

Петренко Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Протасов А.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ АВТОНОМНОСТІ МОБІЛЬНИХ КОЛІСНИХ РОБОТІВ

У статті розглядаються дослідження, які направлені на удосконалення алгоритмів керування мобільними колісними роботами. Сьогодні мобільні колісні роботи є невід'ємною складовою ряду високотехнологічних сфер, включаючи промисловість, медицину, сільське господарство, логістику та повсякденне життя. Вони знаходять широке застосування у доставці, складській логістиці, обслуговуванні пацієнтів у лікарнях, а також в різних аспектах сільського господарства. Розвиток інтелектуальних систем керування дозволяє цим роботам стати все більш автономними та ефективними, відкриваючи нові можливості для підвищення продуктивності та покращення якості життя. Проведені різними групами науковців дослідження методів навчання роботів можна розділити на дві групи: навчання одиночних роботів та групи мобільних колісних роботів. Ряд авторів працюють над розвитком алгоритмів навігації роботів, які базуються на отриманих зображеннях. Актуальною залишається проблема навігації мобільних роботів в динамічних середовищах, яка потребує вдосконалення інтелектуальних систем керування для забезпечення ефективного та безпечного руху, як одного так і групи роботів. Автори розробляють концепцію розрідженого рою, яка передбачає можливість координувати свої дії навіть на значних відстанях один від одного. Піднімається проблема ефективного планування та координації дій систем з багатьма роботами у складних незв'язаних середовищах, де існує обмежена або ненадійна комунікаційна інфраструктура. Дослідниками пропонується новий епістемічний підхід до планування, який дозволяє роботам враховувати невизначеність та здатність до адаптації при відсутності зв'язку. Вирішення таких проблем дозволить значно підвищити ефективність застосування роботів у соціальній і професійній сферах діяльності людини.

Ключові слова: мобільні колісні роботи, інтелектуальні системи керування, автономність, машинне навчання, штучний інтелект.

Постановка проблеми. Колісні мобільні роботи є важливою складовою сучасної робототехніки та автоматизації. Початки їх розвитку сягають далекої історії, проте суттєвий прогрес у цій галузі був досягнутий в останні десятиліття. Роботи з колісною базою відрізняються маневреністю та здатністю до переміщення по різноманітному покриттю. Вони використовуються у багатьох сферах, зокрема в промисловості, медицині, логістиці, сільському господарстві тощо. Розвиток сучасних технологій дав поштовх для вдосконалення колісних мобільних роботів, включаючи вдосконалення систем керування за рахунок штучного інтелекту для автономності, розширення функціональності за рахунок додавання різноманітних сенсорів, а також підвищення продуктивності, надійності та безпеки. У сучасному світі колісні мобільні роботи відіграють ключову роль

у вирішенні багатьох завдань, що стоять перед суспільством, таких як автоматизація виробництва, рятувальні операції, обслуговування інфраструктури, дослідження невідомих або небезпечних територій тощо. Незважаючи на досягнені успіхи, інтелектуальні системи керування рухом мобільних роботів потребують подальшого розвитку. Це включає в себе постійне вдосконалення алгоритмів, розширення функціональності для роботи в нових умовах, а також розробку нових методів координації та співпраці між роботами. Тільки через постійні дослідження та інновації інтелектуальні системи керування рухом мобільних роботів зможуть ефективно відповідати на виклики сучасного технологічного світу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метою останніх досліджень стало пошук алгоритмів обробки даних і машинного навчання, удо-

сконалення систем збору інформації про навколишнє середовище для адаптації робота до змін у реальному часі. Ці системи дозволяють роботам ефективно орієнтуватися в різних умовах, уникати перешкод, планувати оптимальні маршрути та співпрацювати у групах для досягнення загальних цілей. Важливість інтелектуальних систем керування рухом мобільних роботів полягає в їх здатності до автономної роботи в реальних умовах, що робить їх незамінними для застосування у різних сферах.

