

УДК 621.86:004.3

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.2\(500\).30](https://doi.org/10.15589/znп2025.2(500).30)

LAST MILE LOGISTICS: AN OVERVIEW OF MODERN SOLUTIONS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS DELIVERY ROBOTS

ЛОГІСТИКА «ОСТАННЬОЇ МИЛІ»: ОГЛЯД СУЧАСНИХ РІШЕНЬ І ПЕРСПЕКТИВ РОЗРОБКИ АВТОНОМНИХ РОБОТІВ ДОСТАВЛЯННЯ

Oleksandr S. Gerasin

oleksandr.gerasin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-5107-9677

Maksym V. Mazura

mazura.mv@gmail.com

ORCID: 0009-0006-8385-9137

Andrii M. Topalov

topalov_ua@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2745-7388

Anton O. Nedo

antoxa1081@gmail.com

ORCID: 0009-0008-8482-9866

Andrii V. Chepizhnyi

andrii.chepizhnyi@snau.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7540-8313

Olga V. Rysnaya

olgar5062017@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6917-6950

Oleksandr Yu. Savoiskiy

oleksandr.savoiskiy@snau.edu.ua

ORCID: 0000-0002-6459-4931

О. С. Герасін¹,

канд. техн. наук, доцент

М. В. Мазура²,

інженер-програміст

А. М. Топалов¹,

канд. техн. наук, доцент

А. О. Недо¹,

аспірант

А. В. Чепіжний³,

канд. техн. наук, доцент

О. В. Рясна³,

старший викладач

О. Ю. Савойський³,

канд. техн. наук, доцент

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*²*GTR&PC “Zorya”-“Mashproekt”, Mykolaiv*³*Sumy National Agrarian University, Sumy*¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*²*АТ «НВКГ «ЗОРЯ»-«МАШПРОЕКТ», м. Миколаїв*³*Сумський національний аграрний університет, м. Суми*

Abstract. Purpose. The purpose of this article is to analyze and evaluate modern autonomous delivery robots used in last mile logistics for urban environments and warehouses, identify key technical challenges, and explore contemporary solutions and technologies that can optimize logistical processes. **Methodology.** The study employs a literature review approach, analyzing scientific and technical publications on autonomous delivery robots. Data on existing robotic systems are classified and systematized, focusing on their hardware and software components, including sensors (lidars, cameras, ultrasonic sensors), navigation algorithms (SLAM, A*, D* Lite), and power supply systems. Key technical challenges and modern solutions are identified through a review of existing technologies. **Results.** The research reveals major technical challenges in the field of autonomous delivery robots, including limitations in autonomy, maneuverability, adaptation to dynamic urban environments, and weather conditions. Modern technical solutions that create new opportunities for optimizing logistical processes are identified. For warehouse logistics, promising technologies include three-dimensional mapping, RFID tags, and integrated motion control systems that ensure precise localization and safety. Special attention is given to the development of mobile robots for parcel delivery to homes or meeting users, which are based on stable chassis, compact four-wheeled platforms, equipped with high-precision navigation systems and modern communication solutions. **Practical importance.** The research findings

highlight promising technologies for the development of autonomous delivery robots and can be applied to create new systems characterized by high efficiency, maneuverability, and safety in varying operational conditions through the implementation of advanced automated control systems based on sophisticated artificial intelligence tools and sensor technologies.

Key words: autonomous delivery robot; last mile logistics; warehouse logistics; urban environment; control system; electric drive; automation; interface.

Анотація. *Мета.* Метою даної статті є аналіз та оцінка сучасних автономних роботів доставляння, що застосовуються в логістиці «останньої милі» у міських умовах і на складах, виявлення ключових технічних проблем та дослідження сучасних рішень і технологій, які можуть оптимізувати логістичні процеси. *Методика.* У роботі використано підхід огляду літератури, аналізу науково-технічних публікацій з автономних роботів доставляння. Проведено класифікацію та систематизацію даних про існуючі роботизовані системи з акцентом на їх апаратне та програмне забезпечення, зокрема сенсори (лідари, камери, ультразвукові датчики), алгоритми навігації (SLAM, A*, D* Lite) та системи енергозабезпечення. Також визначено ключові технічні проблеми та сучасні рішення через огляд існуючих технологій. *Результати.* Дослідження виявило основні технічні проблеми у галузі автономних роботів доставляння, зокрема: обмеження автономності, прохідності, адаптації до динамічних умов міського середовища та погодних факторів. Визначено сучасні технічні рішення, які створюють нові можливості для оптимізації логістичних процесів. Для складської логістики перспективними технологіями є тривимірне картографування, RFID-мітки та інтегровані системи керування рухом, що забезпечують точну локалізацію і безпеку. Особлива увага приділена розробці мобільних роботів для доставляння посилок до домівок або зустрічі з користувачем, які базуються на стійких шасі, компактних платформах з чотирма колесами, оснащуються високоточними системами навігації і сучасними комунікаційними рішеннями. *Практична значимість.* Отримані результати дослідження відображають перспективні технології для розробки автономних роботів доставляння та можуть бути застосовані для створення нових систем, які відзначаються високою ефективністю, маневреністю та безпекою у змінних умовах експлуатації за рахунок впровадження вдосконалених автоматизованих систем керування на базі розвинутих засобів штучного інтелекту та сенсорних технологій.

