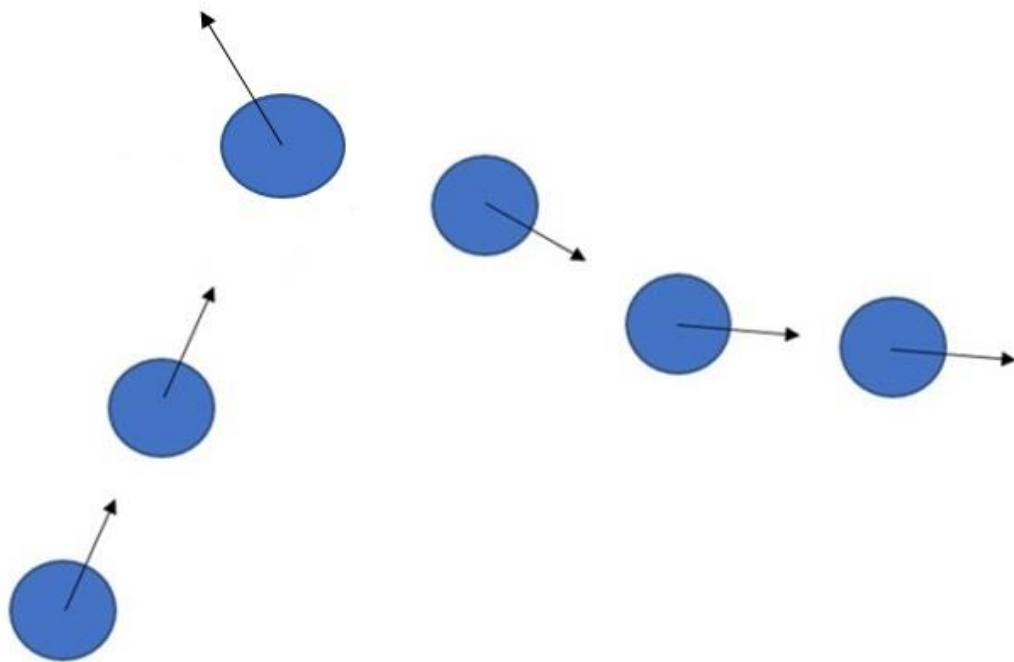


Рисунок 1.9 – Приклад руху «s-bots» коли «s-bot» необхідно вийти зі строю

Ведучий «s-bot», оснащений необхідними датчиками та навігаційними пристроями, рухається заданою траєкторією. Кожен наступний «s-bots» повторює траєкторію руху свого попереднього «s-bots» з деяким запізнюванням за часом, крім цього, використовуючи стратегію логічного управління на основі теорії кінцевих автоматів. На сьогоднішній день розроблено підхід до координації формоутворення групи для виконання різних типів дій. Ця стратегія управління рухом є гібридним управлінням і має перевагу перед зміною топології «s-bots».

Аналіз представлених стратегій руху та управління «s-bots» показує, що в різних сферах застосування може бути розроблений власний алгоритм вирішення поставленого завдання. З іншого боку, в області «S-bots» - systems існують загальні проблеми, що потребують вирішення, розподілу та планування завдань, зв'язку між «s-bots», навігації, координації та управління рухом строю.

Завдання планування траєкторій руху строєм передбачає розрахунок послідовних точок безперервного руху мобільних «s-bots» з початкового до цільового положення в просторі, з урахуванням запобігань зіткнення з перешкодами. Для навігації та обходу перешкод мобільні «s-bots» оснащуються різними датчиками, що включають системи технічного зору, скануючі лазерні далекоміри, тощо.

Крім цього, існує велика кількість алгоритмів для ефективного планування траєкторії. Загальні алгоритми, наприклад,  $A^*$ , дозволяють оптимально планувати траєкторії у дискретних середовищах. Проте оптимальність цих траєкторією обмежена знаннями планувальника про перешкоди. Пряма видимість датчиків на мобільному «s-bot» обмежена геометрією навколишнього середовища. Наприклад, всередині приміщень видимість обмежена стінами та іншими перешкодами, але на вулиці пряму видимість обмежують рослинність та будівлі.

На відкритому повітрі звичайним способом покращення дальності видимості є встановлення датчика на певній висоті на мобільних роботах, але в цьому випадку робот не зможе виявити об'єкти за надто високими перешкодами. Для подолання цього обмеження мобільний s-bot може використовувати інформацію, отриману від Drone, оскільки Drone має набагато довші і ширші діапазони перцепції, ніж мобільний «s-bot». Наприклад, у науковій статті представлена система мобільного s-bot і Drone для картування перешкод. Мобільний «s-bot» і перешкоди на траєкторії «s-bot» ідентифікуються шляхом обробки аерофотознімка від Drone. Далі, щоб забезпечити навігацію та обхід перешкод, застосовується метод, що ґрунтується на потенційних полях.

В результаті виходять координати перешкод в абсолютній системі координат, будується глобальна карта, а потім виконується планування траєкторії на цій карті. На рисунку 1.10 показано комп'ютерний експеримент. Синій квадрат на малюнку є зображенням, отриманим від камери на борту Drone.

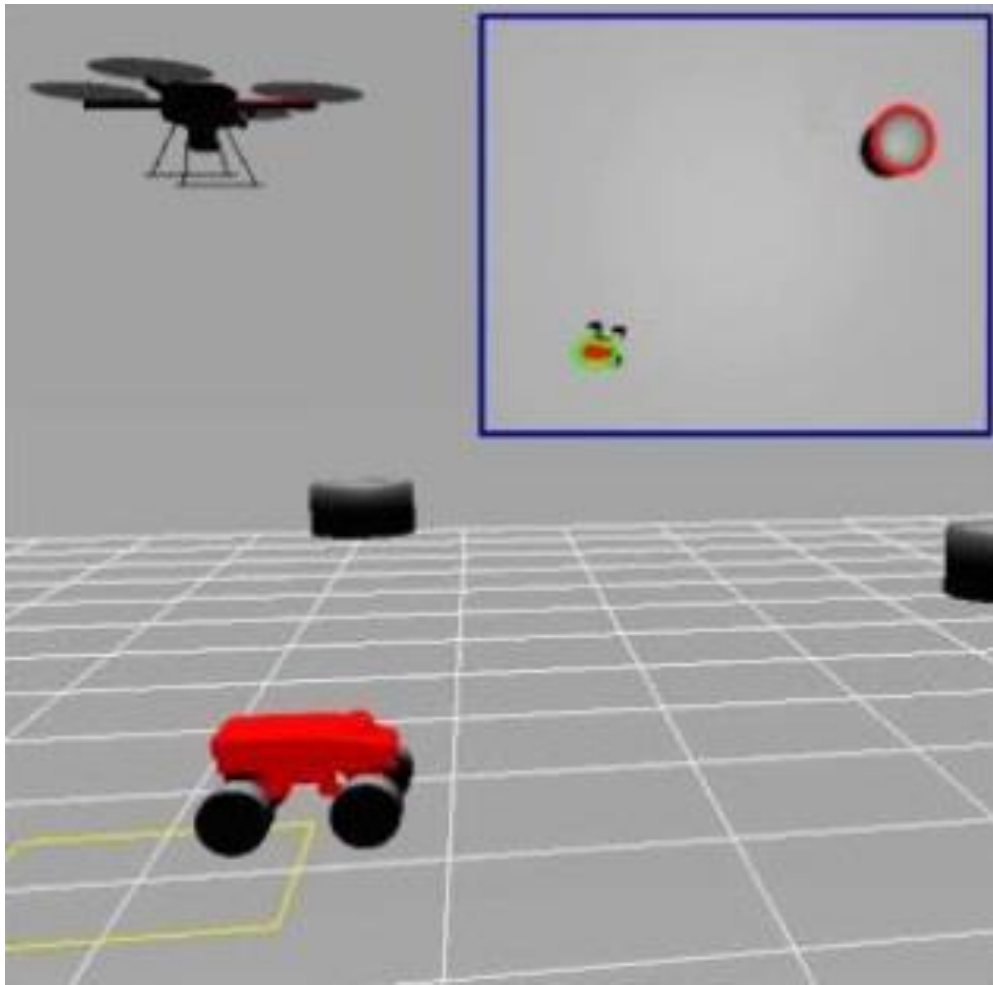


Рисунок 1.10 – Комп'ютерне моделювання взаємодії «s-bot» та Drone

Очевидно, що Drone має більш широке поле зору та гнучкість. Тому застосування Drone для підтримки мобільного s-bot у пошуку цілей, виявленні перешкод є актуальним сучасним завданням. В одній з наукових робіт пропонується система стереобачення на основі кількох Drone для картографування наземних перешкод та забезпечення глобального планування траєкторії мобільного «s-bot».

