

МОДЕЛЮВАННЯ ГРУПОВОЇ ПОВЕДІНКИ АВТОНОМНИХ АГЕНТІВ ЗА СЦЕНАРІЄМ  
КОНСОЛІДАЦІЇ

А. В. Ярмілко, В. С. Нікітюк

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

ORCID: 0000-0003-2062-2694; 0000-0002-4976-3709

Розглянуто питання моделювання багатоагентних інтелектуальних систем в контексті створення прикладних систем групової робототехніки. Обґрунтовано доцільність застосування при формуванні групової поведінки агентів біонічних моделей, отриманих за результатами досліджень з іхтіології. На їхній основі розроблено модель консолідації багатоагентної системи за сценарієм сходження автономних агентів до рухомого лідера. Виконано програмну реалізацію середовища для дослідження групової поведінки самокерованих агентів при виконанні спільних завдань за сценаріями такого типу. Проведено серію імітаційних експериментів з дослідження консолідації самокерованих агентів за розробленим сценарієм. В процесі їх виконання використано функціональні можливості створеного імітаційного середовища для забезпечення варіації властивостей моделей, умов проведення дослідів, збирання та обробки експериментальних даних. Результати апробації середовища моделювання засвідчили достатньо високу якість імітаційних моделей, їхню принципovu придатність до застосування на всіх етапах життєвого циклу прикладних інтелектуальних систем групової робототехніки. Його практична користь вбачається у визначенні оптимальної структури зв'язків у групі агентів та оцінці адекватності їх поведінки у багатофакторному функціональному просторі. Отримані моделі та засоби можуть бути використані при створенні прикладних робототехнічних систем.

**Ключові слова:** групова робототехніка, імітаційне моделювання, біонічні моделі, консолідація багатоагентних систем.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** У загальній тематиці досліджень штучного інтелекту важливе місце посідає вивчення взаємодії декількох елементів штучного інтелекту між собою та з людьми в єдиному безбар'єрному просторі. Особливої уваги воно набуває у зв'язку з впровадженням радикально нових способів взаємодії, притаманних промисловим практикам за концепцією Industry 4.0. Зокрема, на сучасному етапі розвитку теорії та практики інтелектуальних систем керування актуальною є розробка методів та засобів управління групами мобільних роботів. Цей напрям досліджень та практичної діяльності демонструє інтенсивний розвиток вже протягом двох останніх десятиліть та відомий під назвою «swarm robotic» (групова робототехніка). Очевидною є висока складність таких систем та потенційні ризики від використання кіберфізичних пристроїв як окремо, так і у складі груп інтелектуальних агентів, об'єднаних спільним простором та/або спільними функціональними завданнями. Тому типовим рішенням на всіх етапах життєвого циклу пристроїв зі штучним інтелектом є застосування моделювання.

На жаль, дослідники не завжди мають доступ до моделюючих систем з розвинутим функціоналом, придатним для створення та багатофакторного аналізу мультиагентних інтелектуальних систем зі складними сценаріями взаємодії, зокрема – за сценаріями консолідації. Тому створення нових програмних засобів моделювання з такими можливостями є актуальною задачею.

Метою дослідження було імітаційне моделювання багатоагентних систем, яке розглядалося як попередній етап на шляху створення прикладних систем групової робототехніки. При цьому вирішувалися дві основні задачі:

– по-перше, створення дослідницького програмного середовища з функціями формування сцени з множиною самокерованих інтелектуальних агентів, налаштування їх параметрів та принципів взаємодії, засобами моделювання в режимі реального часу та управління експериментом, засобами аналізу і представлення результатів;

– по-друге, проведення у цьому середовищі імітаційних експериментів задля вивчення різноманітних сценаріїв консолідованого руху автономних агентів

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**  
Увага до використання у прикладних задачах груп

роботів на тлі перспектив їх інтенсивного розвитку та поширення [1, 2] цілком виправдана, оскільки вони забезпечують охоплення більшого функціонального простору, надають більш широкий набір функціональних можливостей, підвищують ймовірність успішного виконання завдань. Остання перевага, як правило, забезпечується можливістю перерозподілу завдань всередині угруповання роботів, можливістю дублювання та резервування їхніх функцій. Провідні центри дослідження даної проблеми знаходяться у США, Німеччині, Франції, Китаї, Росії. Серед широкого кола задач, дотичних до зазначеної проблеми, одна з центральних пов'язана з дослідженням поведінки груп роботів, координацією їхнього руху. Типовою задачею є управління консолідованим рухом автономних об'єктів. Консолідацію можемо спостерігати у рухових стратегіях багатьох біологічних систем з певним рівнем соціалізації приналежних їм компонентів. Аналогічні стратегії групового руху розглядаються й у дослідженнях з управління угрупованнями роботів: формування та переформатування конвоїв, безпечний рух у групах роботів за умови відсутності апіорних знань про оточення, рух за сценаріями втечі від зграї хижаків або захоплення зграєю вказаного рухомого об'єкту, синхронне виконання рухів за спостереженням визначеного лідера та інші [3, 4]. Прикладні дослідні системи, зокрема, зосереджуються на застосуванні систем з елементами штучного інтелекту в оптимізації трафіку у міській транспортній інфраструктурі. Так, технологія Virtual Traffic Lights (VTL), яка передбачає застосування автомобілями безпроводного протоколу DSRC (dedicated short-range communications), забезпечує впорядкування перетину перехрестя потоками самокерованих транспортних засобів без застосування світлофорів та вартісних сенсорів руху [5]. Примітно, що застосована модель керування має потенціал зниження часу перебування на типових маршрутах в інфраструктурі великих міст на 30–60% та є ефективною навіть у змішаному транспортному потоці зі звичайними нероботизованими автомобілями.

