

Міністерство освіти і науки України



NURE

Харківський національний університет
радіоелектроніки

ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2025

(Випуск 2)

[електронне видання]



<http://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam>



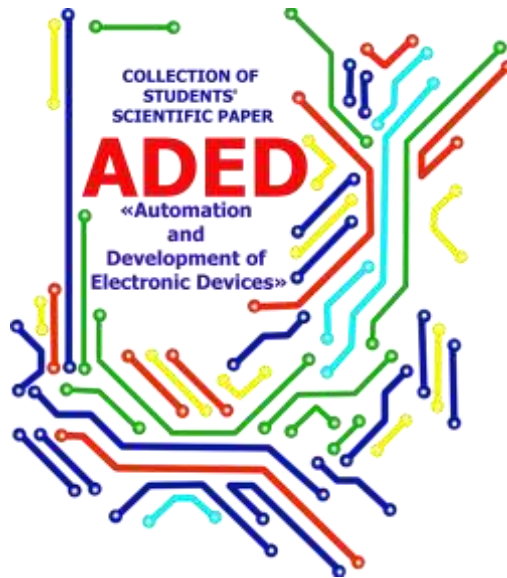
<http://itez.zntu.edu.ua/>



<http://kafea.kdu.edu.ua>

Харків 2025

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(КІТАР)



ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2025

(Випуск 2)

[електронне видання]

Харків 2025

ЗМІСТ

<i>Карпович Б.О.</i> Імпульсно-доплерівська селекція в системах автоматичного керування та робототехніці	7
<i>Рожко А.Р., Бондаренко С.В.</i> Підвищення точності систем автоматичного регулювання шляхом корекції динаміки спостерігача стану	12
<i>Бондаренко С.В., Рожко А.Р.</i> Аналіз методів синтезу оптимальних регуляторів для систем із параметричними збуреннями	17
<i>Кобець Д.С., Кравченко С.О.</i> Синтез адаптивних систем із прогнозуючим законом керування	21
<i>Кравченко С.О., Кобець Д.С.</i> Застосування принципу інваріантності для компенсації зовнішніх збурень у системах автоматичного регулювання	25
<i>Коваленко О.А., Бондаренко С.В.</i> Вплив нелінійних характеристик виконавчих механізмів на динамічні властивості систем автоматичного регулювання та методи їх компенсації	29
<i>Lisovskyi A.</i> Comparative Analysis of the Vulnerability of Large Language Models to Prompt Injections	34
<i>Шевченко О.</i> Аналіз методів визначення положення безпілотного наземного мобільного робота на карті місцевості	41
<i>Андреев А. С.</i> Особливості використання LLM в аналізі даних	46
<i>Гайдук І.М.</i> Система управління роботизованим маніпулятором на основі розпізнавання жестів руки	53
<i>Єчевський А. Д.</i> Дослідження ефективності систем навігації SLAM, VSLAM та LDS для автономних мобільних роботів у складських приміщеннях	56
<i>Колбаса О. Р.</i> CRM-система як інструмент інтеграції відділу продажів та виробництва: від зменшення циклу замовлення до підвищення лояльності клієнтів	63
<i>Конєва А. І.</i> Особливості обробки зображень на виробництві	69
<i>Котенко В.А.</i> Аналіз технологій та перспектив розвитку гібридних мобільних роботів	76
<i>Кривчун Р.В.</i> Комп'ютерне моделювання та його роль у сучасному роботизованому виробництві	81
<i>Левченко К.О.</i> Методи кольорового сортування за допомогою контурного виділення звичайною оптичною камерою у видимому спектрі сировини на конвеєрних виробництвах	87
<i>Мамін В.А.</i> Інтелектуальні системи керування квадрокоптерами: аналіз функціональних аспектів та перспективи розвитку	92
<i>Маруніч Р.В.</i>	95

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ SLAM, VSLAM ТА LDS ДЛЯ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ У СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Єчевський А. Д.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: anatolii.iechevskiy@nure.ua

Анотація. У статті проведено дослідження ефективності систем навігації SLAM, VSLAM та LDS для автономних мобільних роботів у складських приміщеннях. Розроблено класифікацію з визначеними особливостями систем навігації для AMR. Виконано порівняльний аналіз технічних характеристик кожної системи: SLAM на базі лазерних сканерів забезпечує високу точність 2D/3D картування та роботу в умовах відсутності освітлення; VSLAM використовує камери та RGB-D сенсори для створення візуальних карт з можливістю розпізнавання об'єктів; LDS забезпечує швидке 360-градусне сканування при низькому енергоспоживанні. Визначено переваги та недоліки кожної технології. За результатами аналізу встановлено, що для типового складського середовища оптимальним рішенням є 2D LiDAR SLAM завдяки балансу між точністю, надійністю та вартістю. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтованого вибору системи навігації при впровадженні автономних мобільних роботів у складській логістиці.