Ключові слова: автономний робот доставляння; логістика «останньої милі»; складська логістика; міське середовище; система керування; електропривод; автоматизація; інтерфейс.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У сучасних умовах мобільна робототехніка є однією з найдинамічніших галузей наукових досліджень, що знаходить широке застосування в різних сферах життя. Завдяки своїм можливостям автономні роботи здатні виконувати завдання, які раніше вимагали участі людини, забезпечуючи ефективність, точність і безпеку. Їх використання охоплює спостереження, дослідження планет, патрулювання, рятувальні операції, логістику, автоматизацію виробництва, сільське господарство, медицину та багато інших сфер. Особливе місце у сучасній робототехніці займають автономні роботи доставляння (ADR), які стали важливим інструментом логістики «останньої милі». Цей етап є одним із найскладніших у ланцюгу постачання через потребу оперативного доставляння в умовах обмеженого міського простору, густонаселених районів та нерівномірного дорожнього покриття. Впровадження автономних роботів доставляння сприяє оптимізації логістичних процесів. Однак, попри всі переваги, ця технологія стикається з численними технічними складнощами, що стримують її повноцінний розвиток.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідження в галузі автономних роботів доставляння зосереджені на аналізі їх апаратного

та програмного забезпечення [1, 2]. Тротуарні роботи (SADR – Sidewalk Autonomous Delivery Robots), такі як роботи Starship Technologies, виконали понад 6 мільйонів доставок до 2024 року, обслуговуючи кампуси, роздрібні мережі та промислові об'єкти [3]. Дорожні роботи (RADR – Road Autonomous Delivery Robots), наприклад, Nuro та Gatik, транспортують великі партії вантажів у потоці міського транспорту [4]. Безпілотні літальні апарати (UAV), такі як Amazon Prime Air та Wing, застосовуються для доставляння у важкодоступних районах, причому Amazon Prime Air у травні 2024 року отримав схвалення FAA на польоти поза візуальним полем зору [5, 6]. Роботи для внутрішніх приміщень (AGV), наприклад, Fetch Robotics, використовуються у складській логістиці [7], а автономні таксі (PAV) від Waymo та Zoox базуються на технологіях автономного водіння 4 і 5 рівнів [8, 9]. Ці розробки показують прогрес, але проблеми автономності, навігації та адаптації залишаються актуальними. Останні дослідження в галузі автономних роботів доставки зосереджені на вдосконаленні навігаційних систем, підвищенні автономності та адаптації до складних міських умов. Наприклад, робота [10] демонструє новий підхід до навігації з використанням глибокого навчання для розпізнавання перешкод і планування маршрутів у реальному

часі. Крім того, проект в [11] досліджує можливість використання штучного інтелекту для оптимізації маршрутів і управління флотом ADR. Ці дослідження показують значний прогрес, але також підкреслюють необхідність подальших розробок у сфері сенсорних технологій і алгоритмів машинного навчання.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значні успіхи в галузі автономних роботів доставляння, розробники все ще стикаються з низкою викликів, які потребують детального вивчення. Важливо чітко визначити технології та рішення, що дозволять цим роботам бути більш гнучкими, ефективними та безпечними, а також зменшити їхню складність і вартість. Це критично для їх успішного впровадження не лише у звичні логістичні процеси, а й у нові, нетипові сценарії доставки, де вони можуть кардинально змінити підходи до сервісу.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета даної роботи полягає у визначенні перспективних напрямків створення новітніх роботизованих систем доставляння на основі аналізу існуючих інноваційних рішень та підходів до розробки автономних роботів доставляння різних типів, які можуть інтегруватися в операції логістики «останньої милі» та складське обслуговування.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи. У роботі використано підхід огляду літератури, аналізу науково-технічних публікацій з автономних роботів доставляння. Проведено класифікацію та систематизацію даних про існуючі роботизовані системи з акцентом на їх апаратне та програмне забезпечення, зокрема сенсори (лідари, камери, ультразвукові датчики), алгоритми навігації (SLAM, A, D Lite) та системи енергозабезпечення. Об'єктом дослідження є процеси навігації і керування сучасними автономними роботами доставляння, які використовуються в різних задачах доставки. Предметом дослідження є моделі та програмно-технічні засоби підвищення ефективності ADR у логістиці «останньої милі» та складському обслуговуванні.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для аналізу сучасних підходів до розробки автономних роботів доставляння та визначення перспектив їх вдосконалення розглянемо конкретні приклади автономних роботів, які ілюструють різні технічні рішення для міських умов і складської логістики.

У статті [10] описаний робот VNIT для автономного доставляння посилок у межах кампусу. Його конструкція базується на шасі з механізмом рульового керування Акермана, де рух здійснюється за допомогою приводного двигуна Johnson 300 RPM, а повороти контролюються серводвигуном Dynamixel MX-28A

(рис. 1). Енергія надходить від двох літій-полімерних акумуляторів, оснащених системою захисту від перенапруги й короткого замикання. Для аналізу навколишнього середовища робот використовує різноманітне сенсорне забезпечення: RGBD-камера Orbbec Astra (для формування 3D-карти місцевості, візуальної одометрії та виявлення перешкод) та лідар YDLIDAR X4 з охопленням 360° (для створення 2D-карти, локалізації й уникнення перешкод). Крім того, інерційний вимірювальний блок SparkFun MPU9250, що містить акселерометр, гіроскоп і магнітометр, визначає орієнтацію робота, а GPS-модуль Neo-M8N відповідає за глобальне позиціонування й планування маршрутів. Сенсори ближньої дії SHARP IR із діапазоном 4–30 см забезпечують захист від зіткнень.

Система керування роботом VNIT містить два рівні. Верхній рівень базується на платі Nvidia Jetson TX1, яка є основним обчислювальним блоком і відповідає за алгоритми глобального й локального планування та обробку даних із сенсорів у реальному часі. На нижньому рівні Arduino Mega керує двигунами й опитує сенсори, а L298 Motor Driver живить основний привід. Ці електронні компоненти та контролери забезпечують стабільну навігацію й швидке реагування на перешкоди в кампусному середовищі.

Дані від сенсорів об'єднуються методами сенсорного злиття, зокрема через розширений фільтр Калмана (EKF – Extended Kalman Filter), який інтегрує інформацію від GPS, інерційного вимірювального блоку (IMU – Inertial Measurement Unit), лідара й візуальної одометрії для точної локалізації. Камера й лідар працюють разом, створюючи деталізовану 3D-карту середовища, а навігація відбувається завдяки алгоритму A* для глобального планування маршрутів і локальні методи, що дозволяють уникати перешкод на основі даних сенсорів.