Схема роботи цієї системи представлена на рисунку 1.11. Кожен Drone оснащений однією камерою, система стереогляду реалізована двома Drone з рухомою базовою лінією.

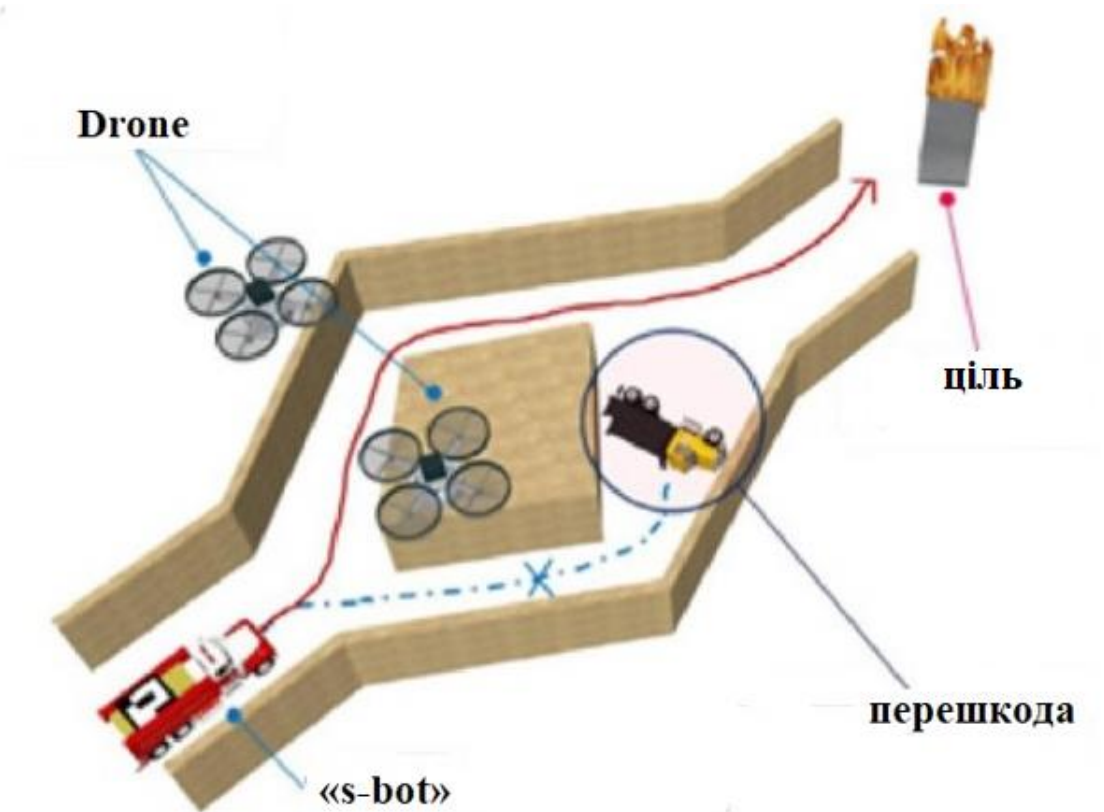


Рисунок 1.11 – Комп'ютерне моделювання взаємодії «s-bot» та Drone

На мобільному «s-bot» є маркер, для розпізнавання використовуються камери першого і другого Drone. На основі розпізнаного маркера, а також систем координат Drone та мобільного «s-bot» можна отримати відносні положення та орієнтації між Drone та мобільним «s-bot». Для виділення перешкод обробляються два зображення від камер першого та другого Drone, а потім проводиться планування траєкторії з використанням цих даних. Здатність виявлення перешкод запропонованою системою суттєво не погіршується при зміні висоти Drone, оскільки базова лінія між камерами стереогляду може бути оптимально відрегульована.

Дана система може працювати навіть за відсутності GPS. У більшості існуючих робіт, що використовують Drone і мобільний «s-bot», побудова карти не є точною. Однією з причин цього є те, що якість фотографій, отриманих від Drone, залежить від погоди, вібрації в польоті або інших факторів. Тому

системи, що містять Drone і наземний «s-bot» потребують подальших досліджень у галузі побудови карт навколишнього середовища та планування траєкторій руху.

В одній із наукових статей розглядається кооперативна система з Drone та групою мобільних «s-bots», що працює в аварійно-рятувальних завданнях. Коли мобільний «s-bot» отримує від камери Drone зображення наземного середовища, першим кроком є шумозаглушення зображень за допомогою методів медіанного фільтра і морфологічного шумозаглушення, що включає корозію і розширення. Необхідність цього полягає в тому, що надто великий шум на зображенні впливає на процес розпізнавання перешкод. Коли Drone знімає зображення, необхідно коригувати спотворені від вібрації у польоті зображення.

Загальна стратегія корекції спотворень полягає у методі поліноміальної деформації, основна ідея якого – використовувати поліноміальне перетворення між координатами, щоб приблизно висловити нелінійне спотворення, а потім вибрати деякі контрольні точки для усунення спотворення. Після виправлення зображень вирішується завдання виявлення перешкод та будується карта середовища. Маючи карту, сигнали GPS та координати цільового пункту, мобільний «s-bot» може планувати свій маршрут. Першим етапом отримання траєкторії є використання генетичного алгоритму для створення допустимого глобального маршруту, потім використовується локальна оптимізація (local rolling optimization), що забезпечує оптимізацію результатів генетичного алгоритму. В іншій науковій статті подано алгоритм спільного управління Drone та мобільним «s-bot». Схема управління складається з чотирьох рівнів, кожен із яких працює як незалежний модуль.

Перший рівень – автономне планування, яке відповідає за прийом координат цільової точки мобільного «s-bot», зазначених або оператором або Drone.

Другий рівень – планування траєкторії з використанням евристичного

алгоритму на основі отримання зображень робочого простору за допомогою камери, прикріпленої до Drone.

Третій рівень є центром формування команд управління рухом та передає команди управління на нижній рівень – модель зовнішнього середовища та «s-bots». Далі розглядається алгоритм управління мобільним «s-bot» для прямування за планованою траєкторією, в якій швидкість є не постійною і може залежати від кривизни траєкторії, похибки або інших факторів управління.

На особливу увагу заслуговує проект, який, здійснює картографування та пошук шляху для «s-bot» групою Drone з використанням активного колективного технічного зору та плануванням руху в загальному просторі групи «s-bots».

