

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

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

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Алгоритм коаліційної поведінки "s-bots" в одній  
"Swarm-bot" - system

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КСМм-22-2  
Дорошев Я.О.  
(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. Токарев В.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

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)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студенту \_\_\_\_\_ Дорошеву Ярославу Олександровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Алгоритм коаліційної поведінки "s-bots" в одній "Swarm-bo" - system \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від “ 06 ” листопада 2023 р. № 1298Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 15 січня 2024р. \_\_\_\_\_

3. Вхідні дані до роботи \_\_\_\_\_ 1) провести дослідження алгоритму коаліційної поведінки для \_\_\_\_\_ управління інтелектуальними мобільними "s-bots" що входять до складу однієї \_\_\_\_\_ "Swarm-bot" - system; 2) провести огляд та аналіз семантичних мереж; \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 3) провести огляд та аналіз сучасних когнітивних архітектур; 4) провести дослідження \_\_\_\_\_ способу побудови адаптивної системи управління "s-bots". \_\_\_\_\_

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 – 18 слайдів \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

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

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи	07.11.23 - 13.11. 23	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	14.11. 23 - 20.11. 23	
3	Вибір інструментальних засобів	21.11. 23 - 23.11. 23	
4	Розробка моделей протоколів	24.11. 23 - 06.12. 23	
5	Проведення експериментів	07.12.23 - 23.12.23	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	26. 12. 23 - 02.01. 24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	03. 01. 24 - 06.01. 24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	09.01.24 - 12.01. 24	

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 60 с., 17 рис., 3 табл., 1 дод., 14 джерел.

АЛГОРИТМ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МОБІЛЬНІ «S-BOTS»,  
КОАЛІЦІЙНА ПОВЕДІНКА, «S-BOT», «SWARM-BOT» SYSTEMS.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження алгоритму коаліційної поведінки «s-bots» в одній «Swarm-bot» - system.

У ході виконання кваліфікаційної роботи досліджується алгоритм коаліційної поведінки «s-bots» в одній «Swarm-bot» - system. Застосування комплексних підходів дозволяє створювати ієрархічні системи управління інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system, що підвищує їх автономність та розширює список можливих розв'язуваних завдань. Експериментальні дослідження, які були проведені з когнітивними інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system зі знаковою картиною світу, надають можливість створення механізмів перевірки біологічно та психологічно правдоподібних гіпотез групової поведінки.

## ABSTRACT

Master's thesis: 60 pages, 17 figures, 3 tables, 1 appendices, 14 sources.

ALGORITHM, COALITION BEHAVIOR, INTELLIGENT MOBILE «S-BOTS», «S-BOT», «SWARM-BOT» SYSTEMS.

The purpose of the qualification work is to study the method of coalition behavior of «s-bots» in one «Swarm-bot» - system.

In the course of the qualification work, the algorithm of coalition behavior of «s-bots» in one «Swarm-bot» - system is investigated. The use of complex approaches makes it possible to create hierarchical control systems for intelligent mobile «s-bots», which are part of one «Swarm-bot» - system, which increases their autonomy and expands the list of possible tasks to be solved. Experimental studies that were carried out with cognitive intellectual mobile «s-bots», which are part of one «Swarm-bot» - system with a symbolic picture of the world, provide an opportunity to create mechanisms for checking biologically and psychologically plausible hypotheses of group behavior.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП .....	8
1 ОГЛЯД ПЕРЕДУМОВ СТВОРЕННЯ АРХІТЕКТУРИ «SWARM-BOT» - SYSTEM ЗІ ЗНАКОВОЮ КАРТИНОЮ СВІТУ.....	10
1.1 Знакове представлення діяльності інтелектуальних мобільних «s- bots» .....	10
1.2 Персоніфікованість знань когнітивних інтелектуальних мобільних «s- bots» .....	15
1.3 Просторове уявлення знань когнітивним «s-bot».....	17
1.4 Огляд та аналіз когнітивних архітектур інтелектуальних мобільних «s- bots» .....	20
2 ОСОБЛИВОСТІ КОАЛІЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МОБІЛЬНИХ «S-BOTS», ЩО ВХОДЯТЬ ДО СКЛАДУ ОДНІЄЇ «SWARM- BOT» - SYSTEM.....	32
2.1 Алгоритм коаліційної поведінки «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system.....	32
2.2 Принципи розподілу завдань між інтелектуальними мобільними «s- bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system .....	35
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОБОТИ АЛГОРИТМУ КОАЛІЦІЙНОГО ПОВЕДІНКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МОБІЛЬНИХ «S- BOTS», ЩО ВХОДИТЬ В СКЛАД ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM.....	41
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	48
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	51

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ  
І ТЕРМІНІВ

ААУ – автономне адаптивне управління

БЗ – база знань

ПЗ – програмне забезпечення

SLAM – алгоритм одночасної локалізації та побудови карти місцевості  
(англ., Simultaneous Localization And Mapping)

STRL – архітектура систем управління (англ., Strategic, Tactical,  
Reactive - Layered)

## ВСТУП

Останнім часом стає актуальним завдання підвищення автономності «Swarm-bot» - system. Для цього потрібна відповідна адаптація наявних оптимальних алгоритмів до умов реального середовища. Адаптація дозволяє виходити за рамки симуляційних експериментів, але вимагає додаткових знань, що використовуються інтелектуальними мобільними «s-bots», які входять до складу однієї «Swarm-bot» - system. Для синтезу цілеспрямованої діяльності, інтелектуальні мобільні «s-bots» повинні мати уявлення про сенсорну складову опису об'єкта, що розглядається, мати сценарій майбутніх дій і можливість уточнення цього сценарію для аналізованої ситуації. Для представлення знань «s-bot» у кваліфікаційній роботі використовується оригінальний знаковий підхід, в рамках якого всі вищеописані види знань інкапсульовані в єдину психологічно та біологічно правдоподібну структуру. Психологічна та біологічна правдоподібність даної моделі дозволяє адаптувати механізми сприйняття та аналізу physical environment людиною для однієї «Swarm-bot» - system та побудувати систему реакцій на зовнішні фактори. Для формування психологічно правдоподібного подання знань «s-bot» про умови взаємодії у реальній physical environment було розроблено знакове уявлення просторової логіки.

Просторові логіки дозволяють:

- конструювати уявлення знань, за допомогою яких вдається враховувати місцезнаходження інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system, та об'єктів;
- розраховувати траєкторію до них за наявною картою місцевості;
- планувати та оптимізувати діяльність, виходячи зі знань про умови, в яких діють «s-bots».

Також, знакове уявлення псевдофізичної логіки дозволяє формувати систематизований опис наявних знань «s-bot» на мові, схожій з природною.

Комплексні завдання, що вирішуються сучасними когнітивними архітектурами, вимагають наявності інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system, діяльність яких взаємопов'язана. Для опису діяльності «s-bots» в умовах реального фізичного середовища, його уявлення було доповнено біологічно правдоподібною моделлю уваги, яка заснована на дослідженнях аналізу інформації. Використання моделі уваги є актуальним завданням підвищення автономності когнітивної архітектури.

# 1 ОГЛЯД ПЕРЕДУМОВ СТВОРЕННЯ АРХІТЕКТУРИ «SWARM-BOT» - SYSTEM ЗІ ЗНАКОВОЮ КАРТИНОЮ СВІТУ

## 1.1 Знакове представлення діяльності інтелектуальних мобільних «s-bots»

Семіотичний опис як внутрішнього уявлення *physical environment*, так і власних дій інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system засноване на психологічно правдоподібному знаковому уявленні знань. Опис подання знань у людини наведено в роботах вчених, виходячи з яких, знання про явище є похідною чотирьох основних типів даних:

- образом явища – *p*;
- значенням явища – *m*;
- змістом явища для суб'єкта діяльності – *a*;
- ім'ям явища – *n*.

Кожен тип даних відповідає однойменній компоненті знака, і вищеописану послідовність можна подати у вигляді кортежу компонент:

$$\langle p, m, a, n \rangle, \quad (1.1)$$

Образ явища представлений результатом роботи суб'єкта діяльності з розпізнавання явища та систематизованим описом його складових. Прикладом образної компоненти знака «Swarm-bot» - system служить опис *physical environment* навколишніх об'єктів, розпізнаних інтелектуальним мобільним «s-bot» за допомогою роботи алгоритмів SLAM (*simultaneous localization and mapping*) одночасна локалізація та побудова карти місцевості, а також об'єднання описів цих об'єктів у подання поточного фокусу уваги (рисунок 1.1).

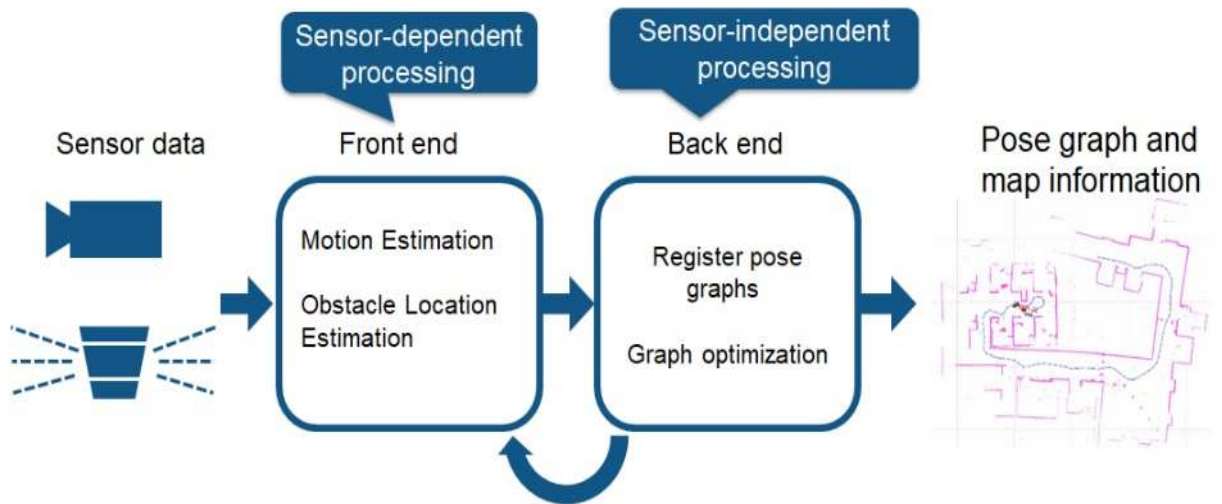


Рисунок 1.1 – Функціональна схема прикладу роботи алгоритму SLAM

Значення явища представляється загальноприйнятим у «Swarm-bot» - system у межах культурно-історичного підходу описом явища. Загальноприйнятий опис надає можливість інтелектуальним мобільним «s-bots» однаково сприймати інформацію про можливе застосування явища. Прикладом такого використання значень в «Swarm-bot» - system служить передача завдання чи сценарію діяльності іншому «s-bot» та одноманітне сприйняття їх.