Навігація робота VNIT базується на інтеграції даних із карти OpenStreetMap, сенсорів (лідара YDLIDAR X4 і RGBD-камери Orbbec Astra) та глобального планувальника A*, що дозволяє генерувати безпечні траєкторії. При виявленні перешкод локальний планувальник у реальному часі коригує маршрут, враховуючи геометрію робота й радіус повороту, шляхом зміщення контрольних точок. Лідар забезпечує кругове сканування на 360°, а ІЧ-сенсори SHARP активують аварійне гальмування при наблизненні до перешкоди на критичну відстань.

Керування роботом реалізовано через повноцінну архітектуру на базі ROS (Robot Operating System), де глобальний планувальник будує маршрут за картою OpenStreetMap, а локальний у реальному часі аналізує перешкоди й коригує траєкторію. Для сегментації доріг і перешкод застосовується нейронна мережа ENet, що підвищує точність сприйняття й адаптивність системи. Однак така система має обмеження: висока обчислювальна складність алгоритмів

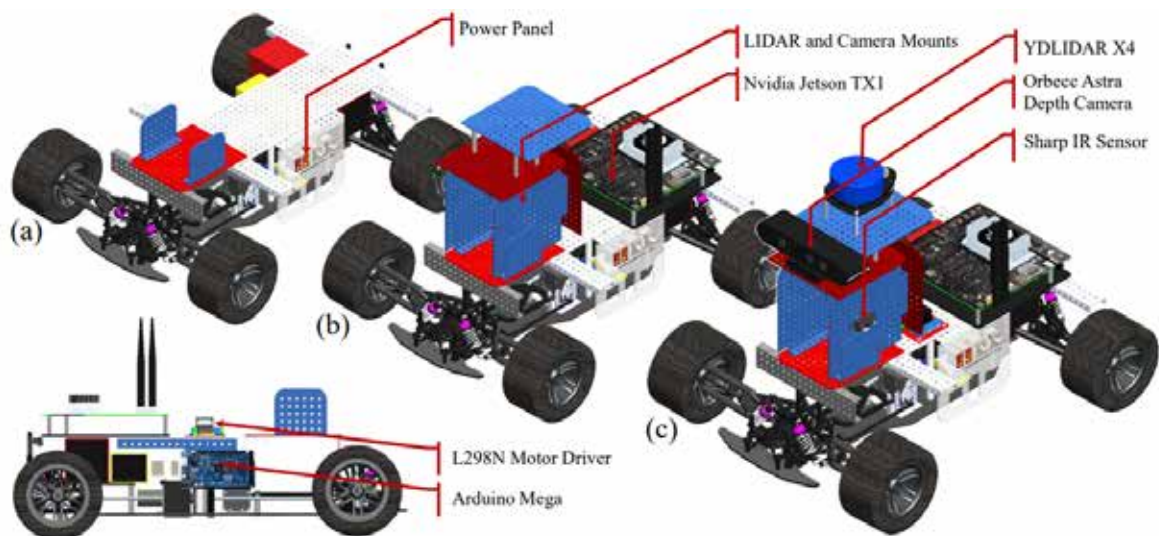


Рис. 1. Основні компоненти робота для доставляння у кампусі VNIT

і залежність від стабільного GPS-сигналу ускладнюють її використання в щільних міських умовах.

Перевагами VNIT є висока точність позиціонування, кругова перевірка перешкод, можливість генерації безпечних траєкторій та аварійного гальмування. Основним недоліком є висока вартість створення, налаштування та обслуговування системи керування. Додатково відсутність або втрата GPS-сигналу в певних середовищах може суттєво знизити точність локалізації, особливо в умовах щільної забудови чи в приміщеннях. Крім того, час автономного функціонування робота обмежений лише 40 хвилинами за незначного корисного навантаження (до 2 кг).

Робот TZAGV-LU03 (TZBOT) є автоматичним керованим транспортом (AGV), створеним для переміщення важких матеріалів у промислових умовах (склади, фабрики та виробничі лінії) [11]. Цей робот вирізняється своєю здатністю перевозити великі та важкі вантажі масою до 700 кг у структурованих промислових середовищах, де ключову роль відіграють стабільність і передбачуваність маршрутів.

Робот оснащений компактним шасі (1237x436x353 мм) та механізмом підйому, його рух здійснюється завдяки диференціальній системі колісного привода зі швидкістю до 0,78 м/с та керуванню на базі програмованого логічного контролера (PLC – Programmable Logic Controller), який відповідає за навігацію, рух та безпеку.

Для навігації використовуються магнітні датчики, що дозволяють роботу точно слідувати по магнітних стрічках, заздалегідь укладених на підлозі складу. Робот оснащений лазерними датчиками, які виявляють перешкоди на шляху, і бамперними датчиками, які реагують на фізичний контакт, а також світлошумовими сигналами присутності, що в цілому підвищує його безпеку експлуатації. Маршрут руху задає оператор, який може взаємодіяти з роботом через

людино-машинний інтерфейс (HMI – Human-Machine Interface), відстежуючи його стан, задаючи маршрути та оперативно розв'язуючи виникаючі питання. Живлення здійснюється від літєвих батарей із підтримкою режимів ручного та бездротового заряджання.

Переваги TZAGV-LU03 полягають у його високій вантажопідйомності, компактності, надійній навігації та продуманих заходах безпеки. Бездротове заряджання додатково підвищує ефективність, скорочуючи час простою. Однак залежність від магнітних стрічок обмежує його гнучкість у динамічних або змінних умовах, а початкові витрати на встановлення стрічок і налаштування можуть бути значними.

У статті [12] представлено прототип автономного мобільного робота для складської логістики Swarm – bot (рис. 2), розробленого для транспортування вантажів у межах промислових приміщень. Робот оснащений колісною платформою, ультразвуковими датчиками й камерами для побудови карти середовища, а також мікроконтролером для обробки даних у реальному часі. Навігація базується на комбінації попередньо заданих маршрутів і адаптивного уникнення перешкод.

