

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. У цій роботі проведено огляд алгоритмів ройового інтелекту, висвітлюючи значний потенціал та перспективи розвитку мультиагентних систем та ройового інтелекту. Підкреслюється тривала дослідницьку активність у цій галузі та безперервне розширення сфер застосування. Вивчаючи різні дослідження та публікації, робиться висновок про важливість інтеграції підходів з різних наукових дисциплін для вирішення різноманітних і складних проблем за допомогою ройового інтелекту. Майбутні дослідження спрямовані на надання більш детального аналізу та порівняння різних алгоритмів ройового інтелекту у різних сферах застосування.

Ключові слова: штучний інтелект, інтелектуальний агент, мультиагентні системи, ройовий інтелект, алгоритми оптимізації ройового інтелекту.

Вступ. В даний час, мультиагентні системи все частіше використовуються у широкому спектрі наукових та технічних областей, стаючи ключовим елементом в еволюції та розвитку сучасних технологій.

Це особливо актуально під час військових конфліктів, коли потреба в самостійних системах з розвиненими можливостями інтелектуального керування значно зростає, що підкреслює важливість та актуальність розвитку мультиагентних систем.

Ця технологія вже використовується в безпілотних літальних апаратах, які експлуатуються у військовій сфері, сільському господарстві, сферах пошуку та рятування, будівництві та екологічному моніторингу.

Аналітичні дані [Ошибка! Источник ссылки не найден.] вказують на те, що обсяг ринку військових безпілотних літальних апаратах в 2022 році становив приблизно 12,55 мільярди доларів США, в 2023 - збільшився до 14,14 мільярдів доларів США в 2023 році і продовжить збільшуватися до 35,60 мільярдів доларів США до 2030 року, з середнім річним темпом зростання на рівні 14,10%.

Серед ключових гравців на цьому ринку вирізняються такі компанії, як Lockheed Martin, Northrop Grumman, General Atomics, і Boeing. Швидке зростан-

ня попиту на військові дрони свідчить про значну увагу та інвестиції в дану область, а також про масове застосування дронів у військових цілях. Такий інтерес обумовлений сучасними військовими конфліктами (повномасштабне вторгнення Росії в Україну з 24 лютого 2022 року та терористичні атаки Хамасу проти Ізраїлю з 7 жовтня 2023 року), а також стрімким розвитком у галузі штучного інтелекту в останні роки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для кращого розуміння наступного матеріалу рекомендується ознайомитися з термінами, що будуть подані нижче.

Складна система - це система, що складається з численних компонентів, між якими існує значна кількість взаємозв'язків, через що поведінка кожного окремого компонента залежить від поведінки інших [2].

Агент - автономна сутність, яка може бути реальною або віртуальною, що функціонує в зовнішньому середовищі. Агент здатний сприймати середовище та взаємодіяти з ним. Також агент може комунікувати з іншими агентами, демонструвати самостійну поведінку, яка може бути інтерпретована як результат його знань, взаємодії з іншими агентами та досягнення власних цілей.

Елементи, за допомогою яких агенти сприймають зовнішнє середовище, зазвичай називають сенсорами, а засоби, якими агенти впливають на середовище, – ефекторами або актуаторами. Під це визначення підпадає чимало сутностей – від комп'ютерних програм і роботів до людей.

Мультиагентна система – це складна система, яка переважно складається з агентів.

У книзі "Штучний інтелект: Сучасний підхід" авторів Стюарта Рассела та Пітера Норвіга [3], яка вважається однією з найавторитетніших і найпопулярніших праць у галузі штучного інтелекту, представлена класифікація агентів за рівнем їхньої "інтелектуальності". За визначенням авторів, ця класифікація охоплює усі агентні системи:

1. Прості рефлекторні агенти, що виконують дії на основі свого поточного сприйняття. Вони здатні діяти ефективно лише тоді, коли середовище повністю спостережуване.

