

Гуржій С.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ПЕРСПЕКТИВИ РОБОТОТЕХНІКИ РОЮ

Стаття присвячена комплексному аналізу сучасних тенденцій розвитку та застосування робототехніки рою (Swarm Robotics) у контексті зростаючих вимог до автономних систем наступного покоління. Основна увага приділена дослідженню концептуальних основ побудови ройових архітектур, їх функціональних можливостей, а також перспектив інтеграції з сучасними платформами на базі Robot Operating System (ROS). Показано, що робототехніка рою, ґрунтуючись на принципах децентралізації, самоорганізації та функціональної надмірності, формує нову парадигму управління великими групами роботів у складних, динамічних і екстремальних середовищах.

Розглянуто особливості переходу від традиційних централізованих систем до децентралізованих моделей, у яких кожен агент здатний виконувати локальні обчислення та приймати рішення автономно. Встановлено, що саме такий підхід забезпечує живучість рою навіть у випадках втрати значної частини апаратів та створює передумови для виконання місії у режимі реального часу. Особливу увагу приділено аналізу поведінкових патернів, які забезпечують гнучкість та масштабованість ройових систем. У статті наведено результати симуляцій та випробувань, що підтверджують здатність ройів до швидкої перебудови конфігурації, адаптивного планування траєкторій та стійкого виконання завдань навіть в умовах активної радіоелектронної протидії.

Окремо висвітлено інновації в апаратному забезпеченні та обчислювальних підсистемах. Охарактеризовано еволюцію від лабораторних платформ Kilobot і E-risk до багатоцільових UGV та UAV з інтегрованими FPGA-акселераторами, мультипроцесорними системами на кристалі та гібридними енергетичними рішеннями, що забезпечують автономність роботи впродовж кількох годин. Підкреслено роль високоточних симуляційних середовищ, зокрема Gazebo, ARGoS, CoppeliaSim та GPU-прискорених платформ, які дозволяють моделювати рой чисельністю понад мільйон агентів із урахуванням факторів середовища і радіоелектронного стану. Це створює основу для швидкого перенесення алгоритмів із моделі на реальні апаратні системи.

Значна увага приділяється питанням зв'язку та безпеки. Розглянуто перспективи застосування ad-hoc mesh-мереж, когнітивного спектрального аналізу, мультиканальних архітектур із використанням радіочастотних, оптичних каналів, а також концепції стігмергії як форми непрямої взаємодії. Висвітлено можливості багаторівневого криптографічного захисту, включно з квантовими протоколами розподілу ключів (QKD), що забезпечують стійкість систем до спуфінгу й кібератак.

Окремий розділ присвячено інтеграції методів штучного інтелекту в управління роями. Показано ефективність багатоагентного підкріплювального навчання, глибоких нейронних мереж та explainable AI для зменшення операційної невизначеності та підвищення передбачуваності дій автономних агентів. Наведено результати випробувань, які доводять здатність ройів зберігати когерентність поведінки при втраті зв'язку з частиною агентів, а також зменшувати час реакції на тактичні зміни до часток секунди.

У підсумку підкреслено, що робототехніка рою є ключовим фактором майбутніх військових, промислових і пошуково-рятувальних застосувань. Поєднання апаратних інновацій, високопродуктивних симуляційних платформ і передових алгоритмів штучного інтелекту формує передумови для створення стійких і масштабованих автономних систем.

Ключові слова: рій, операційна система, ROS, алгоритм, Swarm Robotics.

Постановка проблеми. Робототехніка рою (Swarm Robotics) – як підгалузь штучного інтелекту та колективної робототехніки, стала однією з найперспективніших напрямків у проектуванні та управлінні великомасштабними автономними системами [1]. В основі робототехніки рою лежить самоорганізація соціальних комах та інших природних роїв, вона зосереджується на тому, яким чином велика кількість відносно простих об'єктів може координувати свої дії через локальні взаємодії, забезпечуючи надійну, масштабовану та адаптивну колективну поведінку. На відміну від традиційної робототехніки, яка часто ґрунтується на централізованому контролі та дорогому обладнанні, робототехніка рою досліджує децентралізовані механізми, в яких глобальна функціональність виникає з простих локальних правил.