Процес спільної роботи пристроїв виглядає наступним чином (рисунок 1.12). Drone злітає з «s-bots» у разі наближення його до лабіринту, летить над s-bots і лабіринтом, фотографуючи їх за допомогою камери і передає «s-bots» зняті дані. Для обчислення оптимальної траєкторії проходження лабіринту використовується метод імовірнісної дорожньої карти (PRM) на основі обробки зображення карти місцевості та здійснюється автономна навігація в лабіринті по обчисленому маршруту методом SLAM з використанням лазерного далекоміра.

Хоча Drone з камерою має здатність швидкої зйомки з висоти великих площ, перешкоди в наземному середовищі, особливо високі та великі, зазвичай впливають на результати побудови карт та планування траєкторій. Наприклад, аерофотознімок лісу, захоплений Drone, у процесі обробки зображень розглядається на карті як закрита перешкода, хоча насправді мобільний «s-bot» може пройти через ліс.

Крім того, існує проблема появи динамічних перешкод, які відсутні на карті Drone, побудованій на основі серії знімків. У цих випадках побудова карти та планування маршруту на основі технічного зору Drone стає ненадійною.

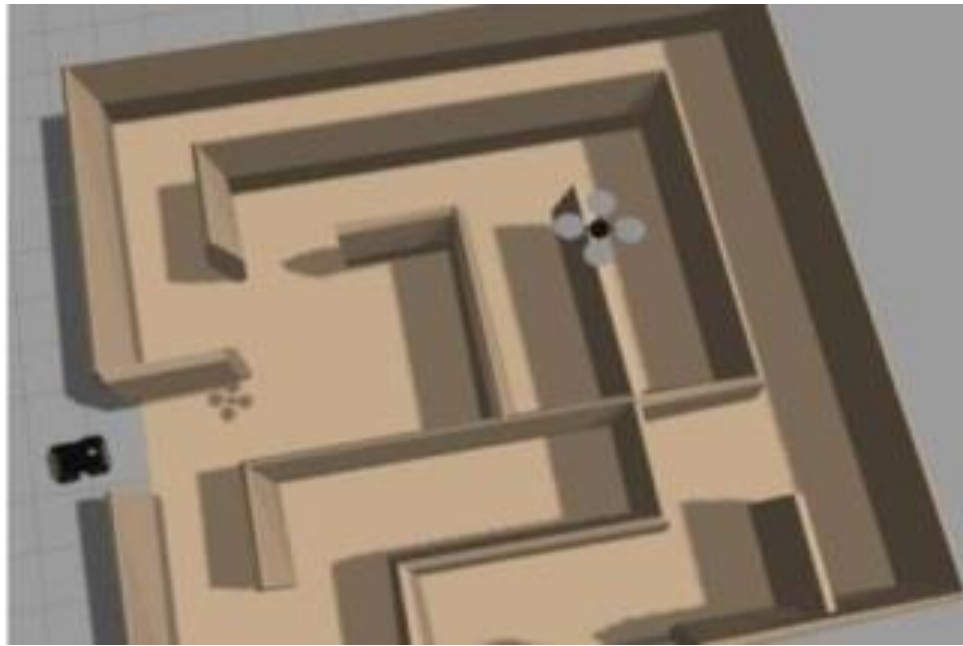


Рисунок 1.12 – Комп'ютерне моделювання взаємодії «s-bot» та Drone

Однак мобільний «s-bot» за допомогою власних датчиків може визначити локальне місцезнаходження точніше, ніж з використанням камери Drone, хоча, в цьому випадку можливий недолік глобальної локалізації. Через ці обмеження недостатньо одного мобільного «s-bot» або Drone для виконання складних завдань на практиці. Тому виникає необхідність об'єднання дій групи мобільних наземних «s-bot» та Drone.

#### 1.4 Постановка завдання дослідження

Завдання, яке досліджується у кваліфікаційній роботі. Нехай «s-bots» застосовується в зоні катастрофи для швидкої доставки необхідних вантажів у постраждалий район. Через землетрус довкілля різко змінюється, тому існуючі карти можуть бути неефективними на момент проведення рятувальної операції. У зв'язку з цим застосовується Drone, який має широке поле зору та гнучку мобільність, для вирішення завдань збору інформації, побудови

глобальної карти та планування глобальної траєкторії для «s-bots». Однак через повторні поштовхи почали руйнуватися пошкоджені будівлі, з'явилися реальні перешкоди, які відсутні на глобальній карті, побудованій на основі серії знімків. Для вирішення цього завдання необхідно побудувати локальну карту даних від ведучого «s-bot». Тому рішенням такої задачі є зіставлення глобальної та локальної карт для виявлення перешкод та їх форм. Наприклад, при зустрічі «s-bots» з вузькими перешкодами може виникнути ситуація, що «s-bots» не зможуть пройти ці перешкоди всією групою. Звичайно, можна дати команду, щоб «s-bots» проходили ці перешкоди по черзі, але на це піде багато часу. Тому в процесі руху «s-bots» запланованою траєкторією для швидкого проходження або обходу перешкод необхідно, щоб надійшла команда для зміни топології «s-bots». Тоді завдання проходження чи обходу вузьких перешкод вирішуються так:

- дослідити алгоритми планування траєкторії на основі зіставлення карт, побудованих з використанням даних від Drone та провідного наземного «s-bot»;
- розробити методику управління перебудовою «s-bots» у середовищі з перешкодами.

Відповідно до цього алгоритму, спроектована структура системи управління «s-bots», що включає керуючий центр, один Drone, один наземний ведучий «s-bot» і групу наземних «s-bots». У цій системі управляючий центр формує завдання Drone і групі наземних «s-bots» з урахуванням команд оператора, і варіанти топології групи наземних «s-bots» на основі зіставлення карт місцевості, а також забезпечує запобігання зіткнень між наземними «s-bots». Drone летить заданою траєкторією над досліджуваною територією та групою наземних «s-bots». Камера Drone робить знімки, що передаються ведучому «s-bot». Ведучий «s-bot» відповідає за побудову глобальної карти місцевості з використанням зображень від камери Drone та локальної карти з

використанням даних від двовимірного скануючого лазерного далекоміра, в той же час виконуючи зіставлення глобальної та локальної карт. Управляючий центр, здійснює глобальне та локальне планування траєкторії руху групи наземних «s-bots» на основі карти місцевості, побудованої за допомогою Drone. Ведені наземні «s-bots», при виявленні перешкод, одержують від управляючого центру команди для перебудови та руху в групі по заданій траєкторії, а також автономно визначають власне положення.

## 2 МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ «S-BOTS» - SYSTEMS ЗА ДОПОМОГОЮ СУПРОВОДЖУЮЧОГО DRONE

Для вирішення завдання побудови програмної траєкторії руху групи наземних «s-bots», за допомогою інформації, отриманої від супроводжуючого Drone, необхідно об'єднати та обробити дані, отримані від групи наземних «s-bots» та Drone. Тоді завдання полягає у побудові моделі узгодження глобальної та локальної карт руху в системі координат ведучого «s-bot» та розробці алгоритму побудови глобальної та локальної карт руху групи наземних «s-bots».