Swarm robotic має свої специфічні особливості, які проявляються як в процесі розробки методів, так і при проектуванні та реалізації алгоритмів керування груповою поведінкою мобільних роботів. Зокрема, кожному з роботів (автономних агентів) доступна

лише локальна інформація про його оточення. Це стосується й даних про поточну топологію групи. Така ситуація є об'єктивним наслідком обмеженості каналів отримання даних, їх діапазонів та радіусу дії, особливостей комунікаційної структури у межах групи та інших факторів, обумовлених властивостями функціонального простору. Але, незважаючи на це, кожен з агентів має забезпечувати виконання завдань, поставлених перед групою як єдиним об'єктом. Інша особливість пов'язана зі складністю аналітичного опису руху групи агентів внаслідок, як правило, нелінійного характеру математичних залежностей та постійними динамічними трансформаціями топології групи. Також особливістю рішень у сфері *swarm robotics* є орієнтація виключно на безпроводні мережеві технології в процесі реалізації алгоритмів керування.

Як вже зазначалося, існує деяка множина задач управління консолідованим рухом автономних самокерованих агентів. Одним з варіантів є консолідований рух системи, який визначається поведінкою лідера. Така система передбачає наявність одного лідера, який має достатньо потужну інформаційну підтримку власної поведінки, та кількох підпорядкованих агентів (переслідувачів або послідовників) з відносно обмеженими сенсорними і комунікаційними можливостями, позбавлених апріорних знань про середовище свого функціонування. В процесі руху група агентів має перебудовувати свою топологію відповідно до зміни оточення та/або поставлених завдань.

Дослідження систем зазначеного типу методами натурального моделювання, як правило, є нерациональними внаслідок факторів загальносистемної складності апаратної реалізації, досить високих матеріальних витрат та значного рівня непрогнозованості поведінки інтелектуальних агентів у відкритому функціональному просторі. Тому очевидною є потреба застосування різноманітних методів моделювання на всіх етапах аналізу, розробки та впровадження таких систем. Чільні позиції серед таких інструментів дослідження посідають програмні системи, призначені для імітаційного моделювання групової поведінки роботів. Вони є основним засобом при дослідженні руху угруповань цих мобільних агентів і внаслідок проблематичності побудови універсальної математичної моделі групи роботів [6]. Відповідною є потреба у створенні засобів моделювання з властивостями підтримки експериментальних досліджень.

На рівні фундаментальних досліджень в рамках парадигми багатоагентних систем взаємодія між агентами розглядається як проблема визначення відкритих, неоднорідних та динамічних систем взаємодії. Типовим є підхід, орієнтований на зовнішні спостережувані події, на відміну від неспостережуваних внутрішніх станів агентів. Засоби для опису таких взаємодій спираються на теоретичні уявлення на базі соціальних явищ [7].

Для забезпечення стійкості мультиагентних систем агенти повинні взаємодіяти з дотриманням деякої системи правил. Проте парадокс полягає в тому, що не завжди можна очікувати, що агент дотримуватиметься правил, визначених системою. На це є багато причин: наявність помилок, орієнтація агентів на власні пріоритети, конкуренція між агентами, обмежена раціональність їхньої поведінки та інші чинники. Враховуючи відсутність контролю над діями автономних агентів, мультиагентним системам потрібні механізми виявлення порушень прийнятих правил та комунікації між складовими системами. Іншим актуальним та проблемним аспектом сучасних засто-

сунків для моделювання мультиагентних систем є те, що взаємодіючі агенти представляють свого колегу, тобто вони діють від імені своїх власників. У цьому випадку має бути реалізована чітка концепція власності агентів [7].

На практичному рівні розв'язання задачі застосовуються різні методи. Зокрема, при плануванні траєкторій для групи роботів знайшли застосування нейромережеві алгоритми та технології доповненої і віртуальної реальності [8, 9]. Також є прецеденти використання стохастичних моделей, які застосовано для моделювання поведінки складних рухомих об'єктів з метою побудови субоптимальних траєкторій їхнього переміщення у визначеному спільному просторі, що дозволяють вирішувати утилітарні завдання з імовірністю не меншою за даної [10]. У роботі [11] розглянута дворівнева структура управління для керування мобільним роботом або групою роботів для навігації в динамічному середовищі, в якій передбачено розділення алгоритмів уникнення перешкод та алгоритмів виконання поставленого функціонального завдання. Ця методика застосована й у формуванні «лідер-послідовник». Досліджуються також сценарії консолідації іншого типу. Наприклад, представлено гібридний метод управління «Самозбірка», який дозволяє групам агентів утворювати стійкі просторові конфігурації [12].

Розглядаючи задачу моделювання поведінки інтелектуальних агентів, чимало дослідників звертається до використання біонічних підходів. Такий спосіб розв'язання задачі у багатьох випадках є виправданим, оскільки алгоритми поведінки живих істот еволюційно пройшли дуже тривалий шлях вдосконалення в жорстких умовах реального життя в конкурентному середовищі. Прикладами варіантів групової поведінки тварин, які є актуальними прототипами для прикладних технічних систем та моделюються в наукових дослідженнях, є сценарії колективної погоні та втечі, колективне зграювання та інші. Зокрема, вражаючи координацію на груповому рівні демонструють зграйні риби [13]. Однак застосування таких прототипів потребує розробки моделей поширення інформації в групі поміж агентами-сусідами та визначення статусу окремих агентів у процесі виконання групових завдань.