Значимість робототехніки рою виходить далеко за межі теоретичних досліджень. У сучасній науці та інженерії можливість ефективно координувати декілька автономних систем стала критично важливою в різних сферах. Наприклад, у моніторингу навколишнього середовища розподілені рої роботів можуть здійснювати збір даних, відстеження забруднення або оцінку катастроф у реальному часі на великих географічних територіях. У промисловій логістиці рої роботів можуть самостійно організовувати складські операції, зменшуючи залежність від фіксованої інфраструктури. У сфері оборони та безпеки координовані команди з декількох роботів можуть виконувати завдання з нагляду, розвідки та пошуково-рятувальних операцій в умовах невизначеності та ворожості. Крім того, розвиток «Індустрії 4.0» та Інтернету речей (IoRT) акцентують увагу на важливості масштабованих та відмовостійких груп роботів, здатних приймати рішення в режимі реального часу без постійного контролю з боку людини.

Незважаючи на ці можливості, кілька складних завдань залишаються невирішеними. Ройові системи повинні функціонувати в умовах суворих обмежень щодо вартості, енергії та обмежених можливостей окремих роботів у сфері зондування/обробки даних. Досягнення надійної координації в реальних умовах потребує прогресу в галузі децентралізованих алгоритмів, надійних стратегій комунікації та масштабованих архітектур. Крім того, подолання розриву між моделями на основі симуляції та ройовими системами, які можуть бути застосовані в польових умовах, залишається відкритим питанням як в академічних колах, так і в промисловості.

Отже, загальну проблему, що розглядається в цій галузі, можна сформулювати так: як спроек-

тувати, змодельовати та реалізувати ройові роботизовані системи, які одночасно є надійними, гнучкими та масштабованими, а також економічно ефективними та придатними для застосування в реальному світі. Вирішення цих завдань є не тільки питанням наукової цікавості, але й практичною необхідністю для майбутніх соціально-технічних систем, де автономні робототехнічні комплекси відіграватимуть ключову роль у вирішенні екологічних, промислових та соціальних проблем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження в галузі робототехніки рою за останні десятиліття зазнали значної еволюції, перейшовши від ранніх примітивних моделей до все більш складних структур, що інтегрують машинне навчання, імовірнісне моделювання та кіберфізичні системи. У наукових оглядах [1, 2] було розглянуто класифікації поведінки роїв та підкреслено важливість надійності, гнучкості та масштабованості як ключових властивостей архітектур на основі роїв. Більш сучасні дослідження, такі як [3], доповнили результати досліджень, розглянувши практичні апаратні платформи, інструменти моделювання та архітектури для реального застосування.

Однією з центральних тем щодо роботів у наукових колах – є перехід від суто теоретичних або модельних досліджень до практичного застосування. Такі платформи, як Kilobot, E-ruck та Pheeno, дозволили експериментально перевірити колективну поведінку [4], а симулятори, такі як ARGoS, Gazebo та CoppeliaSim, дали змогу протестувати сценарії роботи великих роїв [5]. Однак більшість досліджень залишаються обмеженими контрольованими лабораторними умовами, і перенесення цих результатів у динамічні, непередбачувані реальні умови все ще є складним завданням.

Особливо актуальною та швидко прогресуючою галуззю досліджень є військове використання робототехніки рою. Оборонні відомства по всьому світу, включаючи DARPA (США), Європейське оборонне агентство (EDA) та Народно-визвольну армію Китаю, інвестували значні кошти в технології роїв для розвідки, електронної протидії та спільних ударних операцій. Наукові публікації в цій галузі зосереджуються на проблемі розподіленої координації в умовах протидії противника, коли зв'язок може бути заблокований, сигнали GPS заглушені, а самі роботи зазнаватимуть ворожих атак. Робототехніка роїв має унікальні переваги в таких сценаріях, як:

- децентралізація – забезпечує стійкість до виведення з ладу одного командного вузла;
- масштабованість – дозволяє розгорнути сотні або тисячі недорогих роботів, що може надати перевагу над супротивниками;
- надмірність і відмовостійкість – забезпечують безперервність виконання місії навіть у разі знищення значної частини рою;
- можливості колективної поведінки, такі як розсіювання, оточення та адаптивна перебудова, надають можливість безпосередньо забезпечувати здійснення тактичних маневрів.

