

ОСОБЛИВОСТІ МУЛЬТИАГЕНТНИХ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

Проведено дослідження застосування наземних роботів у складних ландшафтах, зокрема в умовах пошуково-рятувальних операцій. Використовуючи платформу SmythOS, що підтримує мультиагентні системи, роботизовані агенти ефективно координують навігаційні завдання, адаптуються до змінних умов ландшафту та забезпечують стабільність завдяки інтегрованим алгоритмам планування та моніторингу.

Ключові слова: безпілотний наземний транспортний засіб, SmythOS, мультиагентні системи, навігація, складні планування руху, ландшафти, пошуково-рятувальні операції.

Група роботів, які безперешкодно працюють разом, щоб рятувати постраждалих після техногенної катастрофи, це одна з нагальних сфер застосування мультиагентних роботизованих систем (МАРС). Оскільки розробники розширюють межі штучного інтелекту та робототехніки, то спільне використання МАРС стають затребуваними у різних галузях. МАРС в робототехніці можуть передбачати співпрацю кількох роботів для виконання складних завдань, які були б неможливими для однієї машини. Але координація роботизованої групи пов'язана зі значними труднощами: забезпечення безперебійної комунікації між роботами в непередбачуваних середовищах, розроблення алгоритмів, які дозволять роботам приймати рішення за короткий час. Інтеграція мультиагентних систем в існуючі технологічні інфраструктури є складним завданням. Передові системи штучного інтелекту часто мають труднощі з безперешкодною інтеграцією із застарілими системами через фундаментальний розрив між їхньою розподіленою, автономною природою та жорсткою, централізованою архітектурою, поширеною в багатьох корпоративних технологічних середовищах.

Успішна мультиагентна інтеграція залежить від комунікації – як між агентами, так і з ширшою технологічною інфраструктурою. Забезпечення безперебійного обміну даними є критично важливим. Щоб мультиагентні системи були ефективними, ключовим фактором є сумісність. Це виходить за рамки простої технічної сумісності – йдеться про створення технологічної інфраструктури, де агенти можуть безперешкодно співпрацювати, обмінюватися інформацією та використовувати сильні сторони один одного.

У системі управління ланцюгом поставок, де автономні агенти займаються різними аспектами логістики, один агент може оптимізувати маршрути доставки, а інший керувати рівнем запасів. Щоб МАРС працювала ефективно, агентам потрібна спільна мова та спільне розуміння загальних цілей. Агенти повинні мати можливість без зусиль обмінюватися даними, адаптуючи свої стратегії на основі інформації в режимі реального часу від інших агентів групи.

Досягнення такого рівня сумісності часто вимагає розробки нових рішень проміжного програмного забезпечення або впровадження стандартів, спеціально розроблених для мультиагентних архітектур. Це складне завдання, але потенційні переваги – підвищення ефективності, покращення процесу прийняття рішень та покращена адаптивність – роблять його вигідною інвестицією для багатьох організацій.

З погляду технічних аспектів важливо не випускати з уваги людський фактор в інтеграції мультиагентних систем. IT-персоналу та кінцевим користувачам, можливо, доведеться адаптувати робочі процеси та ментальні моделі для ефективної взаємодії з новими МАРС на базі штучного інтелекту. Інтеграція мультиагентних систем в існуючі технологічні інфраструктури створює значні труднощі, але потенційні вигоди є суттєвими. Зосереджуючись на безперебійній комунікації, обміні даними та сумісності, організації можуть використовувати можливості цих передових фреймворків штучного інтелекту для стимулювання інновацій та отримання конкурентної переваги.