Інтелектуальні системи керування для колісних мобільних роботів базуються на синтезі різних технологій, включаючи машинне навчання [1, 2], штучний інтелект [3, 4], аналіз даних, системи глобального і локального позиціонування [5, 6], тощо. Науковці активно працюють над розробкою алгоритмів, які дозволять роботам ефективно орієнтуватися в різних умовах, адаптуватися до змін оточення та виконувати завдання з високою точністю.

Однією з ключових областей досліджень є розробка систем штучного інтелекту, які дозволяють роботам самостійно приймати рішення на основі отриманих даних [7]. Крім того, науковці активно вивчають аспекти безпеки та взаємодії з людьми для розробки систем, які забезпечать безпечне співіснування колісних мобільних роботів та людей в різних сферах діяльності [8].

Постановка завдання. Метою даної роботи є аналіз сучасних автоматизованих технологій керування мобільним колісним роботом, та визначення напрямку подальшого розвитку цих технологій.

Виклад основного матеріалу. Використання нейронних мереж та глибинного навчання дозволяє роботам адаптуватися до нових ситуацій та розвивати стратегії дій, що покращує їхню продуктивність та витрати ресурсів.

1. Навчання одиночних роботів

У дослідженні [9] автори зосередилися на розвитку алгоритмів навігації роботів, які базуються на зображеннях. Відзначається, що із зростанням популярності технологій, що використовують зображення для візуального керування роботами, стає важливим розв'язання проблеми вибору оптимальних дій алгоритмів навігації на основі отриманих зображень.

У попередніх дослідженнях автори використовували методи, які базувалися на мінімізації вартості переходу між станами для вибору дій робота. Однак ці підходи не завжди були ефективними, особливо коли кінцева ціль розташована далеко від початкової. У зв'язку з цим, автори

запропонували нову метрику, відому як досяжність завдання, яка дозволяє оцінити ефективність дій робота при плануванні шляху на основі зображень. Щоб оцінити досяжність завдання, автори розробили прямий та непрямий підходи. Перший полягав у навчанні моделі на основі трансформатора зору, яка безпосередньо виводила метрику з вхідних зображень. Другий підхід передбачав прогнозування майбутнього стану робота відповідно до запланованого шляху і використання цього прогнозу для оцінки досяжності завдання (рис. 1).

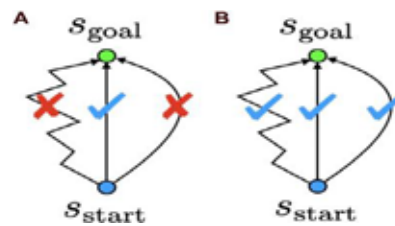


Рис. 1. Концептуальна різниця між традиційним плануванням маршрутів – оптимальним (А) та запропонованим – не обов'язково оптимальним (В) [9]

Експерименти, проведені в змодельованому середовищі, схожому на вітальню, показали успішність планування шляху з використанням нової метрики, навіть у випадках, коли інші підходи не були ефективними. Однак в ході дослідження виявлено проблеми з нестабільністю навігації та коливаннями, над якими автори планують працювати в подальших дослідженнях.

У статті [10] було проведено дослідження порівняльного аналізу двох підходів до створення автономних агентів з метою вирішення складних завдань. Перший підхід базується на глибокому навчанні з підкріпленням DRL (Deep Reinforcement Learning), в той час як другий використовує моделі поведінки людини, засновані на динамічному програмуванні з математичною оптимізацією DPMP (Dynamical Perceptual-Motor Primitives).

У роботі досліджувалася ефективність обох підходів в умовах виконання різних завдань, враховуючи їхню здатність адаптуватися до змінних умов та навколишнього середовища. Автори звернули увагу на переваги та недоліки кожного підходу, зокрема, на складність налаштування та надмірну чутливість до змін у випадку агентів DRL, а також на складності врахування індивідуальних структур винагороди для моделей DPMP.