Сенси явища синтезуються у процесі взаємодії «s-bot» з явищем та є конкретизацією значень явища. Прикладом синтезу сенсу явища в «Swarm-bot» - system є конкретизація сценарію діяльності «s-bot» щодо об'єкта у його фокусі уваги. Цей вид конкретизації передбачає уточнення загальної інформації відносно класу таких об'єктів інформації по конкретному об'єкту та формування сценарію діяльності. Компонента імені виконує функцію зв'язування компонентів знака в єдину структуру і дозволяє складати повідомлення в рамках протоколу комунікації між інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system.

Компоненти знака представлені спеціальною структурою – «каузальною матрицею», яка є структурованим набором посилань на інші знаки, елементарні ознаки та реактивні дії. Усі елементи каузальної матриці пов'язані зі структурою представленого знаком явища. Як приклад каузальної матриці розглянемо матрицю на мережі образів інтелектуального мобільного «s-bot», що описує автомобіль (рисунок 1.2).



$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Передній бампер} \\ \text{Переднє колесо} \\ \text{Заднє колесо} \\ \text{Дзеркало} \end{array}$$

Рисунок 1.2 – Приклад каузальної матриці

У стовпці 1 наведено посилання на результат процесу розпізнавання s-bot переднього бампера автомобіля, в стовпці 2 – посилання на результат процесу розпізнавання передніх коліс, далі – задніх коліс в стовпці 3 і дзеркала – в стовпці 4. У найпростішому випадку, каузальну матрицю можна описати кортежем :

$$z = \langle e_1, e_2, \dots, e_t \rangle, \quad (1.2)$$

довжини  $t$  подій  $e_i$ . Кожна з подій  $e_i$  на мережі образів описує результат розпізнавання елемента в момент часу  $t_i$  або посилання на його елементарну ознаку на мережах значень та смислів, посилання на інший знак чи реактивну

дію. Наприклад, дія щодо підняття блоку на мережі смислів абстрактного стаціонарного «s-bot», що має маніпулятор з 4 ступенями свободи, матиме на мережі смислів посилення на список дій зі зміни стану всіх 4 сервоприводів та функцію їх реалізації. Якщо розглядати «s-bot» з іншим маніпулятором, то вищеописана дія матиме іншу реалізацію на мережі особистісних смислів, але обидва «s-bots» будуть мати однакову структуру матриці на мережі значень, що дозволить їм діяти кооперативно. В рамках реалізації опису об'єктів physical environment та стану «s-bot» з використанням каузальної структури компонент знака були використані матриці двох видів – об'єктні та процедурні. Об'єктна матриця відрізняється від процедурної відсутністю ефектів активації матриці та служить для опису статичного стану системи, а процедурні матриці використовуються для опису існуючих у поданні «s-bot» процесів.

Описана вище структура компонент знака, дозволяє пов'язувати компоненти та формувати сематичні мережі:

$$W_p, W_m, W_a, \quad (1.3)$$

Елементи мереж мають відповідні типи відносин, виражені на мережі:

- p – відношенням частина-ціле;
- m – об'єкт-роль;
- a – коаліція-учасник коаліції.

Між вузлами кожної мережі встановлено взаємнооднозначну відповідність, яка описується функціями зв'язування по мережам в рамках одного знака:

$$\Psi_p^m, \Psi_m^a, \Psi_a^p, \quad (1.4)$$

та зворотними ним функціями. Функції зв'язування ставлять у відповідність каузальній матриці кожної мережі відповідну матрицю з іншої мережі, або генерують її на вимогу, за відсутності такої.

На кожній семантичній мережі

$$W_x \in \{W_p, W_m, W_a\}, \quad (1.5)$$

існує відповідна ітераційна функція поширення активності вгору:  $\varphi_x \uparrow$ , та донизу:  $\varphi_x \downarrow$ , які дозволяють активувати необхідні множини каузальних матриць на задану глибину. Глибина розповсюдження активності може бути задана користувачем або отримана циклом міркувань у межах конкретного завдання. Прикладом реалізації процесів поширення активності в алгоритмі планування служить процес активації матриць на мережі смислів, що входять в опис відношення «блок а, на блоці б». При використанні функції  $\varphi_a \downarrow$  на один крок активуються матриці знаків «блок а» та «блок б», а при використанні функції  $\varphi_a \uparrow$  на один крок, у найпростішому випадку, активуються матриці знаків усіх дій, до опису яких входить це відношення.

У більшості випадків об'єкти і процеси описуються тривимірними каузальними матрицями, кожен шар яких представляє або унікальний прецедент розпізнавання, або реактивну процедуру виконання дії. Кортеж із 5 елементів називають картиною світу когнітивного «s-bot»:

$$\langle W_p, W_m, W_a, R^n, \Theta \rangle, \quad (1.6)$$

де  $R^n = \langle R^m, R^a, R^p \rangle$  – відносини на компонентах знака;

$\Theta$  – операції на безлічі знаків.

Відносини на компонентах знака дозволяють реалізувати процеси розповсюдження активності, описані вище.

## 1.2 Персоніфікованість знань когнітивних інтелектуальних мобільних «s-bots»

Персоніфікованість знань когнітивних інтелектуальних мобільних «s-bots» широко використовується в когнітивних архітектурах і дозволяє здійснювати функції рефлексії та синтезувати план поведінки, ґрунтуючись на особистих знаннях «s-bots» про physical environment та можливості інших «s-bots». Власна самосвідомість, оцінка своїх можливостей та можливостей інших «s-bots» формують особистість когнітивного «s-bots». Так як особистість формують онтогенетично-сформовані властивості, і чим вираженішими стають відмінності вроджених і прижиттєво-придбаних властивостей, тим більш індивідуальною стає особистість. З цього можна дійти висновку, що на формування особистісного сенсу переважно впливають синтезовані у процесі діяльності знання «s-bot» та його вміння. Персоналізм постулює існування деякого початку, що утворює ядро особистості, навколо якого формується життєвий досвід «s-bot» і його ставлення до physical environment дійсності.

Деякі сучасні дослідники спираються на ідеї функціонального матеріалізму і постулюють, що ментальні уявлення актуалізуються і змінюються індивідом залежно від досвіду, який він набуває, але основи пізнання залишаються вродженими. В описі когнітивних процесів та ментального уявлення велика роль віддана оцінці власного світогляду «s-bot». Також персоніфікованість знань можна розглядати в контексті створення установок, описаних за допомогою суб'єктивного сприйняття потреби та можливості її задоволення суб'єктом. Самі установки були описані, як несвідомі явища, але вони породжували активність «s-bot» і можуть бути віднесені до синтезу «s-bot» особистісного сенсу. При вивченні свідомої діяльності можна виділити 4 рівні настановної регуляції:

- смисловий;
- цільовий;

- операційної установки;
- психофізичних механізмів.

Ці рівні також характеризуються формами вираження особистісних смислів «s-bot» щодо його діяльності. Група дослідників опублікувала звіт, в якому описано образну компоненту невербальних смислових установок «s-bot» і звернено увагу на зв'язок образної сфери та внутрішнього світу особистості.

Вищеописані дослідження сприяли створенню знакового уявлення суб'єкта діяльності. Кожен «s-bot» сприймає свої дії як доступні йому з досвіду механізмів впливу на physical environment. Вважається, що базові (вроджені, отримані в процесі культурно-історичного підходу) знання про абстрактне представлення доступних коаліції видів діяльності є у кожного «s-bot» і описані на семантичній мережі значень. Ці знання не є атрибутом самої особистості та не мають нерозривного зв'язку з нею. Поняття особистості представлене знаком «Я», а решта «s-bot» описана абстракцією «Вони» (рисунок 1.3). Особистісні, досвідчені знання «s-bot» про свої можливості представлені на мережі смислів і характеризують як елементарні дії (підняти ложку, штовхнути м'яч), так і комплексні сценарії дій, які раніше сприяли досягненню бажаного стану physical environment (заварити каву, дійти з кімнати А до кімнати Б). Уточнені комплексні сценарії можуть бути заново «розгорнуті» в послідовність елементарних дій при необхідності, а також дозволяють здійснювати вибір «s-bot» для кооперування. На мережі значень є опис родової або видової приналежності, типу «s-bot», який отримано в процесі культурно-історичного підходу.

Знання про коаліцію описано знаком «Вони». На мережі значень знака представлені посилання на знаки інших «s-bots» коаліції, кожен із цих знаків опосередковує знання про вміння «s-bots», доступні «s-bot» «Я». Також знак «Вони» описує доступні «s-bot» способи зв'язку з іншими «s-bots».