Планування руху в динамічних середовищах [1] стало вирішальним викликом у робототехніці та автономних системах, що швидко розвивається. Склад, заповнений роботизованими вилковими навантажувачами, або жваве перехрестя, яким керують безпілотні автомобілі. Наведені сценарії вимагають складних алгоритмів, здатних орієнтуватися в складних, постійно мінливих ландшафтах. Планування руху для мультиагентних систем повинно вирішувати дві ключові задачі: уникнення перешкод та координація рухів між агентами. Для цього завдання можливим є використання гіперграфів на основі навігації. Розумні дорожні карти, які допомагають роботам ефективно планувати свої маршрути, адаптуючись на ходу до змін середовища. Такий підхід дозволяє створювати більш масштабовані рішення, що дозволяє більшим групам

роботів безперервно працювати в обмеженому просторі. Адаптивна координація роботів використовує розумну стратегію, об'єднуючи роботів для планування лише тоді, коли це абсолютно необхідно. Таким чином, досягається баланс між точністю скоординованих рухів та обчислювальною ефективністю незалежного планування. Завдяки підходам, вирішується завдання уникнення перешкод у динамічних умовах. Замість того, щоб покладатися на жорсткі, заздалегідь запрограмовані траєкторії, роботи тепер можуть плавно реагувати на навколишнє середовище, подібно до того, як ви можете петляти крізь заповнений тротуар.

Оскільки роботи дедалі більше інтегруються в наше повсякденне життя та робочі місця, управління взаємодією між людьми та кількома роботизованими агентами стало критичним завданням. Взаємодія людини і робота (HRI) у мультиагентних системах має на меті сприяти безперервній співпраці між людьми та командами роботів, які працюють разом над складними завданнями. Розумний розподіл обов'язків між членами команди керування МАРС та роботизованими агентами має вирішальне значення для максимізації загальної продуктивності системи. Алгоритми розподілу завдань повинні враховувати унікальні можливості як людей, так і роботів, призначаючи обов'язки, які відповідають сильним сторонам кожного агента. Наприклад, роботи можуть бути краще пристосовані для повторюваних фізичних завдань, тоді як люди досягають успіху в прийнятті рішень на високому рівні та творчому вирішенні проблем. Чіткі та ефективні канали зв'язку між людьми та роботами є важливими для координації в мультиагентних командах. Це включає розробку інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів для передачі людьми інструкцій роботам, а також методів для ефективної передачі роботами свого статусу, намірів та будь-яких проблем, що виникають. Мультимодальна комунікація, що включає мову, жести та візуальні підказки, може покращити взаєморозуміння між членами команди, що складається з людей та роботів.

Оскільки багато роботів працюють поблизу людей, надзвичайно важливими є надійні протоколи безпеки, які включають впровадження систем запобігання зіткненням, визначення чітких операційних меж та встановлення процедур екстреної зупинки. Крім того, роботи повинні бути запрограмовані на рух за передбачуваними схемами [2], які здаються природними та безпечними для їхніх людських аналогів.

МАРС координують роботу кількох інтелектуальних агентів для вирішення складних проблем. Логістика ланцюга поставок також вииграє від використання МАРС. Агенти обмінюються даними про запаси в режимі реального часу, прогнозами попиту та умовами доставки, що дозволяє швидко вносити корективи, щоб уникнути дефіциту товарів та мінімізувати витрати на зберігання. Координація МАРС призводить до більш гнучких та адаптивних ланцюгів поставок. У пошуково-рятувальних операціях МАРС координують команди роботів для дослідження зон лиха, обміну інформацією та пошуку поранених. У промислових умовах мультиагентні системи трансформують автоматизацію. Роботи на складальних лініях взаємодіють між собою та адаптуються до змін у режимі реального часу, оптимізуючи виробничий процес та зменшуючи час простою. Гнучкість МАРС дозволяє виробникам швидко змінювати виробництво відповідно до змінних вимог ринку.

Ефективність МАРС полягає в їхній масштабованості та адаптивності. У міру того, як завдання стають складнішими, ці системи можуть безперешкодно інтегрувати додаткових агентів (рис. 1), кожен з яких надає спеціалізовані можливості. Такий розподілений підхід підвищує стійкість; якщо один агент виходить з ладу, інші можуть компенсувати це, забезпечуючи безперервність операцій. В роботі МАРС також використовує двосторонній підхід: диверсифікація джерел даних та впровадженні ретельних процесів оцінювання виконання завдань агентами.