Крім того, автори пропонують гібридний підхід DPMP-DRL, який поєднує переваги обох під-

ходів та дозволяє досягти кращих результатів в створенні автономних агентів. Цей гібридний підхід надає можливість моделям DRL вивчати процеси прийняття рішень на високому рівні, зберігаючи стабільність динаміки дій за допомогою моделей DPMP. Дане дослідження сприяє розумінню та розвитку методів створення автономних агентів у різних сферах застосування штучного інтелекту.

Актуальна проблема навігації мобільних роботів в динамічних середовищах розглядається в роботі [11]. Навіть за наявності різноманітних методів навігації, виникає необхідність у вдосконаленні ефективних та надійних підходів, здатних вирішувати проблеми оптимальної навігації в реальному часі та уникнення зіткнень. У роботі пропонується новий алгоритм логарифмічної увігнутої моделі прогнозуючого контролера (MPC), який розв'язує зазначені проблеми за допомогою унікального підходу до формулювання функцій вартості та динамічних обмежень. Основою алгоритму є структура рекурентної нейронної мережі (RNN), яка порівнюється з іншим інструментом оптимізації CVXOPT. Застосування нейронних мереж у поєднанні з прогностичним контролером моделі розв'язує проблеми оптимального керування локально поблизу робота, забезпечуючи обчислювальну ефективність та здатність працювати з нелінійними та складними системами (рис. 2).

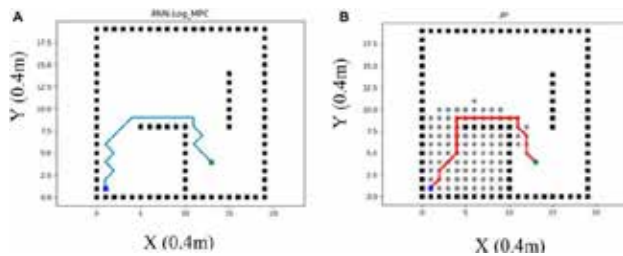


Рис. 2. Метод планування шляху RNN у статичному середовищі [11]

У результаті дослідження доведено успішне впровадження та оцінку запропонованого алгоритму, який перевершує інші методи, такі як RRT, A-Star і LQ-MPC, з точки зору надійності та швидкості. Подальші дослідження автори бачать у застосовності методології в реальних умовах за допомогою симуляторів, таких як Gazebo або VREP, для додаткового підтвердження та отримання більш детальної інформації щодо результатів.

У роботі [12] пропонується структура, спрямована на подолання проблеми розрідженості

даних навчання з глибоким підкріпленням (DRL) у складних областях. Це досягається через розробку методології навчання агенту DRL та його інтеграцію у автомобільне середовище. Запропонована методологія використовує доступні домени для навчання агенту вирішувати навігаційні проблеми, такі як уникнення перешкод, і дозволяє агенту узагальнювати складні та недоступні домени, наприклад, морське середовище, з мінімальним подальшим навчанням.

Основними елементами запропонованої методології є інтеграція агенту DRL на високому рівні керування автомобілем та використання існуючого планування маршруту і методів контролю низького рівня, які вже використовуються в різних доменах. В результаті розроблено пакет автономії з третинним багаторівневим контролером, який дозволяє агенту DRL взаємодіяти на встановленому високому рівні керування та бути відокремленим від динаміки автомобіля та обмежень навколишнього середовища.

Прикладом використання цієї методології є глибокий алгоритм навчання Deep Q Network (DQN), який навчається у змодельованому наземному середовищі і перевіряється на його здатність узагальнювати між різними доменами, такими як морське середовище. Експериментальна перевірка включала в себе змодельоване середовище водної поверхні та реальне розгортання роботизованих платформ як на наземному, так і на водному середовищі (рис. 3).