### 2.1 Опис моделі зіставлення карт місцевості у системі координат ведучого «s-bot»

Нехай група наземних «s-bots» та Drone рухаються у просторі OXYZ (рисунк 2.1). На борту ведучого «s-bot» групи встановлено скануючий лазерний далекомір, а система координат далекоміра нерухома щодо системи координат провідного «s-bot»  $O_r X_r Y_r Z_r$ . На борту Drone знаходиться камера зі своєю системою координат, яка нерухома відносно системи координат Drone  $O_g X_g Y_g Z_g$  і переміщуються разом з ним. Drone летить над територією, що вивчається, і мобільними «s-bots» на незмінній висоті ( $z=const$ ), фотографує їх за допомогою камери та передає відзняті дані ведучому «s-bot». Ведучий «s-bot» будує карту (глобальну карту) місцевості з використанням даних, отриманих від камери Drone. Інша карта (локальна карта) побудована ведучим «s-bot», який оснащений скануючим лазерним далекоміром. Нехай  $M$  – нерухома точка, яка належить рельєфу, з вектором  $r_o$  в системі координат OXYZ. Нехай  $r_g$  – вектор, який визначає положення точки  $M$  в системі  $O_g X_g Y_g Z_g$  та отриманий за допомогою системи технічного зору Drone, а  $r_r$  – вектор, який визначає положення точки  $M$  в системі  $O_r X_r Y_r Z_r$ .

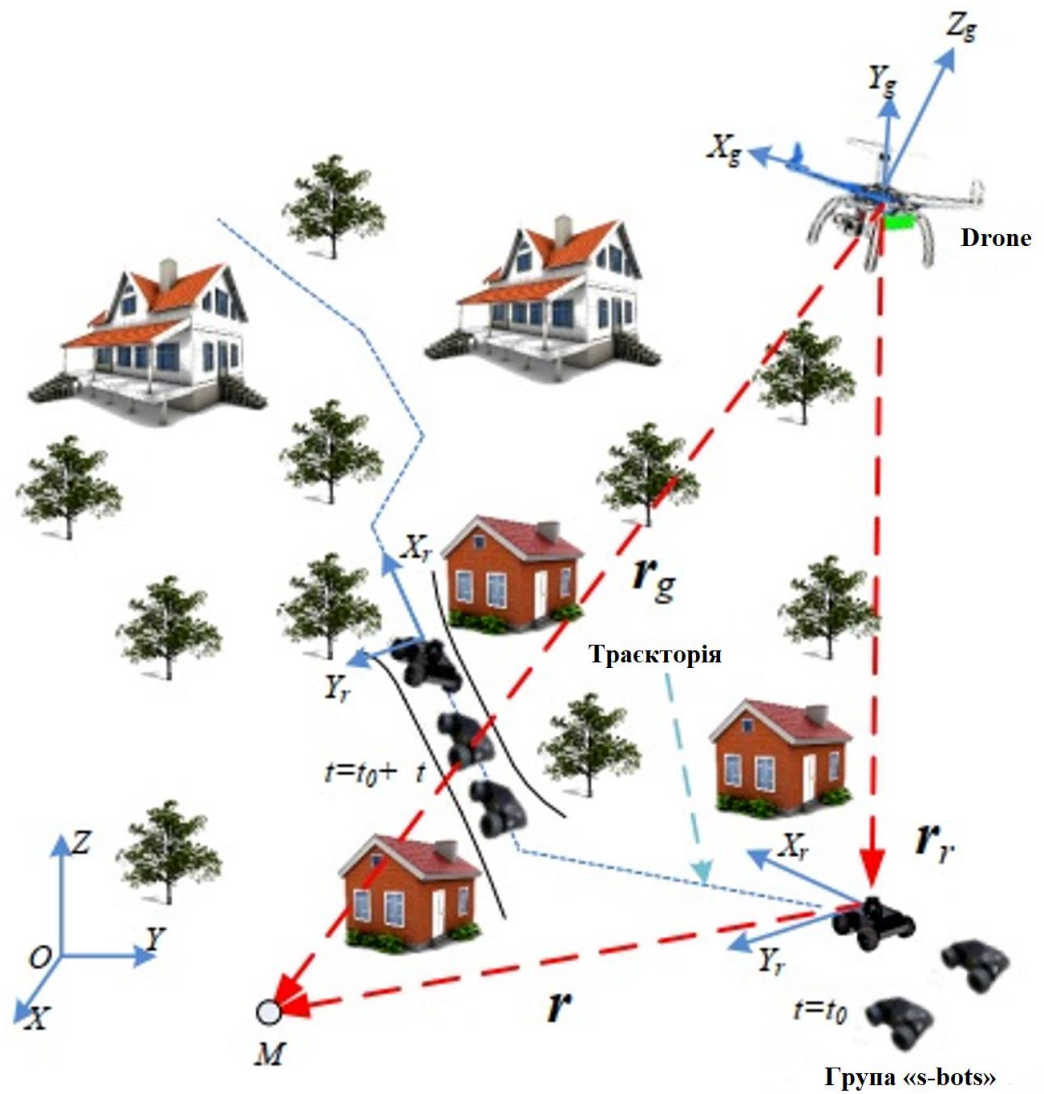


Рисунок 2.1 – Системи координат Drone та ведучого «s-bot» групи

То має місце співвідношення:

$$\begin{cases} r_0 = T_g r_g \\ r_0 = T_r r_r \end{cases}, \quad (2.1)$$

де  $T_g$  – матриця переходу від зв'язаної з Drone системи координат до абсолютної;

$T_r$  – матриця переходу від зв'язаної з «s-bot» системи координат до абсолютної.

Тоді:

$$\mathbf{r}_r = \mathbf{T}_r^{-1} \mathbf{T}_g \mathbf{r}_g. \quad (2.2)$$

Тоді  $\mathbf{r} = (p_x, p_y, 1)^T$  – вектор, що визначає положення точки  $M$  у системі  $O_r X_r Y_r Z_r$ , можна отримати, використовуючи виміряні координати кінцевої точки скануючим лазерним далекоміром. Для побудови локальної двовимірної карти навколишнього середовища і визначення свого становища у ньому використовуються інформації лазерного сканера. Тоді можна записати наступні співвідношення для знаходження однорідної матриці  $T$ , яка зв'язує вектори глобальної та локальної карт:

$$\mathbf{r}_r = \mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & x \\ s\theta & c\theta & y \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

де  $\theta, x, y, m$  – відповідно, кут повороту, координати перенесення та масштаб між координатами двох карт у системі координат «s-bot». Матриця  $T$  містить чотири невідомі параметри. Для їх визначення потрібно мати мінімум чотири рівняння та мінімум чотири пари точок на двох картах. Тепер перейдемо до побудови глобальної та локальної карт, пошуку цих пар точок та обчислення чотирьох невідомих параметрів.

## 2.2 Побудова глобальної карти з використанням візуальної інформації від Drone

При спільній роботі групи, як правило, швидкість Drone більше швидкості «s-bots», і Drone щохвилини веде групу «s-bots». Припустимо, що Drone летить заданою траєкторією. На ній вибирається ряд рівновіддалених

точок  $N$ , які відповідатимуть тим моментам часу, коли камера Drone зняла черговий кадр  $K_i (i=0,1,\dots,n-1)$ . Кожен кадр від камери Drone передається провідному «s-bots», і записується по черзі до буфера  $B$ , де  $i$  позначає відповідний номер кадру. Потрібний обсяг пам'яті буфера  $B$  залежить від розміру зображення кожного кадру. Протягом кожного інтервалу часу записується по черзі один кадр в процесор  $P$  з буфера  $B$ .

Через освітлення навколишнього середовища, різних шумів датчика та вібрації в польоті або інших факторів знімки мають проблеми, такі як переміщення, обертання, зміна масштабу, перспективна деформація, хроматична аберація, спотворення та оклюзія цілі, що рухається. Отже, першим етапом обробки зображення є реєстрація зображень.

Реєстрація зображень – це процес перетворення різних наборів даних на одну систему координат. Ці дані можуть бути кількома зображеннями, отриманими від різного часу, глибини або точок зору, а також від різних датчиків. Метою реєстрації є встановлення геометричної відповідності між зображеннями для того, щоб їх можна перетворювати, порівнювати та аналізувати у загальній системі.