Цей робот здатен перевозити вантажі вагою до 50 кг і адаптуватися до змін у розташуванні об'єктів на складі. Енергозабезпечення забезпечує батарея з автономністю до 2 годин. Основні переваги: простота конструкції й низька вартість порівняно з комерційними аналогами. Основні недоліки: низька швидкість (до 0,5 м/с) і труднощі з навігацією в динамічному середовищі з великою кількістю рухомих об'єктів.

Робот RUR53 [13] є безпілотним наземним роботом, створеним для виконання завдань автономної навігації, розпізнавання інструментів і маніпуляцій, зокрема захоплення гайкових ключів і керування клапанами. Конструкція робота побудована на базі мобільної платформи Robotnik Summit XL HL

з маніпулятором UR5, який оснащений адаптивним 3-пальцевим захватним пристроєм Robotiq, модифікованим для надійного утримання інструментів (рис. 3, а). Система сприйняття включає два 2D LiDAR-датчики SICK LMS151, що використовуються для навігації та побудови карти навколишнього простору, а також стереокамери Point Grey Grasshopper3, які забезпечують візуальне сприйняття. Керування мобільною базою та маніпулятором здійснюється через вбудований контролер і зовнішній обчислювальний модуль із процесором Intel i7 та графічним прискорювачем NVIDIA GTX 1070.



Рис. 2. Прототип Swarm – bot



а



б

Рис. 3. Колісні роботи доставляння: а – конструкція RUR53, б – Starship Delivery Robot

Програмне забезпечення робота має модульну архітектуру, що забезпечує гнучкість в адаптації системи до різних завдань. Робот обробляє дані із сенсорів за допомогою різних алгоритмів для створення карти простору і визначення об'єктів. Дані LiDAR використовуються для сканування простору і ідентифікації перешкод. Камери забезпечують візуальне розпізнавання інструментів із застосуванням машинного навчання. На основі отриманих даних робот будує карту місцевості, обчислює оптимальні маршрути і виконує маніпуляції з інструментами. Навігація здійснюється за допомогою алгоритмів SLAM і планування траєкторій, що дозволяє роботу автономно рухатися, уникаючи перешкод. Візуальна система розпізнає інструменти, визначає їх положення й орієнтацію, що дозволяє маніпулятору точно виконувати завдання, наприклад, повертати клапани.

Попри високу продуктивність, цей робот має низку недоліків. Перший – обмеженість навігаційних можливостей під час роботи у яскравому світлі та з чорними поверхнями. При роботі в таких умовах виникатимуть помилки в оцінці орієнтації інструментів, які будуть погіршувати якість виконання маніпуляцій, наприклад, при вставці інструмента в клапан. Другий – експлуатація на рівній поверхні є необхідною умовою для ефективної роботи, що складно забезпечити в реальних умовах.

Робот доставляння від Starship Technologies [14] є одним із найвідоміших прикладів SADR, який впроваджено у реальні логістичні операції (рис. 3, б).

Цей компактний шестиколісний робот призначений для доставляння їжі, документів і дрібних посилок у міських умовах, пересуваючись тротуарами зі швидкістю до 6 км/год. Його конструкція містить колісне шасі, електромотори з низьким енергоспоживанням і вантажний відсік місткістю до 10 кг, а сам пристрій (678x569x554 мм) без вантажу важить біля 23 кг.

Енергозабезпечення здійснюється літій-іонною батареєю, яка дозволяє роботу працювати до 4 годин на одному заряді з можливістю швидкої заміни акумулятора.

Для сприйняття середовища робот оснащений набором датчиків: лідарами для побудови 2D-карти на 360°, камерами високої роздільної здатності для розпізнавання об'єктів і ультразвуковими датчиками для виявлення ближніх перешкод. Навігація базується на алгоритмах SLAM, які поєднуються з GPS для глобального позиціонування та локального планування маршрутів. Програмне забезпечення використовує методи машинного навчання для адаптації до динамічних умов (рух пішоходів чи тимчасові перешкоди), забезпечуючи безпечну інтеграцію в міське середовище.

Система керування дозволяє оператору централізовано стежити за роботом і за потреби втручатися

вручну, що підвищує надійність у складних ситуаціях. Робот функціонує на четвертому рівні автономності, що означає мінімальну потребу в людському контролі, хоча оператори можуть повністю взяти керування на себе, якщо виникає така необхідність. Зв'язок із центральною системою керування підтримується через бездротові технології (стільникова мережа). Вантажний відсік робота блокується і відкривається лише отримувачем через спеціальний додаток на смартфоні, що гарантує безпеку доставляння.

Переваги робота включають низький рівень викидів CO₂ і високу енергоефективність, що сприяє екологічній логістиці «останньої милі». Проте є й обмеження: автономність у 4 години вимагає розвиненої інфраструктури зарядних станцій, а сенсори можуть втрачати ефективність у сильний дощ чи сніг. Крім того, залежність від стабільного зв'язку для віддаленого контролю може бути проблемою в зонах із слабким покриттям.

Fetch100 [15] – AGV для складів із вантажопідйомністю 100 кг, розмірами приблизно 90х60х40 см і вагою 50 кг, показаний на рис. 4, а.

Датчики включають 2D-лідари (дальність до 25 м), камери (1080p) і ультразвукові датчики (дальність до 2 м). Живлення забезпечує літій-іонна батарея (48 В, до 8 годин роботи при швидкості 1,5 м/с). Навігація базується на SLAM із підтримкою FetchCore (хмарної платформи для координації кількох роботів). Продуктивність робота становить до 200 одиниць за годину в задачах комплектації, але цей показник знижується на нерівних поверхнях (максимальний перепад до 2 см). Наукові експерименти підтверджують можливість побудови ройових систем з обміном даними між роботами через Wi-Fi та оптимізацією маршрутів у реальному часі. Обмеженнями по впровадженню є висока початкова ціна, залежність від інфраструктури заряджання, а також затримки зв'язку (>50 мс) за ройової координації.