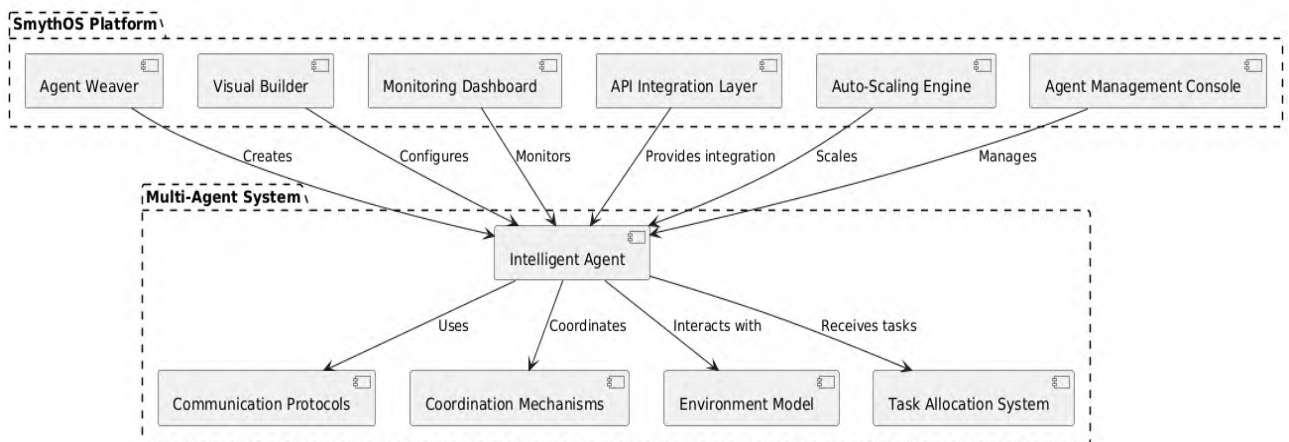


Рис. 1. Архітектура МАРС на базі SmythOS-платформи

Для боротьби з упередженнями вкрай важливо використовувати широкий спектр даних для збору навчальних даних [3]. Це означає активний пошук інформації з різних джерел, які представляють різні точки

зору, досвід та демографічні показники, що робить можливим створити більш повний та збалансований набір даних, який краще відображає складність реального світу. Збір різноманітних даних – це лише половина справи. Не менш важливим є постійний процес оцінки та вдосконалення цих наборів даних для викорінення прихованих упереджень. Даний процес включає як автоматизований аналіз, так і людський нагляд для виявлення закономірностей, які можуть свідчити про несправедливе ставлення або представництво. Один з ефективних методів полягає в регулярному тестуванні мультиагентної системи за допомогою ретельно розроблених сценаріїв, спрямованих на виявлення потенційних упереджень. Вирішення проблеми упередженості в MAPC – це постійний виклик, який вимагає пильності та відданості. Оскільки ці системи стають дедалі поширенішими та впливовішими в нашому повсякденному житті, забезпечення їхньої справедливості та точності стає дедалі важливішим.

Зобов'язавшись із дотриманням різноманітних методів збору даних та ретельної оцінки, можемо працювати над створенням мультиагентних систем, які не лише ефективно виконують свої завдання, але й сприяють рівності та справедливості в процесах прийняття рішень. Динамічна природа мультиагентних систем вимагає пильного нагляду та регулярного налаштування. Безперервний моніторинг слугує основою для підтримки максимальної продуктивності та адаптації до змінюваних викликів. Використовуючи зворотній зв'язок автономних наземних агентів та аналітичні дані, організації можуть проактивно вдосконалювати операції MAPC [4; 5]. Розгортання MAPC часто виявляє непередбачені складнощі. Надійна система моніторингу фіксує важливі показники, допомагаючи командам виявляти вузькі місця, неефективність та нові закономірності. Дані формують основу для прийняття рішень на основі фактичних даних та цілеспрямованих покращень. Зворотній зв'язок надає важливі дані для практичного впливу у мультиагентних системах.