2. Рефлекторні агенти з внутрішньою моделлю. Цей вид агентів включає в себе модель невидимої на даний час частини середовища, зокрема, враховує дані про попередні сприйняття та дії агента. Такі агенти здатні функціонувати в середовищі, яке спостерігається лише частково.

3. Агенти, орієнтовані на досягнення цілей. Цей тип включає в себе агентів з моделлю, які володіють знаннями про конкретні цілі, тобто набором станів, які вони прагнуть досягти.

4. Агенти, засновані на корисності. Такі агенти під час своєї діяльності прагнуть максимізувати функцію корисності, яка дозволяє їм ранжувати потенційні стани, в яких агент може опинитися, згідно з їх корисністю.

5. Агенти, що навчаються. Цей тип агентів здатен функціонувати у спочатку невідомих середовищах, поступово збираючи дані про найбільш ефективні стратегії поведінки.

У ряді досліджень, мультиагентні системи вивчаються в контексті класичної теорії управління під назвою "мережеве управління". Такий підхід об'єднує класичні інструменти теорії керування з методами теорії графів. Наприклад, у роботі [4] зазначається, що такі задачі керування, як управління групою роботів, розподілений інтелект, інтелект зграї, розподілене прийняття рішень, розподілене пізнання, керування перевантаженнями в мережах, колективний рух у біології, синхронізація осциляторів у фізиці, паралелізація в теорії оптимізації, розподілена оцінка, спільна оцінка, рівновага в економіці, моделювання соціальних взаємодій та теорія ігор можуть бути розглянуті через теорію взаємопов'язаних динамічних систем.

Ці наукові галузі науки мають декілька перетинаючихся дослідницьких спільнот, що призводить до розмаїття у визначеннях і методологіях, варіюючи від детального математичного аналізу до практичних досліджень. Через це також існує відсутність уніфікованої термінології: так, динамічні системи можуть отримувати такі назви як роботи, агенти, вузли, процесори чи об'єкти. Групи описуються, як мережі, загони, рої, команди або кластери, а методика можуть бути представлені як контролери, протоколи або динаміки. У згаданому джерелі слово «агент» вживається для опису окремої динамічної системи, тоді як терміни «мережа» або «колектив» використовуються для опису груп. Викладаються проблеми знаходження консенсусу, організації структури, оптимізації розподілу ресурсів через поняття динамічних систем.

Ройовий інтелект - це тип мультиагентних систем, надихнутих природою, де багато простих агентів працюють разом, імітуючи поведінку природних роїв, таких як рої комах, зграї птахів, та інших тварин. Ці агенти взаємодіють між собою та з оточенням за допомогою простих правил, що дозволяє їм разом вирішувати складні задачі.

Ціль та постановка завдання. У даній статті буде акцентована увага на ройовому інтелекті, як на ключовому напрямку в галузі мультиагентних систем, особливо зосереджуючись на взаємодії між агентами, як на фундаментальному елементі в галузі мультиагентних систем.

Основна увага буде зосереджена на алгоритмах ройового інтелекту, їх застосуванні для вирішення складних оптимізаційних та координаційних задач, а також на потенціалі ройового інтелекту для розробки нових технологій у різних областях, включаючи робототехніку, розподілені обчислення, управління трафіком та інші.

Матеріал дослідження. Ройовий інтелект є однією з галузей штучного інтелекту, яка динамічно розвивається. Як попередників ройового інтелекту можна згадати три алгоритми: алгоритм стохастичного дифузійного пошуку (SDS - Stochastic Diffusion Search), мурашиний алгоритм (ACO - Ant Colony Optimization) та метод рою часток (PSO - Particle Swarm Optimization).

Алгоритми ройового інтелекту - приклад того, як природні процеси та поведінка можуть бути адаптовані для вирішення складних завдань у сферах оптимізації, пошуку та інших обчислювальних задачах.

Сімейство алгоритмів ройового інтелекту продовжує розширюватися. У книзі Адама Словіка надано перелік 45 алгоритмів[5] впорядкованих за датою створення (Таблиця 1).