Тому процес реєстрації зображення визначає величини повороту, перенесення та масштабу між еталонним та поточним зображеннями. Це має практичне застосування у багатьох областях, включаючи дистанційне зондування, медичну візуалізацію та комп'ютерний зір. В даний час існуючі методи реєстрації зображень поділяються на дві категорії:

- алгоритми на основі характеристик. Основна процедура в цьому способі включає виявлення характеристик (feature detection). Знаходять особливі точки, лінійні сегменти та краї яких отримують із застосуванням деяких алгоритмів, на етапі зіставлення характеристик (feature matching) встановлюється відповідність між характеристиками, виявленими у захопленому зображенні та еталонному зображенні. З цією метою використовуються різні дескриптори ознак і міри подібності, і навіть просторові зв'язки між ознаками. Оцінюються тип і параметри так званих

картографічних функцій, що вирівнюють вимірювальне зображення з еталонним зображенням. Параметри функцій відображення обчислюються за допомогою встановленої відповідності характеристик. Ця категорія методів має деякі недоліки, такі як, виявлені набори характеристик в еталонному та вимірюваному зображеннях повинні мати достатню кількість загальних елементів, також методи виявлення характеристик повинні мати хорошу точність локалізації і не повинні бути чутливими до передбачуваного погіршення зображення;

- алгоритми з урахуванням області перетворення (transform domain). Для реєстрації зображень дані алгоритми знаходять параметри перетворення, наприклад, переміщення, обертання та масштабу. На відміну від алгоритмів на основі характеристик, ці методи мають високу стійкість до корельованих і частотно-залежних шумів і неоднорідних, нестаціонарних перешкод освітлення. У разі великої кількості вхідних зображень, що надійшли, виконується економія часу обчислень за рахунок застосування особливих алгоритмів.

Тому у кваліфікаційній роботі для реєстрації зображень використовується алгоритм на основі області перетворення.

Розглянемо зображення  $K_1(x, y)$ , яке перетворюється з декартової системи координат на логарифмічну систему координат:

$$K_1 = \begin{cases} p_1 = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \alpha_1 = \arctan \frac{y}{x} \end{cases}, \quad (2.4)$$

якщо  $K_1$  вийде за допомогою перетворення  $K_2$  з масштабним коефіцієнтом  $m$  для горизонтального та вертикального напрямів, тобто:

$$K_1(x, y) = K_2\left(\frac{x}{m}, \frac{y}{m}\right), \quad (2.5)$$

тоді полярне представлення  $K_2$  буде дорівнювати:

$$K_2 = \begin{cases} p_2 = \frac{1}{m} \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{p_1}{m} \\ \alpha_2 = \arctan \frac{y}{x} = \alpha_1 \end{cases} \quad (2.6)$$

З використанням комплексного числа  $z$  рівняння (2.6) можна записати як:

$$z = p_2 e^{j\alpha_2} = p_2 (\cos \alpha_2 + j \cdot \sin \alpha_2). \quad (2.7)$$

Припустимо, що:

$$w = l \cdot n \cdot z, \quad (2.8)$$

тоді отримаємо:

$$w = l \cdot n \cdot p + j \cdot \alpha \cdot 2. \quad (2.9)$$

Тому, коли зображення  $K_i(x_i, y_i)$  в декартовій системі координат масштабується в  $m$  раз і повертається відносно початкових координат на  $\alpha_0$ , то відповідні полярні координати дорівнюють:  $(\frac{p}{m}, \alpha - \alpha_0)$ . Після того як логарифм полярних координат обчислено та виконано відображення, маємо:

$$[l \cdot n \cdot m - l \cdot n \cdot p] + j \cdot (\alpha - \alpha_0). \quad (1.10)$$

Отже, зміна масштабу зображення в декартовій системі координат еквівалентно горизонтальному переміщенню зображення в логарифмічній полярній системі координат, а зміна обертання еквівалентно вертикальному переміщенню.

Після реєстрації зображень потрібне зшивання цих зображень для формування глобальної карти. Якщо якісь області зшивання зображень при порівнянні перекриваються, тоді будуть помітні шви різних зображень і буде видно різницю між краєм зображення і основною частиною цього зображення. Щоб ефективно усунути ці шви, зображення зшивають з використанням лінійно-зваженого методу зшивання. На рисунку 2.2 представлений результат зшивання двох зображень.

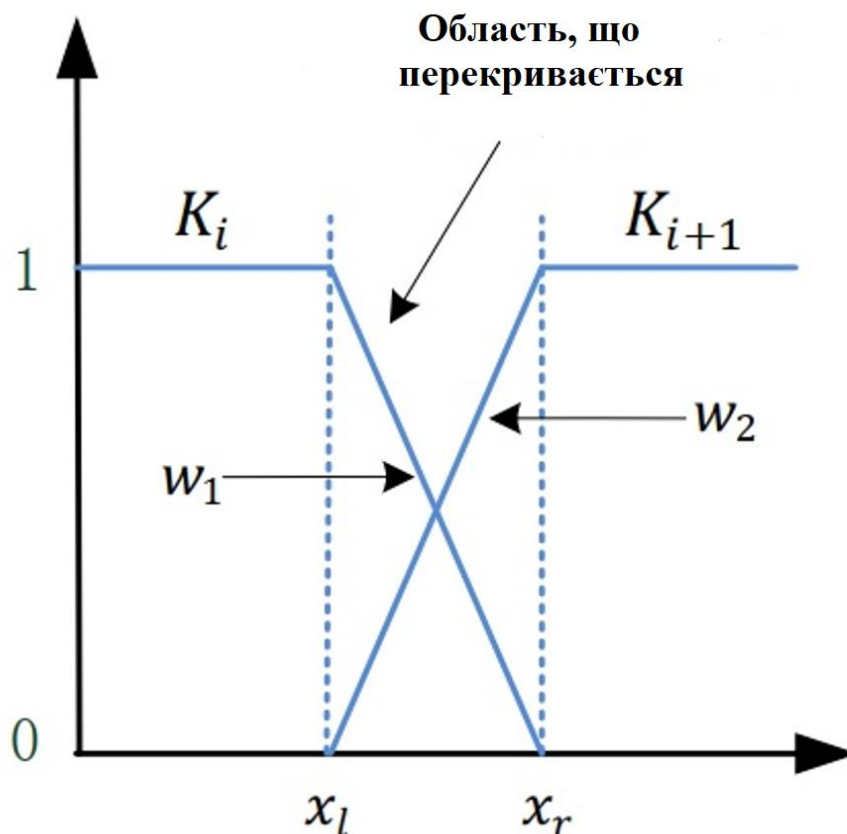


Рисунок 2.2 – Результат зшивання двох зображень

Виявлення перешкод. За допомогою системи технічного зору Drone, який веде групу «s-bots», отримує зображення місцевості. Для побудови глобальної карти місцевості відбувається зіставлення двох карт місцевості. На цих картах необхідно виділити перешкоди. В даний час для обробки зображень застосовують традиційні алгоритми сегментації зображення, які мають граничну сегментацію, для зіставлення з еталонним зображенням (шаблоном). Знаходження краю зображення здійснюється за допомогою двох методів:

- кластеризації;
- Дугласа-Пекера.

Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки. Сегментація зображення є найважливішим кроком при побудові глобальної карти місцевості. Тому точність виділення об'єкта на зображенні (відсіювання шумів) впливає на ефективність планування траєкторії. Отже завдання зводиться до того, щоб якомога чіткіше отримати контури об'єкта. Потім, виходячи з цих контурів, будується глобальна карта. Для виділення контурів об'єкта на зображенні застосовано модифікований алгоритм Дугласа-Пекера.