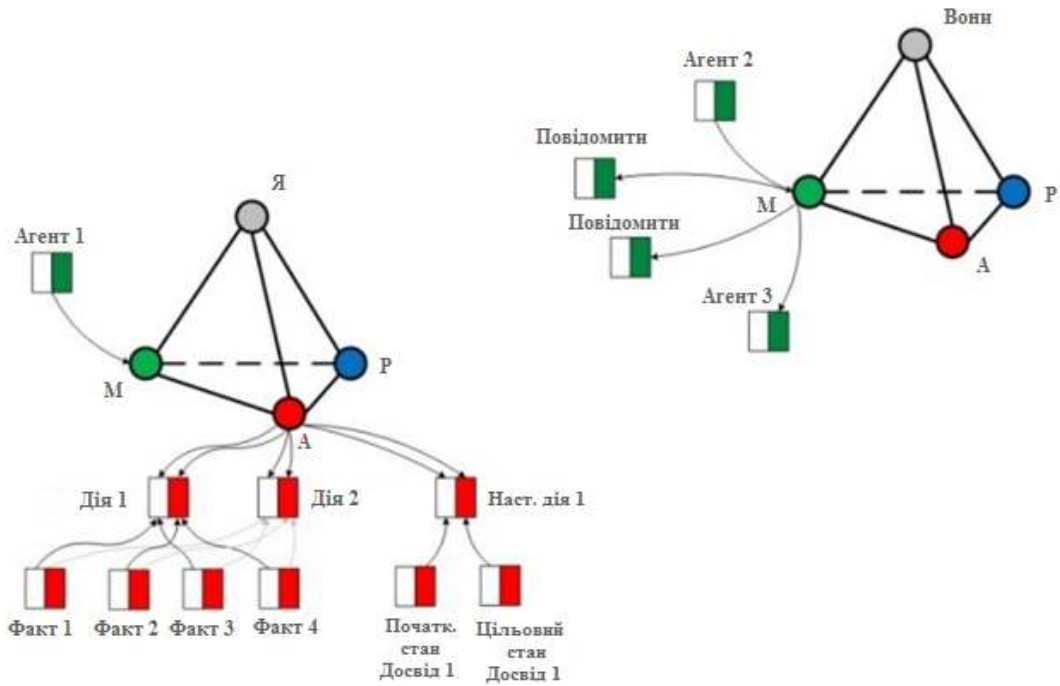


Рисунок 1.3 – Знакове уявлення «s-bot» та знань про існуючу коаліцію

### 1.3 Просторове уявлення знань когнітивним «s-bot»

Використання просторового представлення знань «s-bot» про physical environment обумовлено біологічно чи психологічно правдоподібною архітектурою «s-bot». Реактивні «s-bots», за правило, обмежені поданням знань у вигляді клітинних графів, що дозволяють синтезувати траєкторію переміщення «s-bot» на площині, але не мають прив'язки до інтелектуальної цілеспрямованої діяльності. Планування траєкторії представляє пошук шляху графі, у якому вершини є положеннями «s-bot» у просторі, ребра – елементарними траєкторіями, а ваги ребер – довжинами відповідних елементарних траєкторій. Когнітивні «s-bots», що користуються алгоритмами такого виду, можуть синтезувати траєкторію з пріоритетами та затримками, синтезувати плани як без урахування переміщень інших «s-bots», так і враховуючи їх переміщення, вибирати з безлічі планів той, який підходить для всіх «s-bots», усуваючи конфлікти між ними. Одним із способів інтеграції планування траєкторії в діяльність когнітивного «s-bot» є

використання вищеописаних методів, в якості евристики вибору напрямку переміщення (рисунок 1.4). Такий підхід дозволяє «s-bot» синтезувати план дій, оперуючи як діями по переміщенню об'єктів, здійсненням комунікації з іншими «s-bots», так і оптимально вибирати траєкторію власних переміщень.

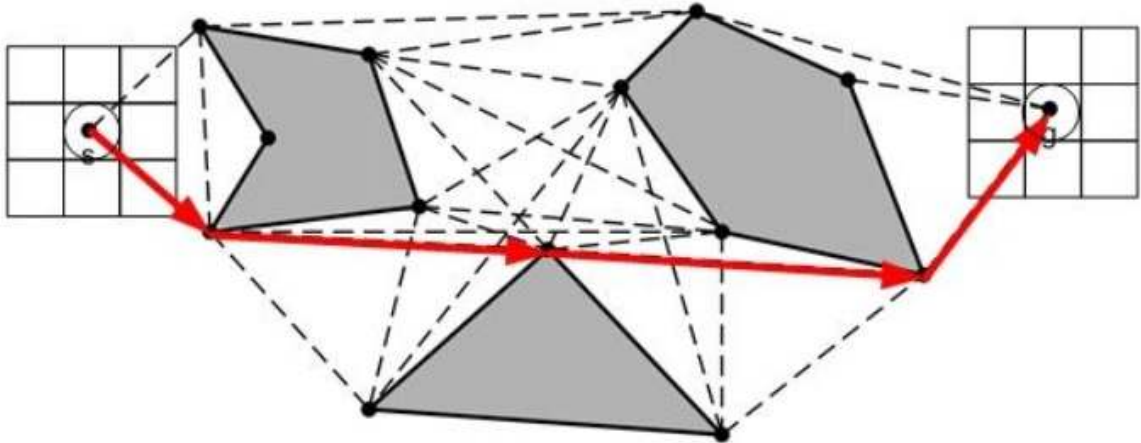


Рисунок 1.4 – Приклад алгоритму пошуку траєкторії переміщення «s-bot» з початкової точки в кінцеву

Біологічно правдоподібні архітектури синтезують план дій і переміщень «s-bot», ґрунтуючись на наявній інформації про будову мозку ссавців. У Швейцарії з 2013 року функціонує проєкт The Human Brain Project, в рамках якого вчені зі 135 інститутів систематизують дослідження розвитку та функціонування людського мозку. Ці дані можуть допомогти побудувати правдоподібну модель мозку, механізми якого забезпечують швидке обчислення траєкторії переміщення агента і дозволяють планувати діяльність. Планування переміщень «s-bot» тісно пов'язане з можливістю розпізнавання *physical environment* і своєчасної обробки отриманих даних. В одному з наукових звітів описано модель, отриману на основі досліджень активності мозку щурів. Модель описує ієрархічну середу, представлену картами різних масштабів. Планування переміщення «s-bot» відбувається з урахуванням всіх можливих траєкторій досягнення мети, що вимагає великої

кількості ресурсів для розрахунку можливих наслідків діяльності з урахуванням динаміки зміни середовища. Ця проблема частково була вирішена групою вчених, що призвело до створення системи RatSLAM, яка дозволила «s-bot» переміщатися на великі відстані в реальній місцевості, а також системам локалізації та картування. Основними недоліками цих досліджень є перевантаженість знаннями про віддалені об'єкти, відсутність протоколів комунікацій, що дозволяють передавати знання іншим «s-bot», та відсутність уніфікованого підходу апроксимації знань. Ці недоліки не дозволяють порівнювати підхід реалізації «s-bot» з підходами, представленими когнітивними архітектурами.

У рамках психологічно правдоподібного підходу до питання планування поведінки «s-bot» розглядаються завдання, пов'язані з неповнотою і неточністю опису *physical environment*. Для вирішення поставлених завдань використовується широкий спектр способів представлення знань «s-bot», багато з яких дозволяють апроксимувати знання про *physical environment* до необхідного для планування поведінки рівня. У нещодавно опублікованому науковому звіті описаний підхід, у межах якого уявлення просторових знань «s-bot» здійснюється з допомогою набору найімовірніших дій у поточному положенні. Грунтуючись на цьому, було створено когнітивну архітектуру SemaFORR. В архітектурі наведено 3 види геометричних абстракцій:

- траси;
- області;
- конвекси.

Вибір маршруту переміщення ґрунтується на діяльності 3 рівнів евристичних «порадників»:

- рівень реактивної діяльності;
- рівень планування переміщень;
- рівень вирішення конфліктів.

Ймовірнісні підходи представлення геометричних характеристик physical environment представлені в реалізаціях архітектури LIDA. Основні досягнення ґрунтуються на байєсовському представленні геометричних знань про physical environment «s-bot» та ймовірнісну оцінку коректності даних, отриманих з сенсорів. Алгоритми дозволяють синтезувати судження «s-bot» про успішність взаємодії з об'єктами та точність переміщення спланованою траєкторією.

Останнім часом було зроблено спроби побудувати взаємодію між алгоритмами планування поведінки та алгоритмами навчання з підкріпленням. Характерною особливістю об'єднання є можливість синтезувати символічний план поведінки «s-bot» і розширити кожен з абстрактних дій списком дій, який реалізує послідовність моторних операцій. У цьому контексті проявляється відсутність явного уявлення у картині світу «s-bot» просторових знань, які описуються послідовністю найпростіших кроків, синтезованих алгоритмами навчання з підкріпленням.

Такий механізм характерний для створення безлічі списків дій, що реалізують поведінку маніпулятора «s-bot», але й можливий у рамках реалізації переміщення колісної бази.

#### 1.4 Огляд та аналіз когнітивних архітектур інтелектуальних мобільних «s-bots»

Опис структур когнітивних архітектур можна умовно розділити на дві частини:

- ієрархічні;
- модульні.

Ієрархічні архітектури, як правило, вибудовані щодо фаз розуміння та реакції на дані, отримані з датчиків (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Приклад ієрархічної структури когнітивної архітектури

Ієрархія дозволяє сприймати дані, виділяти необхідну циклу прийняття рішень інформацію та поповнювати власні знання за допомогою міркувань щодо отриманої інформації. Архітектури з ієрархічною структурою сумісні з «Swarm-bot» - system і дозволяють знаходити рішення задач для інтелектуальних мобільних «s-bots», але їх адаптація до завдань інших типів передбачає поділ ієрархії на складові.

Модульні архітектури слабо адаптовані для вирішення комплексних проблем інтелектуальних мобільних «s-bots» (рисунок 1.6).

Їхня розподілена структура дозволяє створити аналог ієрархії і вирішувати завдання такого типу, але в той же час метою створення цих архітектур є симуляція когнітивних не інтелектуальних мобільних «s-bots», а створення швидше інтелектуальних асистентів.



Рисунок 1.6 – Приклад модульної структури когнітивної архітектури

В даний час більшість способів представлення знань можна звести до:

- продукційним моделям;
- семантичним мереж;
- фреймам;
- формальним логічним моделям.