При проектуванні та реалізації алгоритмів керування груповою поведінкою мобільних агентів за сценаріями прикладного використання потрібно враховувати ряд притаманних *swarm robotics* особливостей. Як вже зазначалося, вони обумовлені доступністю для агентів лише локальної інформації про його оточення внаслідок об'єктивної обмеженості параметрів сенсорів і каналів отримання даних, особливостями реалізації комунікаційної структури та конкретними проявами властивостей функціонального простору. Тому ці особливості прикладної області слід враховувати при визначенні топології групи та базових сценаріїв поведінки агентів на елементарних кроках керування.

Нами було розглянуто варіант групової поведінки агентів у формі консолідації групи навколо рухомого лідера. Постановка задачі передбачала використання моделей комунікаційних структур біонічної природи та поведінкових алгоритмів, притаманних живим організмам. Формування індивідуальної поведінки кожного з агентів на кожному з кроків вирішення групового завдання має відбуватися лише на основі спостереження за агентами-сусідами за умови відсутності апріорних знань про оточення. Була використана графова модель комунікаційних зв'язків всере-

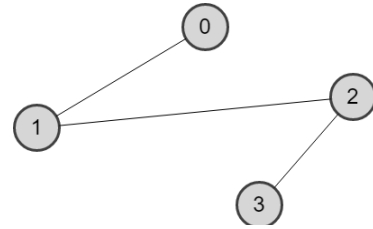
дині групи.

Як зазначено у [13], структура групи у косяку риб формується за результатами спостереження окремих особин за поведінкою інших учасників консолідаційного процесу. Було встановлено, що особина у зграї в основному реагує на одного або двох сусідів одночасно. Відстань до сусіда не є визначальною для рішення щодо використання спостереження за ним для формування власної траєкторії.

Проте найновіші дослідження біологів дозволили глибше зрозуміти механізм групової поведінки великих популяцій живих істот. Зокрема, міждисциплінарною групою дослідників оприлюднено результати спостережень за формуванням косяків риб-цихлід [14]. У дослідях з експериментальними популяціями з п'ятнадцяти, тридцяти та шістдесяти риб встановлено, що кожна з риб в процесі консолідації косяка може взаємодіяти лише з однією іншою рибою. Таким чином, її поведінка формується не в результаті спостереження за поведінкою групи, а внаслідок випадкового копіювання поведінки іншої особини. Разом з тим, альтернативною дією кожної особини у зграї є спонтанна зміна напрямку руху на кожному окремому кроці консолідації. Отже, було спростовано механізм консолідації відповідно до стандартної теорії «ковзного середнього», якою описували поведінку особин у косяку або зграї. Визначення середнього напрямку руху у косяку за таким принципом, ймовірно, є занадто складним для риб. Таким чином, було підтверджено механізм групової поведінки, стосовно якого раніше висловлювалися лише теоретичні припущення. Зазначимо, що це відкриття залишає й багато питань для подальших досліджень. Зокрема, експерименти показали більш послідовну консолідацію у менших за чисельністю косяках, що не було очікуваним з огляду на більшу роль випадковості у динаміці малих груп. Проте встановлені у цьому дослідженні закономірності дозволяють обрати їх в якості базового прототипу.

Розглянемо мультиагентну систему, яка складається з лідера та певної кількості підпорядкованих йому агентів. Всі вони мають обмежену область видимості, що означає їхню здатність слідкувати в певний момент часу лише за обмеженою множиною видимих об'єктів. У даній роботі під баченням автономних модулів розуміємо їхню здатність ідентифікувати та встановлювати положення інших модулів за актуальні для цієї задачі часові проміжки. Будемо вважати, що «бачення» кожного агента обмежене можливістю спостерігати за рухом лише одного об'єкту. Зв'язки між лідером та агентами можна представити у вигляді графа, де кожен агент слідкує за одним об'єктом та потрапляє у зону видимості іншого сусіда. Отже, з урахуванням накладених у даному розгляді обмежень, будь-яка вершина графа має не більше ніж дві дуги, кожна з яких замкнута на сусідів. Одна з дуг однієї вершини з множини агентів обов'язково замкнута на вершину-лідера (рис. 1).

Математична реалізація алгоритму руху агентів базується на постановці задачі консенсусу для представленої мультиагентної системи. Динаміка лідера та агентів може бути описана системами диференціальних рівнянь. Обчислення за такою математичною моделлю дозволяють отримати залежності для знаходження положення та напрямку руху кожного елемента системи в певний момент часу.



Рисунк 1 – Топологія графової моделі групи автономних самокерованих агентів: 0 – агент-лідер, 1, 2, 3 – підпорядковані агенти

Згідно постановки задачі, мультиагентна система складається з лідера (який може бути й віртуальним) та  $N$  агентів (followers). Динаміка лідера описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = y_0 \\ \dot{y}_0 = f(t, x_0, y_0) + g(t, x_0, y_0) \end{cases} \quad (1)$$

де  $x_0 = (x_{0_1}, x_{0_2})^T$  – вектор, який описує положення лідера,  $y_0 = (y_{0_1}, y_{0_2})^T$  – вектор швидкостей лідера,  $f(t, x, y) \in \mathbb{R}^2$  і  $g(t, x, y) \in \mathbb{R}^2$  – достатню кількість разів неперервно диференційовані в  $\mathbb{R}^2$  функції. Тут  $f$  відповідає за власну динаміку лідера, а  $g$  – за контролювання траєкторії лідера.