Надіслані дані висвітлюють проблемні точки, розкривають нові варіанти використання та пропонують нові погляди на функціональність системи. Активне отримання та аналіз даних агентів гарантує, що зусилля з розробки MAPC пов'язані з реальними потребами. Практичність безперервного моніторингу полягає в ітеративному механізмі [6]. Кожен раунд збору та аналізу даних сприяє наступному набору вдосконалень, що створює корисний цикл удосконалення, дозволяючи мультиагентним системам швидко розвиватися та адаптуватися.

Ефективна адаптація залежить від здатності отримувати змістовні висновки з зібраних даних. Передові методи аналітики та машинного навчання можуть виявляти тонкі закономірності та кореляції, які можуть вислизнути з-під контролю людини, що спонукає до цілеспрямованих оновлень MAPC (рис. 2), від точного налаштування поведінки окремих безпілотних наземних транспортних засобів, що контролюються агентами, до аналізу структури взаємодії.

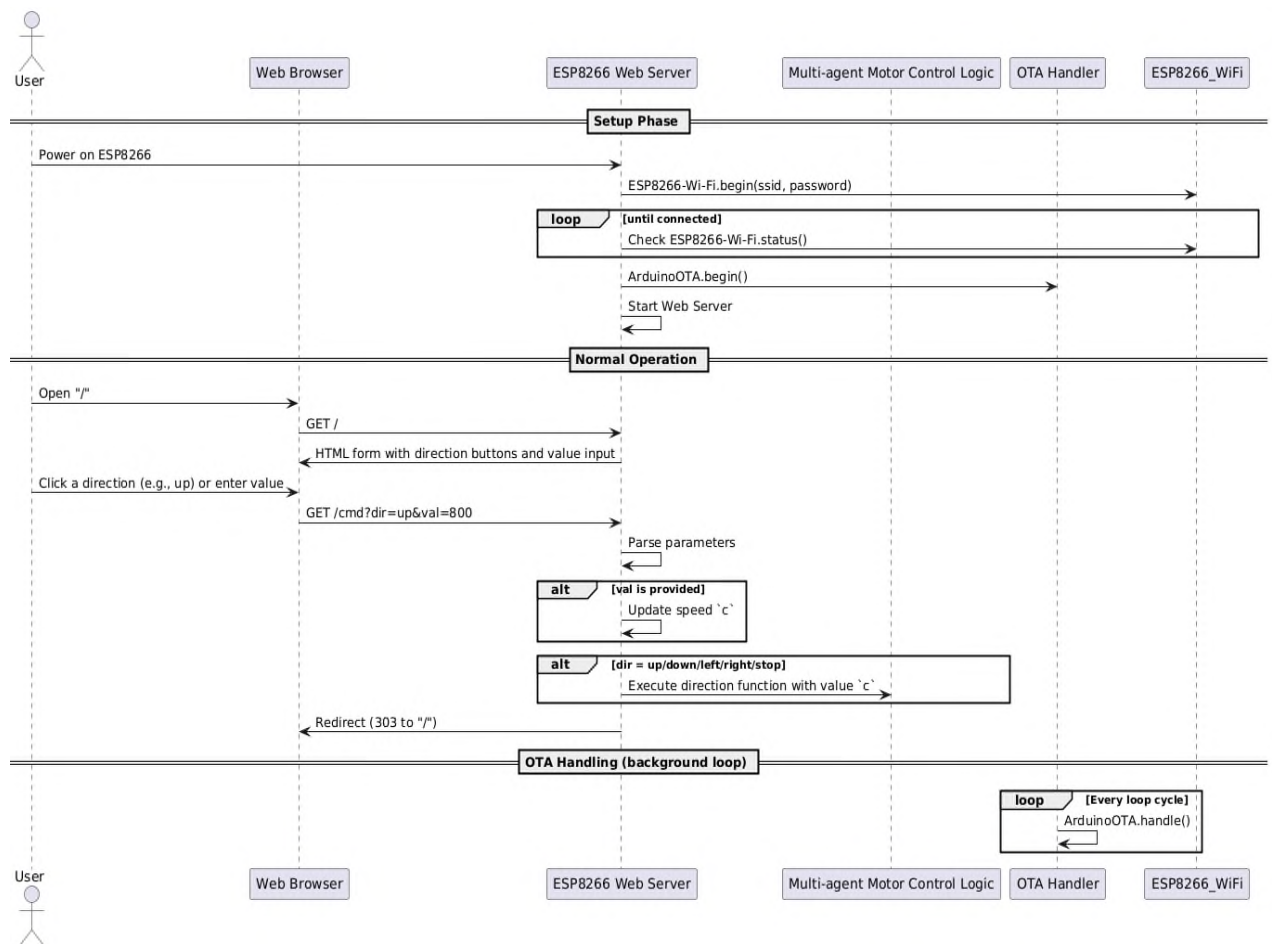


Рис. 2. Діаграма послідовності взаємодії автономного наземного агента з МАРС

Стратегії адаптації МАРС повинні збалансовувати короткострокові рішення з довгостроковою стійкістю. Регулярні перевірки стану МАРС можуть допомогти групам агентів залишатися проактивними. Оцінки можуть включати аналіз тенденцій продуктивності, перегляд ключових цілей та оцінку відповідності системи ширшим цілям організації. Дотримуючись такого дисциплінованого підходу, організації можуть забезпечити, щоб мультиагентні системи залишалися передовими та забезпечували стабільну цінність.

Оскільки МАРС вирішують складні навігаційні завдання, важливість надійних процесів моніторингу та вдосконалення неможливо переоцінити. SmythOS трансформує розробку мультиагентних систем завдяки своїй комплексній платформі. Платформа пропонує потужні функції, призначені для оптимізації створення та розгортання складних розподілених роботизованих систем. В основі SmythOS лежить інтуїтивно зрозумілий візуальний конструктор робочих процесів. Цей інструмент дозволяє розробникам створювати складні моделі поведінки та взаємодії агентів. Забезпечуючи графічний інтерфейс для проєктування МАРС, SmythOS значно скорочує час розробки та знижує поріг входу для створення складних мультиагентних