Продукційні моделі представляють знання у вигляді правил «Якщо умова, то дія». У загальному вигляді продукція описується формулою:

$$N = \langle A, U, C, I, R \rangle, \quad (1.7)$$

де  $N$  – ім'я продукції, що у найпростішому вигляді позначає порядковий номер продукції;

$A$  – область застосування продукції, необхідна для обмеження пошуку необхідної продукції по базі знань;

U – умова застосовності продукції, яка потрібна для активації слідства продукції;

C – ядро продукції;

I – наслідок (постумови) продукції;

R – додаткову інформацію про продукцію.

Експертні системи, засновані на продукційній моделі представлення знань, включають в себе:

- базу знань (продукції);
- робочу пам'ять;
- вирішувач.

Правила в базі знань складаються з частини умов (антецедента) та частини ефектів (консеквента). Робоча пам'ять складається з наборів пар атрибут-значення, істинність яких встановлюється за допомогою застосування правил бази знань. У процесі зростання бази знань з'являються правила, що частково суперечать один одному, що призводить до погіршення швидкості обчислення необхідного результату.

Існує два види логічного висновку в системах із продукційними моделями – прямий та зворотний. Прямий висновок полягає у циклічному пошуку рішення від вихідних фактів до висновків. Першим кроком прямого виведення є активація всіх продукцій, чиї умови дійсні в даний момент часу, після цього в робочу пам'ять вносяться отримані висновки, які доповнюють наявні умови на наступному етапі ітерації. Цикл завершується під час активації цільової умови.

При зворотному висновку відбувається цикл пошуку фактів, що підтверджують цільову гіпотезу, після цього ці факти призначаються проміжними гіпотезами і цикл рекурсивно повторюється до моменту активації вже відомих фактів.

Семантичні мережі репрезентують знання у вигляді графа, вершинами якого є сутності, а ребра (дуги) – відносини між ними (рисунок 1.7).

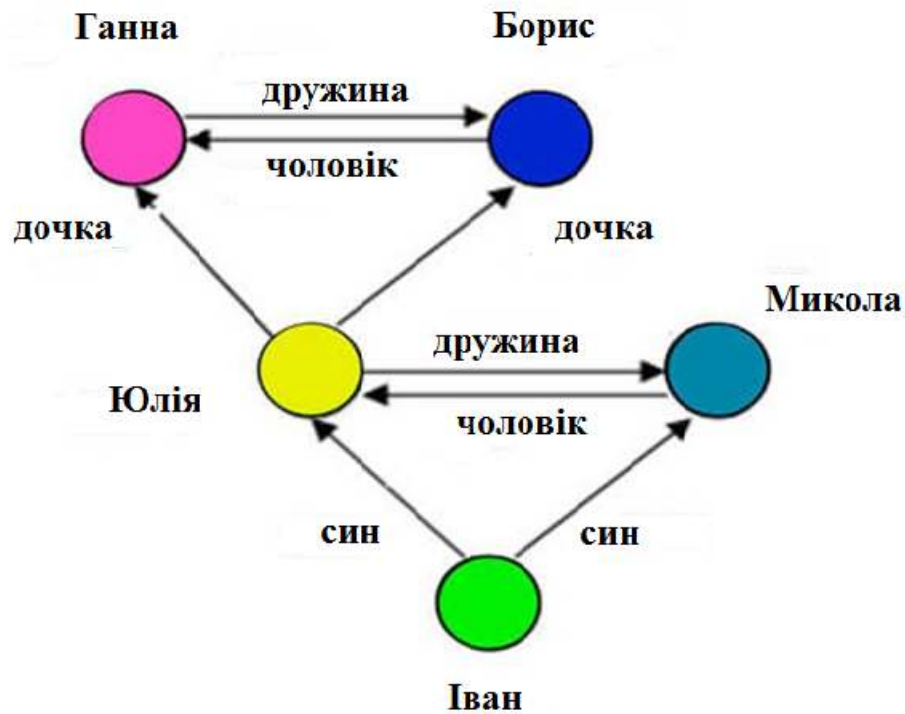


Рисунок 1.7 – Приклад Семантичної мережі

Сутності описують об'єкти та суб'єкти діяльності, а також їх абстрактні уявлення. Відносини між сутностями залежать від галузі знань, що описується семантичною мережею. Базовими відносинами є:

- структурні («частина-ціле»);
- таксономічні («клас-підклас»);
- часові («раніше-пізніше»);
- логічні («і, ні, або»);
- каузальні (причина-наслідок).

Також описуються функціональні якості сутності, які можуть бути представлені, залежно від реалізації мережі, як у вигляді вершин, так і у вигляді дуг. Для пошуку відповіді на запит у базі знань, представленої семантичною мережею, використовують механізми пошуку та активації підграфа, що містить сутності запиту. При збільшенні бази знань, як і в продукційних моделях, відбувається зниження швидкості обробки запитів. Одним із способів вирішення цієї проблеми є поділ загальної мережі на

пов'язані підмережі, кожна з яких описуватиме окремий вид відносин. Семантичні мережі найбільш психологічно правдоподібно формують уявлення когнітивного агента про сутність та можливості взаємодії з нею.

Фреймові моделі служать для опису даних у формальному вигляді. Під фреймом репрезентують структуру:

$$F = \langle N, D, C, P \rangle, \quad (1.8)$$

де  $N$  – ім'я фрейму;

$D$  – множина слотів з фактами, що описують фрейм;

$C$  – множина слотів, які відповідають за зв'язок з іншими фреймами;

$P$  – множина слотів, що описують дії, пов'язані з фреймом.

Слоти можуть бути як термінальними значеннями, так і фреймами іншого рівня ієрархії. Прийнято розділяти безліч фреймів на:

- фрейми-зразки;
- фрейми- екземпляри.

Перші служать для опису сутностей в базі знань, другі формуються в процесі розпізнавання даних, що надходять. Також, у деяких моделях, використовуються фрейми-структури, фрейми-ролі, фрейми-сценарії та фрейми-ситуації. Формальні моделі уявлення знань вимагають наявності словника використовуваних понять і синтаксичних правил, що пов'язують ці поняття. Поняття можуть бути істинними та хибними. Завжди істинні поняття називаються аксіомами, ґрунтуючись на яких здійснюється механізм логічного висновку, що дозволяє синтезувати новий набір істинних понять. Систему, засновану на формальному способі представлення знань, називають формальною системою.

У загальному вигляді формальна система подається у вигляді:

$$F = \langle A, V, W, R \rangle. \quad (1.9)$$

де  $A$  – словник понять;

$V$  – множина синтаксичних правил;

$W$  – множина аксіом;

$R$  – множина правил логічного висновку.

Прикладом формального способу уявлення знань є предикативний спосіб. Основним недоліком формальних моделей є складність поповнення знань та розширення спектру застосування моделі. Для більшості розглянутих архітектур спосіб подання знань може бути класифікований неоднозначно, але наведені вище дані підтверджують, що семантичні (або семіотичні у розширеному вигляді) мережі є найбільш актуальним на даний момент способом подання знань. Цей висновок підтверджується наявністю розвинених засобів комунікації, розроблених для інтелектуальних мобільних «s-bots» у архітектурах, що розглядаються, і можливістю семіотичного уявлення природної мови. В даний час взаємодоповнюючі структури семантичного представлення знань та нейромережових алгоритмів не дозволяють генерувати складний, зв'язковий та логічний текст, а схильні синтезувати бінарні відповіді на поставлені перед інтелектуальними мобільними «s-bots» питання.

Процес планування та прийняття рішень у кожній з архітектур представлений ієрархічно. Ієрархії дозволяють розпаралелити багаторівневі процеси обробки даних, а в архітектурах до когнітивного циклу додатково внесено можливість відстеження змін *physical environment* на дії інтелектуальних мобільних «s-bots». Перепланування, як спосіб реакції на зміни *physical environment*, характерне для «Swarm-bot» - system архітектур теперішнього часу, надає можливість динамічно змінювати план інтелектуальних мобільних «s-bots». Динамічна варіативність діяльності характерна і для інтелектуальних мобільних «s-bots», що навчаються. Оскільки більшість реалізацій процесу планування поведінки не є алгоритмами, синтезуючими план у реальному часі, то реакція когнітивного інтелектуального мобільного «s-bot» на зміну середовища може бути суттєво

уповільнена. Але «s-bot», діяльність якого заснована на обробці досвідчених знань, здатний у більш стислі терміни адаптуватися до змін physical environment, застосувавши прецедент діяльності в подібній ситуації та синтезувавши реакційну поведінку.

Навчання когнітивних «s-bot» реалізується за допомогою розв'язання двох умовних задач:

- задачі накопичення декларативних та процедурних знань високого рівня абстракції;
- задачі уточнення абстрактних дій до атомарного рівня за допомогою алгоритмів навчання із підкріпленням.

У першому випадку, «s-bot» зберігає прецедент успішного виконання плану та здатний адаптувати наявний прецедент у майбутніх взаємодіях з physical environment. Також, функціонал деяких когнітивних «s-bot» дозволяє їм міркувати щодо умов здійсненності та нездійсненності плану, виявляти надійність «s-bot» - кооператорів, абстрагувати наявний план до рівня узагальненого сценарію, який може стати прикладом діяльності для інших «s-bot». Уточнення абстрактних дій за допомогою навчання з підкріпленням вже реалізовано в сучасних архітектурах та є біологічно правдоподібним способом. Цей вид навчання дозволяє адаптувати сплановані дії до умов physical environment аналогічно тому, як це робить людина. В якості прикладів вирішуваних завдань можна навести розвиток архітектури STRL - strategic, tactical, reactive level – стратегічний, тактичний, реактивний рівень управління інтелектуальних мобільних «s-bots». Можливість когнітивного «s-bot» орієнтуватися на місцевості та поповнювати власну картину світу обумовлена його діяльністю з розпізнавання physical environment, основну роль у якій відіграють алгоритми локалізації та побудови карти місцевості – SLAM.

Алгоритми SLAM дозволяють враховувати взаємодію пропріоцептивних (колісні енкодери, IMU та ін.) та екстероцептивних (камери, лідари та ін.) датчиків у рамках відстеження одометрії «s-bot»

платформи, з урахуванням якої відбувається локалізація. Основними вимогами до системи SLAM є:

- надійні одометрія та локалізація, що зумовлюють замикання петлі розпізнавання карти та запобігають помилковим інтерпретаціям положення «s-bots» при роботі в динамічному середовищі;
- швидкість розпізнавання та побудови карти. У динамічній системі «s-bots» може не мати достатньої кількості часу для повторного розпізнавання карти;
- здатність зіставлення та «склеювання» карт.

