

УДК 004.896:629.36:658.78

АВТОНОМНИЙ МОБІЛЬНИЙ РОБОТ З СИСТЕМОЮ НАВІГАЦІЇ SLAM ДЛЯ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ

Токар Є.П.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

В сучасних умовах цифрової трансформації промисловості та логістики автономні мобільні роботи (AMR) стають ключовими елементами оптимізації складських процесів. Дана робота присвячена розробці та дослідженню автономного мобільного робота з використанням системи навігації SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), що дозволяє виконувати переміщення складським простором без попередньо підготовленої карти та зовнішньої інфраструктури. [1-3]

Сучасні автономні системи навігації застосовують кілька підходів до позиціонування всередині складських приміщень. До них належать технології, що базуються на лінійних маяках і QR-мітках, лідарні методи визначення положення, візуальні системи V-SLAM, а також інтегровані рішення, які поєднують дані від кількох сенсорів.

Найбільш перспективним напрямом є SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), що дозволяє одночасно будувати карту та визначати координати робота в реальному часі. [4-6]

Технології SLAM можуть бути реалізовані на основі різних сенсорів, серед яких LiDAR, стереокамери, RGB-D-камери та ультразвукові датчики. До найпоширеніших алгоритмів належать GMapping, Hector SLAM, RTAB-Map, ORB-SLAM2 та Cartographer від Google. У роботі виконано порівняння цих методів за точністю локалізації, обчислювальними вимогами, стійкістю до змін середовища та швидкістю побудови карти.

Автором розглянуто декілька груп підходів до реалізації SLAM. LiDAR-орієнтовані алгоритми, такі як Hector SLAM чи GMapping, забезпечують високу точність на основі лазерного сканування. Візуальні системи (Visual

SLAM), зокрема ORB-SLAM2 або RTAB-Map, працюють із даними з камер та показують кращі результати в умовах, де важлива візуальна інформативність. Комбіновані системи (Multi-sensor SLAM), що поєднують IMU, камери й лідари, забезпечують підвищену стійкість до динамічних змін середовища. Робота системи SLAM включає послідовний збір даних від сенсорів, їх обробку та фільтрацію, побудову карти, локалізацію робота в межах цієї карти та формування траєкторії руху.

Автономний мобільний робот, розроблений у межах проєкту, включає кілька ключових підсистем. Механічна частина ґрунтується на диференціальній або чотириколісній схемі приводу. Сенсорна система складається з 2D або 3D LiDAR, інерційного блока IMU, одометрії та RGB-D камери, що забезпечує надійну навігацію у складському середовищі. Обчислювальним модулем виступає одноплатний комп'ютер, наприклад NVIDIA Jetson або Raspberry Pi 5. Комунікація реалізується через бездротові мережі з використанням ROS2 DDS, що гарантує надійний обмін даними між компонентами системи. Живлення робота забезпечується акумуляторним модулем із відповідною системою енергокерування.

Програмна архітектура побудована на основі ROS2 Humble і включає використання пакета Nav2 для навігації, SLAM Toolbox для побудови карти та lifecycle-вузлів для керування станами системи. Для планування руху застосовано алгоритми DWB Controller, A*, а також RRT, що дає змогу адаптивно генерувати оптимальні маршрути. Реалізовані програмні модулі відповідають за керування приводами, обробку сенсорних потоків і побудову актуальних карт складського середовища в реальному часі. Загальний алгоритм роботи робота передбачає поетапну ініціалізацію сенсорів, запуск SLAM-алгоритму, формування карти, виявлення перешкод, планування траєкторії та виконання логістичного завдання, такого як переміщення вантажів.

У процесі реалізації програмної частини було застосовано ROS2 Foxy, пакет Nav2 для навігаційних задач, ORB-SLAM2 для навігації в умовах недостатнього освітлення та PCL для обробки тривимірних даних.

Експериментальна частина роботи проводилася в умовах реального складського приміщення, де перевірялися точність локалізації, стабільність побудови карти, швидкість реакції під час обходу перешкод та ефективність маршрутів. Отримані результати показали, що використання SLAM Toolbox забезпечує локалізацію з середньою похибкою менш ніж 3 см (яка не перевищує 2%) та надійність проходження маршруту понад 97%. Робот здатний уникати динамічних перешкод. Середній час побудови карти становив 30 секунд на 200 м², а продуктивність роботи загалом перевищує ручне транспортування приблизно на 35%.

Таким чином, в результаті виконання проєкту створено комплексну систему автономного мобільного робота, придатну для застосування у сфері складської логістики. Проведений аналіз сучасних методів, розробка апаратної та програмної архітектури, а також виконані експериментальні дослідження підтвердили ефективність обраного технічного рішення. Отримані результати можуть бути використані для впровадження автономних мобільних роботів у логістичних центрах та на складах підприємств. Подальший розвиток роботи може передбачати створення системи колективної взаємодії кількох роботів та розширення сенсорного комплексу для збільшення стійкості навігації в різноманітних середовищах.

Література:

1. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. — MIT Press, 2005. — 672 p.
2. Siegwart R., Nourbakhsh I., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. — 2nd ed. — MIT Press, 2011. — 472 p.

3. Cadena C. et al. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, Vol. 32(6), pp. 1309–1332.
4. Grisetti G., Kümmerle R., Stachniss C., Burgard W. A Tutorial on Graph-Based SLAM. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2010, Vol. 2(4), pp. 31–43.
5. Mur-Artal R., Tardós J. D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, Vol. 33(5), pp. 1255–1262.
6. Kohlbrecher S. et al. A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation. *Proc. IEEE Int. Symp. Safety, Security, Rescue Robotics*, 2011.