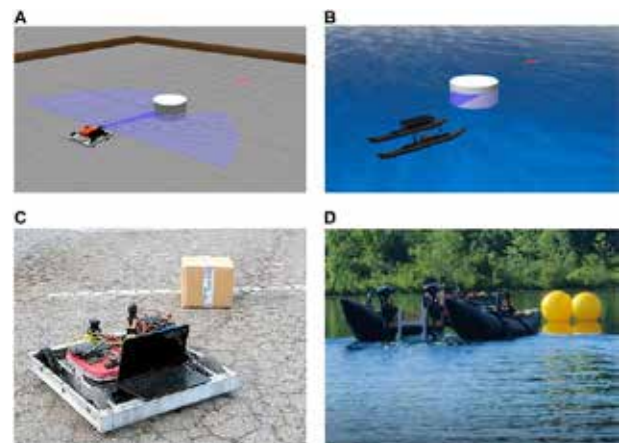


Рис. 3. Уникнення перешкод під час моделювання (A, B) і у реальному світі (C, D) [12]

Отримані результати показують, що запропонована методологія дозволяє ефективно використовувати доступні та багаті даними наземні домени для розробки агентів DRL для навігації автономних надводних апаратів. Це зменшує час і витрати, пов'язані з навчанням у складних сфе-

рах реального світу, і дозволяє установам, які не мають доступу до моря, розробляти агентів для морських застосувань.

Новий підхід до автономної навігації мобільних роботів, що поєднує традиційні методи глобального та локального планування з методами глибокого навчання з підкріпленням (DRL) пропонують автори статті [13]. Зазначається, що підвищення точності автономної навігації у середовищі з динамічними перешкодами є актуальною проблемою, і традиційні методи навігації часто недостатньо ефективні для її вирішення. Автори вказують, що хоча DRL може стати альтернативою традиційним методам, час навчання цих моделей може бути значно великим, а відсутність довготривалої пам'яті може ускладнювати роботу мобільних роботів у реальних умовах.

Для вирішення цих проблем автори пропонують нову систему автономної навігації, яка комбінує традиційні методи планування шляху з DRL. У цій системі глобальне планування шляху виконується за допомогою традиційних алгоритмів, потім визначаються важливі орієнтири на шляху, і лише після цього використовується DRL для переміщення робота до цих орієнтирів. Це дозволяє значно зменшити складність навчання робота.

Додатково, автори розробили мережу вилучення функцій з модулями пам'яті, що дозволяє зберігати довготривалу залежність входних функцій, щоб вирішити проблему відсутності довготривалої пам'яті при навчанні DRL.

Стаття представляє результати порівняння запропонованих методів з традиційними підходами до навігації та DRL. Виявлено, що запропонований метод виявився ефективнішим у багатьох аспектах, зокрема, в часі навігації, безпеці та надійності.

2. Особливості навчання групи роботів

Робота [14] присвячена ітеративному підходу до навчання групи мобільних роботів для досягнення групового колективного руху. Автори пропонують метод, який дозволяє учневі, здатному розпізнавати груповий рух, ефективно використовувати свої знання для налаштування стабільної колективної поведінки на різних платформах роботів. Цей підхід, відомий як перехідне навчання, спирається на невеликий початковий набір даних від кожної платформи, що може бути зібраний з випадкових рухів. Подальше оновлення бази знань відбувається за допомогою ітеративного підходу.

Автори, для перевірки запропонованого підходу, використовують дві платформи роботів –

імітовані роботи Pioneer 3DX та реальні роботи Sphero BOLT. Експерименти показали, що застосування цього методу дозволяє автоматично налаштувати стабільну колективну поведінку на обох платформах. Отже, дослідження вносять важливий внесок у розуміння та розвиток методів налаштування колективної поведінки мобільних роботів за допомогою ітеративного підходу до навчання передачі.

Дослідження, описане в статті [15], присвячене аналізу сприйняття користувачами ройової робототехніки на робочому місці та розгляду принципів проектування для успішного впровадження таких систем у реальних програмах. Автори провели три якісні дослідження, в яких взяли участь 37 учасників з трьох секторів соціальної інфраструктури: пожежно-рятувальної служби, організації зберігання та служби огляду мостів. На рис. 4 показано можливі сценарії застосування групи роботів.