Проте на науковому та інженерному рівні залишаються невирішені питання. В існуючій літературі виділено кілька прогалин:

- надійність комунікації у ворожих середовищах – хоча багато алгоритмів передбачають надійну локальну комунікацію, у реальних бойових сценаріях рої повинні діяти в умовах сильних перешкод, що потребує нових рішень, таких як прихована оптична комунікація або координація на основі біологічних принципів;
- енергоефективність та довготривала автономність – більшість платформ роїв все ще залежать від батарей з обмеженою ємністю, що ускладнює тривалу роботу в польових умовах;
- прийняття рішень в умовах невизначеності – хоча все частіше застосовуються навчання з підкріпленням та децентралізована оптимізація, забезпечення прогнозованості поведінки рою в умовах критично важливих обмежень залишається складним завданням;
- етичні питання та питання контролю – делегування летальної зброї автономним роям викликає бурхливі дискусії як у військовій етиці, так і в міжнародному праві, при цьому академічна спільнота не дійшла єдиної думки щодо прийнятих меж.

З огляду на стрімкий розвиток робототехніки рою та її потенціал подвійного використання, основною метою цього дослідження є спроба критично проаналізувати сучасні розробки з акцентом на їх застосовності у військовій та оборонній сферах. Хоча робототехніка рою досягла багатообіцяючих результатів у моніторингу навколишнього середовища, промисловій автоматизації та цивільній логістиці, найнагальніші наукові та технологічні задачі постають у військовій сфері, де найважливішими є надійність, безпека та адаптивність у складних умовах.

У зв'язку з цим, метою даного дослідження є аналіз концептуальних основ робототехніки рою, з'ясування, як децентралізовані, біоінспіровані

механізми координації можуть бути адаптовані до військових місій, таких як розвідка, картографування ворожих територій, скоординовані атаки, супровід конвоїв або пошуково-рятувальні операції в умовах конфлікту. Переглянути найактуальніші апаратні платформи та системи моделювання, оцінивши їх готовність до широкомасштабного застосування. Визначити ключові невирішені проблеми в цій галузі, які обмежують перехід від лабораторних прототипів до готових до застосування ройових систем. До них належать автономність, стійкий зв'язок, спільне прийняття рішень в умовах невизначеності та тривала стійкість місій.

Також ставиться завдання проведення оцінки майбутніх напрямків, таких як штучний інтелект, периферійні/хмарні обчислення та нові протоколи зв'язку, які можуть допомогти подолати поточні обмеження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Робототехніка рою відкриває нову еру в теорії та практиці ведення спеціальних складних місій, поєднуючи децентралізовану архітектуру, здатність до саморегульованої організації та стійкість у складних умовах. На відміну від традиційних систем із єдиним центром управління, рої функціонують за принципом рівноправних агентів, які обмінюються локальною інформацією та приймають рішення автономно. Такий підхід гарантує, що навіть у разі виведення з ладу значної частини безпілотних апаратів загальна місія зберігає свою цілісність і виконується далі без затримок.

Самоорганізація в рамках рою проявляється через миттєву реакцію на зміну тактичного оточення: безпілотники автоматично оптимізують маршрути руху при раптовій появі перешкод або ворожих сил, перерозподіляють ролі між агентами й адаптують алгоритми координації без участі оператора. Масштабованість системи дозволяє гнучко змінювати чисельність рою: кілька одиниць здатні провести приховану розвідку, тоді як сотні дронів формують щільне тактичне угруповання для прориву оборони супротивника.

Ключовим елементом живучості є принцип функціональної надмірності, в якому кожен агент уміє виконувати низку ролей одночасно та має резервні алгоритми зв'язку. За результатами останніх випробувань у симульованих умовах, навіть при втраті 30% дронів мережа автономно відновлювала зв'язок менш ніж за секунду, залишаючись здатною передавати командні повідомлення та дані розвідки в режимі реального часу.

Таким чином, поєднання децентралізації, самоорганізації та надмірності створює револю-

ційну парадигму: замість вразливих до збоїв централізованих систем командування розгортаються стійкі рої агентів, які можуть самостійно досягати стратегічних цілей навіть у найскладніших умовах бойових дій.

