

4. Park, S. J., et al. (2024). Food quality assessment using chemoresistive gas sensors. *Food & Function*, 15(3), 1234–1256.

5. Rashvand, M., Senge, B., et al. (2025). Artificial intelligence for prediction of shelf-life of various food products. *Trends in Food Science & Technology*, 153, 104–119.

6. Sanislav, T., Miclea, L., et al. (2025). A Comprehensive Review on Sensor-Based Electronic Nose for Food Quality and Safety. *Sensors*, 25(14), 4437.

УДК 004.89

В.Стецько, здобувач вищої освіти, М. Приймак, докт.техн. наук, проф., Р. Жаровський, канд. техн. наук, доц.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ РОБОТИЗОВАНОЇ ГАЗОНОКОСАРКИ

V. Stetsko, higher education applicant, M. Priymak, Dr.Sc, Prof., R. Zharovskiy, PhD., Associate Prof.

METHODS AND MEANS OF HIGH-PRECISION POSITIONING ON THE EXAMPLE OF A ROBOTIC LAWN MOWER

Роботизовані газонокосарки дедалі частіше застосовуються для автоматизованого догляду за приватними та промисловими ділянками. Ефективність їхньої роботи визначається точністю позиціонування, оскільки від неї залежить якість покриття території, безпека руху та енергоефективність використання ресурсів [2]. У недорогих моделей поширені системи орієнтації на основі обмежувального кабелю або випадкового руху, що спричиняє надмірні повторні проходи, пропуски окремих ділянок та втрату до 40 % продуктивного часу. Саме тому зростає потреба у впровадженні нових, ефективних систем навігації, які здатні поєднувати різні технології та працювати в неоднорідних умовах.

Аналіз сучасних моделей Husqvarna, Worx та Robomow показує, що їх системи позиціонування забезпечують точність у межах 20–50 см, що, подекуди, є недостатнім для автоматичного руху у складних зонах, вузьких проходах та поблизу перешкод. На основі цього визначено потребу у системах із точністю у межах 10 см.

Метою роботи є обґрунтування архітектури гібридної системи позиціонування роботизованої газонокосарки з використанням сучасних зовнішніх сенсорів, інерціальних модулів та алгоритмів обробки даних.

У сучасній практиці для навігації мобільних роботів застосовують GNSS, RTK-GNSS, ультраширококосмугові (UWB) системи, ультразвукові маяки, інерційну навігацію та візуальну локалізацію.

GNSS у стандартному режимі забезпечує точність 1–6 м, але її значно знижує часткове перекриття сигналу, а в умовах присадибних ділянок під кронами дерев втрачається до 40 % супутникової видимості. Режим RTK підвищує точність до 2–5 см за наявності стабільного радіоканалу, хоча його затримка становить у середньому 50–150 мс, частота оновлення — 1–10 Гц, а енергоспоживання модулів досягає 250 мВт, що ускладнює застосування на малих автономних роботах [1].

Альтернативою є UWB-навігація, яка працює у діапазоні 3.1–10.6 ГГц із шириною спектра понад 500 МГц та забезпечує високу стійкість до завад. Завдяки ширококосмуговому сигналу позиціонування досягає точності 2–10 см із радіусом дії від 30 до 150 м. Частота оновлення координат становить 20–100 Гц, затримка — 2–10 мс, а

енергоспоживання міток коливається від 10 до 50 мВт, що робить технологію придатною для малогабаритних мобільних платформ на зразок роботизованих газонокосарок [2]. Ультразвукові системи позиціонування, зокрема Marvelmind, працюють у діапазоні 19–31 кГц і забезпечують ще вищу точність на рівні 1–2 см. Частота оновлення їх координат становить 8–45 Гц, зона покриття сягає 400–1000 м², затримка системи — 10–40 мс. Водночас такі системи є чутливими до сильного вітру і сторонніх акустичних перешкод, проте в умовах невеликих ділянок вони демонструють стабільну роботу та можуть розглядатися як ефективний інструмент автономної навігації [3].

Використання інерційних вимірювальних модулів (IMU) дозволяє підвищити стабільність руху завдяки високій частоті оновлення (100–1000 Гц) та мінімальній затримці (<1 мс). Проте у IMU присутній інерційний дрейф, який без корекції накопичує похибку до 1–10 см щосекунди, тому такі модулі використовуються виключно у складі систем з фоновією корекцією. Дослідження [4] демонструють, що поєднання IMU з UWB дає змогу компенсувати дрейф і забезпечує стабільну точність не гірше ніж 5–7 см, навіть у випадку тимчасових втрат зовнішніх сигналів.

Візуальна локалізація (Visual SLAM) забезпечує точність у межах 2–15 см залежно від умов освітлення та текстури поверхні. Однак її використання на роботизованих газонокосарках обмежується високими обчислювальними вимогами, необхідністю стабільних умов освітленості та чутливістю до рослинності, яка може змінюватися протягом дня. Незважаючи на це, сучасні дослідження [5] підкреслюють перспективність комбінування візуальної локалізації з інерційним та ультразвуковим позиціонуванням.

Таким чином, проведений аналіз засвідчує, що найбільш перспективним рішенням для автономних газонокосарок є використання гібридної системи позиціонування, у якій UWB або ультразвукові маяки забезпечують базову просторову точність, IMU стабілізує навігацію під час руху, а оптичні методи забезпечують додаткову корекцію у складних зонах. Поєднання цих технологій дозволяє досягти просторової точності не гіршої за 10 см, підвищує стійкість роботи у змінних зовнішніх умовах та забезпечує покращення енергоефективності за рахунок оптимізації траєкторії руху.

Література

1. Chen Y., Wang H. Hybrid Localization Approaches for Mobile Robots. *Journal of Intelligent Systems*, 2021.
2. Li X., Ma H. Ultra-Wideband Positioning for Mobile Robotics: A Survey. *Sensors*, 2020.
3. Marvelmind Robotics. Outdoor/Indoor Navigation System: Technical Documentation, 2023.
4. Ramezani M., Cetin E. Fusion of UWB and IMU for Robust Robot Localization. *IEEE Sensors Journal*, 2022.
5. Nguyen T., Park S. Comparative Analysis of Modern Outdoor Robot Localization Systems. *Electronics*, 2022.