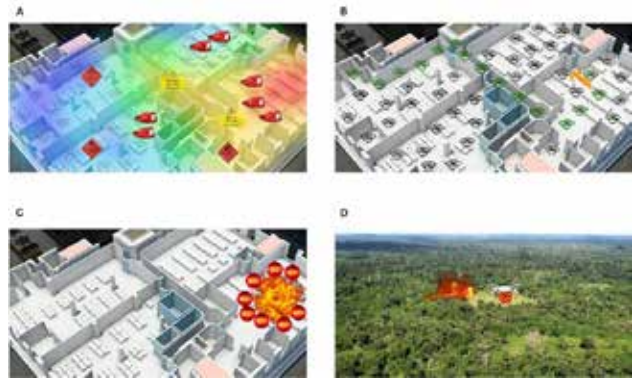


Рис. 4. Можливі сценарії застосування, (А) збір інформації в палаючій будівлі, (В) знаходження шляхів для евакуації, (С) гасіння пожежі, (D) гасіння лісової пожежі [15]

Кожне дослідження включало в себе фокус-групи та інтерв'ю, спрямовані на вивчення сприйняття користувачами ройових систем, їхніх вимог та реакції на зграї роботів, які надають підтримку в різних професійних сценаріях. Загальною тенденцією є позитивне сприйняття групи роботів для збору інформації та автоматизації простих процесів. Проте, учасники виявили певні застереження щодо автономних рішень ройових систем, особливо в контексті прийняття рішень, де людина вважається більш переважною.

Особливу увагу було приділено взаємному формуванню, методології, що спрямована на створення дво-направлених відносин між користувачами та розробниками технологій. Це дозволяє враховувати суспільний вибір на всіх етапах досліджень і розробок, щоб підвищити рівень сприйняття та розуміння робототехніки роїв.

В статті [16] автори досліджують вплив топології мережі на колективну поведінку рою роботів у динамічних середовищах, зокрема, у сценаріях пошуку їжі. Основною метою є вивчення впливу безмасштабного зв'язку на здатність рою реагувати на зміни в навколишньому середовищі шляхом аналізу колективної відповіді змодельованого рою з різними типами мережевої топології.

У роботі використовується модель динамічного середовища зміни щільності їжі, яка є реалістичним аспектом більшості реальних сценаріїв. Порівняння здійснюється між мережами безмасштабного типу та альтернативними топологіями мережі, такими як безконтактні мережі. Автори розглядають два типи змін у середовищі: одноразову різку зміну та періодичні зміни.

Результати дослідження свідчать про те, що безмасштабні мережі сприяють прискоренню процесу колективної реакції рою на зміни в навколишньому середовищі. Однак це супроводжується зменшенням узгодженості колективних рішень. Автори вважають, що використання безмасштабних мереж може покращити продуктивність рою завдяки двом побічним ефектам: спілкування на великих відстанях та частій регенерації мережі. Такий підхід дозволяє зменшити просторові кореляції поведінки рою та збагачує вибірку інформації.

Дослідження, що представлено в статті [17], спрямоване на вирішення проблеми масштабування груп роботів для спільної дії на великих відстанях. Автори ставлять перед собою завдання розробити концепцію розрідженого рою та дослідити її застосування у різних прикладних сценаріях. Це дослідження є актуальним в контексті потреби в масштабованих групах роботів для дії в різних середовищах, таких як ліси, а також для вирішення завдань у сфері робототехніки. Автори вказують, що існуючі моделі роїв роботів, які базуються на щільних зграях, непрактичні для застосувань, що вимагають спільної дії на великих відстанях через обмеження щодо близькості та обмежені можливості взаємодії між роботами.