Динаміка  $i$ -го ( $i = \overline{1, N}$ ) агента описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = y_i \\ \dot{y}_i = f(t, x_i, y_i) + u_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

де  $x_i = (x_{i_1}, x_{i_2})^T$  – вектор, який описує положення  $i$ -го агента,  $y_i = (y_{i_1}, y_{i_2})^T$  – вектор швидкостей  $i$ -го агента,  $u_i(t)$  – керування.

Консенсус у мультиагентній системі досягається при побудові такого керування  $u_i(t), i = \overline{1, N}$ , для якого виконуватимуться умови:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_0(t)\| &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|y_i(t) - y_0(t)\| &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

для будь-якого  $i$  та довільних початкових станів.

Для побудови управління, відповідного зазначеним умовам, було використано метод, запропонований Гогуан Вень (Guoguang Wen) [15]. Метод дозволяє отримати вирішення задачі консенсусу на основі залучення методів з теорії графів, теорії матричних обчислень, теорії автоматичного керування. З урахуванням зазначеного, було побудовано математичну модель руху агентів-переслідувачів. Дана модель передбачає розбиття часового періоду моделювання  $[0, T] (T > 0)$  на  $n$  рівних частин. Позначимо

$h = \frac{T}{n}, x_i^k = x_i(kh), y_i^k = y_i(kh), \forall k = \overline{0, n}$ . В процесі моделювання поведінки мультиагентної системи, складеної за прикладом рис. 1, для кожного обчисленого на попередньому інтервалі управління стану агента  $x_i^k, y_i^k$  обраховується його наступний стан за такими виразами:

$$\begin{aligned}
 x_0^{k+1} &= hx_0^k + hy_0^k, \\
 y_0^{k+1} &= y_0^k + hf(kh, x_0^k, y_0^k) + hg(kh, x_0^k, y_0^k), \\
 x_i^{k+1} &= x_i^k + hy_i^k, \\
 y_i^{k+1} &= y_i^k + hf(kh, x_i^k, y_i^k) + \\
 &h\left(-a \sum_{j=0}^N a_{ij} [r_1(x_i^k - x_j^k) + r_2(y_i^k - y_j^k)]\right) \\
 &- \beta \operatorname{sgn} \left\{ \sum_{i=0}^N a_{ij} [r_1(x_i^k - x_j^k) + r_2(y_j^k - y_i^k)] \right\}
 \end{aligned} \quad (4)$$

для кожного  $i=1, 2, 3$ . Значення коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$  обираються відповідно до умови консенсусу, обґрунтованої у [15].

За представленою моделлю було розроблено програмну реалізацію імітаційного середовища для дослідження поведінки автономних модулів в процесі виконання спільних завдань. Програмна система виконана у вигляді web-сервісу. Експериментатору надаються інструменти формування динамічної дослідної сцени, конфігурування агентів, симуляції відповідно до заданого сценарію у реальному масштабі часу та засоби аналітики. Забезпечена можливість використання у досліді значної кількості агентів – не менше 100 одиниць. Межі сцени (функціонального простору агентів) на даному етапі не визначаються. На період моделювання функція розподілу лідерства (статус агентів) залишається сталою. Задача уникнення зіткнень модулів у процесі руху на даному етапі не розв'язується.

Зазначимо, що реальні прикладні системи з угрупованнями агентів актуального для даного дослідження типів мають значну складність як на рівні опису її топології, структури, алгоритмів функціонування та комунікаційних зв'язків агентів, так і на рівні урахування властивостей функціонального середовища. Оскільки деталізація часткових моделей негативно відбиватиметься на конструктивності загальної моделі багатоагентної системи, урахування у запропонованій моделі встановлення консенсусу додаткових чинників було виконано шляхом введення до неї узагальнюючих коефіцієнтів. Отже, деяка міра невизначеності стану реальної системи внаслідок потенційно можливих похибок у роботі рушійних механізмів, датчиків, програмних алгоритмів у середовищі моделювання враховується параметром у формі стохастичного коефіцієнту. Таким чином, на базі запропонованого рішення можуть бути побудовані дослідницькі моделі з достатнім рівнем адекватності конкретним прикладним системам. А урахування зазначених додаткових параметрів на етапі натурних експериментів чи впровадження розроблених моделей консолідації може бути виконано на принципах оптимального та адаптивного управління автономними інтелектуальними агентами за алгоритмами, які описані, зокрема, у [16, 17].

Завданням експериментального дослідження розробленої моделі формування консолідованих маневрів групи автономних модулів була перевірка її ефективності як засобу імітаційного моделювання прикладних багатоагентних динамічних систем. Метою таких експериментів може бути як встановлення параметрів функціонування конкретних систем із заданими параметрами, так і пошук такої конфігурації багатоагентної системи, яка задовольнятиме вимогам до параметрів функціонування системи у певній прикладній задачі. Саме імітаційний експеримент

може надати діагностичну інформацію, необхідну для прийняття рішень щодо розробки або застосування конкретної багатоагентної системи.

Програма експериментів передбачала дослідження функціонування імітаційних моделей кількох типів:

Тип 1. Модель системи консолідованого руху з визначеним лідером та кількома агентами-переслідувачами за умови визначення траєкторій руху агентів за аналітичним законом. Варіація моделі:

- а) зміна взаємного положення лідера та агентів-переслідувачів;
- б) зміна кількості агентів-переслідувачів;
- в) зміна параметрів аналітичного закону, за яким визначається рух лідера.