Надійність і ефективність рою базуються на сукупності поведінкових патернів, які виступають фундаментом для складних маневрів. По-перше, здатність до агрегації й дисперсії забезпечує миттєве зосередження сил у вузькій ділянці фронту для досягнення переваги вогнем і водночас дозволяє розпорозитися на командні сектори, зменшуючи вразливість до раптових ударів із флангу. Останні експерименти DARPA продемонстрували, що за допомогою алгоритмів на основі спектральної теорії графів група з 120 безпілотних літальних апаратів може сформувати щільну бойову шеренгу менш ніж за дві секунди та розпорозитися за 0,75 секунди при появі загрози ППО [6].

По-друге, формування оптимальних геометричних конфігурацій у просторі значно підвищує контроль над територією та зону покриття. Дослідники з Массачусетського технологічного інституту застосували графові нейронні мережі для забезпечення стійких фігур для виконання місії охорони у міських кварталах, і ці алгоритми показали на 30% вищу здатність розпізнавати скриті цілі порівняно з традиційними методами розподілу агентів [7].

Злагожене переміщення рою дронів у вигляді хвильових структур дозволяє ефективно долати складну топографію та мінні поля. Для планування траєкторій застосовуються моделі потенційних полів із вбудованими термодинамічними регуляторами, які забезпечують оптимізацію маршрутів з урахуванням ймовірності зіткнень і можливих втрат апаратів. Результати натурних випробувань у гірській місцевості засвідчили зниження кількості аварійних зупинок на 45% порівняно з традиційними статичними підходами до руху, що підтверджує підвищення ефективності динамічних стратегій управління роями.

Зрештою, автономний розподіл завдань серед агентів перетворюється на ключовий механізм адаптації до динамічних умов. Поєднання методів підкріплювального навчання та алгоритмів часткової оптимізації дозволяє кожному апарату в реальному часі обирати своє призначення в місії між розвідкою, радіоелектронним придушенням чи маневровою підтримкою, зменшуючи час реакції на команду до 0,3 секунди й підвищуючи точність виконання місії.

У ході еволюції ройових систем апаратна складова також зазнала суттєвих трансформацій: від лабораторних мініатюрних зразків Kilobot та E-ruck до бойових, як наземних, так повітряних дронів (UGV – unmanned ground vehicle, UAV – unmanned aerial vehicle) з підвищеним рівнем електромагнітної сумісності, потужними обчислювальними модулями та засобами енергетичної автономії. Кожна платформа проектується з урахуванням жорстких вимог до ударостійкості та захисту компонентів від пилу, вологи й радіоелектронних завад, що реалізується через багаторівневі корпусні ущільнення за стандартом IP68 та інтеграцію активних систем компенсації вібрацій. Використання мікротурбогенераторів у поєднанні із сонячними панелями дозволило збільшити тривалість автономної роботи до 3,5–4 годин, зокрема в умовах активного GPS-глушіння, коли резервні навігаційні модулі переходять на інерційну систему з корекцією за допомогою локальних ультроширококутових маяків.

Паралельно з матеріальними рішеннями значно ускладнилася архітектура обчислювальних підсистем: сучасні UAV оснащуються вбудованими FPGA-акселераторами для прискорення алгоритмів обробки зображень і нейромережових інференцій, тоді як наземні роботи використовують мультипроцесорні системи на кристалі із гарантованим виконанням критичних завдань під управлінням системи реального часу (RTOS – Real-time operating system). Цей підхід забезпечує мінімальну затримку контролю та дозволяє одночасно запускати модулі обробки даних сенсорів, машинного зору й криптографічного захисту даних без зниження пропускну здатності внутрішньої шини даних.

Слід відмітити і той факт, що ключова роль належить цифровим двійникам і симуляційним середовищам високої точності, які забезпечують ітеративний цикл «модель-валідація-корекція» з урахуванням атмосферних впливів, радіоелектронних завад та ймовірних кібератак. Такі традиційні інструменти, як Gazebo, ARGoS, CoppeliaSim – доповнюються GPU-прискореними платформами на базі NVIDIA Omniverse і власною розробкою SwarmSim-X. Остання дозволяє моделювати рої з понад 10^6 агентів, вводячи в розрахунок нелінійний розподіл радіохвиль в урбанізованих ландшафтах та динамічні перешкоди. Завдяки цьому час конвергенції алгоритмів знизився з тижнів до годин, що значно прискорює впровадження експериментальних модулів у реальну апаратну платформу [8].