Актуальні в даний час підходи SLAM дозволяють «s-bot» - платформам вибудовувати внутрішнє уявлення *physical environment*, ґрунтуючись на малій кількості датчиків, наприклад, на єдиній камері, яка вимірює відстань до об'єктів за допомогою побудови карти глибин. Використання невеликої кількості датчиків негативно позначається на швидкості та точності побудови карти і особливо яскраво проявляється у випадку малих мобільних платформ та *drones*. Підходи SLAM всередині невеликих приміщень без вікон та відчинених дверей показують задовільні результати та дозволяють точно знаходити місце розташування «s-bot». В рамках вирішення проблеми локалізації за наявності неідеальних умов для SLAM (у приміщенні є вікна, двері, ходи) актуальним підходом є поєднання SLAM з алгоритмами навчання з підкріпленням. Одним із найвідоміших середовищ для навчання «s-bot» розпізнаванню карти є проект *Habitat*. Підхід SLAM з єдиною камерою та використання алгоритмів навчання з підкріпленням, для покращення якості локалізації та розпізнавання, доповнили когнітивну складову архітектури *STRL*. Як було описано раніше, через неточність розпізнавання *physical environment*, більшість когнітивних архітектур мають ймовірнісне уявлення виконання дій, в архітектурі є байєсовський спосіб прогнозування розташування «s-bot» після виконання дії, а архітектура має можливість оцінювати ймовірність виконання дії за допомогою оцінки здійсненості дії кількома евристичними порадами. Невизначеність даних

зумовлює наявність фаз розуміння в архітектурах та використання набору припущень, уточнення яких виконується ієрархією рівнів взаємодії із середовищем. Інтеграція алгоритмів локалізації та картування когнітивних архітектур найчастіше відбувається за допомогою реалізації SLAM у ROS - Robot Operating System (рисунок 1.8). Процес персоніфікації когнітивних «s-bot» відбувається за допомогою суб'єктивізації декларативних та процедурних знань та присутній у явному вигляді в сучасних архітектурах.

Найбільш яскраво він виражений в архітектурах STRL і CARINA, в яких представлена сама модель «s-bot», яка реалізує функції авторефлексії, а також інформаційної та стратегічної рефлексії. Персоніфікація знань характерна для систем із вираженим метарівнем процесу прийняття рішень, наявність якого зумовлює комплексність процесу усвідомлення physical environment та пошуку місця «s-bot» у ньому.

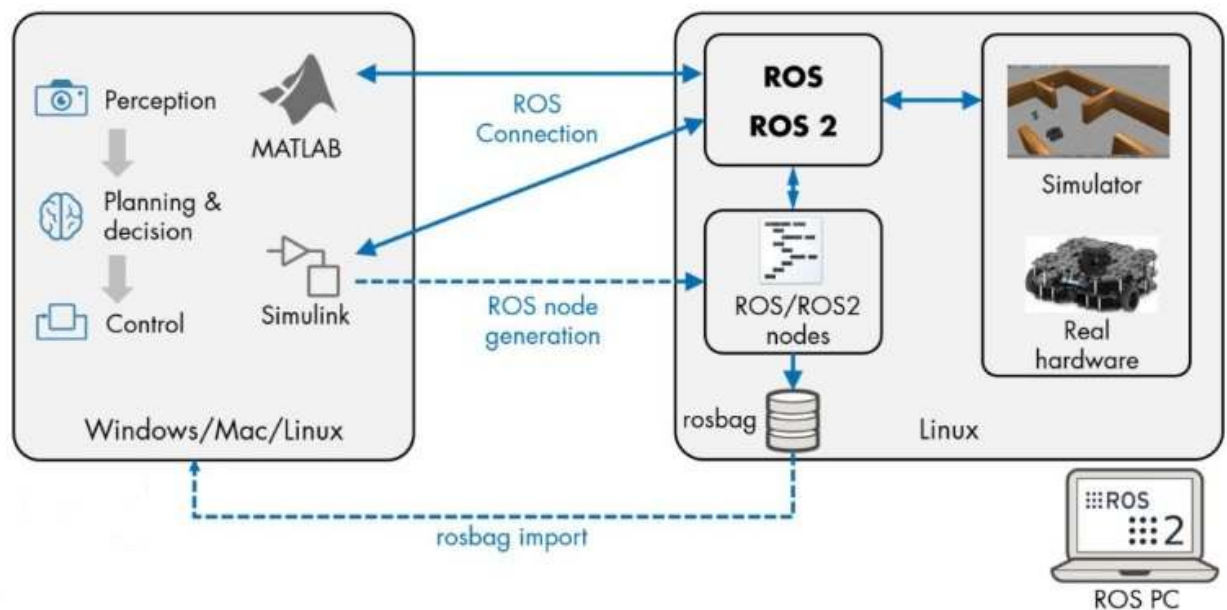


Рисунок 1.8 – Приклад Robot Operating System - ROS

Процес цілеспрямованої предметної діяльності тісно пов'язаний із процесом моделювання фокусу уваги «s-bot». Процес планування поведінки когнітивних архітектур дозволяє синтезувати взаємодії з об'єктами та

суб'єктами, що входять до фокусу уваги «s-bot», тому моделювання фокусу уваги є частиною процесу прийняття рішень. Процес моделювання уваги дозволяє здійснити комбінаторну оптимізацію алгоритмів планування та навчання за допомогою виявлення найбільш важливих об'єктів *physical environment*.

Фокус уваги породжує процес усвідомлення «s-bot» присутності сутності в безпосередній близькості і можливість з нею взаємодіяти. В архітектурі поняття фокусу уваги поєднує підсистеми мотивації, уваги та усвідомлення. В архітектурах фокус уваги є невід'ємною частиною циклу прийняття рішень і явно не описаний. Існують архітектури, в яких присутні евристичні порадики першого рівня, що характеризують поведінку «s-bot» у ситуації, що розглядається. У STRL відбулося явне виділення ієрархічного фокусу уваги «s-bot», що дозволило характеризувати доступні і недоступні йому дії. Цілеспрямована діяльність у фокусі уваги «s-bot» може включати як атомарні усвідомлювані «s-bot» дії, так і комплексні, реалізація яких є послідовністю виконання безлічі реактивних операцій.

Реактивна поведінка характерна для роєвих структур, що реалізують взаємодію інтелектуальних мобільних «s-bots» слабкої обчислювальної потужності. Одним із прикладів інтегрування когнітивної архітектури та рою реактивних інтелектуальних мобільних «s-bots» є взаємодія когнітивної архітектури та системи SCARAB (Situative Cognitive Architecture for Reasoning About Behavior). В даний час когнітивні архітектури дозволяють підвищити рівень автономності інтелектуальних мобільних «s-bots» і сприяють реалізації комплексної діяльності, елементами якої є багаторівневе ієрархічне розпізнавання *physical environment*, синтез плану поведінки, створення протоколів комунікацій, моделювання уваги інтелектуальних мобільних «s-bots», оцінка реакції *physical environment* на дії інтелектуальних мобільних «s-bots» і механізми динамічного коригування діяльності. У

зв'язку з цим сучасна «Swarm-bot» - system архітектура повинна базуватися на наступних властивостях:

- комплексною ієрархією отримання знань у процесі обробки даних із датчиків. Ієрархія STRL дозволяє зчитувати дані з камер, лідарів та інших доступних датчиків, що дозволяє будувати карту місцевості та проводити локалізацію «s-bots» алгоритмами SLAM, адаптувати побудовану карту до знань «s-bots» про середовище та синтезувати комплексний план поведінки «s-bots»;

- фокусом уваги. Біологічно та психологічно правдоподібний спосіб моделювання фокусу уваги «s-bots» дозволяє зменшити комбінаторну складність завдання, надаючи STRL – «s-bots» перевагу в порівнянні з «s-bots», що втілюють інші архітектури;

- розвиненим протоколом комунікацій. «Swarm-bot» - system дозволяє не тільки будувати карти більшої точності, а й виконувати комплексні завдання.

## 2 ОСОБЛИВОСТІ КОАЛІЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МОБІЛЬНИХ «S-BOTS», ЩО ВХОДЯТЬ ДО СКЛАДУ ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM

2.1 Алгоритм коаліційної поведінки «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system

Дослідження процесу поведінки інтелектуальних мобільних «s-bots», які входять до складу однієї «Swarm-bot» - system є актуальним завданням, і може поширюватися на:

- логістичні;
- інженерні;
- будівельні процеси.

Ці дослідження виявили дві основні групи планування поведінки інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot»:

- централізованого планування поведінки «s-bots»;
- розподіленого планування поведінки «s-bots».

Для групи централізованих підходів характерна висока швидкість обчислення загального плану поведінки «s-bots», хороша зв'язність планів, відсутність більшості помилок, що виникають при перетині планів і розподілі дій «s-bots» по часовим інтервалах. Централізовані способи планування дозволяють знизити рівень навантаження на комунікаційні мережі «s-bots», вибудувати чітку міжагентну ієрархію, в рамках якої кожен з «s-bot» буде виконувати поставлене перед ним завдання, не розмірковуючи щодо можливостей інших «s-bot». Централізований підхід надає можливість створювати гетерогенні коаліції «s-bots», в рамках яких здатні здійснювати цілеспрямовану взаємодоповнювальну діяльність як когнітивні, так і реактивні «s-bots». Негативною складовою централізованого підходу є повна

доступність усіх знань про можливості «s-bots» та комплексність побудови плану за наявності множинних цілей «s-bots». При втраті зв'язку з «s-bot» - координатором виникає необхідність вибору нового «s-bot» - координатора, з урахуванням усіх виконаних змін у поточному плані поведінки. Процес відновлення втраченого зв'язку з координуючим «s-bot» виникає з великою періодичністю в системах з чіткою ієрархією і вимагає виконання відповідного протоколу після кожної елементарної дії «s-bot».