Класичний алгоритм Дугласа-Пекера (рисунки 2.3 - 2.7) складається з наступних кроків:

Крок № 1 – сегмент АВ з'єднаний початковою точкою А з кінцевою точкою В кривою лінією;

Крок № 2 – обчислена вертикальна відстань  $d$  від точки на кривій до сегмента АВ, отримана точка С на кривій, яка є найбільшою вертикальною відстанню від сегмента АВ;

Крок № 3 – порівняння відстані  $d$  з порогом, якщо відстань  $d$  менша за поріг, сегмент апроксимується як кривий;

Крок № 4 – якщо відстань  $d$  більша за поріг, відбувається поділ кривої на два сегменти АС і ВС з точки С і обробка двох сегментів АС і ВС по крокам (1), (2), (3);

Крок № 5 – після обробки всіх кривих, відбувається з'єднання всіх точок та формування ламаної лінії  $l_1$ .

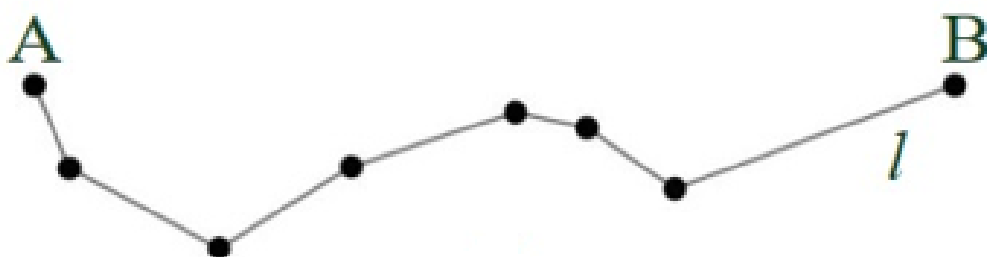


Рисунок 2.3 – Крок № 1. Сегмент АВ з'єднаний початковою точкою А з кінцевою точкою В кривою лінією

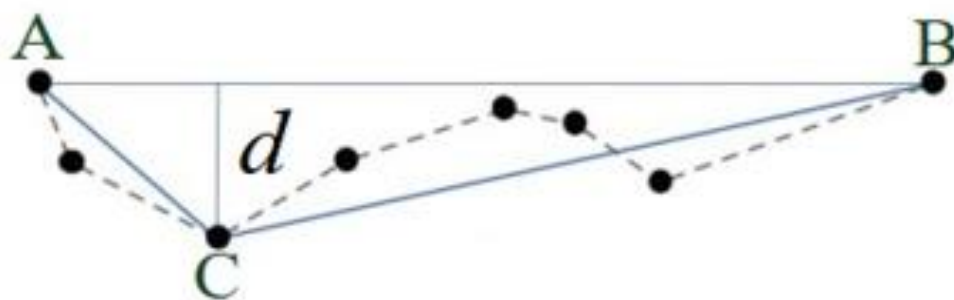


Рисунок 2.4 – Крок № 2. Обчислення вертикальної відстані  $d$  від точки на кривій до сегмента АВ, отримана точка С на кривій

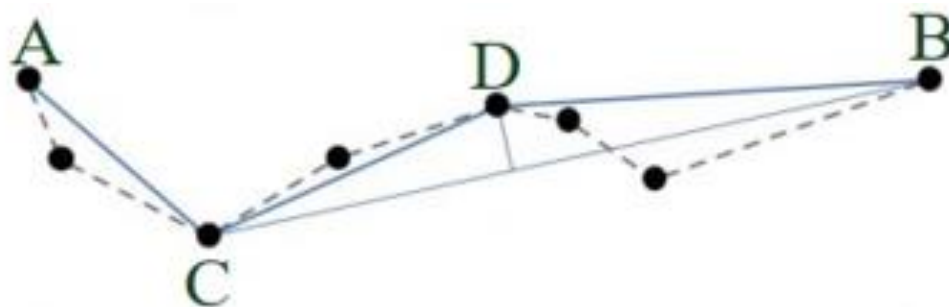


Рисунок 2.5 – Крок № 3. Порівняння відстані  $d$  з порогом

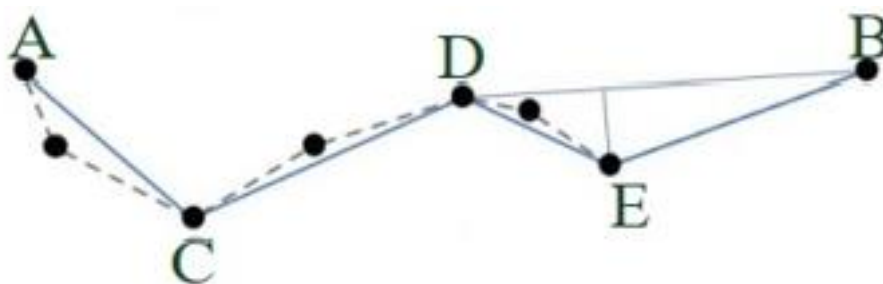


Рисунок 2.6 – Крок № 4. Поділ кривої на два сегменти AC і BC з точки C і обробка двох сегментів AC і BC

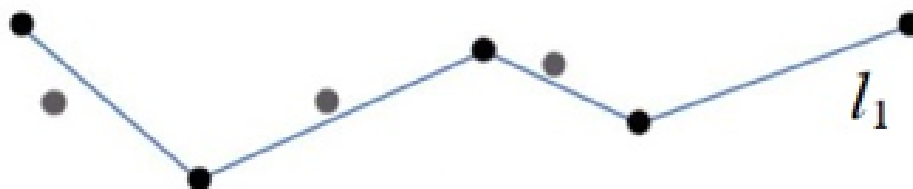


Рисунок 2.7 – Крок № 5. З'єднання всіх точок та формування ламаної лінії  $l_1$

### З ПЛАНУВАННЯ ТРАЕКТОРІЇ РУХУ МОБІЛЬНОГО «S-BOTS» НА ОСНОВІ ДАНИХ ОТРИМАНИХ ВІД DRONE

Після того, як встановлений зв'язок між об'єктами на картах, можна перейти до завдань планування глобальної та локальної траєкторії руху. Головною частиною планування траєкторії руху є алгоритм планування. Методи планування траєкторії мобільного «s-bots» складаються з трьох аспектів. Одним із них є алгоритм на основі моделі навколишнього середовища. У сформованому середовищі положення та форма перешкоди відомі та нанесені на карту. Рух мобільного «s-bots» вимагає порівняння інформації від Drone і порівняння її з картою. Будується послідовність точок від початкового положення «s-bots» до цільового «s-bots». Стандартні алгоритми глобального планування траєкторії руху мобільного «s-bots» включають в себе:

- алгоритм сіткової карти (grid map метод);
- алгоритм топологічної карти (topological map method);
- алгоритм графу видимості (visibility graph algorithm);
- алгоритм  $A^*$ .

Алгоритм сіткової карти практичний і простий у реалізації, але має великий обсяг обчислень, тривалий час виконання, низьку ефективність пошуку.

Алгоритм топологічної карти перетворює складне зовнішнє середовище на топологічне середовище. Цей метод має високу стійкість з точки зору помилки розташування «s-bots». Тим не менш, час обробки інформації про місцезнаходження «s-bots» велике, а ефективність низька. Складність алгоритму зростає зі збільшенням кількості перешкод.

Для пошуку найкоротшого маршруту руху «s-bots» застосовується алгоритм графу видимості у разі невеликої кількості перешкод і коли зовнішнє середовище не змінюється.