Тип 2. Модель системи консолідованого руху з визначеним лідером та кількома агентами-переслідувачами за умови визначення траєкторій руху агентів за аналітико-стохастичним законом. Варіація моделі:

- а) зміна стохастичного коефіцієнту;
- б) зміна параметрів аналітичного закону, за яким визначається рух лідера;
- в) зміна взаємного положення лідера та агентів-переслідувачів;
- г) зміна кількості агентів-переслідувачів.

Тип 3. Модель системи консолідованого руху з віртуальним лідером (керування з боку експериментатора за допомогою миші або іншого маніпулятора) та кількома агентами-переслідувачами за умови визначення траєкторій руху агентів за аналітико-стохастичним законом. Варіація моделі:

- а) зміна стохастичного коефіцієнту;
- б) зміна взаємного положення лідера та агентів-переслідувачів;
- в) зміна кількості агентів-переслідувачів.

Значимими параметрами всіх перелічених моделей є час консолідації (обмежується моментом сходження всіх агентів до координати рухомого лідера) та дистанція між агентами (визначається попарно за відстанню між їхніми центрами).

Для проведення експериментів з моделлю типу 1 була сформована дослідна сцена, яка складалася з агента-лідера та шести агентів-переслідувачів. Координати початкового положення агентів задавалися експериментатором. Агента з номером 0 було призначено лідером. Візуалізація лідера виконувалася колом червоного кольору з вміщеним всередині нього номером агента. Агенти-переслідувачі були візуалізовані кольоровими кругами з номером агента посередині. Вибір кольору для кожного агента виконується за стохастичним алгоритмом. Закон, за яким визначається траєкторія руху лідера, задано аналітичними виразами:

$$x = 100 * \sin\left(\frac{t}{100}\right) + t,$$

$$y = 100 * \sin\left(\frac{t}{100}\right).$$

Інші параметри експерименту: ширина зони контролю зближень агентів (небезпечна зона) – 50 рх, стохастичний коефіцієнт – 0%, час анімації – 10000 ms.

В процесі відпрацювання заданого сценарію в реальному масштабі часу відбувалося анімаційне відтворення руху групи агентів відповідно до алгоритму стеження за рухом сусідів. Розвиток сцени із залишковими траєкторіями руху агентів представлено на рис. 2. В процесі експерименту відбувалося сходження

ня траєкторій руху агентів-переслідувачів до траєкторії руху лідера, який переміщується відповідно заданого аналітичного закону. Для заданих параметрів моделі сходження всіх агентів до лідера відбувається приблизно за однаковий час незалежно від початкового положення.



Рисунок 2 – Відтворення процесу консолідації: а – початкове положення агентів; б – положення агентів після виконання консолідації навколо лідера та їх залишкові траєкторії

Також в процесі відпрацювання сценарію виконується моніторинг зближень агентів. Візуалізація цього процесу виконана у вигляді часових трендів, які демонструють відстань від кожного з агентів до найближчого сусіда. При цьому відображається входження агентів-сусідів у небезпечну зону навколо конкретного агента (виділена область, рис. 3). В процесі побудови трендів застосовується кольорове кодування тренду кожного з агентів відповідно до присвоєних їм при генерації сцени ознак кольору.

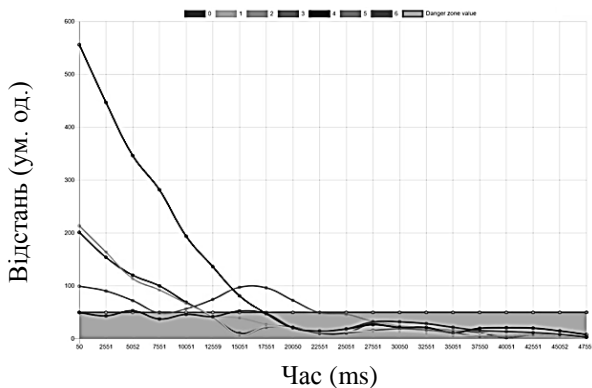


Рисунок 3 – Тренд зближень агентів

Було виконано серію експериментів зі сценою описаного типу, в ході яких відбувалася зміна окремих початкових параметрів моделі, а саме зміна початкових координат лідера та агентів-переслідувачів, зміна кількості агентів-переслідувачів та зміна числових параметрів аналітичного закону, за яким задається рух лідера. Отримані результати в цілому ідентичні представленим на рис. 2. Варіація результатів спостерігається переважно щодо швидкості сходження до лідера залежно від параметрів застосованого аналітичного закону.

Для проведення експериментів з моделями типу 2 була сформована дослідна сцена з параметрами, ідентичними попередній. Відмінність полягала у використанні стохастичного коефіцієнту, який мав моделювати урахування додаткових (не врахованих у математичній моделі) факторів реального функціонального простору консолідаційного процесу та флуктуації параметрів агентів. В процесі дослідження моделі послідовно змінювалися значення стохастичного коефіцієнту в діапазоні від 0% до 50%. Час анімації змінювався від 5000 ms до 15000 ms з метою створення умов візуального спостереження за процесом до завершення консолідації при конкретних значеннях стохастичного коефіцієнту. Вплив вибору зна-

чення коефіцієнту на розвиток сцен з ідентичними початковими параметрами представлено на рис. 4. На ньому показано взаємне положення агентів після завершення однакових часових інтервалів моделювання. Як видно, збільшення значення стохастичного коефіцієнту перешкоджає швидкій консолідації агентів. Проте збільшення часу на виконання спільної задачі цілком відповідає очікуванням щодо впливу властивостей реального функціонального середовища та якості фізичної реалізації агентів на їх здатність до оптимального виконання поставленого завдання.