Велика автономність «s-bots» досягається за допомогою використання розподілених підходів до синтезу алгоритму поведінки інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system.

Алгоритм коаліційної поведінки «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» – system складається з наступних базових кроків:

- крок 1. Кожен із інтелектуальних мобільних «s-bots», що входить до складу однієї «Swarm-bot» - system, синтезує завдання щодо досягнення власного цільового становища;

- крок 2. Запускається протокол координації завдань, у рамках якого усуваються тимчасові та ресурсні розбіжності між інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system;

- крок 3. Для досягнення заданої мети поставлені завдання розподіляються між інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system, для виконання.;

- крок 4. Кожен локальний конфлікт вирішується через відповідні протоколи комунікацій між інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system.

Описаний алгоритм дозволяє реалізувати досягнення комплексного набору цілей, знижує залежність інтелектуальних мобільних «s-bots» від центрального, координуючого «s-bots» (деякі підходи дозволяють не використовувати «s-bot» - координатора, а всі конфлікти між інтелектуальними мобільними «s-bots» вирішуються локально) (рисунок 2.1).

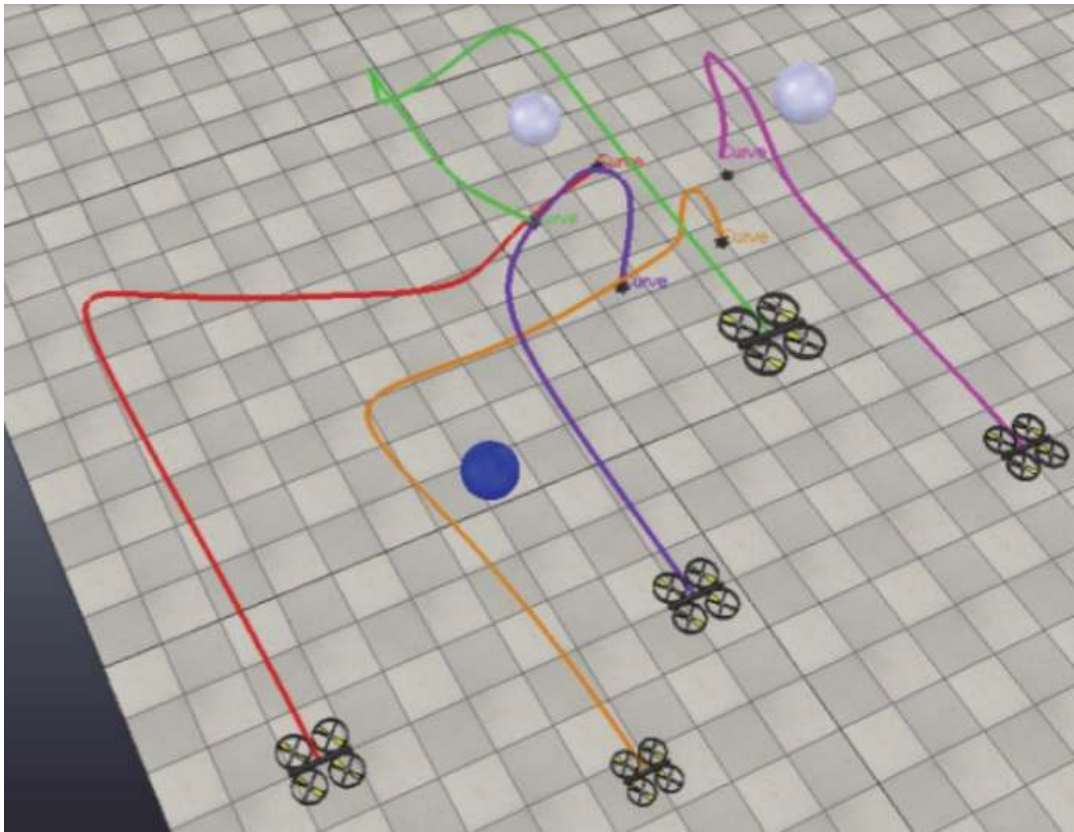


Рисунок 2.1 – Приклад розподіленого управління інтелектуальними мобільними «s-bots» без координуючого «s-bot»

Розподілений спосіб планування вимагає більш автономних «s-bots», кожен з яких повинен виконувати комплексні дії, через це виникає проблема використання «s-bots» з реактивною поведінкою. Комплексність завдання управління інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system з розподіленим підходом полягає в необхідності наявності складних протоколів локальної комунікації та механізмів перепланування. Механізми перепланування задіяні за відсутності можливості виконати раніше синтезований план через використання необхідних ресурсів іншими інтелектуальними мобільними «s-bots». Розподілений спосіб синтезу плану дозволяє не розголошувати можливості «s-bots» та синтезувати субоптимальний та менш залежний від постійної доступності план комунікації між інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system. Комунікація між

інтелектуальними мобільними «s-bots» у розподіленій системі може ґрунтуватися на мережах довіри (рисунок 2.2), при цьому «s-bots» шукатимуть перевірені способи виконання плану та вибудовуватимуть коаліції для досягнення поставлених завдань.



Рисунок 2.2 – Приклад мережі довіри

2.2 Принципи розподілу завдань між інтелектуальними мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system

Розглянемо докладніше крок 3 алгоритму коаліційної поведінки «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system. Основними причинами кооперування інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system є:

- відсутність достатньої кількості ресурсів для самостійного досягнення цільової ситуації;
- наявність спільних цілей;
- функціональне доповнення власних можливостей.

У межах організації структури кооперації використовується набір правил, аналогією якому у людському колективі є локальне уточнення культурно-історичного підходу під час організації діяльності. Під правилами розглядається колективна відповідальність за виконання взятих «Swarm-bot» - system обов'язків, обмежування учасниками кооперації можливих способів досягнення цілей, залучення учасників колективу в процес досягнення поставлених цілей.

Для сучасних планувальників поведінки та координації виконання плану характерно ієрархічне уявлення дій інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system та можливість повернення на рівень абстрактного опису дії без підтвердженого факту його реалізації. Кожен з інтелектуальних мобільних «s-bots» встановлює локальні взаємодії щодо вирішення проміжних завдань, згідно зі своїми уявленнями про залучення інших інтелектуальних мобільних «s-bots» до своєї стратегії досягнення мети та про взаємозамінність інтелектуальних мобільних «s-bots». Приклад можливих локальних реактивних взаємодій для кооперуючих інтелектуальних мобільних «s-bots» представлений у моделі К. Рейнольдса.

Як у неорганізованому фізичному середовищі – unorganized physical environment (UPE) сформувалася колективна поведінка, в основі якої лежить складна взаємодія між суб'єктами еволюційного відбору, так і в завданнях оптимізації за еволюційними алгоритмами з'явився новий клас алгоритмів – роевої оптимізації.

Цей клас сьогодні сформувався у групу методів роевого інтелекту. У 1989 році публікується наукова робота Херардо Бені та Ван Цзіна, в якій автори представляють новий науковий напрямок – клітинні автомати. У цій науковій роботі автори запроваджують новий термін – роевий інтелект (swarm intelligence (SI)), який одразу закріпився у науковому середовищі (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Приклад застосування «Swarm» - інтелекту при управлінні інтелектуальних мобільних «s-bots»

На сьогоднішній день показують високу ефективність у вирішенні оптимізаційних задач алгоритм рою частинок та мурашиний алгоритм (рисунок 2.4).

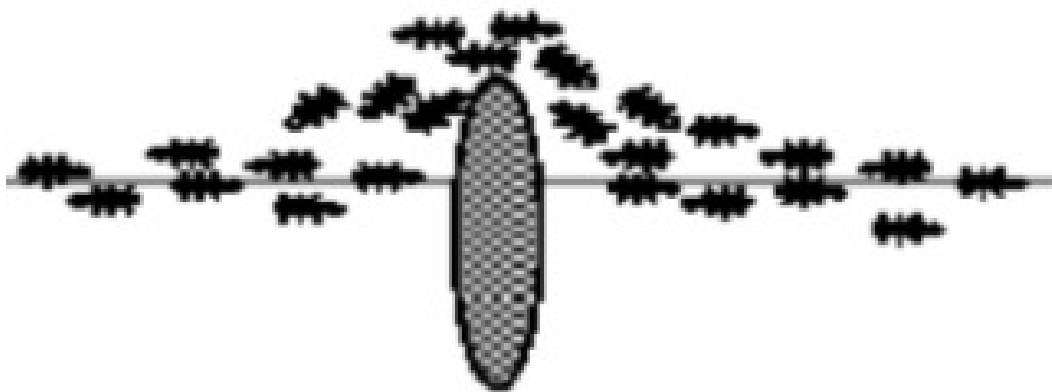


Рисунок 2.4 – Приклад знаходження мурахами нового шляху з появою перешкоди

Проаналізувавши колективну поведінку між окремими біологічними популяціями, автори наукової публікації змогли розробити математичні

моделі для технічних систем і застосувати їх для створення оптимізаційних алгоритмів. Першою математичною моделлю, що копіює колективну поведінку, стала модель поведінки птахів у зграї, створена у 1986 Крейгом Рейнольдсом.



Рисунок 2.5 – Приклад зграї птахів

К.Рейнольдсу за допомогою імітаційного моделювання вдалося розробити правдоподібну візуалізацію колективної поведінки птахів у зграї. Пізніше вчені Дж. Кеннеді та Р. Еберхарт у 1995 році запропонували алгоритм оптимізації безперервних нелінійних функцій та назвали його алгоритмом рою частинок – particle swarm optimization (PSO) (рисунок 2.6). Дослідники досконало вивчили математичну модель К. Рейнольдса, а також створені на той час модифікації цієї моделі, опубліковані у наукових працях Хеппнера та Гренадера. Р. Еберхарту вдалося досить правдоподібно змодельовати соціальну поведінку птахів в одній зграї та сформулювати досить прості, але базові правила переміщення кожного птаха у просторі.