Ключові слова: автономні мобільні роботи, системи навігації, SLAM, VSLAM, LDS, локалізація, картографування.

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF SLAM, VSLAM, AND LDS NAVIGATION SYSTEMS FOR AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS IN WAREHOUSE ENVIRONMENTS

Yechevskiy A. D.

Kharkiv National University of Radioelectronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av.,14

E-mail: anatolii.iechevskiy@nure.ua

Abstract. The study investigates the effectiveness of SLAM, VSLAM, and LDS navigation systems for AMRs in warehouse environments. A classification system with defined features for navigation systems in AMRs has been developed. A comparative analysis of the technical characteristics of each system was performed: SLAM based on laser scanners provides high-precision 2D/3D mapping and operates in conditions without lighting; VSLAM utilizes cameras and RGB-D sensors to create visual maps with object recognition capabilities; LDS ensures rapid 360-degree scanning with low power consumption. The advantages and disadvantages of each technology were identified. Based on the analysis, it was determined that for a typical warehouse environment, the optimal solution is 2D LiDAR SLAM due to its balance of accuracy, reliability, and cost. The obtained results can be used for a well-founded selection of a navigation system when implementing autonomous mobile robots in warehouse logistics.

Key words: autonomous mobile robots, navigation systems, SLAM, VSLAM, LDS, localization, mapping.

Актуальність робототехніки в сучасному світі важко переоцінити, оскільки вона стала ключовим драйвером технологічного прогресу та трансформації майже всіх сфер людської діяльності [1-7]. Від автоматизованих виробничих ліній, які забезпечують безпрецедентну точність і продуктивність, до автономних роботів, що виконують складні завдання в

небезпечних для людини умовах, – робототехніка корінним чином змінює індустрію, економіку і суспільство [8-15]. Швидкий розвиток штучного інтелекту, машинного навчання та сенсорних технологій надає роботам нових можливостей: вони стають більш адаптивними, «розумними» та здатними до взаємодії з навколишнім середовищем і людьми [16-18].

Особливо гострою сьогодні є потреба в автономних системах для логістики, охорони здоров'я та сфери послуг, що робить дослідження в галузі робототехніки не просто актуальними, а вирішальними для подальшого розвитку та підвищення ефективності та якості життя.

Саме ця трансформація особливо відчутна в галузі логістики та управління складами, де постає гостра потреба в повній або частковій автономії мобільних роботів.

Ключовим викликом для їх успішного функціонування в цих складних, динамічних середовищах є надійна та точна навігація. Складові приміщення, з їх щільним розташуванням стелажів, вузькими проходами, постійним рухом людей та техніки, а також мінливим освітленням, створюють унікальні умови, де традиційні системи навігації часто виявляються недостатніми. Таким чином, постає нагальна необхідність у дослідженні та порівнянні сучасних технологій, таких як SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), VSLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping) та LDS (Laser Distance Sensor), для визначення найбільш ефективних рішень, здатних забезпечити стабільну автономність роботів саме в умовах складських приміщень.

Детальніше про SLAM – одночасна локалізація та картографування, яка є фундаментальною проблемою мобільної робототехніки, яка полягає у необхідності робота одночасно будувати карту невідомого середовища та визначати своє положення в цьому середовищі [19]. Ця задача є принципово важливою для автономної навігації, оскільки без попередньо створеної карти робот повинен самостійно орієнтуватися у просторі.

Розроблено класифікацію з визначеними особливостями систем навігації SLAM, VSLAM та LDS для AMR (Autonomous Mobile Robot) (рис. 1).



Рисунок 1 – Класифікація та особливості систем навігації SLAM, VSLAM та LDS для AMR

Рисунок 1 ілюструє три основні системи навігації, які використовуються для автономних мобільних роботів у складських приміщеннях. Перша система SLAM базується на лазерних сканерах та ультразвукових датчиках, що забезпечують 2D/3D картування простору (рис. 2) з високою точністю та можливістю роботи в умовах відсутності освітлення.