а



б

Рис. 4. Складські роботи: а – Fetch100, б – OTTO 100

Автономний модульний мобільний робот для внутрішньої логістики OTTO 100 [16] має вантажопідйомність 100 кг, габарити 74х54х30 см і вагу приблизно 70 кг (рис. 4, б). Робот оснащений лідарами з дальністю до 15 м, камерами й системою безпеки, що відповідає стандарту ISO 13849, а його живлення забезпечує батарея на 36 В з ємністю 40 А·год, яка гарантує автономність від 6 до 8 годин при швидкості до 2 м/с, із можливістю автоматичного заряджання за 30 хвилин.

Навігація базується на технології SLAM, що адаптується до змін у складському середовищі, а інтеграція з системами керування складом (WMS – Warehouse Management System) дозволяє обробляти до 150 завдань за годину. Такий робот придатний для створення гібридних систем із маніпуляторами та має високу енергоефективність [17]. Недоліками OTTO 100 є обмежені прохідність (максимальний перепад поверхні 1,5 см) та робочий ресурс лідарів в умовах запиленості.

Locus Origin [18] є AMR для складів із вантажопідйомністю 36 кг, розмірами 90х60х120 см і вагою близько 60 кг. Сенсорне забезпечення містить лідари (з дальністю до 10 м), камери (720p) і інфрачервоні датчики наближення. Батарея (24 В, 30 А·год) забезпечує до 8 годин роботи при швидкості 1,8 м/с. Навігація через SLAM і машинне навчання дозволяє роботу адаптуватися до присутності людей, досягаючи продуктивності 150–200 одиниць/годину в гібридному режимі «людина-робот». Дослідження показують, що Locus скорочує час комплектації на 30% порівняно з ручними методами (продуктивність сумісної роботи із людьми сягає 3х порівняно з суто ручною працею), але система потребує стабільного Wi-Fi (швидкість >10 Мбіт/с). Обмеженнями цього робота є менша вантажопідйомність порівняно з конкурентами, висока залежність від інфраструктури, шум (>70 дБ), який може впливати на операторів.

Огляд автономних мобільних роботів для внутрішньої логістики проведений у [19], де аналізується їх застосування на складах і фабриках, фокусуючись на проєктуванні, навігації та оптимізації. Система базується на колісній платформі з використанням лідарів, візуальних сенсорів і RFID для побудови карти середовища за допомогою SLAM. Особливу увагу приділено використанню RFID-тегів, розміщених на підлозі з щільністю 4 теги/м², що забезпечує стійкість до змін освітлення й динамічних перешкод, хоча й потребує попередньої підготовки середовища (рис. 5).

Роботи живляться від батарей із автономністю до 6 годин і використовують часткові фільтри для точної локалізації (похибка 30–113 мм для позиції робота й 50–112 мм для тегів), а також оптимізації маршрутів у реальному часі. Тестування на різних траєкторіях (без/з обертанням, невизначеностями) показало

високу продуктивність, але виявило обмеження, такі як: залежність від рівних поверхонь і високу вартість через необхідність розгортання RFID-інфраструктури. Цей підхід підкреслює важливість інноваційних технологій для складської автоматизації та можливість їх інтеграції з логістикою міста.

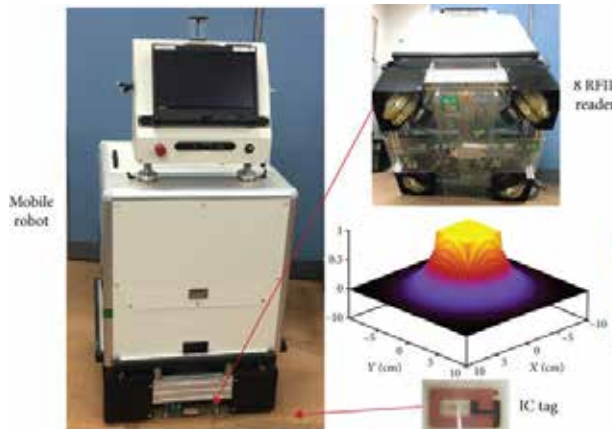


Рис. 5. RFID-теги та зчитувачі

Прототип шестиколісного робота доставляння для тестування в міських умовах розглянутий в [20]. Він має вантажопідйомність 15 кг, розміри 70x50x40 см і вагу 25 кг. Робот оснащений лідаром RPLIDAR A3 (з дальністю до 25 м), стереокамерою ZED і ультразвуковими датчиками, живиться від літій-іонної батареї (24 В, 20 А·год), що забезпечує до 3 годин роботи при швидкості 1 м/с.

Навігація побудована на ROS із використанням SLAM для побудови карти та алгоритму D* Lite для планування маршрутів тротуарами. Робот протестований на доставці їжі й дрібних посилок у радіусі 2 км, досягаючи точності позиціонування до 5 см у відкритих зонах. Переваги робота включають низьке енергоспоживання (~150 Вт), недоліки – чутливість до опадів (сенсори втрачають ефективність), коротка автономність і недостатня швидкість зв'язку для обміну даними в реальному часі.

Дослідження автономних мобільних роботів для внутрішньої логістики, проведено в [21], зосереджується на розробці та порівнянні методів одночасної локалізації та картографування (vSLAM) для складів і офісів. Система базується на платформі TurtleBot2, модифікований у робот RobSLAM, із колісною базою, RGB-D сенсором (Kinect) і візуальними камерами (Logitech C270), які забезпечують дані для vSLAM.