систем. Вбудовані можливості моніторингу відрізняють SmythOS від традиційних платформ. Інструменти SmythOS пропонують аналітику продуктивності агентів та стану системи в режимі реального часу, що дозволяє розробникам швидко виявляти та вирішувати проблеми. Такий рівень контролю має вирішальне значення для підтримки надійності розподілених роботизованих систем, особливо в промислових умовах, де простої можуть бути дорогими.

Для розподілених роботизованих застосувань SmythOS пропонує масштабованість. Архітектура платформи розроблена для обробки зростаючої кількості наземних роботизованих агентів та зростаючих робочих навантажень без шкоди для продуктивності. Така масштабованість гарантує, що по мірі розширення ваших роботизованих систем SmythOS зростатиме разом з вами, зберігаючи ефективність та надійність. Безпека є головним пріоритетом у SmythOS, завдяки надійним функціям, вбудованим в ядро платформи. Це особливо важливо для розподілених систем, де групи агентів можуть працювати в різних місцях або середовищах. SmythOS забезпечує шифрування, контроль доступу та безпечні протоколи зв'язку для захисту ваших мультиагентних систем від потенційних загроз.

Однією з найважливіших переваг SmythOS є підхід до розробки агентів. Використовуючи SmythOS для розробки мультиагентних систем, організації можуть значно скоротити час і ресурси, необхідні для втілення складних роботизованих програм. Поєднання платформи інструментів візуального проєктування, надійного моніторингу, можливостей безперешкодної інтеграції та масштабованої архітектури робить SmythOS ідеальним вибором для різних галузей промисловості, від виробництва та логістики до сільського

господарства та інших. Інтеграція різноманітних роботизованих об'єктів у цілісні одиниці є серйозною перешкодою. Кожен агент має власні можливості, обмеження та потенційну несумісність. Координація мультиагентних елементів в ефективну систему є складною, але ефективність потенційного застосування передових мультиагентних систем є величезним. Від команд реагування на стихійні лиха, які орієнтуються в небезпечних середовищах, до виробничих цехів, де роботи співпрацюють для підвищення продуктивності, вплив на різні галузі використання SmythOS для побудови MAPC може бути суттєвим.