У кваліфікаційній роботі для визначення оптимального маршруту руху "s-bots" застосовується алгоритм A\*, оскільки він швидший і ефективніший за інші алгоритми. На рисунках 3.1 – 3.4 представлені топології руху «s-bots», з початкової точки спроектованого маршруту, до кінцевої.

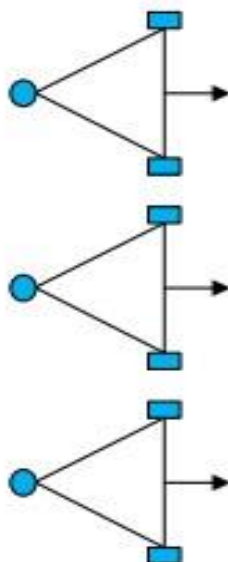


Рисунок 3.1 – Приклад топології руху «s-bots»

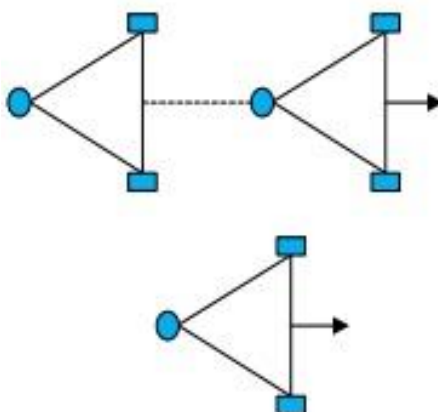


Рисунок 3.2 – Приклад топології руху «s-bots»

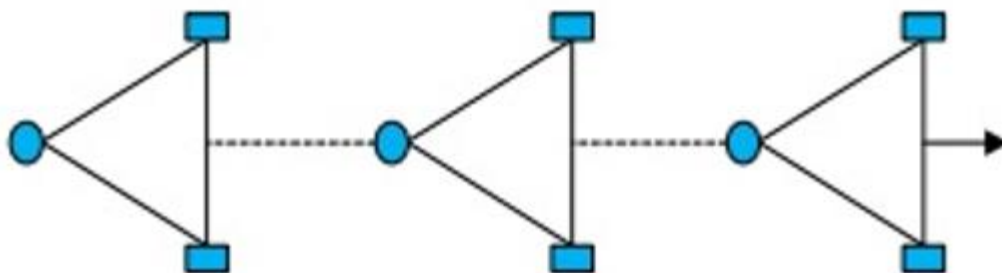


Рисунок 3.3 – Приклад топології руху «s-bots»

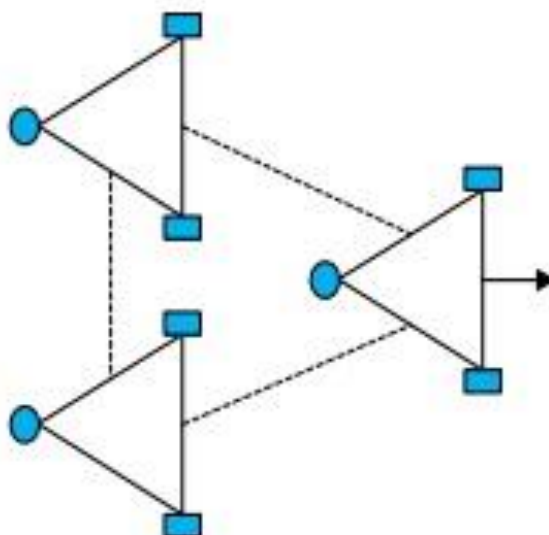


Рисунок 3.4 – Приклад топології руху «s-bots»

У процесі пошуку найкоротшого маршруту руху «s-bots» необхідно обійти кожну вузлову точку на сітковій карті з використанням класичного алгоритму. A\*.

Коли s-bot рухається до цільової точки F, то точки, які оточують цей вузол зберігаються в списку Open-List (Open-List – відомі точки разом зі значеннями). Точка, вибрана з цього списку Open-List з найменшою вартістю, є наступною цільовою точкою і переноситься до списку Closed-List (Closed-

List – повністю досліджені точки. До цих точок вже відома найкоротша траєкторія). Повторюється цей процес до кінця пошуку останньої цільової точки маршруту руху «s-bots». Ідея алгоритму  $A^*$  полягає у знаходженні базових цільових точок для того, щоб створити карту руху «s-bots» по найкоротшій траєкторії (рисунок 3.5 та 3.6).

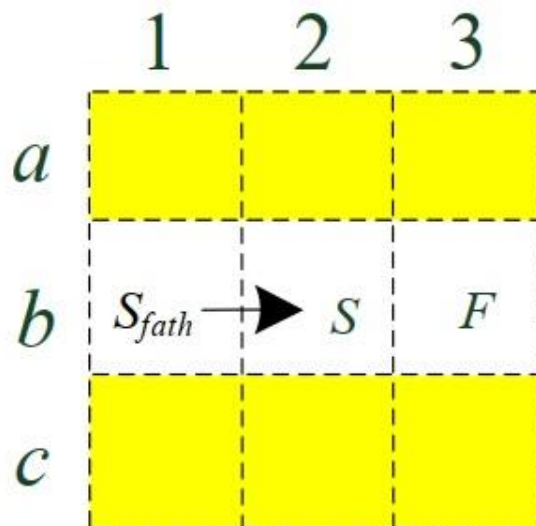


Рисунок 3.5 – Приклад руху «s-bot» по найкоротшій траєкторії за допомогою алгоритму  $A^*$

Алгоритм  $A^*$  описується наступними кроками.

Крок № 1. Введення глобальної карти початкової точки  $S_{fath}$  та цільової точки  $F$ .

Крок № 2. Початкова точка  $S_{fath}$  зберігається у списку Open-List.

Крок № 3. Обчислюється вартість кожного вузла  $n$  у списку Open-List за допомогою функції:

$$l(n)=g(n)+h(n).$$

де  $g(n)$  – функція фактичної відстані від початкової точки  $S_{fath}$  до вузла  $n$ ;

$h(n)$  – евристична функція оцінюваної відстані від вузла  $n$  до цільової

точки  $F$ . Вузол з найменшою вартістю виключиться зі списку Open-List і переноситься до списку Closed-List.

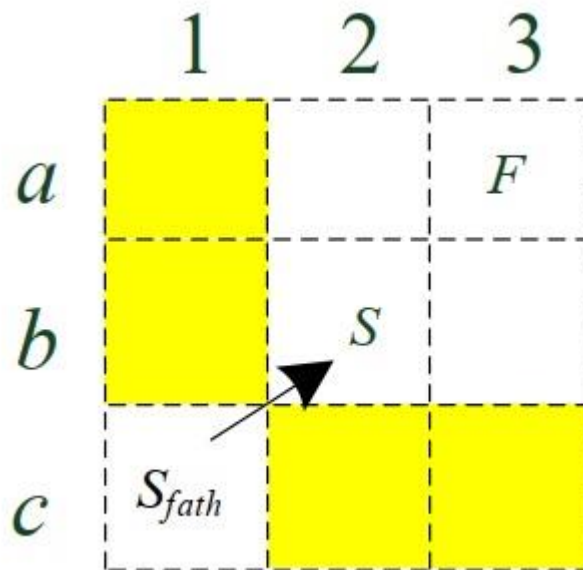


Рисунок 3.6 – Приклад руху «s-bot» по найкоротшій траєкторії за допомогою алгоритму  $A^*$

Крок № 4. Якщо вузол  $n$  з найменшим значенням є цільовою точкою, то робота алгоритму закінчена, інакше перехід до кроку № 5.

Крок № 5. Обійти вузли за горизонтальними та вертикальними напрямками.