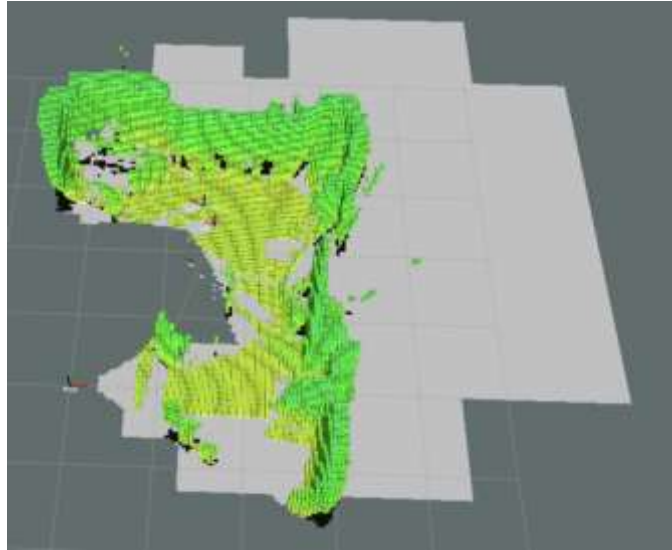


Рисунок 2 – Приклад 2D/3D картування простору за допомогою системи SLAM

Визначено переваги технології SLAM:

- автономність – не потребує попередньо створеної карти або зовнішньої інфраструктури (GPS, маяків);
- адаптивність – здатність працювати в динамічних середовищах;
- точність – при правильній реалізації забезпечує високу точність локалізації;
- універсальність – може використовувати різні типи сенсорів (лазерні, візуальні, сонари).

Тоді, в якості обмеження SLAM є:

- вимагає значних обчислювальних ресурсів, особливо для великих середовищ;
- проблема замикання циклу (loop closure) у вигляді складності розпізнавання раніше відвіданих місць;
- накопичення похибок та дрейф одометрії з часом призводить до зростання невизначеності;
- погане освітлення, повторювані структури, динамічні об'єкти можуть погіршувати роботу;
- складність обробки дуже великих середовищ в режимі реального часу.

Тепер детальніше про VSLAM. Друга система VSLAM використовує камери моно або стерео типу та RGB-D сенсори для створення карти середовища (рис. 3) за допомогою комп'ютерного зору, що дозволяє розпізнавати об'єкти, проте потребує достатнього освітлення для коректної роботи.

Visual SLAM використовує камери як основні сенсори для одночасної локалізації та картографування [19]. На відміну від традиційного SLAM з лазерними далекомірами, VSLAM аналізує послідовності зображень для витягування візуальних ознак та оцінки руху камери. Типова архітектура VSLAM включає наступні модулі [20]:

- захоплення зображень (Image Acquisition), тобто отримання послідовності кадрів з камери та попередня обробка (корекція дисторсії, нормалізація яскравості);
- витягування та опис ознак (Feature Extraction and Description) з використанням детекторів та дескриптори ознак таких як SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF (Speeded Up Robust Features), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), AKAZE, BRISK та інші [21];
- відстеження ознак (Feature Tracking/Matching), тобто встановлення відповідностей між ознаками на послідовних кадрах з використанням алгоритмів оптичного потоку Лукаса-Канаде та/або дескрипторне зіставлення;

- оцінка руху (Motion Estimation) з використанням епіпольна геометрія для визначення відносного руху камери;
- локальна оптимізація (Local Optimization) з використанням Bundle Adjustment, тобто спільної оптимізації положень камери та 3D точок, що сприяє мінімізації помилки репроекції;
- замикання циклу (Loop Closure Detection), тобто розпізнавання раніше відвіданих місць;
- глобальна оптимізація (Global Optimization).