Таблиця 1

Перелік алгоритмів оптимізації ройового інтелекту

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
Стохастичний дифузійний пошук (Stochastic Diffusion Search)	1989	Механізм тандемного зв'язку, використовуваний одним видом мурах
Оптимізація колонії мурах (Ant Colony Optimization)	1992	Реальні колонії мурах, які використовують феромон як засіб хімічного посланника
Оптимізація роєм частинок (Particle Swarm Optimization)	1995	Соціальна поведінка зграї птахів або школи риб
Система бджіл (Bee System)	2001	Поведінка збирання нектару колоніями бджіл
Бактеріальний пошук (Bacterial Foraging)	2002	Соціальна поведінка здобування їжі <i>Escherichia coli</i>
Алгоритм рою риб (Fish-	2002	Поведінка риб, така як полювання та формування

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
swarm Algorithm)		зграї
Бджолиний вулик (Beehive)	2004	Комунікативні та оціночні методи та процедури медоносних бджіл
Хемотаксис колонії бактерій (Bacterial Colony Chemotaxis)	2005	Реакція бактерій на хемоатрактанти
Оптимізація колонією бджіл (Bee Colony Optimization)	2005	Колонії бджіл у природі
Оптимізація роєм бджіл (Bee Swarm Optimization)	2005	Поведінка реальних бджіл у природі
Віртуальні бджоли (Virtual Bees)	2005	Рій бджіл та взаємодії між ними, коли вони знаходять нектар
Рій котів (Cat Swarm)	2006	Поведінка котів та їхні навички, такі як слідкування та пошук
Штучна колонія бджіл (Artificial Bee Colony)	2007	Природна поведінка збирання їжі реальними медоносними бджолами
Швидке бактеріальне зграювання (Fast Bacterial Swarming)	2008	Механізм здобування їжі Escherichia coli та модель зграювання птахів
Шмели (Bumblebees)	2009	Коллективна поведінка соціальних комах
Пошук кукушки (Cuckoo Search)	2009	Паразитична поведінка деяких видів кукушок
Алгоритм світляків (FireFly Algorithm)	2009	Поведінка світляків та їх світіння
Оптимізація роєм світлячків (Glowworm Swarm Optimization)	2009	Світіння, індуковане люциферином, світляка, яке використовується для приваблення партнерів/здобичі
Штучний алгоритм рибної школи (Artificial Fish School Algorithm)	2010	Поведінка риб, така як полювання, формування зграї, слідування
Алгоритм кажана (Bat Algorithm)	2010	Характеристики ехолокації мікрокажанів

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
Оптимізація роєм тарганів (Cockroach Swarm Optimization)	2010	Соціальна поведінка тарганів
Пошук під час полювання (Hunting Search)	2010	Групове полювання тварин, таких як леви, вовки та дельфіни
Оптимізація колонією бактерій (Bacterial Colony Optimization)	2012	П'ять основних поведінок бактерій Escherichia coli протягом їхнього життєвого циклу
Сліпі голі кроти (Blind-Naked Mole-Rats)	2012	Соціальна поведінка колонії сліпих голих кротів
Стадо криля (Krill Herd)	2012	Поведінка стада криля
Алгоритм лева (Lion's Algorithm)	2012	Соціальна поведінка левів, яка допомагає зберегти тварину сильною у світі
Пошук вовків (Wolf Search)	2012	Вовки шукають їжу та виживають, уникаючи ворогів
Оптимізація мухою (Fruit Fly Optimization)	2013	Поведінка мух-плодоїдів
Оптимізація соціальними павуками (Social Spider Optimization)	2013	Кооперативна поведінка соціальних павуків, які взаємодіють один з одним
Оптимізація роєм курей (Chicken Swarm Optimization)	2014	Поведінка курей під час пошуку їжі
Оптимізація розсіяними мухами (Dispersive Flies Optimisation)	2014	Поведінка рою мух над джерелами їжі
Оптимізатор сірих вовків (Grey Wolf Optimizer)	2014	Імітує соціальну домінуючу структуру зграї сірих вовків
Ведення слонів (Elephant Herding)	2015	Поведінка стада слонів
Оптимізація монарх-метеликів (Monarch Butterfly Optimization)	2015	Міграція монарх-метеликів