Автори розробляють концепцію розрідженого рою, яка передбачає, що роботи можуть координувати свою дію навіть на значних відстанях один від одного. Ілюструється застосування цієї концепції у різних сценаріях, зокрема в лісовому середовищі, де група марсоходів повинна пройти та контролювати ліс. Крім того, у дослідженні висвітлені теоретичні питання, які виникають у контексті розрідженого рою, такі як продуктивність групи, типи взаємодій, що мають місце,

і можливість реалізації концепції на різних масштабах.

Стаття [18] присвячена проблемі ефективного планування та координації дій систем з багатьма роботами у складних незв'язаних середовищах. Автори звертають увагу на те, що багато застосувань робототехніки, такі як пошук і порятунок, допомога при стихійних лихах і інспекційні операції, відбуваються в умовах, де існує обмежена або ненадійна комунікаційна інфраструктура.

У статті запропоновано новий епістемічний підхід до планування, який дозволяє роботам враховувати невизначеність та здатність до адаптації при відсутності зв'язку. Епістемічне планування дозволяє роботам аналізувати та розширювати свої переконання щодо стану системи та інших роботів у системі. Це дає можливість кожному роботу активно реагувати на зміни у навколишньому середовищі та координувати свої дії з іншими роботами.

Для розв'язання проблеми оптимального планування в умовах обмеженого зв'язку, автори використовують алгоритм оптимізації розподілу завдань з протоколом пліток, що поєднується з механізмом епістемічного планування. Цей підхід дозволяє роботам ефективно реагувати на втрату зв'язку та продовжувати спільні операції в умовах обмеженої комунікації. Результати показують значне скорочення часу виконання місії порівняно з альтернативними методами, що свідчить про успішність запропонованого підходу (рис. 5). Автори наголошують на важливості подальших досліджень у цьому напрямку, зокрема, вирішення проблем динамічної тривалості завдань та оптимізація розподілу завдань для більших багатороботних систем. Крім того, планується дослідження можливостей використання епістемічних марковських процесів для досягнення консенсусу в умовах складних невизначених середовищ.

Порівняльний аналіз п'яти різних підходів до створення карт помітності для агентів Deep Reinforcement Learning (DRL), які навчаються на іграх проводиться авторами статті [19]. Карти помітності вказують на те, наскільки кожен піксель на екрані пов'язаний з прийнятими рішеннями агентів. Автори відзначають, що дотепер не існувало робіт, які б оцінювали та порівнювали точність різних підходів до карт помітності на основі збурень, спеціально розроблених для агентів DRL. Автори проводять аналіз залежності від вивчених параметрів основної глибокої Q-мережі агентів і вірності їхніх міркувань. Вони виявля-

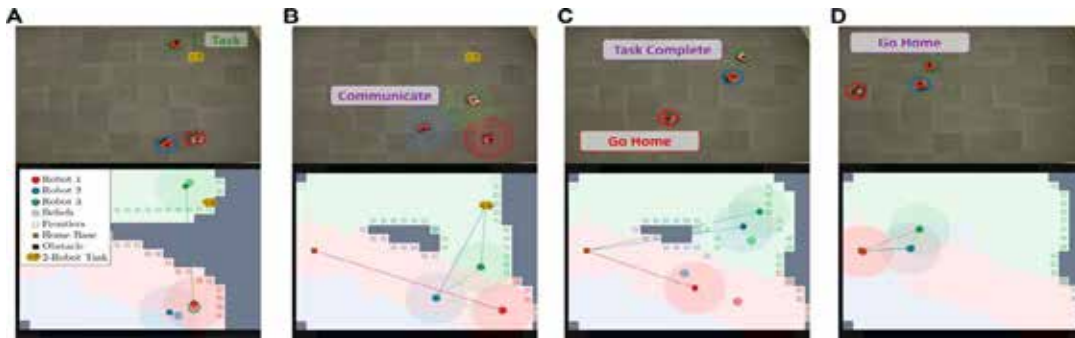


Рис. 5. Експеримент з одним завданням та трьома роботами, (А) робот 3 знаходить завдання, (В) комунікація та визначення виконавців, (С) роботи 2 і 3 виконують завдання, робот 1 повертається додому, (D) роботи 2 і 3 повертаються додому [18]

ють, що більшість підходів до карт помітності дійсно залежать від параметрів, вивчених агентом. При цьому, заміна початкового обчислення релевантності, що враховує аналіз усієї дії, на обчислення, що розглядає лише конкретну дію, може покращити залежність від параметрів.