Аналогічні експерименти було проведено для версії моделі зі зміненими параметрами аналітичного закону, за яким визначається рух лідера, кількістю та взаємним положенням агентів.

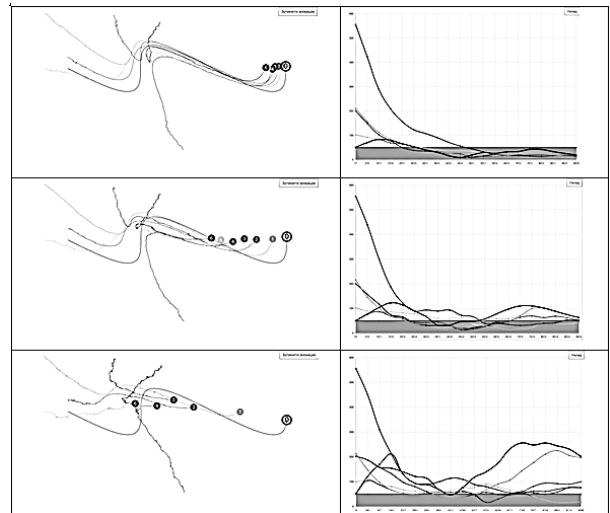


Рисунок 4 – Варіація траєкторій агентів та відповідних їм трендів зближень у залежності від стохастичного коефіцієнту (для значень 10%, 25%, 50%)

У дослідях з моделями типу 3 при формуванні сцени статус лідера жодному агенту не присвоювався. Положення віртуального лідера задавалося дослідником інтерактивно за допомогою переміщення миші. Поточне положення віртуального лідера відображалось положенням курсора миші на моніторі. Варіація моделі задавалася зміною таких параметрів: стохастичний коефіцієнт, кількість та взаємне положення агентів. Результати моделювання в цілому були подібні до отриманих в дослідях попереднього типу, однак використання ручного управління рухом віртуального лідера дозволило змінювати закон його руху в процесі відпрацювання конкретного екземпляру експерименту.

В процесі відпрацювання заданих сценаріїв взаємодії виконується експрес-аналіз безпеки кожного з агентів. Візуалізація результатів такого аналізу виконується за допомогою пелюсткових діаграм (рис. 5).

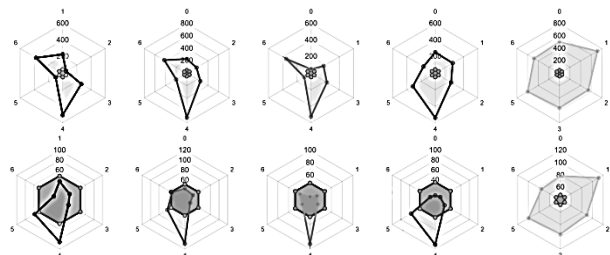


Рисунок 5 – Експрес-аналіз зближень агентів та візуалізація загроз зіткнення

Експрес-аналіз оточення агентів надає дані для

формування кожним з них власних маневрів з уникнення фізичного зіткнення або небезпечного наближення до інших учасників консолідаційного процесу на тлі виконання загального завдання групи. Наявність та формат представлення такої інформації створює передумови для подальшого розвитку моделей інтелектуальної поведінки модулів у середовищі з високою динамікою.

Результати, отримані в ході експериментів з використанням програмного середовища дослідження консолідованого руху автономних агентів, засвідчили можливість проведення імітаційних експериментів з консолідації багатоагентної системи за обраним базовим сценарієм консолідації – сходження агентів-переслідувачів до лідера. Наявні у програмному середовищі інструментальні засоби дозволяють формувати спрощені багатоагентні сцени кількох типів та надає засоби управління експериментом і його візуалізації в реальному масштабі часу. Отримані результати імітаційного моделювання є адекватними властивостям реальних систем-прототипів. На поведінку складових моделі впливають їхнє просторове положення у групі, топологія групи, параметри руху агента-лідера.

Варіація результатів експериментів відповідає варіації властивостей досліджуваних моделей. Зокрема, введення стохастичного коефіцієнту дозволило ускладнити поведінку агентів відповідно до реальних ситуацій виконання функціональних завдань у відкритому виробничому просторі. Експерименти показали, що підвищення значення стохастичного коефіцієнта ускладнює процес консолідації, збільшуючи тривалість виконання консолідаційної задачі та збільшуючи ймовірність критичного зближення агентів у процесі руху. Такі результати є відповідними поведінці реальних систем у функціональних середовищах зі складними властивостями.

Зважаючи на загальний позитивний результат дослідження, доцільним є розширення функціональних можливостей програмного середовища моделювання консолідованого руху як шляхом поглиблення аналізу динаміки агентів, так і шляхом створення засобів формування модельних сцен з властивостями, наближеними до реальних прототипів. Це створить передумови для використання даних експрес-діагностики у формуванні агентами власної реакції на поточні ситуації. Також на наступних етапах розвитку програмного продукту має бути розширено номенклатуру базових сценаріїв консолідації.

**ВИСНОВКИ.** Із використанням моделей біонічної природи розроблено програмне середовище дослідження консолідованого руху автономних агентів та виконано дослідження консолідації багатоагентної системи за кількома сценаріями. Отримані експериментальні результати продемонстрували відповідність поведінки застосованих імітаційних моделей їх реальним прототипам. Забезпечено отримання моніторингової інформації про перебіг консолідаційного процесу та їх інтерпретацію в реальному масштабі часу.