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
Алгоритм пошуку ворон (Crow Search Algorithm)	2016	Інтелектуальна поведінка ворон
Алгоритм рою дельфінів (Dolphin Swarm Algorithm)	2016	Ехолокація дельфінів, обмін інформацією, співпраця
Динамічний віртуальний алгоритм кажанів (Dynamic Virtual Bats Algorithm)	2016	Здатність кажанів маніпулювати частотою/довжиною хвилі випромінюваних звукових хвиль
Алгоритм оптимізації китів (Whale Optimization Algorithm)	2016	Соціальна поведінка горбатих китів - стратегія полювання "бульбашковою сіткою"
Алгоритм рою дельфінів (Swarm Dolphin Algorithm)	2016	Соціальні поведінки дельфінів
Штучний алгоритм вовчої зграї (Artificial Wolf Pack Algorithm)	2016	Соціальні поведінки вовчої зграї при розвідці, виклику та облозі
Оптимізація сараною (Grasshopper Optimisation)	2017	Поведінка зграї сарани в природі
Оптимізатор плямистих гієн (Spotted Hyena Optimizer)	2017	Соціальні відносини між плямистими гієнами та їхнє співробітництво
Алгоритм рою сальп (Salp Swarm Algorithm)	2017	Поведінка рою сальп під час навігації та здобування їжі в океанах
Оптимізатор імператорських пінгвінів (Emperor Penguin Optimizer)	2018	Імітує поведінку згуртування імператорських пінгвінів
Алгоритм оптимізації чайок (Seagull Optimization Algorithm)	2019	Міграція та нападаючі поведінки чайки в природі

Основними рисами алгоритмів ройового інтелекту є їх здатність до самоорганізації, гнучкість, масштабованість та робастність.

Загальна структура алгоритму ройового інтелекту (рисунок 1) складається з таких етапів:

Визначення параметрів алгоритму: Налаштування початкових значень, які керують поведінкою алгоритму.

Ініціалізація агентів: Створення початкової популяції агентів, де кожен агент представляє можливе рішення задачі.

Встановлення умови завершення: Задання критеріїв, за якими алгоритм зупинить виконання, наприклад, досягнення максимальної кількості ітерацій або задовільного рівня точності рішення.

Обчислення фітнес функції: Оцінка кожного агента з використанням функції пристосованості, яка вимірює, наскільки добре агент вирішує поставлену задачу.

Виконано умову завершення?: Перевірка, чи була досягнута умова завершення алгоритму. Якщо так, алгоритм завершує роботу; якщо ні, процес продовжується.

Оновлення агентів: Модифікація станів агентів на основі обміну інформацією між ними для покращення їх рішень.

Отримання оптимального результату: Вибір найкращого рішення з усіх агентів після завершення алгоритму або досягнення умови завершення.