Крок № 6. Якщо «s-bot» зустрічається з перешкодами або досягає краю карти, то обійти вузли по діагональному напрямку, потім перехід до кроку № 7.

Крок № 7. Визначається віддалений вузол за допомогою умов обмеження руху у першому та другому випадках, якщо вузол є віддаленим, то перехід до кроку № 5. В іншому випадку вузол зберігається у списку Open-List, потім перехід до кроку № 3.

Для перевірки правильності та працездатності алгоритму  $A^*$  проведено моделювання з використанням на сіткових картах різних розмірів, результати

показано на рисунку 3.7. Як видно з рисунку, час руху з початкової до кінцевої точки становив 0.3 мілісекунди за допомогою алгоритму  $A^*$ .

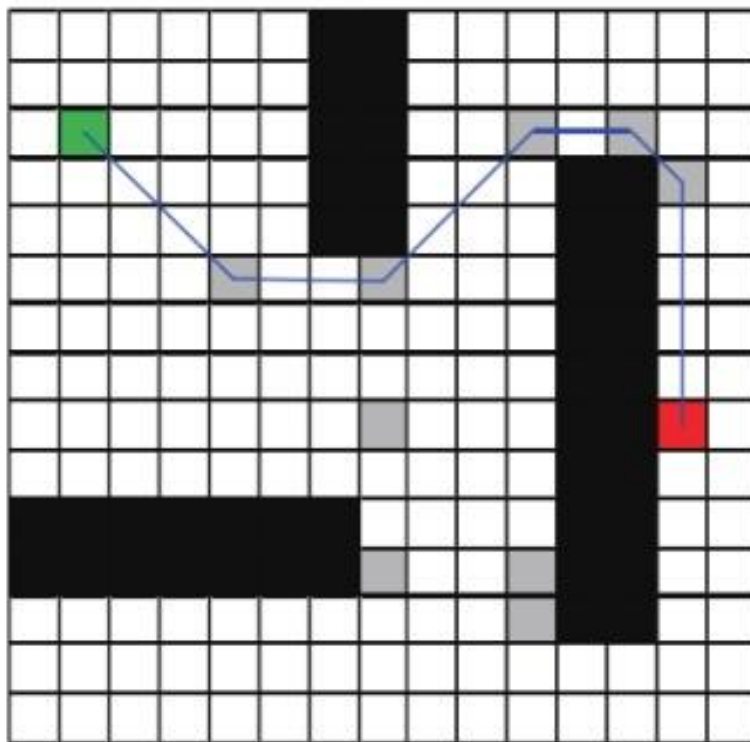


Рисунок 3.7 – Імітаційне моделювання перевірки правильності та працездатності алгоритму  $A^*$

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було досліджено модель управління рухом «S-bots» - systems за допомогою супроводжуючого Drone.

Розроблено методику процедури формування глобальної карти з використанням зображень від камери Drone та сформовано модель зіставлення карт у системі координат «s-bot», які забезпечують отримання необхідних параметрів матриці переходу в процесі зіставлення глобальної та локальної карт. Запропоновано алгоритм пошуку найкоротшої траєкторії руху мобільного «s-bot», який забезпечує обхід певних вузлів сіткової карти та зменшує обсяг обчислень та час побудови програмної траєкторії.

Комп'ютерне моделювання підтвердило працездатність та ефективність досліджуваних методів та алгоритмів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедєв В.О. Проблема передачі даних типу BIG DATA у мобільній системі «Мультикоптер- сенсорна мережа» / В.М. Ткачов, В.В. Токарев, В.О. Радченко, В.О. Лебедєв // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - С.154-157
2. Радченко В.О., Руденко Д.А., Ткачов В.Н., Токарев В.В. Мобильная подсистема «Мультикоптер-сенсорная сеть» в компьютерной системе хранения BIG DATA / В.О. Радченко, Д.А. Руденко, В.Н. Ткачов, В.В. Токарев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №4(44). - С.102-105.
3. Пат. 118921 Україна, МПК H04W 64/00. Спосіб передачі цифрових даних мультикоптерною системою між сегментами розподіленої сенсорної мережі та базовою станцією / В.М. Ткачов, В.В. Токарев - № u201704085; заявл. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16. 5с.
4. Радченко В.А., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Мобильная система передачи данных на базе динамически реконфигурируемых мультикоптерных устройств / В.А. Радченко, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - С.36.
5. Рубан И.В., Чурюмов Г.И., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Функциональная стойкость универсальной мобильной реконфигурируемой системы при воздействии электромагнитного излучения высокой мощности / И.В. Рубан, Г.И. Чурюмов, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Информационные технологии и безопасность: (ИТБ-2017), материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции, 30 нояб. 2017г. - Киев, 2017. - С.205 - 210.
6. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу потужного НВЧ випромінювання: звіт про НДР (заключ.) № держреєстрації

0117U003916.: Ф76/109-2017 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник Г. И. Чурюмов. – Харків, 2017. – 116 с.

7. Ruban I.V., Churyumov G.I., Tokarev V.V., Tkachov V.M. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation / I.V. Ruban, G.I. Churyumov, V.V. Tokarev, V.M. Tkachov // Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security: (ITS 2017). CEUR Workshop Processing., 30 nov. 2017 y. - Kyiv, 2017. - P. 105-111.

8. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokarev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokarev, W. Nannan // The 10h IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019)., 5-7 june, 2019 y. - Leeds, 2019. - P.26 - 29.

9. Серков О. А., Пустовойтов П. Є., Яковенко І. В., Лазуренко Б. О., Чурюмов Г. І., Токарев В. В., Наннан Ванг. Надширокосмугові технології в системах управління мобільними об'єктами. / О. А. Серков, П. Є. Пустовойтов, І. В. Яковенко, Б. О. Лазуренко, Г. І. Чурюмов, В. В. Токарев, Ванг Наннан // Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - С.22-27.

10. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширокосмугові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів / О.А. Серков, В.В. Князев, Б.О. Лазуренко, І.В. Яковенко, Г.І. Чурюмов, В.В. Токарев // Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (ЕМС-2019):збірник наукових робіт четвертої міжн. наук.-техн. конф., 24 жовт. 2019 р. - Харків, 2019. - С. 55-57.

11. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Щербак В.К. Моделирование компьютеризированных систем управления с использованием интеллектуальных средств / Г.Ф. Кривуля, В.В. Токарев, В.К. Щербак // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези доповідей 32-ї міжн. наук.-практ. конф., 24-25 жовт. 2019р. - Харків, 2019. - С. 90 - 91.

12. Krivoulya G., Tokariyev V., Ilyina I, Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic / G. Krivoulya, V. Tokariyev, I. Ilyina, V. Shcherbak // IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology: (PIC S&T), 06-09 oct. 2020y. - Kharkiv, 2020. - P.197 - 201.

13. Лебедев О.Г., Ткачев В.Н., Токарев В.В., Чурюмов Г.И. Темпоральная модель адаптации интегрированной информационной системы путем реконфигурации логической структуры / О.Г. Лебедев, В.Н. Ткачев, В.В. Токарев, Г.И. Чурюмов // Комп'ютерні та інформаційні системи і технології: тези доповідей другої міжн. наук. - техн. конф., 18 - 19 квітн. 2018 р. - Харків, 2018. - С.6-7.

14. Негрей А.Ю. Модель управління рухом «S-bots» - systems за допомогою супроводжувачого Drone / А.Ю. Негрей // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: збірник тез доповідей, 22 вересн. 2022р. - Тернопіль, Україна – Переворськ, Польща: 2022. - випуск 70. - С.58 - 59.