Автори підкреслюють важливість подальшого дослідження підходів до карт помітності на основі збурень. Зазначають, що дослідникам варто вирішити, які типи збурень є важливими для їхніх досліджень та вибрати відповідний метод збурення, враховуючи специфіку агентів DRL.

Висновки. Наукові дослідження, які розглядаються у цій статті спрямовані на розробку інтелектуальних систем керування рухом, як одного так і групи мобільних колісних роботів. Метою таких систем є забезпечення автономності, точності та надійності, для її досягнення використовують синтезі різних технологій, включаючи аналіз даних, штучний інтелект, машинне навчання та інше. Головними проблемами які постають є безпека орієнтації та наві-

гації в незнайомому статичному і динамічному середовищах. Найбільш популярними, для вирішення цієї проблеми на сьогодні, є застосування різних методів машинного навчання та їх комбінування для швидкої обробки даних зібраних з сенсорів та камер. Таким чином, напрям подальшого розвитку цих технологій полягає у подальшому вдосконаленні алгоритмів машинного навчання та їх адаптації до різних умов експлуатації. Крім того, важливим напрямом є пошук ефективних рішень для забезпечення безпеки як самого робота, так і його оточення, включаючи розробку адаптивних стратегій управління для уникнення зіткнень та взаємодії з іншими об'єктами. В цілому, продовження досліджень у напрямку розробки інтелектуальних систем керування колісними мобільними роботами відкриває широкі перспективи для їх застосування в різноманітних галузях, від промисловості та логістики до наукових досліджень небезпечних для здоров'я людини або досліджень важкодоступних місць.

Список літератури:

1. The rise of Machine Learning Robots: Explore machine learning in robotics. *Robotnik Automation S.L. company brochure*. Paterna, Valencia, Spain. 15 June 2023. URL: <https://robotnik.eu/the-rise-of-machine-learning-robots-explore-machine-learning-in-robotics/> (дата звернення: 20.11.2023).
2. How Machine Learning Is Developing Robotics. *Factored company brochure*. Palo Alto, CA, USA. URL: <https://factored.ai/machine-learning-developing-robotics/> (дата звернення: 10.12.2023).
3. Ksheeraj Kandra. Artificial Intelligence and Machine Learning in Robotics. Jul 8, 2021. URL: <https://ksheeraj-kandra.medium.com/artificial-intelligence-and-machine-learning-in-robotics-15948dcc2f56> (дата звернення: 05.11.2023).
4. Mohsen Soori, Behrooz Arezoo, Roza Dastres. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. *Cognitive Robotics*. Volume 3 – 2023 | <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>
5. Zhenhuan Long et al. Integrated Indoor Positioning System of Greenhouse Robot Based on UWB/IMU/ODOM/LIDAR. *Sensors*. Volume 22, Issue 13, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22134819>
6. GPS/GNSS for Robotic and Autonomous Devices. *Septentrio N.V. company brochure* URL: <https://www.septentrio.com/en/learn-more/gps/gnss-robotic-and-autonomous-devices> (дата звернення: 25.12.2023).
7. Machine Learning and AI In Robotics: Shaping The Future Of Digital Advancements. *Stefanini Group brochure*. Nov. 29, 2023. URL: <https://stefanini.com/en/insights/news/machine-learning-and-ai-in-robotics-shaping-the-future-of-digital-advancements> (дата звернення: 08.11.2023).