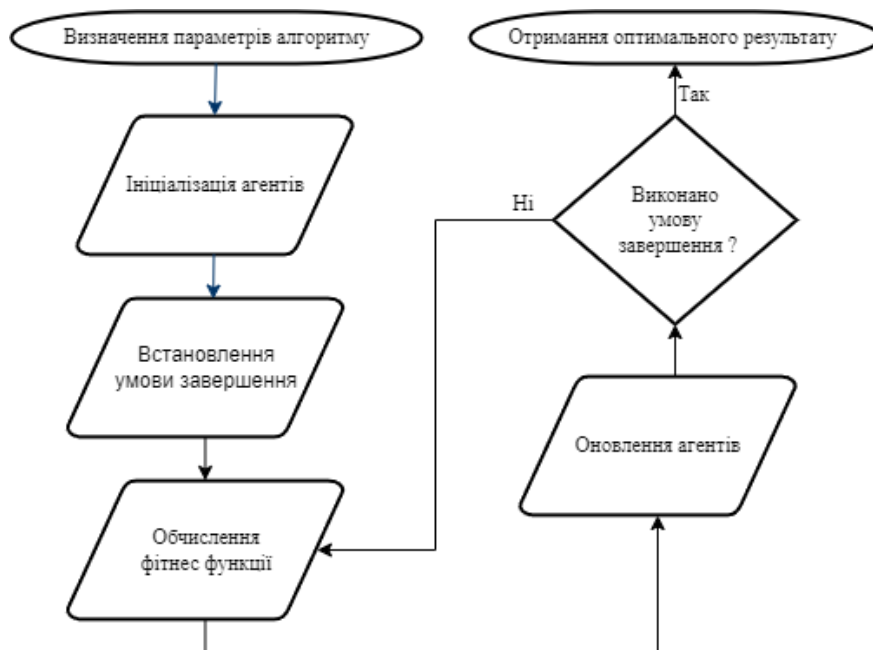


Рисунок 1 – Загальна структура ройового алгоритму

Але для конкретних алгоритмів послідовність та кількість етапів може відрізнятися від загальної структури.

Серед алгоритмів ройового інтелекту найбільш популярними є алгоритм оптимізації роєм частинок (PSO) та алгоритм мурашиного колонії (ACO).

PSO є привабливим через свою простоту у реалізації та здатність швидко знаходити рішення.

ACO, з іншого боку, надихнутий поведінкою мурашиних колоній при пошуку їжі та вирізняється своєю ефективністю у вирішенні задач маршрутизації та розкладу. Обидва алгоритми широко застосовуються в різних областях, включаючи логістику, робототехніку, енергетику, обробку даних, безпілотні літальні апарати демонструючи свою універсальність та силу в рішенні складних проблем [6,7,8,9].

Крім того вже розроблені реалізації алгоритмів ройового інтелекту.

Для мови програмування Python існують бібліотеки :

➤ PySwarms - легка бібліотека для оптимізації роєм частинок, яка дозволяє дослідникам та розробникам легко використовувати PSO в своїх проектах;

➤ DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python): - бібліотека для еволюційних обчислень, яка також підтримує реалізацію різних ройових алгоритмів;

➤ ACO-Pants: спеціалізована бібліотека для алгоритму мурашиного колонії, яка зосереджена на пошуку шляхів і оптимізації.

Для мови програмування Java:

➤ JMetal - фреймворк, призначений для розробки метаевристичних алгоритмів, включаючи ройові алгоритми, для рішення багатоцільових оптимізаційних задач;

➤ Opt4J - відкритий і модульний фреймворк для метаевристичної оптимізації, що підтримує різні ройові алгоритми.

Для мови програмування C/C++:

➤ ParadisEO - багатофункціональний фреймворк для еволюційних обчислень, який включає підтримку для різних ройових алгоритмів. Підтримує паралельні та розподілені обчислення;

➤ SwarmOps - бібліотека, яка надає ефективні реалізації для різних оптимізаційних алгоритмів, включаючи ройові.

Висновки

У даній роботі було проведено аналіз алгоритмів ройового інтелекту, демонструючи їхній потенціал та широке поле діяльності у сфері мультиагентних систем. Вказано на активне дослідження в цій галузі та наростання застосувань. Вивчення різних наукових робіт вказує на необхідність поєднання знань

із різних областей для ефективного вирішення складних завдань за допомогою ройового інтелекту.

Алгоритми ройового інтелекту знаходять застосування в різноманітних галузях та сферах, існують безліч бібліотек та фреймворки для реалізації алгоритмів ройового інтелекту в мовах програмування Python, Java, та C/C++, що свідчить про доступність та зручність використання цих алгоритмів у дослідницькій та розробницькій діяльності.