Робот використовує методи RTAB-Map і ORB-SLAM2 для створення щільних і розріджених тривимірних карт, застосовуючи GraphSLAM із закритим циклом і глобальною оптимізацією. Тестування проводилося в офісному приміщенні де робот демонстрував точність локалізації до кількох сантиметрів у текстурованих умовах, але стикався з проблемами в низько текстурованих зонах, які вирішувалися

додаванням текстурованих об'єктів (шашкових патернів). Батарея забезпечує автономність до 3,5 годин, що є обмеженням для тривалих завдань, а навігація базується на ROS із підтримкою реального часу, але потребує потужного обладнання (GPU) і стабільного Wi-Fi.

Дослідження [22] аналізує оптимізацію логістичних процесів на складах за допомогою автономних мобільних роботів, які підтримують підбирачів замовлень PS-AMR (Picker-Supporting Autonomous Mobile Robots).

Ці роботи призначені для співпраці з людьми під час виконання завдань зі збору замовлень, що є ключовим елементом сучасних складських операцій, спрямованих на підвищення ефективності та зменшення витрат часу. Система базується на автономних роботах, які переміщуються по складах із кількістю проходів від 14 до 24 і для навігації використовують S-подібну маршрутизацію (S-shape routing) – метод, що оптимізує шлях руху в складських приміщеннях, зменшуючи відстань і час на переміщення. Роботи оснащені сенсорами, які дозволяють їм орієнтуватися в просторі, уникати перешкод і безпечно взаємодіяти з навколишнім середовищем, а співпраця з людьми відбувається через екрани, встановлені на роботах, або через носимі технології (смарт-годинники чи окуляри), що забезпечує чітку координацію дій і передачу інструкцій у реальному часі.

Роботи здатні транспортувати товари між зонами й депо, зменшуючи час ходіння підбирачів (до 20%) і підвищуючи їх продуктивність (до 80% швидше навчання співробітників). Обмеження системи включають високу залежність від батарей, потребу в інфраструктурі заряджання й високу вартість при масштабуванні.

Концепція ройової взаємодії автономних мобільних роботів є перспективним напрямком підвищення ефективності складських операцій. У ройових системах [12, 23] декілька роботів можуть координувати свої дії для сумісного виконання складних завдань (транспортування вантажів, оптимізація маршрутів або розподіл ресурсів на складі).

Взаємодія між такими роботами рою базується на децентралізованому підході, де кожен робот оснащений ультразвуковими датчиками й камерами та додатково використовує локальну комунікацію для обміну інформацією.

У контексті складської логістики ройові роботи можуть виявляти перешкоди за допомогою ультразвукових датчиків (з дальністю до 2 м) або камер, передавати їх координати іншим роботам у групі через простий протокол зв'язку (наприклад, за допомогою радіомодулів або Wi-Fi). Це дозволяє рою адаптувати маршрути в реальному часі, уникаючи заторів. Крім того, у рої кілька роботів можуть спільно (синхронізуючи свої дії) транспортувати вантаж більшої ваги, ніж

максимальна вантажопідйомність окремого робота. В такому випадку контролер верхнього рівня в реальному часі обробляє дані, отримує сигнали від сусідніх роботів, координує їх швидкість і напрямок руху.

Для реалізації сумісної взаємодії необхідне програмне забезпечення, яке містить алгоритми ройового інтелекту, наприклад, Particle Swarm Optimization (PSO) для оптимізації маршрутів або поведінкові моделі для уникнення конфліктів. Обмеженнями ройових систем є висока витрата заряду батарей, складність алгоритмів синхронізації і повільна швидкість, що ускладнює масштабування рою в динамічному середовищі.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Огляд сучасних транспортних роботів розкрив широкий спектр технічних рішень і проблем, які необхідно врахувати при створенні новітніх систем доставляння. Автономні роботи доставляння для забезпечення високої функціональності вимагають інтеграції кількох основних систем. Конструктивно вони містять корпус, двигуни та шасі. Системи переміщення таких роботів включають колісні платформи, які є ефективними на рівних поверхнях, крокуючі роботи, що здатні долати нерівності, гусеничні платформи для забезпечення високої прохідності та літаючі платформи для швидкого доставляння.

Оснащення автономних роботів маніпуляторами та стереокамерами розширює їх функціональні можливості з точки зору взаємодії з об'єктами. Впровадження енергоефективних двигунів, швидкозмінних батарей високої ємності (для забезпечення безперервної роботи до 4 годин), станцій автоматичної швидкого заряджання, ефективних методів обробки даних дозволяють підвищити рівень автономності роботів доставляння.

Сприйняття автономними роботами доставляння навколишнього середовища здебільшого забезпечується лідарами, камерами, ультразвуковими датчиками, а живлення – батареями та системами заряджання. Інтеграція сенсорів (лідар і RGBD-камера) разом із алгоритмами SLAM у середовищі ROS забезпечує високу точність локалізації та побудову карти, а залежність від GPS потребує візуальної одометрії із захистом сенсорів від несприятливих погодних умов.

Автономні системи для складської логістики мають певні особливості. Зокрема автономні мобільні роботи внутрішньобудинкового транспортування для навігації та оптимізації маршрутів поєднують SLAM, vSLAM (RTAB-Map і ORB-SLAM2) із використанням лідарів, візуальних сенсорів і RFID. Такі системи використовують часткові фільтри й згладжувачі, створюють тривимірні карти, демонструють високу точність локалізації, але потребують підготовки робочого середовища шляхом розміщення RFID-тегів для підвищення рівня текстурованості робочого середовища.

Програмне забезпечення автономних роботів доставляння виконує наступні ключові функції: керування рухом та стабілізація, обробка даних із сенсорів для інтерпретації інформації про середовище, навігації та базове планування маршруту, інтерфейс оператора. Когнітивні функції охоплюють здатності розпізнавати об'єкти, аналізувати дані для прийняття рішень, а також планувати дії та коригувати маршрути згідно з ситуацією. Алгоритми динамічного планування маршрутів у реальному часі, наприклад D* Lite, покращують безпеку руху роботів та пішоходів.