На сьогоднішній день particle swarm optimization (PSO) – це один із біонічних методів оптимізації. Particle Swarm Optimization відображає здатність зграї птахів, риб та інших біологічних популяцій адаптуватися до

unorganized physical environment, шукати харчові ресурси та уникати хижаків шляхом обміну інформацією.

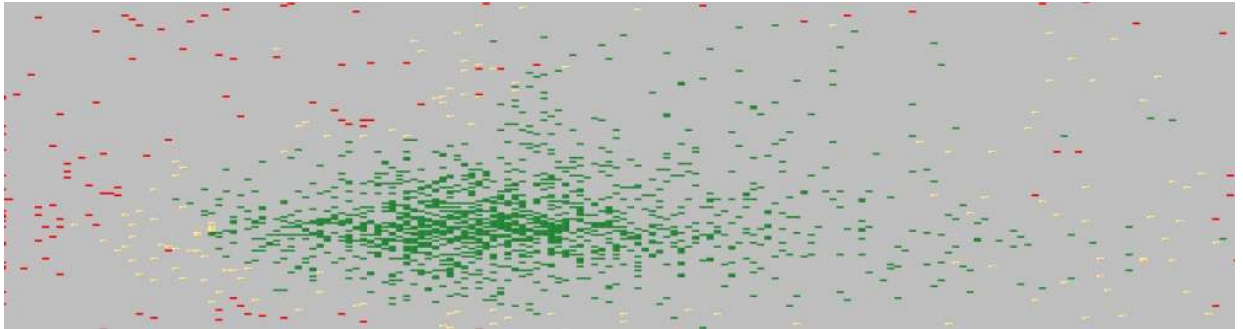


Рисунок 2.6 – Приклад рою частинок

В Particle swarm optimization оптимізують функцію, підтримуючи популяцію можливих рішень (кожне імітує одного птаха), званих частинками, і переміщуючи ці частинки у просторі рішень згідно з простою формулою. Переміщення підпорядковуються принципу найкращого знайденого у цьому положенні становища, яке постійно змінюється при знаходженні частинками вигідніших положень. Таким чином, виникає метод оптимізації, для використання якого не потрібно знати точного градієнта функції, що оптимізується. У методі ініціалізують групу частинок випадковим чином. Далі шукають оптимальне рішення, виконуючи послідовність ітерацій. На кожній ітерації частки оновлюють своє становище на основі параметрів:

$p_i$  – найкраще з відомих положень частинки  $i$ ;

$g$  – найкращий відомий стан рою в цілому.

Коли оптимальні значення  $p_i$  та  $g$  знайдені, оновлюються швидкості частинок та їх місцезнаходження відповідно до наступної формули:

$$v_i \leftarrow wv_i + \phi_p r_p \cdot (p_i - x_i) + \phi_g r_g \cdot (g - x_i), \quad x_i \leftarrow x_i + v_i. \quad (2.1)$$

де  $w$  – інерційна вага;

$\varphi_p$  та  $\varphi_g$  – коефіцієнти навчання, зазвичай, рівні 2;

$r_p$  та  $r_g$  – випадкові числа на відрізку  $[0,1]$ .

Кожен птах знає своє місце розташування, саме:

- відстань до їжі;
- відстані до їжі інших птахів у своїй зграї.

У якийсь початковий момент часу, птахи мають якусь випадкову швидкість, яка задається модулем і напрямком, потім вони коригують швидкість, рухаючись до птаха, розташованого ближче за всіх до їжі. Такі дії описані у класичному алгоритмі К. Рейнольдса. Для імітаційного моделювання поведінки птахів у зграї К. Рейнольдс запрограмував поведінку кожного з птахів окремо, а також їх взаємодію між собою, але в межах однієї зграї. При цьому К. Рейнольдс використав такі принципи:

- принцип К. Рейнольдса\_№1. Кожен птах повинен прагнути уникнути зіткнень з іншими птахами.
- принцип К. Рейнольдса\_№2. Кожен птах повинен рухатися в тому ж напрямку, що й сусідні птахи.
- принцип К. Рейнольдса\_№2. Кожен птах повинен намагатися рухатися на однаковій відстані від сусіднього птаха.

Якщо зграю птахів розглядати як рій частинок, то оптимальне рішення знаходиться через кілька ітерацій, причому на кожному кроці ітерації частка (це один птах у зграї, а відстань до «їжі» – витрати на виконання завдань) оновлює своє положення, прагнучи до власного кращого рішення ( $pbest$ ) – локальному рішенню частки, і, водночас, кращого рішення серед усіх частинок рою ( $gbest$ ) – глобальному кращому рішенню. Тоді коригування швидкості та положення частинки відбуватиметься за формулами, що описують класичний алгоритм рою частинок. В даний час алгоритм рою частинок зазнав безліч модифікацій, які були опубліковані в різні часи дослідниками в цій галузі, але базові принципи, сформульовані Ю. Ши та Р. Еберхартом.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОБОТИ АЛГОРИТМУ КОАЛІЦІЙНОГО ПОВЕДІНКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МОБІЛЬНИХ «S- BOTS», ЩО ВХОДИТЬ В СКЛАД ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM

Експериментальна перевірка роботи алгоритму проводилася за допомогою імітаційного моделювання в середовищі MATLAB, що обумовлено її функціональністю. Починаючи експериментальну перевірку роботи алгоритму коаліційної поведінки інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system, необхідно забезпечити оптимальне розподілення підзавдань  $z$  між якоюсь кількістю «s-bot» в одній «Swarm-bot» - system для вирішення головного завдання –  $Z$ . Розподіл підзавдань  $z$  будемо здійснювати за допомогою алгоритму рою частинок. При цьому враховуються заохочення кожного «s-bot», що входять до складу однієї «Swarm-bot» system.

Сенс застосування алгоритму рою частинок полягає в тому, щоб досліджувати можливість розподілу підзадач між «s-bot» - однієї «Swarm-bot» - system таким чином, щоб кожний «s-bot», що входить до складу однієї «Swarm-bot» - system, при вирішенні отриманого завдання прагнув досягти цільового функціоналу і принести якнайбільше користі, щоб виграш  $X$  був максимальним.

У класичному алгоритмі рою частинок кожен окремий птах зграї представлений окремою частинкою. У випадку з «Swarm-bot» - system часткою є вирішення задачі розподілу підзадач між «s-bot», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system, а відстанню до «їжі» – є витрати на виконання підзавдання. В исследуемом алгоритме на определённой итерации необходимо обязательно учитывать интересы каждого «s-bot», що входить до складу однієї «Swarm-bot» - system, відповідно до його підзадачі. Результат розподілу зручно подати у вигляді масиву, розмір якого відповідає числу розподілених підзадач. Елементи масиву – це номери «s-bot» в одній «Swarm-

bot» - system, що беруть участь у розподілі, а порядковий номер елемента відповідає номеру підзавдання, призначеного для даного «s-bot». Наприклад, послідовність [3, 1, 2] означає наступне: 3-й «s-bot» буде виконувати 1-у підзадачу, 1-й «s-bot» буде виконувати 2-у підзадачу, а 2-й «s-bot» буде виконувати 3-ю підзадачу.

Розподіл підзадач між «s-bot» однієї «Swarm-bot» system виконаємо за допомогою централізованого алгоритму рою частинок (ЦАРЧ). Середньоквадратичне відхилення  $\sigma[x_i]$  випадкової  $i$ -ї частинки обчислюється відповідно до формули:

$$\sigma_i[x_i] = \sqrt{D[x_i]}, \quad (3.1)$$

де  $\sigma[x_i]$  – середньоквадратичне відхилення випадкової  $i$ -ї частинки;

$D[x_i]$  – дисперсія випадкової  $i$ -ї частинки.

Дисперсію випадкової  $i$ -ї частинки можна обчислити за формулою:

$$D[x_i] = \sum_{i=1}^n (x_i - m[x_i])^2 \times P_i, \quad (3.2)$$

де  $D[x_i]$  – дисперсія випадкової  $i$ -ї частинки;

$x_i$  – значення випадкової  $i$ -ї частинки серед ряду з  $n$  - значень;

$m[x_i]$  – математичне очікування випадкової  $i$ -ї частинки;

$P_i$  – ймовірність появи випадкової  $i$ -ї частинки.

Математичне очікування випадкової  $i$ -ї частинки обчислюється відповідно до класичної формули:

$$m[x_i] = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot P_i), \quad (3.3)$$

де  $m[x_i]$  – математичне очікування випадкової  $i$ -ї частинки;

$P_i$  – ймовірність появи випадкової  $i$ -ї частинки.

Ймовірність появи випадкової  $i$ -ї частинки, серед ряду з  $n$  значень можна обчислити згідно з формулою:

$$P_i = \frac{1}{n}. \quad (3.4)$$

Наприклад. Задамо склад «Swarm-bot» - system з 5 – «s-bot». Введемо обмеження, що будь-яке з підзавдань може бути вирішене будь-яким із п'яти «s-bot», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system. В таблиці 3.1, таблиці 3.2 та таблиці 3.3 представлені результати експериментальних досліджень роботи досліджуваного алгоритму ітерацій на основі централізованого алгоритму рою частинок. Так в таблиці 3.1 представлені результати експериментальних досліджень залежно від кількості частинок у рої.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень роботи досліджуваного алгоритму ітерацій на основі централізованого алгоритму рою частинок (залежно від кількості частинок)

Число частинок	Витрати (min)	Витрати (max)	Витрати середні (min+max)/2	Середньоквадратичне відхилення, $\sigma[x_i]$
5	3.255	4.800	4.027	0.617
10	3.230	4.600	3.915	0.410
15	2.295	4.700	3.827	0.434
20	3.050	4.500	3.775	0.314
25	3.205	4.200	3.702	0.193
30	2.700	4.300	3.500	0.299
35	3..005	4.250	3.627	0.205
40	3.000	4.100	3.550	0.169

В таблиці 3.2 представлені результати експериментальних досліджень, залежно від кількості ітерацій розподілу підзадач між інтелектуальними

мобільними «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system. В таблиці 3.3 представлені результати експериментальних досліджень залежно від кількості підзавдань.