8. Research and Development in Robotic Systems. Safe Human-Robot Interaction. *Digest of Fraunhofer IFF*. Magdeburg, Germany. URL: <https://www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/robotic-systems/research/human-robot-interaction.html> (дата звернення: 08.02.2024).
9. Yu Ishihara, Masaki Takahashi. Image-based robot navigation with task achievability. *Front. Robot. AI, Sec. Robot Learning and Evolution*. May 31, 2023. Volume 10 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.944375>
10. Lillian M. et al. Navigational Behavior of Humans and Deep Reinforcement Learning Agents. *Front. Psychol. Sec. Cognitive Science*. Sep. 22, 2021. Volume 12 – 2021 | <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.725932>
11. Mohaghegh M. et al. Optimal predictive neuro-navigator design for mobile robot navigation with moving obstacles. *Front. Robot. AI*. August 09, 2023. Volume 10 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1226028>
12. Lambert R. et al. Robust ASV Navigation Through Ground to Water Cross-Domain Deep Reinforcement Learning. *Front. Robot. AI*. Sep. 20, 2021. Volume 8 – 2021 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.739023>
13. Xuanzhi Wang et al. Deep reinforcement learning-aided autonomous navigation with landmark generators. *Front. Neurobot.* Aug. 22, 2023. Vol. 17. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2023.1200214>
14. Abpeikar S. et al. Iterative transfer learning for automatic collective motion tuning on multiple robot platforms. *Front. Neurobot.* March 16, 2023. Volume 17 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/fnbot.2023.1113991>
15. Daniel Carrillo-Zapata et al. Mutual Shaping in Swarm Robotics: User Studies in Fire and Rescue, Storage Organization, and Bridge Inspection. *Front. Robot. AI*. April 21, 2020. Vol. 7. | <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00053>
16. Ilja Rausch et al. Adaptive Foraging in Dynamic Environments Using Scale-Free Interaction Networks. *Front. Robot. AI*. July 09, 2020. Volume 7 – 2020 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00086>
17. Tarapore D., Grob R., Zauner K-P. Sparse Robot Swarms: Moving Swarms to Real-World Applications. *Front. Robot. AI*. July 02, 2020. Volume 7 – 2020. | <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00083>
18. Bramblett L., Bezzo N. Epistemic planning for multi-robot systems in communication-restricted environments. *Front. Robot. AI*. May 23, 2023. Volume 10 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1149439>
19. Huber T., Limmer B., André E. Benchmarking Perturbation-Based Saliency Maps for Explaining Atari Agents., *Front. Artif. Intell. Sec. AI in Business*. July 13, 2022. Vol. 5 – 2022 | <https://doi.org/10.3389/frai.2022.903875>

Petrenko D.V., Protasov A.G. OVERVIEW OF MODERN TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE AUTONOMY OF MOBILE WHEELED ROBOTS

The article deals with research aimed at improving the control algorithms of mobile wheeled robots. Today, mobile wheeled robots are an integral part of a number of high-tech fields, including industry, medicine, agriculture, logistics and everyday life. They are widely used in delivery, warehouse logistics, patient care in hospitals, as well as in various aspects of agriculture. The development of intelligent control systems allows these robots to become increasingly autonomous and efficient, opening up new opportunities for increasing productivity and improving the quality of life. The studies of robot training methods conducted by different groups of scientists can be divided into two groups: training of single robots and groups of mobile wheeled robots. A number of authors are working on the development of robot navigation algorithms based on the received images. The problem of navigation of mobile robots in dynamic environments remains relevant, which requires the improvement of intelligent control systems to ensure efficient and safe movement of both one and a group of robots. The authors develop the concept of a sparse swarm, which provides for the possibility of coordinating their actions even at considerable distances from each other. The problem arises of effective planning and coordination of actions of systems with many robots in complex disconnected environments where there is a limited or unreliable communication infrastructure. The researchers propose a new epistemic approach to planning that allows robots to account for uncertainty and adaptability in the absence of communication. Solving such problems will significantly increase the efficiency of the use of robots in the social and professional spheres of human activity.

Key words: mobile wheeled robots, intelligent control systems, autonomy, machine learning, artificial intelligence.