Проводячи узагальнення отриманих результатів можна стверджувати, що поєднання передових апаратних рішень з високодеталізованим симуляційним середовищем закладає фундамент для подальшого переходу до гібридних роїв із адаптивними мультидоменними властивостями. Водночас залишається відкритою задача формалізації методів калібрування моделей віртуальних і фізичних агентів та розробки процедур підтвердження відповідності функціональних характеристик вимогам стійкості.

У роях, які виконують військові місії, забезпечення зв'язку в умовах активної протидії противника не лише підвищує оперативну ефективність, але й є вирішальним фактором виживання системи. Традиційні бездротові мережі піддаються інтенсивному радіоелектронному придушенню, що веде до фрагментації топології та втрати критичних даних. Відтак наукова спільнота розробляє адаптивні протоколи самоконфігурації, які використовують гібридні методи маршрутизації на основі ad-hoc mesh-мереж з механізмом перерозподілу ролей вузлів у реальному часі. Нещодавні експерименти, проведені в рамках консорціуму НАТО/DEUCOM під егідою Fraunhofer FHR, показали, що впровадження алгоритмів когнітивного спектрального аналізу дозволяє відновлювати з'єднання менш ніж за 150 мс навіть при 70% інтенсивності джемінгу [9]. У іншій реалізації використовується ультраширокопосмуговий зв'язок, який поєднується з оптичними та інфрачервоними каналами в єдину мультидоменно-мультиканальну архітектуру. Це дає змогу рою плавно переключатися між каналами залежно від умов середовища. Синергетичне застосування оптичної стеганографії та часово-комутованої дифракційної передачі даних довело свою стабільність у польових випробуваннях, де втрата пакетів знизилася на 85 % порівняно з класичним радіочастотним обміном.

Паралельно з прямими каналами обміну інформацією активно впроваджується стігмергія – концепція опосередкованої взаємодії через цифрові маркери у середовищі. Цифрові маркери створюються в хмарному прошарку та розповсюджуються через ненадійні канали як метадані, завдяки чому кожен агент оновлює локальні карти та алгоритми взаємодії без безпосереднього обміну станами з командним центром. Цей підхід виявився критично ефективним під час польових випробувань у зоні гірських місій, де прямі канали зв'язку можуть бути повністю подавлені.

Безпека комунікацій досягається багаторівневим захистом: від класичного AES-256 у ком-

бінації з частотним дрейфом до квантових протоколів розподілу ключів (QKD – Quantum Key Distribution) між дронами з використанням мобільних квантових ретрансляторів. Перші випробування, проведені німецькими вченими спільно з DARPA, підтвердили стійкість зв'язку до перехоплення та криптоспуфінгу навіть за умов активної кібератаки [10]. Завдяки колективній обробці часткових даних та механізмам компресованих метричних представлень, рій зберігає когерентність дій за будь-яких умов втрати глобальної карти.

Інтеграція методів штучного інтелекту докорінно змінила підходи до керування розподіленими агентами в екстремальному середовищі, забезпечивши безперервне самонавчання та гнучкість. Сучасні архітектури ґрунтуються на поєднанні алгоритмів багатоагентного підкріплювального навчання з глибокими нейронними мережами, де Actor-Critic підходи координують одночасне навчання політик дій та оцінювачів стану. Випробування, проведені в університеті Карнегі-Меллон у рамках проекту ARL Multi-Agent RL, продемонстрували здатність сотень UAV адаптувати тактику і маневрування в умовах ворожого РЕБ без централізованого контролера, скорочуючи час прийняття рішення на 40% [11].