Основними складнощами забезпечення ройової координації транспортних роботів є забезпечення надійного зв'язку (Wi-Fi чи 5G) та алгоритми керування складом для сумісного функціонування кількох одиниць через хмарну інфраструктуру.

Аналіз можливостей колаборації автономних роботів із людьми на складах підкреслює важливість стратегій зонування для зменшення часу руху та підвищення продуктивності (системи на базі PS-AMR). Проте якість та безпека їх роботи суттєво залежить від профілю вантажів, автономності батарей, інфраструктури заряджання та інтерфейсу оператора.

Майбутнє автономних роботів доставляння виглядає перспективним завдяки швидкому розвитку технологій і зростанню попиту на автоматизацію. Покращення штучного інтелекту й сенсорних систем дозволяють роботам краще орієнтуватися в складних умовах і безпечно взаємодіяти з людьми.

ВИСНОВКИ

В роботі проведений детальний огляд сучасних автономних роботів доставляння, їх технічних особливостей і викликів, з якими стикаються розробники подібних пристроїв. Проаналізовано ключові особливості, такі як: системи переміщення, сенсорне обладнання, програмне забезпечення та аспекти взаємодії з навколишнім середовищем. Аналіз показав, що успішні роботи поєднують інноваційні технології з практичними рішеннями для підвищення ефективності доставляння.

Визначено, що залежно від умов функціонування сучасний універсальний робот доставляння має оснащуватися енергоефективними приводами та батареєю з автономністю щонайменше до шести годин та мати модульну конструкцію для адаптації до складів чи вулиць. Систему керування та навігації доцільно будувати на базі принципів SLAM із динамічним плануванням для міських умов та давачами (лідар і камери) із захистом від погодних умов, а також надійних засобів зв'язку (4G, 5G). Подальшу роботу доцільно спрямувати на розробку моделі експериментального робота доставляння, зокрема практична реалізація вимагатиме балансу між вартістю, функціональністю та практичною цінністю, враховуючи реальні потреби логістики «останньої милі».

REFERENCES

- [1] Gerasin, O.S., Topalov, A.M., Zaytsev, V.V., Zaytsev, D.V., Susak, O.M., Savchenko, O.V. (2023). Information System for Calculating the Shortest Route for a Mobile Robot in a Multilevel Environment Based on Unity. In G. Antoniou et al. (Eds.), *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. ICTERI 2023. Communications in Computer and Information Science*. Vol. 1980, pp. 53–64. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48325-7_5
- [2] Liu, N., Gerasin, O., Topalov, A., Karpechenko, A. (2021). Analiz zadach monitorynhu y avtomatychnoho kontroliu silskohospodarskoho mobilnoho robota [Analysis of tasks of monitoring and automatic control of agricultural mobile robot]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system – Management of Development of Complex Systems*, 47, 174–179. <https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.47.174-179> [in Ukrainian].
- [3] Heater, B. (2024, February 5). TechCrunch. <https://techcrunch.com>
- [4] Ohnsman, A. (2021, October 8). Robotruck Startup Gatik Making Delivery Runs For Walmart Without Humans At The Wheel. *Forbes*. <https://forbes.com>
- [5] Hawkins, A. J. (2024, January 17). Alphabet's Wing unveils larger drones for heavier packages. *The Verge*. <https://theverge.com>
- [6] Shakir, U. (2024, May 30). Amazon's Prime Air delivery drones can fly even farther after FAA approval. *The Verge*. <https://theverge.com>
- [7] Zebra Technologies. (n.d.). Fetch100. <https://zebra.com>
- [8] Lawler, R. (2019, May 25). Waymo is bringing its self-driving trucks back to Arizona. *TechCrunch*. <https://techcrunch.com>
- [9] ABC7 News. (2024, November 11). Zoox robotaxis begin testing on San Francisco streets. <https://abc7news.com>
- [10] Gujarathi, A., Kulkarni, A., Patil, U., Phalak, Y., Deotalu, R., Jain, A., Panchi, N. (2020). Design and Development of Autonomous Delivery Robot. *Visvesvaraya National Institute of Technology*. <https://arxiv.org/pdf/2103.09229>
- [11] TZBOT. (n.d.). Prykhovanyy AGV TZAGV-LU03 [Hidden AGV TZAGV-LU03]. <https://tzbtagv.com/automatic-guided-vehicle> [in Ukrainian].
- [12] Dorigo, M. (2005). Swarm-bot: an experiment in swarm robotics. IRIDIA, Université Libre de Bruxelles. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1501622>
- [13] Castaman, N., Tosello, E., Antonello, M., Bagarello, N., Gandin, S., Carraro, M., Munaro, M., Bortoletto, R., Ghidoni, S., Menegatti, E., Pagello, E. (2020). RUR53: an Unmanned Ground Vehicle for Navigation, Recognition and Manipulation. *Intelligent Autonomous Systems Lab (IAS-Lab), Department of Information Engineering, University of Padova*.
- [14] Hoffman, T., Prause, G. (2018). On the Regulatory Framework for Last-Mile Delivery Robots. *MDPI Machines*. <https://doi.org/10.3390/machines6030033>
- [15] Wise, M., Kaplan, E. (2019). Autonomous Mobile Robots for Warehouse Logistics: Technologies and Applications. *Journal of Field Robotics*.
- [16] OTTO Motors. (n.d.). OTTO 100. <https://ottomotors.com/100/>
- [17] Baker, R., Rendall, M. (2021). Autonomous Mobile Robots for Warehouse Logistics: Technologies and Prospects. *IEEE Robotics and Automation Letters*.
- [18] Garcia, E., Lopez, J. (2021). Enhancing Warehouse Productivity with Autonomous Mobile Robots: Human-Robot Collaboration. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
- [19] Wang, J., Takahashi, Y. (2019). Particle Smoother-Based Landmark Mapping for the SLAM Method of an Indoor Mobile Robot with a Non-Gaussian Detection Model. *Journal of Sensors*. <https://doi.org/10.1155/2019/3717298>
- [20] University of Tartu. (2020). Autonomous Delivery Robot. <https://arxiv.org/abs/2007.08038>
- [21] Acosta-Amaya, G. A., Cadavid-Jimenez, J. M., Jimenez-Builes, J. A. (2023). Three-Dimensional Location and Mapping Analysis in Mobile Robotics Based on Visual SLAM Methods. *Journal of Robotics*. <https://doi.org/10.1155/2023/6630038>
- [22] Azadeh, K., Roy, D., de Koster, R., Khalilabadi, S. M. G. (2023). Zoning strategies for human–robot collaborative picking. *Decision Sciences*. <https://doi.org/10.1111/deci.12620>
- [23] Uholnikov, H. H., Nedo, A. O., Gerasin, O. S. (2024). Analiz osoblyvostey suchasnykh robotiv-manipulyatoriv [Analysis of features of modern manipulator robots]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannya imeni admiral Makarova – Collection of scientific works of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, 2(495), 85–94. <http://znp.nuos.mk.ua/archives/2024/2/13> [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Gerasin, O.S., Topalov, A.M., Zaytsev, V.V., Zaytsev, D.V., Susak, O.M., Savchenko, O.V. (2023). Information System for Calculating the Shortest Route for a Mobile Robot in a Multilevel Environment Based on Unity. In G. Antoniou et al. (Eds.), *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. ICTERI 2023. Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1980, pp. 53–64. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48325-7_5
- [2] Liu, N., Gerasin, O., Topalov, A., Karpechenko, A. (2021). Analysis of tasks of monitoring and automatic control of agricultural mobile robot. *Управління розвитком складних систем*, 47, 174–179. <https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.47.174-179>
- [3] Heater, B. (2024, February 5). TechCrunch. <https://techcrunch.com>