Подолання поточних обмежень є ключем до розкриття можливостей MAPC, що включає: розробку складних протоколів зв'язку, вдосконалення алгоритмів прийняття рішень та створення гнучких рамок для масштабованості та адаптації. Вирішення зазначених проблем призведе до створення більш ефективних, стійких мультиагентних систем, здатних обробляти дедалі складніші завдання. Такі платформи, як SmythOS, відіграють вирішальну роль у цьому мінливому середовищі і надають розробникам інструменти та інфраструктуру для створення, тестування та розгортання мультиагентних систем, прискорюючи прогрес у логістичній навігації. SmythOS зосереджується на безшовній інтеграції та масштабованих рішеннях, долаючи розрив між поточними можливостями та майбутніми прагненнями. Майбутнє робототехніки тісно пов'язане з розвитком мультиагентних систем. Кожна подолана перешкода MAPC наближає до світу, де роботи працюють разом з безпрецедентною ефективністю та адаптивністю, трансформуючи галузі та переосмислюючи можливості автоматизації.

References

1. Zeng, Z., Wei, Y., & Kang, J. (2025). TinyMA-IEI-PPO: Exploration incentive-driven multi-agent DRL with self-adaptive pruning for vehicular embodied AI agent twins migration (Version 1). arXiv. DOI: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2505.00055>.
2. Yurchenko, O. V., Burlachenko, I. S. (2024). Multi-agent monitoring system for fire detection in buildings. *Proceedings of Technical Sciences*, 155 [in Ukrainian].
3. Ma, Y., Khan, Q., & Cremers, D. (2023, September). Multi agent navigation in unconstrained environments using a centralized attention based graphical neural network controller. In 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 2893–2900). IEEE.
4. Boldrer, M., Antonucci, A., Bevilacqua, P., Palopoli, L., & Fontanelli, D. (2022). Multi-agent navigation in human-shared environments: A safe and socially-aware approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 149, 103979. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103979>.
5. Goonatileke, S. T., & Hettige, B. (2022). Past, present and future trends in multi-agent system technology. *Journal Européen Des Systèmes Automatisés*, 55(6), 723–739. DOI: <https://doi.org/10.18280/jesa.550604>.
6. Krainyk, Y. M., Razzhyvin, A., Bondarenko, O., & Simakova, I. (2019, April). Internet-of-Things device set configuration for connection to wireless local area network. *CMIS* (pp. 885-896).

DOI 10.34132/mspc2025.01.06.15

Nikita Hiulmamedov,
Ivan Burlachenko

FEATURES OF MULTI-AGENT ROBOTIC SYSTEMS

The research explores the use of ground robots in complex landscapes, particularly in search-and-rescue operations. Using the SmythOS platform, which supports multi-agent systems, robotic agents efficiently coordinate navigation tasks, adapt to changing landscape conditions, and ensure stability through integrated planning and monitoring algorithms.

Keywords: *unmanned ground robots, SmythOS, multi-agent systems, navigation, complex motion planning, landscapes, search-and-rescue operations.*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Nikita Гюльмамедов, бакалаврант спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: nikitagulmamedov@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-1106-5367>.

Nikita Hiulmamedov, BSc Student of specialty 123 Computer Engineering at the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: nikitagulmamedov@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-1106-5367>.

Іван Бурлаченко, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ivan.burlachenko@chmmu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5088-6709>.

Ivan Burlachenko, Senior Lecturer of the Computer Engineering Department at the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ivan.burlachenko@chmmu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5088-6709>.

© Н. Гюльмамедов, І. Бурлаченко
20.05.2025.

Стаття отримана редакцією