Таблиця 3.2 – Результати експериментальних досліджень роботи досліджуваного алгоритму ітерацій на основі централізованого алгоритму рою частинок (залежно від кількості ітерацій)

Число ітерацій	Витрати (min)	Витрати (max)	Витрати середні (min+max)/2	Середньоквадратичне відхилення, $\sigma[x_i]$
10	5.010	5.900	5.455	0.266
20	4.500	4.850	4.675	0.075
30	4.150	4.600	4.375	0.079
40	4.000	4.450	4.225	0.068
50	3.950	4.350	4.150	0.054
60	3.650	3.900	3.775	0.033
70	3.200	3.550	3.375	0.042
80	2.950	3.150	3.050	0.029

Таблиця 3.3 – Результати експериментальних досліджень роботи досліджуваного алгоритму ітерацій на основі централізованого алгоритму рою частинок (залежно від числа підзавдань)

Число ітерацій	Витрати (min)	Витрати (max)	Витрати середні (min+max)/2	Середньоквадратичне відхилення, $\sigma[x_i]$
1	2	3	4	5
4	7.150	7.800	7.475	0.281
5	10.000	11.150	10.575	0.459
6	13.950	14.700	14.325	0.279
7	17.000	18.200	17.600	0.419
8	20.550	22.000	21.275	0.479

## Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5
9	24.150	25.400	24.775	0.392
10	27.900	29.000	28.450	0.329
11	31.450	33.300	32.375	0.531

На рисунку 3.1 представлена графічна залежність даних з таблиці 3.1, які отримані в результаті експериментальних досліджень роботи досліджуваного алгоритму ітерацій на основі централізованого алгоритму рою частинок (залежно від кількості частинок).

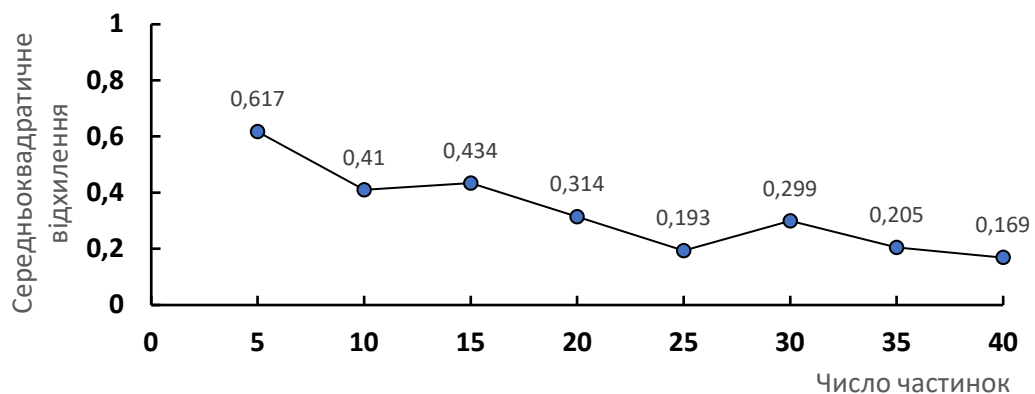


Рисунок 3.1 – Графічна залежність даних з таблиці 3.1

На рисунку 3.2 представлена графічна залежність даних з таблиці 3.2, які отримані в результаті експериментальних досліджень роботи досліджуваного алгоритму ітерацій на основі централізованого алгоритму рою частинок (залежно від кількості ітерацій).

На рисунку 3.3 представлена графічна залежність даних з таблиці 3.3, які отримані в результаті експериментальних досліджень роботи досліджуваного алгоритму ітерацій на основі централізованого алгоритму рою частинок (залежно від числа підзавдань).

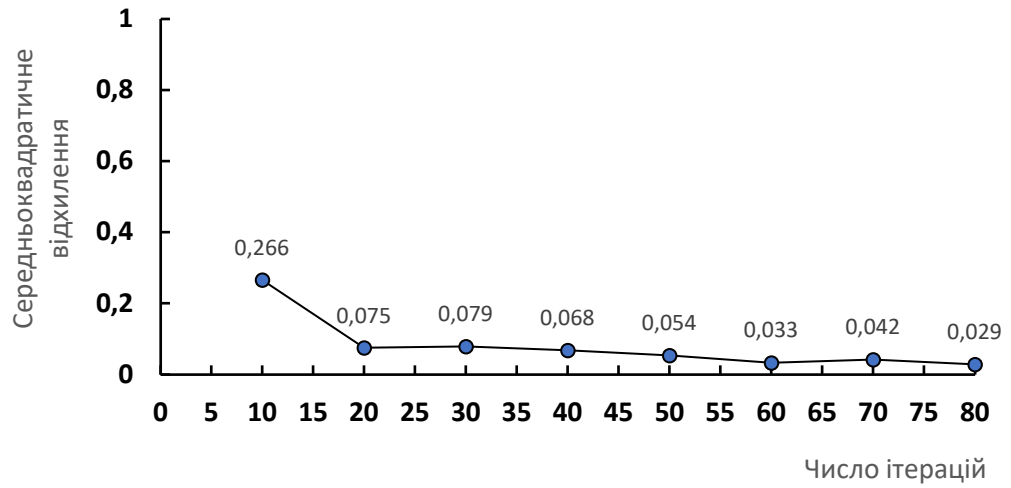


Рисунок 3.2 – Графічна залежність даних з таблиці 3.2

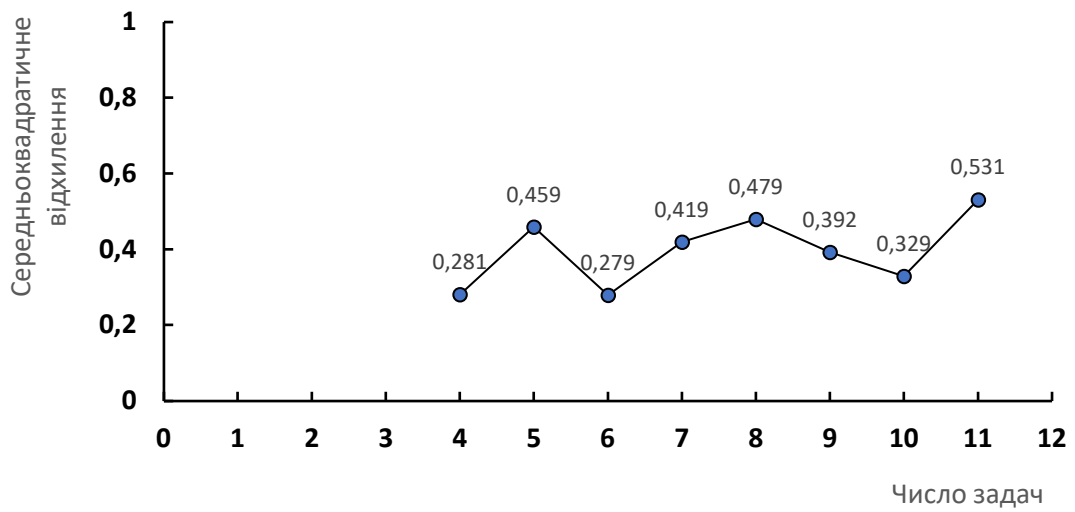


Рисунок 3.3 – Графічна залежність даних з таблиці 3.3

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було досліджено алгоритм коаліційної поведінки «s-bots» в одній «Swarm-bot» - system.

Було успішно досліджено алгоритм коаліційної поведінки «s-bots» в одній «Swarm-bot» - system для оптимального розподілу підзадач  $Z$  між «s-bots» в одній «Swarm-bot» - system для вирішення головного завдання  $Z$ . Розподіл підзадач  $Z$  було здійснено за допомогою алгоритму рою частинок.

При проведенні практичних досліджень було встановлено, що алгоритм рою частинок відрізняється простотою роботи, невеликим набором вхідних параметрів, які необхідно задавати на першій ітерації, досить прийнятною точністю і що особливо обнадіяло – має швидку збіжність до прийняття оптимального рішення. Виходячи з цього можна зробити висновок, що застосування алгоритму рою частинок при централізованому розподілі підзадач між «s-bots» в одній «Swarm-bot» - system для вирішення головного завдання, є доцільним і виправданим.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедев 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. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - С.154-157
2. 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.
3. Радченко В.А., Токарев В.В., Ткачев В.М. Мобільна система передачі даних на базі динамічно реконфігурованих мультикоптерних пристроїв / В.О. Радченко, В.В. Токарев, В.М. Ткачов // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - С.36.
4. 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.
5. 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.
6. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev, 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.

7. 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.

8. 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.

9. Krivoulya G., Tokariiev V., Ilina 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. Tokariiev, I. Ilina, 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.

10. Krivoulya G., Tokariiev V., Ilina I., Lebediev O., Shcherbak V. Algorithm of Iterations of Distribution of Subtasks Between «S-Bot» in One «Swarm-Bot» System // Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2022). CEUR Workshop Proceedings., 12-13 may. 2022 y. - Gliwice, Poland. - P. 1531-1541.

11. Koshevoy N., Ilina I., Tokariiev V., Malkova A., Muratov V. Implementation Of The Gravity Search Method For Optimization By Cost Expenses Of Plans For Multifactorial Experiments // Radioelectronic and Computer Systems. – 2023. Vol. 1(105). - P. 23-32. Doi: 10.32620/reks.2023.1.02

(Scopus).

12. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Ільїна І.В., Кравець В.Є. Взаємодія між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system у фізичному неорганізованому середовищі. // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2023. №1(71). - С.108-111. Doi: 10.26906/SUNZ.

13. Krivoulya G., Koshevoy N., Tokariev V., Ilna I., Dubinsky D. Solving the Task of Topological Formation Intelligent Mobile «S-bots» for One «Swarm-bot» System // Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2023). CEUR Workshop Proceedings., 20-21 april. 2023 y. - Kharkiv, Ukraine. - pp. 273-282.

14. Токарев В.В., Дорошев Я.О. Алгоритм коаліційної поведінки «s-bots» в одній «Swarm-bot» - system / В.В. Токарев, Я.О. Дорошев // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: збірник тез доповідей, 20 вер. 2023р. - Тернопіль: 2023. - випуск 80. - С.86 - 87.