

УДК 681.51:004.94

Є.А. Бобошко, студент гр. ПБ-41мп, д.т.н., проф. Тимчик Г.С.

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ МОДЕЛЕЙ ЛІДАРІВ

Анотація. У статті наведено результати імітаційного моделювання роботи автоматизованої системи керування мобільним роботом у середовищі MATLAB. Проведено порівняльний аналіз ефективності навігації при використанні трьох поширених моделей лазерних сенсорів: Hokuyo URG-04LX, SICK TiM781S та Slamtec RPLIDAR A2. Досліджено вплив стохастичних шумів вимірювання на точність дотримання траєкторії та стабільність роботи алгоритмів локального планування (Pure Pursuit) і фільтрації (Kalman Filter). Визначено оптимальну конфігурацію сенсорного забезпечення для задач внутрішньої складської логістики.

Ключові слова: мобільний робот, симуляція, MATLAB, LIDAR, PRM, Pure Pursuit, фільтр Калмана.

ВСТУП

Розвиток автономних мобільних платформ (AMR) вимагає впровадження надійних алгоритмів навігації, здатних працювати в умовах невизначеності та зашумлених сенсорних даних. У попередніх дослідженнях авторів було розглянуто теоретичні аспекти вибору сенсорів та загальну архітектуру системи керування [1]. Проте, для практичного впровадження критично важливим є етап верифікації обраних рішень у контрольованому симуляційному середовищі, що дозволяє оцінити поведінку робота без ризику пошкодження дороговартісного обладнання.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження ефективності розроблених алгоритмів навігації та порівняльний аналіз впливу технічних характеристик реальних моделей ЛІДАРів (рівня шуму, точності, частоти) на якість керування рухом.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для проведення експериментів було розроблено комплексний програмний продукт у середовищі MATLAB (Robotics System Toolbox), реалізований у форматі Live Script. Система базується на інтеграції глобального планувальника PRM (Probabilistic Roadmap) для побудови маршруту та локального контролера Pure Pursuit для відстеження траєкторії [2].

Ключовою особливістю моделі є емуляція роботи реальних сенсорів шляхом накладання гаусового шуму (σ) та випадкових викидів (outliers) на ідеальні вимірювання відстані. Для аналізу було обрано три моделі сенсорів, що широко застосовуються в індустрії:

- Hokuyo URG-04LX (середня точність, $\sigma = 0.03$ м) [3];
- SICK TiM781S (висока точність, $\sigma = 0.02$ м) [4];
- Slamtec RPLIDAR A2 (бюджетний сегмент, високий шум $\sigma = 0.06$ м) [5].

Для компенсації похибок вимірювання у контур керування введено блок фільтрації на основі розширеного фільтра Калмана (EKF), який оцінює стан робота на основі кінематичної моделі диференціального приводу [6].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У ході серії симуляцій робот виконував рух по складному маршруту у середовищі з перешкодами. Оцінка ефективності здійснювалася за критеріями

довжини пройденого шляху, кількості аварійних ситуацій (зіткнень) та відхилення від еталонної траєкторії.

На рис. 1 наведено візуалізацію порівняння траєкторій руху робота при використанні даних від різних моделей сенсорів.