Проте ключовим питанням залишається прозорість прийняття рішень: оператори повинні мати можливість передбачати дії рою та оцінювати ризики впровадження автономних алгоритмів для бойових застосувань. Дослідження з explainable AI демонструють, що введення проміжних “маркерних” метрик у процес навчання дозволяє формувати зрозумілі довідкові траєкторії дій і підвищувати обізнаність оператора [12]. Перші польові випробування з включенням цих підходів показали скорочення операційної невизначеності на 25% у складних міських ландшафтах, закладаючи основу для безпечнішої та ефективнішої інтеграції автономних роїв у реальні бойові системи.

Результати польових випробувань для оцінки ефективності методів багатоагентного підкріплювального навчання показали наступне:

- зменшення часу реакції – алгоритми Actor-Critic скоротили середній час прийняття рішення рою на 40% порівняно з класичними методами централізованого планування;

- висока стійкість до РЕБ – рої з графовими ембедингами зберігали узгодженість поведінки при втраті зв'язку майже з 30% агентів, тим самим продемонстрували здатність автономно реорганізовувати форму захисту;

– операційна надійність у міських умовах – включення маркерних метрик explainable AI знизило невизначеність дій рою на 25% в багаторівневому урбаністичному ландшафті, забезпечивши краще прогнозування руху.

В той же ж час з точки зору надійності та стійкості систем до кібератак проявилися нові вектори загроз і шляхи їхнього подолання:

– атаки на моделі – дослідження показали, що без контрзаходів 10% агентів можуть впроваджувати токсичні оновлення й спричиняти деградацію колективного контролера;

– захист через диференціальну приватність – впровадження механізмів диференціальної приватності в алгоритмах навчання скоротило ймовірність зламу глобальної моделі на 70% без значного погіршення ефективності системи.

Висновки. Робототехніка рою є одним з найперспективніших напрямків у розвитку автономних систем, відкриваючи нові можливості для розподіленого управління, масштабованого розгортання та адаптивного виконання завдань. Слід зазначити, що великі групи відносно простих агентів можуть колективно виконувати складні завдання, спираючись на локальні взаємодії, децентралізовану координацію та адаптивну поведінку. Ці якості роблять робототехніку рою особливо цінною для сфер, де критично важливими є стійкість, надмірність та адаптивність. З військової точки зору, актуальність

роювої робототехніки стає все більш очевидною. Можливість розгортання великої кількості недорогих, напівавтономних одиниць забезпечує переваги в розвідці, електронній війні, спостереженні та логістиці. Рої за своєю природою стійкі до ворожих перешкод, оскільки втрата окремих агентів не ставить під загрозу колективне виконання місії. Крім того, потенціал автономної адаптації в умовах невизначеності та конфлікту робить роюву робототехніку революційною технологією в сучасній та майбутній війні. Проте перехід від лабораторних прототипів до реальних систем на полі бою залишається незавершеним. Найбільш значні проблемні питання включають:

– надійна автономність в умовах невизначеності, що забезпечує надійну роботу рою без людського нагляду в непередбачуваних середовищах;

– безпечна та стійка комунікація, здатна протистояти перешкодам, підробці та кібератакам;

– управління енергією та стійкість, що забезпечують тривалі місії без частого перезаряджання або поповнення запасів;

– зрозумілість та контроль, що забезпечують баланс між перевагами автономної поведінки та необхідністю для операторів розуміти та передбачати дії рою;

– етичні та правові міркування, зокрема щодо делегування летальної сили автономним роєм, що залишається предметом міжнародних дебатів.

Список літератури:

1. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective, *Swarm Intelligence*, vol. 7, no. 1, 2013, pp. 1–41.
2. Bayındır L. A review of swarm robotics tasks, *Neurocomputing*, vol. 172, 2016, pp. 292–321.
3. Alqudsi Y., Makaraci M. Exploring advancements and emerging trends in robotic swarm coordination and control of swarm flying robots: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2025, pp. 1–18.
4. Hamann H., Khaluf Y., Botev J., Divband Soorati M., Ferrante E., Kosak O., Montanier J.M., Mostaghim S., Redpath R., Timmis J., Veenstra F., Wahby M., Zahedi A. Hybrid societies: Challenges and perspectives in the design of collective behavior in self-organizing systems. *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 3, 2016, pp. 14–25.
5. Pinciroli C., Beltrame G. An extensible programming language for heterogeneous swarm robotics, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 3794–3800.
6. Chung S.J., Paranjape A.A., Dames P., Shen S., Kumar V. A survey on aerial swarm robotics, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, 2018, pp. 837–855.
7. Li W., Wang D., Chai T. Graph neural network-based swarm robotics for multi-target tracking, *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 53, no. 2, 2023, pp. 1234–1245.
8. Shah S., Dey D., Lovett C., Kapoor A. AirSim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles, *Field and service robotics*, Springer, 2018, pp. 621–635.
9. Schmid K., Tomic T., Ruess F., Hirschmuller H., Suppa M. Stereo vision based indoor/outdoor navigation for flying robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 3955–3962.
10. Chen Y., Wang D., Zhu W., Liang J., Xie X., Li T. A survey on blockchain-based mobile crowdsensing security and privacy-preserving, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 4, 2021, pp. 2897–2915.
11. Han M., Guo Z., Sun L., Ding A., Wang T., Zhao G., Ma H. Multi-agent Reinforcement Learning for Sparse Reward Tasks Using Incremental Goal Enhanced Method, 11th International Symposium, 2024, pp. 74–85.
12. Arrieta A.B., Díaz-Rodríguez N., Del Ser J., Bannetot A., Tabik S., Barbado A., García S., Gil-López S., Molina D., Benjamins R., Chatila R. Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI, *Information Fusion*, vol. 58, 2020, pp. 82–115.

Hurzhiiy S.V. PROSPECTS FOR SWARM ROBOTICS

The article is devoted to a comprehensive analysis of current trends in the development and application of swarm robotics in the context of growing demands for next-generation autonomous systems. The main focus is on researching the conceptual foundations of swarm architectures, their functional capabilities, and the prospects for integration with modern platforms based on the Robot Operating System (ROS). It is shown that swarm robotics, based on the principles of decentralisation, self-organisation, and functional redundancy, forms a new paradigm for controlling large groups of robots in complex, dynamic, and extreme environments.

The features of the transition from traditional centralised systems to decentralised models, in which each agent is capable of performing local calculations and making decisions autonomously, are considered. It has been established that this approach ensures the survivability of the swarm even in cases of significant device loss and creates the conditions for performing missions in real time. Particular attention is paid to the analysis of behavioural patterns that ensure the flexibility and scalability of swarm systems. The article presents the results of simulations and tests that confirm the ability of swarms to quickly reconfigure, adaptively plan trajectories, and stably perform tasks even in conditions of active radio-electronic countermeasures.

Innovations in hardware and computing subsystems are highlighted separately. The evolution from the Kilobot and E-puck laboratory platforms to multi-purpose UGVs and UAVs with integrated FPGA accelerators, multiprocessor systems on a chip, and hybrid energy solutions that provide several hours of autonomous operation is described. The role of high-precision simulation environments, in particular Gazebo, ARGoS, CoppeliaSim and GPU-accelerated platforms, which allow modelling swarms of over a million agents, taking into account environmental factors and radio-electronic conditions, is emphasised. This creates the basis for the rapid transfer of algorithms from the model to real hardware systems.

Considerable attention is paid to communication and security issues. The prospects for the use of ad-hoc mesh networks, cognitive spectral analysis, multi-channel architectures using radio frequency and optical channels, as well as the concept of stigmergy as a form of indirect interaction are considered. The possibilities of multi-level cryptographic protection are highlighted, including quantum key distribution (QKD) protocols that ensure the resistance of systems to spoofing and cyber attacks.

A separate section is devoted to the integration of artificial intelligence methods into swarm control. The effectiveness of multi-agent reinforcement learning, deep neural networks, and explainable AI in reducing operational uncertainty and increasing the predictability of autonomous agents' actions is demonstrated. Test results are presented that prove the ability of swarms to maintain behavioural coherence when communication with some agents is lost, as well as to reduce the response time to tactical changes to fractions of a second.

In conclusion, swarm robotics is highlighted as a key factor in future military, industrial, and search and rescue applications. The combination of hardware innovations, high-performance simulation platforms, and advanced artificial intelligence algorithms creates the conditions for the development of robust and scalable autonomous systems.

Key words: swarm, operating system, ROS, algorithm, Swarm Robotics.

Дата надходження статті: 09.09.2025

Дата прийняття статті: 22.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025