У майбутніх дослідженнях передбачається провести детальніший розгляд та порівняння алгоритмів ройового інтелекту, а також розглянути можливості їх інтеграції з іншими методами штучного інтелекту для покращення рішень у різних областях застосування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Military Drone Market to Hit USD 35.60 Billion by 2030 | Featuring a Detailed 200-Pages Research Report. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 02.02.2024)
2. Herbert A. Simon - The Architecture of Complexity. URL: <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ArchitectureOfComplexity.HSimon1962.pdf> (дата звернення: 02.02.2024).
3. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (4nd Edition). Pearson, 2020. 1132 p.
4. Gianluca Antonelli - Interconnected dynamic systems: An overview on distributed control. IEEE Control Systems. 2013. Vol. 33, no. 1. P. 76–88. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6415463> (дата звернення: 02.02.2024).
5. Adam Slowik. Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial. CRC Press, 2020. 348p.
6. Louis P. Walters. Applications of swarm intelligence. Nova Science Publishers, Incorporated, 2010. 234p.
7. Abhishek Kumar, Pramod Singh Rathore, Vicente Garcia Diaz, Rashmi Agrawal. Swarm Intelligence Optimization Algorithms and Applications. John Wiley & Sons, Inc, 2021. 364p.
8. Modestus O. Okwu, Lagouge K. Tartibu. Metaheuristic Optimization: Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications. Springer Nature Switzerland AG, 2021. 196p.
9. Lewis M. Pyke www.frontiersin.org Craig R. Stark - Dynamic Pathfinding for a Swarm Intelligence Based UAV Control Model Using Particle Swarm (дата звернення: 15.03.2024)

REFERENCES

1. Military Drone Market to Hit USD 35.60 Billion by 2030 | Featuring a Detailed 200-Pages Research Report. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 02.02.2024)
2. Herbert A. Simon - The Architecture of Complexity. URL: <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ArchitectureOfComplexity.HSimon1962.pdf> (дата звернення: 02.02.2024).
3. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th Edition). Pearson, 2020. 1132 p.
4. Gianluca Antonelli - Interconnected dynamic systems: An overview on distributed control. IEEE Control Systems. 2013. Vol. 33, no. 1. P. 76–88. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6415463> (дата звернення: 02.02.2024).
5. Adam Slowik. Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial. CRC Press, 2020. 348p.
6. Louis P. Walters. Applications of swarm intelligence. Nova Science Publishers, Incorporated, 2010. 234p.
7. Abhishek Kumar, Pramod Singh Rathore, Vicente Garcia Diaz, Rashmi Agrawal. Swarm Intelligence Optimization Algorithms and Applications. John Wiley & Sons, Inc, 2021. 364p.
8. Modestus O. Okwu, Lagouge K. Tartibu. Metaheuristic Optimization: Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications. Springer Nature Switzerland AG, 2021. 196p.
9. Lewis M. Pyke www.frontiersin.org Craig R. Stark - Dynamic Pathfinding for a Swarm Intelligence Based UAV Control Model Using Particle Swarm (дата звернення: 15.03.2024)

Received 15.04.2024.
Accepted 17.04.2024.

Analysis of swarm intelligence algorithms

This paper conducts a comprehensive review of swarm intelligence algorithms, highlighting the significant potential and development prospects of multi-agent systems and swarm intelligence. It underscores the ongoing research activity in this field and the continuous expansion of application areas. By examining various studies and publications, the paper concludes the importance of integrating approaches from different scientific disciplines to tackle diverse and complex problems using swarm intelligence. Future research is aimed at providing a more detailed analysis and comparison of various swarm intelligence algorithms across different application domains, as well as exploring their integration with other artificial intelligence methods. This work points towards the

growing relevance of swarm intelligence in solving real-world problems, showcasing its versatility and effectiveness across multiple sectors, including military, agriculture, search and rescue, and environmental monitoring.

Key words: artificial intelligence, intelligent agent, multi-agent systems, swarm intelligence, swarm intelligence optimization algorithms.

Купін Андрій Іванович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету.

Косей Максим- аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету.

Kupin Andrey - Doctor of technical sciences, professor, Head of the department of computer systems and networks of The Kryvyi Rih National University.

Kosei Maksym - PhD student of the department of computer systems and networks of The Kryvyi Rih National University.