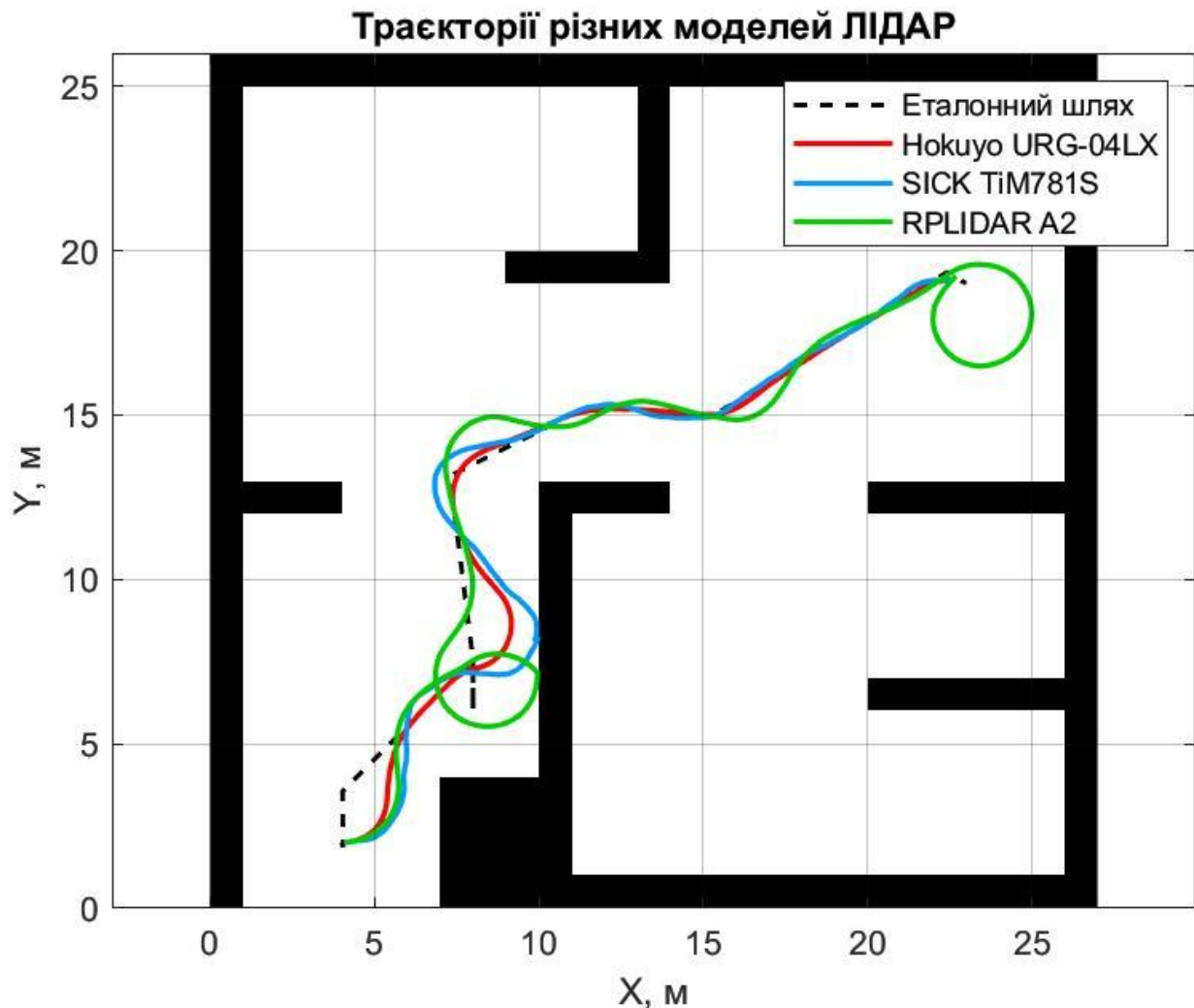


Рис. 1. Порівняння траєкторій руху мобільного робота з різними моделями ЛІДАР-сенсорів

Аналіз отриманих траєкторій дозволяє зробити наступні висновки:

1. Траєкторія Нокую URG-04LX (червона лінія) демонструє найбільш збалансовану поведінку. Робот плавно проходить повороти з мінімальним відхиленням від плану.
2. Сенсор SICK TiM781S (синя лінія), попри високу паспортну точність, у динаміці показав схильність до «перестраховки». Через високу чутливість алгоритм реактивного уникнення часто спрацьовував на фантомні наближення до стін, що призводило до мікро-корекцій курсу.
3. Модель RPLIDAR A2 (зелена лінія) показала найгіршу стабільність. Через високий рівень шуму контролер отримував суперечливі дані про відстань до перешкод, що змушувало робота «блукати» (ефект осциляції), суттєво збільшуючи довжину шляху.

Кількісні результати експерименту наведено у табл. 1.

Таблиця. Зведені показники ефективності навігації

Модель сенсору	Гаусовий шум, σ	Ймовірність відхилення	Довжина шляху, м	Кількість зіткнень	Середня похибка
Hokuyo URG-04LX	0.03	0.01	30.87	0	2.2911
SICK TiM781S	0.02	0.005	34.517	3	2.4164
Slamtec RPLIDAR A2	0.06	0.03	49.52	2	3.0924

Дані таблиці підтверджують, що найменшу довжину шляху (30.87 м) забезпечив сенсор Нокіуо. Важливо відзначити, що модель SICK, маючи найменший шум, зареєструвала найбільшу кількість умовних зіткнень (3). Це пояснюється тим, що алгоритм безпеки сприймав навіть мінімальні відхилення високоточного сенсора як небезпеку, що свідчить про необхідність додаткового налаштування порогів чутливості для прецизійних датчиків [7].

На рис. 2 наведено комплексну оцінку ефективності, яка враховує співвідношення точності локалізації та стабільності руху.