Практичне застосування отриманих результатів можливе в розробці та дослідженні прикладних інтелектуальних систем *swarm robotic* при визначенні оптимальної структури зв'язків у групі агентів та оцінці адекватності їх поведінки у багатофакторному функціональному просторі. Позитивний ефект можна очікувати на всіх етапах життєвого циклу таких систем: як для оцінки концептуальних рішень, так і у процесі розробки, впровадження та експлуатації. Зокрема, воно може бути корисним у завданнях по-

передньої перевірки поведінки роботів з метою визначення очікуваних часових характеристик колективного виконання прикладних завдань, раціонального початкового розміщення та вибору оптимальних технічних характеристик агентів.

Подальший розвиток дослідницького середовища вбачається у розширенні його функціональних можливостей щодо опису дослідних сцен, властивостей агентів, системи комунікації у групі, типів консолідації. Зокрема, подальше підвищення варіативності модельних ситуацій вбачається шляхом впровадження у модель консолідаційної задачі динамічного графа, який забезпечуватиме перебудову комунікаційних зв'язків у групі на кожному кроці моделювання. Такий розвиток структури зв'язків між агентами забезпечить більш повну відповідність модельних ситуацій природним аналогам та є практичною відповіддю на обмеженість реальних технічних реалізацій каналів і апаратури моніторингу, здатності апаратних версій мобільних агентів здійснювати маневри слідування конкретним агентам-сусідам з множини можливих. Розширенню сфери застосування середовища сприятиме також реалізація його 3D-версії.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Sirkin H. L., Zinser M., Rose J. R. The robotics revolution: The next great leap in manufacturing. The Boston Consulting Group (BCG), 2015.
2. Аналитическое исследование : Мировой рынок робототехники. НАУПП, 2016.
3. Gonzalez R. How a flock of drones developed collective intelligence. URL: <https://www.wired.com/story/how-a-flock-of-drones-developed-collective-intelligence/> (дата звернення: 17.08.2021).
4. Зенкевич С.Л., Чжу Х. Управление движением группы роботов в строю типа «конвой». *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Вып.18(1). С. 30–34.
5. Tonguz O. K. Red light, green light – no light: Tomorrow's communicative cars could take turns at intersections. *IEEE Spectrum*. 2018. Vol. 55. No. 10. P. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2018.8482420>.
6. Hamann H., Wörn H. A framework of space-time continuous models for algorithm in swarm robotics. *Swarm Intelligence*. 2008. Vol. 7. P. 209–239.
7. Fornara N. Interaction and communication among autonomous agents in multiagent systems : Ph.D. dissertation. Università della Svizzera italiana. Lugano, 2003.
8. Даринцев О. В., Мигранов А. Б., Юдинцев Б. С. Нейросетевой алгоритм планирования траектории для группы мобильных роботов. *Искусственный интеллект*. 2011. Вып. 1/2011. С. 154–160.
9. Даринцев О. В. Использование технологий расширенной и виртуальной реальностей при реализации алгоритмов управления коллективом роботов. *Искусственный интеллект*. 2013. Вып. 3/2013. С. 479–487.
10. Дрюк А. Д., Кучеренко Е. И. Стохастические модели и методы субоптимальной маршрутизации сложных объектов. *Бионика интеллекта : науч.-техн. журн.* 2013. Вып. 1 (80). С. 45–53.
11. Roy S. Coordination and control for a team of mobile robots in an unknown dynamic environment : theses and dissertations. The University of Wisconsin-Milwaukee. Milwaukee, 2018.
12. Mahmood S., Liaquat M., Ahmad Z., Zaheer A. and Khan A. Study of formation control of mobile robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2020. Vol. 9(1). P. 111–116. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijmer.9.1.111-116>.
13. Jiang L., Giuggioli L., Perna A., Escobedo R., Lecheval V., Sire C., Han Z. and Theraulaz G. Identifying influential neighbors in animal flocking. *PLoS Computational Biology*. 2017. Vol. 13(11). 1005822. DOI: <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PCBI.1005822> PMID: 29161269.

14. Jhawar J., Morris R. G., Amith-Kumar U. R., Danny Raj M., Rogers T., Rajendran H. and Guttal V. Noise-induced schooling of fish. *Nature Physics*. 2020. Vol. 16(4). P. 488–493. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0787-y>.

15. Wen G. Distributed cooperative control for multi-agent systems : Ph.D. thesis. Ecole Centrale de Lille, Université Lille Nord de France. Lille, 2013.

16. Ярмілко А. В. Адаптивна модель для системи інтелектуального керування виробничими процесами.

*Інформаційні та моделюючі технології (ІМТ-2015): матеріали всеукр. наук.-практ. конф.* Черкаси, 2015. С. 61.

17. Ярмілко А. В., Приходько Д. С. Дослідження ефективності системи управління зі зміною стратегій. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2013. Вип. 4/2013 (81). С. 77–81.