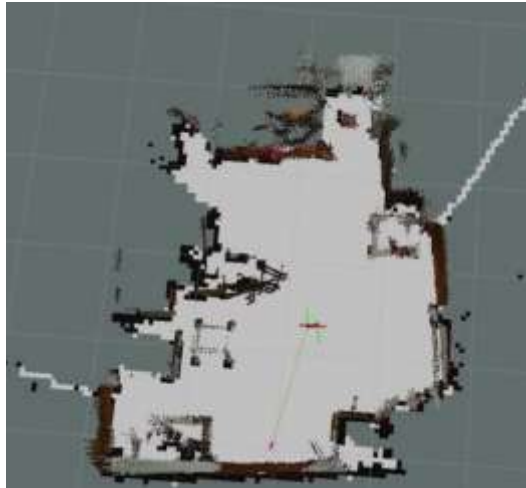


Рисунок 3 – Приклад карти середовища за допомогою системи VSLAM

Visual SLAM має ключову перевагу у використанні відносно недорогих та енергоефективних камер, що робить його дуже привабливим для масового застосування. Ця технологія здатна надавати багату інформацію про навколишнє середовище, розпізнаючи не тільки геометрію, але й виокремлюючи конкретні об'єкти та текстури, що дозволяє роботу краще орієнтуватися в просторі. Однак основним недоліком VSLAM є його сильна залежність від умов освітлення та наявності візуальних особливостей у середовищі; робот може втратити орієнтацію в однорідних або погано освітлених приміщеннях. Крім того, обробка відеоданих є обчислювально-складною та вимагає значної потужності процесора, а динамічні об'єкти, такі як люди, що рухаються, можуть серйозно заважати побудові точної карти.

Окремо варто згадати RGB-D підхід, що використовує камери з датчиком глибини (наприклад, Intel RealSense, Microsoft Kinect) [22]. Це поєднує переваги візуальної інформації та прямих вимірювань глибини, але обмежене дальністю дії сенсора (зазвичай до 10 метрів) та не працює на відкритому повітрі через інфрачервоне освітлення.

Третя система LDS оснащена лазерними далекомірами з можливістю 360-градусного сканування, що забезпечує швидке виявлення перешкод при компактних розмірах обладнання та високій енергоефективності.

У сфері навігації автономних роботів LDS зазвичай означає 2D лідар (рис. 4) – це основний датчик, який створює кругову площину сканування навколо робота. Він безперервно вимірює відстані до навколишніх об'єктів, створюючи точну картину простору у реальному часі. Саме ці датчики є ключовими для побудови карти та локалізації в багатьох сучасних системах SLAM.



Рисунок 4 – Приклад лідару для робота-пилососа roborock lds лазерний датчик відстані LDS

Основними перевагами LDS є низьке енергоспоживання, швидкість обробки даних, надійна робота в умовах поганого освітлення та відносно невисока вартість впровадження.

Проте система LDS має і недоліки: обмежена дальність сканування порівняно з повноцінними SLAM-системами, складність роботи з прозорими та дзеркальними поверхнями, а також менша точність картування у порівнянні з лазерними сканерами високого класу. Кожна з представлених систем має свої технічні особливості та переваги, що робить їх придатними для різних умов експлуатації у складському середовищі.

Згідно з проведеним аналізом, для типового складського середовища з рівною підлогою та структурованим розташуванням стелажів 2D LiDAR SLAM демонструє найвищу інтегральну оцінку завдяки оптимальному балансу між точністю, надійністю та вартістю.

3D LiDAR SLAM поступається через високу вартість, але є незамінним для складних багаторівневих структур та складів з автоматизованими високими стелажимами.

Візуальні методи (VSLAM) отримали нижчі оцінки переважно через обмеження роботи в умовах поганого освітлення та необхідність текстурованого середовища, хоча мають переваги у вартості та можливостях розпізнавання.