- [4] Ohnsman, A. (2021, October 8). Robotruck Startup Gatik Making Delivery Runs For Walmart Without Humans At The Wheel. Forbes. <https://forbes.com>
- [5] Hawkins, A. J. (2024, January 17). Alphabet's Wing unveils larger drones for heavier packages. The Verge. <https://theverge.com>
- [6] Shakir, U. (2024, May 30). Amazon's Prime Air delivery drones can fly even farther after FAA approval. The Verge. <https://theverge.com>
- [7] Zebra Technologies. (n.d.). Fetch100. <https://zebra.com>
- [8] Lawler, R. (2019, May 25). Waymo is bringing its self-driving trucks back to Arizona. TechCrunch. <https://techcrunch.com>
- [9] ABC7 News. (2024, November 11). Zoox robotaxis begin testing on San Francisco streets. <https://abc7news.com>
- [10] Gujarathi, A., Kulkarni, A., Patil, U., Phalak, Y., Deotalu, R., Jain, A., Panchi, N. (2020). Design and Development of Autonomous Delivery Robot. Visvesvaraya National Institute of Technology. <https://arxiv.org/pdf/2103.09229>
- [11] TZBOT. (n.d.). Прихований AGV TZAGV-LU03. <https://tzbotagv.com/automatic-guided-vehicle>
- [12] Dorigo, M. (2005). Swarm-bot: an experiment in swarm robotics. IRIDIA, Université Libre de Bruxelles. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1501622>
- [13] Castaman, N., Tosello, E., Antonello, M., Bagarello, N., Gandin, S., Carraro, M., Munaro, M., Bortoletto, R., Ghidoni, S., Menegatti, E., Pagello, E. (2020). RUR53: an Unmanned Ground Vehicle for Navigation, Recognition and Manipulation. Intelligent Autonomous Systems Lab (IAS-Lab), Department of Information Engineering, University of Padova.
- [14] Hoffman, T., Prause, G. (2018). On the Regulatory Framework for Last-Mile Delivery Robots. MDPI Machines. <https://doi.org/10.3390/machines6030033>
- [15] Wise, M., Kaplan, E. (2019). Autonomous Mobile Robots for Warehouse Logistics: Technologies and Applications. *Journal of Field Robotics*.
- [16] OTTO Motors. (n.d.). OTTO 100. <https://ottomotors.com/100/>
- [17] Baker, R., Rendall, M. (2021). Autonomous Mobile Robots for Warehouse Logistics: Technologies and Prospects. *IEEE Robotics and Automation Letters*.
- [18] Garcia, E., Lopez, J. (2021). Enhancing Warehouse Productivity with Autonomous Mobile Robots: Human-Robot Collaboration. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
- [19] Wang, J., Takahashi, Y. (2019). Particle Smoother-Based Landmark Mapping for the SLAM Method of an Indoor Mobile Robot with a Non-Gaussian Detection Model. *Journal of Sensors*. <https://doi.org/10.1155/2019/3717298>
- [20] University of Tartu. (2020). Autonomous Delivery Robot. <https://arxiv.org/abs/2007.08038>
- [21] Acosta-Amaya, G. A., Cadavid-Jimenez, J. M., Jimenez-Builes, J. A. (2023). Three-Dimensional Location and Mapping Analysis in Mobile Robotics Based on Visual SLAM Methods. *Journal of Robotics*. <https://doi.org/10.1155/2023/6630038>
- [22] Azadeh, K., Roy, D., de Koster, R., Khalilabadi, S. M. G. (2023). Zoning strategies for human-robot collaborative picking. *Decision Sciences*. <https://doi.org/10.1111/deci.12620>
- [23] Угольніков, Г. Г., Недо, А. О., Герасін, О. С. (2024). Аналіз особливостей сучасних роботів-маніпуляторів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 2(495), 85–94. <http://znp.nuos.mk.ua/archives/2024/2/13>

© Герасін О. С., Мазура М. В., Топалов А. М., Недо А. О., Чепіжний А. В., Рясна О. В., Савойський О. Ю.
 Дата надходження статті до редакції: 01.06.2025
 Дата затвердження статті до друку: 13.06.2025