## SIMULATION OF AUTONOMOUS AGENTS COLLECTIVE BEHAVIOR ACCORDING TO THE CONSOLIDATION SCENARIO

A. Yarmilko, V. Nikitiuk

Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

ORCID: 0000-0003-2062-2694; 0000-0002-4976-3709

**Purpose.** To perform research on group behavior in a multi-agent system during performing a consolidation task by simulation modeling in the created by the bionic prototype modeling environment. The research was considered as a preliminary step towards the creation of applied systems of group robotics. **Methodology.** We have applied graph theory, mathematical differential calculation, simulation modeling. **Results.** We have developed a mathematical model of the problem of consolidation of agents in a multi-agent system according to the scenario of leader persecution. The software implementation of the environment for studying the behavior of multi-agent systems in real time has been performed. Simulation of a multi-agent system with variation of system parameters and experimental conditions was performed. The directions of improvement of the modeling environment in order to bring the simulation closer to the real conditions of functioning of applied multi-agent systems are determined. **Originality.** We have developed an original research software environment for real-time swarm robotic tasks. Forms and means of monitoring the state of the multi-agent system and individual agents, suitable for rapid analysis by the researcher of the model experiment, are proposed. We have experimentally established the effectiveness of the proposed approach in the process of modeling the consolidation of a multicomponent system with high dynamic parameters. **Practical value.** We have tested the effectiveness of the bionic model of behavior of a multi-agent system in solving the problem of consolidation in the scenario of convergence of agents to the leader. **Conclusions.** Practical usage of received results is possible at all stages of the life cycle of the swarm robotic applying intellectual systems, in particular, during identifying the optimal structure of links in the group of agents and the assessment of the adequacy of their behavior in the functional space. A further development of the research environment is in expanding functional possibilities to describe the scenes, the properties of the agents, the communication systems in the group, the types of consolidation. References 17, tables 0, figures 5.

**Key words:** swarm robotic, simulation modeling, bionic models, consolidation of the multi-agent systems.

### REFERENCES

1. Sirkin, H. L., Zinser, M., Rose, J. R. (2015). *The robotics revolution: The next great leap in manufacturing*. The Boston Consulting Group (BCG).

2. Analiticheskoe issledovanie: Mirovoy rynek robototekhniki [Analytical research: World robotics market]. (2016). Moskva: Russian Association of Robotics (RAR). [in Russian]

3. Gonzalez, R. (2018). How a flock of drones developed collective intelligence. URL: <https://www.wired.com/story/how-a-flock-of-drones-developed-collective-intelligence/>.

4. Zenkevich, S. L., Zhu, H. (2017). Upravlenie dvizheniem gruppy robotov v stroyu tipa «konvoy». [Control of a group of mobile robots moving in the convoy type formation]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 18(1), pp. 30–34. [in Russian]

5. Tonguz, O. K. (2018). Red light, green light – no light: Tomorrow's communicative cars could take turns at intersections. *IEEE Spectrum*, 55(10), pp. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2018.8482420>.

6. Hamann, H., Wörn, H. (2008). A framework of space-time continuous models for algorithm in swarm robotics. *Swarm Intelligence*. 2(2–4), pp. 209–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11721-008-0015-3>.

7. Fornara, N. (2003). Interaction and communication among autonomous agents in multiagent systems. (Ph.D. dissertation). Università della Svizzera italiana. Lugano.

8. Darintsev, O.V., Migranov, A.B., Yudincev B.S. (2011). Neyrosetevoy algoritm planirovaniya traektorii dlya gruppy mobilnykh robotov [Neural network algorithm of planning trajectories for a group of mobile robots]. *Stuc. Intelekt*. 16(1), pp. 154–160. [in Russian]

9. Darintsev, O.V. (2013). Ispolzovanie tekhnologiy rasshyrennoy i virtualnoy realnostey pri realizatsii algoritmov upravleniya kollektivom robotov [Use of technologies of augmented and virtual realities at realization of control algorithms for robotics collective]. *Stuc. Intelekt*. 18(3), pp. 479–487. [in Russian]

10. Driuk, O.D., Kucherenko, Ye.I. (2013). Stokhasticheskie modeli i metody suboptimalnoy marshrutizatsii slozhnykh obektov [Stochastic models and methods of suboptimal complex objects routing] *Bionics of Intelligence: Sci. Mag.* 1 (80), pp. 45–53. [in Russian]

11. Roy, S. (2018). Coordination and control for a team of mobile robots in an unknown dynamic environment. (Theses and Dissertations). The University of Wisconsin-Milwaukee. Milwaukee.

12. Mahmood, S., Liaquat, M., Ahmad, Z., Zaheer, A., & Khan, A. (2020). Study of formation control of mobile robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 9(1), pp. 111–116. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.1.111-116>.

13. Jiang, L., Giuggioli, L., Perna, A., Escobedo, R., Lecheval, V., Sire, C., Han, Z., Theraulaz, G. (2017). Identifying influential neighbors in animal flocking. *PLoS Computational Biology*. 13(11), 1005822. DOI: <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PCBI.1005822> pmid:29161269.

14. Jhawar, J., Morris, R. G., Amith-Kumar, U. R., Danny Raj, M., Rogers, T., Rajendran, H., Guttal, V. (2020). Noise-induced schooling of fish. *Nature Physics*. 16(4), pp. 488–493. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0787-y>.

15. Wen, G. (2013). Distributed Cooperative Control for Multi-Agent Systems. (Ph.D. Thesis). Ecole Centrale de Lille. Université Lille Nord de France. Lille.

16. Yarmilko, A. (2015). *Adaptyvna model dlia systemy intelektualnoho keruvannia vyrobnychymy protsesamy [Adaptive model for the system of intelligent control of production processes]*. *Information modeling technologies, IMT-2021*. The Bohdan Khmelnytsky national university of Cherkasy. Ukraine. [in Ukrainian]

17. Yarmilko, A., Prykhodko, D. (2013). Doslidzhennia efektyvnosti systemy upravlinnia zi zminoiu stratehii [Efficiency investigation of the control system with strategies changing]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 4(81), pp. 77–81. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 11.12.2021