Таким чином, у роботі проведено комплексне дослідження ефективності систем навігації SLAM, VSLAM та LDS для автономних мобільних роботів у складських приміщеннях. Розроблено класифікацію систем навігації з детальним визначенням їх технічних особливостей, переваг та обмежень для застосування в умовах складської логістики. Виконано порівняльний аналіз трьох основних технологій навігації. Система SLAM на базі лазерних сканерів забезпечує високу точність 2D/3D картування та автономність роботи незалежно від умов освітлення, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів. Система VSLAM використовує камери та RGB-D сенсори для створення візуальних карт середовища з можливістю розпізнавання об'єктів, але демонструє критичну залежність від якості освітлення та наявності візуальних особливостей. Система LDS з лазерними далекомірами забезпечує швидке 360-градусне сканування при низькому енергоспоживанні та компактності, хоча має обмежену дальність та точність порівняно з повноцінними SLAM-системами. За результатами дослідження встановлено, що для типового складського середовища з рівною підлогою та структурованим розташуванням стелажів оптимальним рішенням є 2D LiDAR SLAM, що демонструє найвищу інтегральну оцінку завдяки балансу між точністю, надійністю та вартістю впровадження. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтованого вибору системи навігації при проектуванні та впровадженні автономних мобільних роботів у складській логістиці, що сприятиме підвищенню ефективності складських операцій та зниженню експлуатаційних витрат.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Sukhomlinova, D.A., et al. Aerial robot in urban environments // Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of I st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports. – 2025. – pp. 45-46
2. Sotnik, S. V., et al. Modeling design of mobile robotic platform // Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій / Матеріали XXIV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів, 2024. – pp. 481-482
3. Zarubin, I., et al. Basic principles of building aerial robots // Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024, pp. 32-36
4. Andreiev, A. S., et al. Analysis of robotics platforms for educational and research purposes. Комп'ютерні ігри та мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації - 2024 // Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Одеса, 26-27 вересня 2024 р., 2024. – pp. 25-27
5. Bielik, M. S., et al. Analysis of the structures of mobile platforms for promoter robots // The 5th International scientific and practical conference “Global trends in science and education” (June 2-4, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua”, Kyiv, Ukraine, 2025. – pp. 319-325
5. Lashyn, Z. V., et al. Automation capabilities of equipment with built-in robot for manufacture of microelectronics products // Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024», 2024. – pp. 283-286
6. Yechevskiy, A. D., et al. Research of orientation methods of autonomous mobile robots in industrial conditions // «Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025. – 2025. – pp. 115-119
7. Sotnik, S.V., et al. Safe cobots in development of industrial robotics // European scientific congress. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. – 2023. – pp. 80-84
8. Зарубін, І. С. та інші. Ефективність використання роботизованих систем у виробництві // Computer-integrated technologies, automation and robotics CITAR-2024. – 2024. – pp. 150-153
9. Al-Sharo, Y. M., et al. Generalized procedure for determining the collision-free trajectory for a robotic arm // Tikrit Journal of Engineering Sciences. – 2023. – pp. 142-151
10. Sotnik, S. V. Development of automated control system and registration of metal in continuous casting // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 3. – 2024. – pp. 197-211
11. Lykho, T. A., et al. Pattern recognition and computer vision technologies in decision support systems of robotic systems // Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation – 2024». – 2024. – pp. 645-648
12. Сотник, С. Розробка автоматизованої інформаційно-пошукової системи вибору маніпулятора промислових роботів // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2025. – № 1 (68). – С. 52-58
13. Sotnik, S., et al. Evaluating relational database scaling strategies in web engineering // International Conference on Advanced Trends In Radioelectronics and Infocommunications (ATRIC-2025) (May 21–22, 2025), Lviv Polytechnic Publishing House, Lviv, Ukraine, 2025. – pp. 224-228
14. Sotnik, S. V. Study of Shrinkage of Thermoplastics in Injection Molding / S. V. Sotnik // Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics. – 2025. – Vol. 21. – Iss. 24. – pp. 13-17
15. Vasylychenko, Y., et al. Development of Security and Fire Alarm Integrated Automation System at Enterprise // WSEAS Transactions on Systems. – 2025. – 24. – pp. 642-664
16. Khalimonov, Y. I., et al. Integration of IoT into security systems: opportunities and risks // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених, 20 листоп. 2024 р. – 2024. – pp. 117-121

17. Polikanov, K. A., et al. Overview of modern technologies for residential automation // «Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025. – 2025. – pp. 85-89
18. Marunich, R. V., et al. Features of IoT application in the security sector // «Computer-integrated technologies, automation and robotics» CITAR-2025. – 2025. – pp. 80-84
19. Thrun, S., et al. Probabilistic Robotics. Cambridge. – MA: The MIT Press, 2005. – 672 p.
20. ORB-SLAM3 — UZ-SLAMLab (офіційний репозиторій). – [Електронний ресурс]. – URL: https://github.com/UZ-SLAMLab/ORB_SLAM3 (дата звернення: 14.10.2025).
21. Siegwart, R., et al. Introduction to Autonomous Mobile Robots. 2nd ed. Cambridge. – MA: The MIT Press, 2011. – 14 p.
22. Hartley, R., et al. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. –