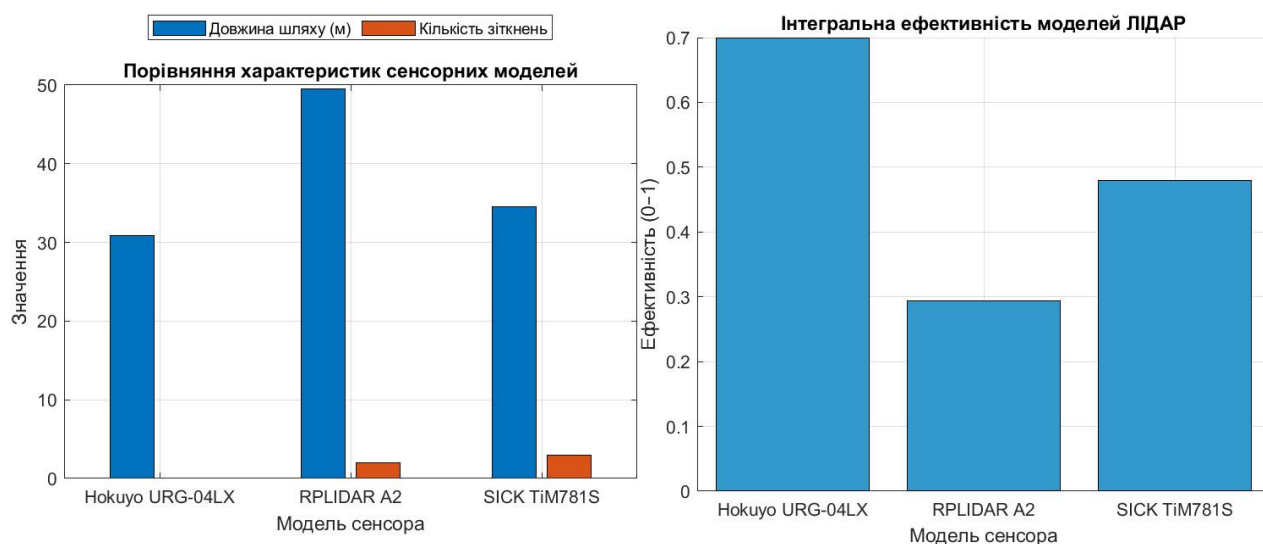


Рис. 2. Порівняння інтегральної ефективності моделей сенсорів

ВИСНОВКИ

Проведене імітаційне моделювання підтвердило працездатність розробленої автоматизованої системи керування. Встановлено, що для задач внутрішньої логістики (Indoor Navigation) найоптимальнішим вибором за критерієм «ціна/якість» є використання лазерних сканерів середнього цінового сегмента (типу Hokuyo URG-04LX) у поєднанні з адаптивними алгоритмами фільтрації Калмана.

Використання бюджетних сенсорів (RPLIDAR) можливе лише за умови реалізації складних алгоритмів згладжування, що підвищує вимоги до обчислювальної потужності бортового комп'ютера. Прецизійні сенсори (SICK) вимагають ретельного калібрування алгоритмів уникнення перешкод для запобігання хибним зупинкам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Бобошко Є.А., Тимчик Г.С. Аналіз та вибір лазерних сенсорів для систем автоматичного керування мобільними роботами // Матеріали XX науково-практичної конференції «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.
- [2] Karur K. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots / K. Karur // Machines. – 2021. – Vol. 9, No. 9.
- [3] Hokuyo URG-04LX Laser Rangefinder [Електронний ресурс] // RobotShop. – Режим доступу: <https://ca.robotshop.com/products/hokuyo-urg-04lx-laser-rangefinder>.
- [4] ICK TiM781S [Електронний ресурс] // SICK. – Режим доступу: <https://www.sick.com/il/en/products/lidar-and-radar-sensors/lidar-sensors/tim/tim781s-2174104/p/p594149>.
- [5] SLAMTEC RPLIDAR A2 Integration [Електронний ресурс] // Fictionlab. – Режим доступу: <https://docs.fictionlab.pl/integrations/lidars/slamtec-rplidar-a2>.
- [6] The Kalman Filter [Електронний ресурс] // Engineering Media. – 2021. – Режим доступу: <https://engineeringmedia.com/controlblog/the-kalman-filter>.
- [7] MacLeod C. Quantifying and Improving Laser Range Data When Scanning Industrial Materials / C. MacLeod // IEEE Sensors Journal. – 2016