

УДК 004.93

АДАПТИВНИЙ ПОРІГ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВІДМОВ СЕНСОРІВ У НАЗЕМНИХ ПЛАТФОРМАХ З ПОВОРОТОМ КОВЗАННЯМ

Юрочкін В.В., аспірант

Київський національний університет технологій та дизайну

Лебеденко Ю.О., кандидат технічних наук, доцент

Київський національний університет технологій та дизайну

Ключові слова: виявлення відмов, адаптивний поріг, наземні роботизовані комплекси, рекурсивна оцінка дисперсії, кінематика повороту ковзанням, симуляційна валідація.

Сучасні системи автономної навігації наземних платформ інтегрують дані від інерціальних, супутникових та лазерних сенсорів за допомогою статистичних фільтрів [1, 3]. Для виявлення відмов застосовують методи перевірки узгодженості вимірювань, зокрема відстань Махаланобіса між оцінкою фільтра та фактичним вимірюванням [2]. Однак існуючі підходи використовують статичні пороги, що призводить до підвищеної частоти хибних спрацювань під час агресивних маневрів.

Суттєві труднощі виникають у випадку платформ із кінематикою типу «skid-steer», де різниця швидкостей між лівими та правими колесами спричиняє короткочасні сплески нев'язок фільтра (розбіжність прогноз–вимір). Ці сплески є кінематично обумовленими, а не наслідком деградації сенсорів. Традиційні методи часто інтерпретують цю розбіжність як відмову сенсора, тому відокремлення фізичного ковзання від апаратної несправності вимагає динамічної корекції порогів детекції без втручання в контур фільтрації. Запропоновані в попередніх роботах адаптивні підходи [1] враховують зовнішні умови, але не моделюють тимчасову мінливість дисперсії нев'язок у режимі реального часу.

Метою роботи є розробка обчислювально-ефективного методу адаптивної перевірки узгодженості, що динамічно масштабує поріг детекції на основі рекурсивної оцінки дисперсії нев'язок та поточної кутової швидкості платформи. Такий підхід забезпечує стійкість до кінематичних артефактів без втрати чутливості до реальних відмов сенсорів.

Запропоновано модифікацію класичного критерію Махаланобіса, де ефективний поріг формується як:

$$h_{eff}(t) = \chi_{p,\alpha}^2 \cdot \left[1 + \gamma \cdot \frac{\sigma_{win}(t)}{\sigma_{base}} \right] \cdot (1 + \beta \cdot |\omega_z(t)|) \quad (1)$$

де p – число ступенів вільності (розмірність вектора нев'язок), α – рівень значущості (допустима ймовірність хибного спрацювання); $\sigma_{win}(t)$ – середньоквадратичне відхилення нев'язок на інтервалі ковзного вікна, σ_{base} – еталонне значення для номінального режиму; ω_z – кутова швидкість навколо вертикальної осі; γ, β – коефіцієнти калібрування. Рекурсивне оновлення σ_{win} забезпечує обчислювальну складність $O(1)$ на ітерацію, що

дозволяє виконання в режимі реального часу. Запропонована структура дозволяє незалежно враховувати вплив зовнішнього шуму та кінематики, а рекурсивна обробка виключає збереження історії даних, мінімізуючи вимоги до пам'яті, що розширює діапазон нев'язок під час маневрів, коли сплески є очікуваними, та звужує його при прямолінійному русі для раннього виявлення дрейфу.

Метод інтегрується у середовище керування як окремий обчислювальний вузол. Алгоритм обробляє вихідні дані системи локалізації та формує індикатор працездатності сенсорів. Використання стандартних бібліотек дозволяє забезпечити кросплатформність та спростити подальше тестування на вбудованих контролерах.

Експериментальна перевірка ефективності методу здійснюється в симуляційному середовищі на базі моделі наземної платформи з кінематикою повороту ковзанням. Для моделювання відмов використовується модуль ін'єкції збоїв у ROS 2, що модифікує сенсорні повідомлення в реальному часі [4]. Протокол включає серію прогонів із випадковими початковими умовами, дрейфом інерціального модуля та втратою супутникового сигналу. Ефективність визначається зниженням хибних спрацювань при ймовірності виявлення $>90\%$ та дотриманні вимог реального часу. Статистична значущість результатів оцінюється за допомогою непараметричних критеріїв для порівняння розподілів помилок.

Таким чином, розроблений підхід забезпечує математично верифіковану адаптацію порогів детекції до динамічного стану платформи, усуваючи необхідність ручного калібрування для кожного режиму руху. Подальші дослідження спрямовані на інтеграцію запропонованого методу з модулями оцінки прохідності для формування архітектури відмовостійкого планування траєкторій наземних роботизованих комплексів у складних умовах експлуатації.

Список використаних джерел

1. Hafez O.A., Joerger M., Spenko M. Quantifying mobile robot localization safety for an EKF-based SLAM. *The International Journal of Robotics Research*. 2024. Vol. 44, № 6. P. 972-988. DOI: 10.1177/02783649241287797.
2. Yang Y., Zhao J., Xu X. et al. Unsupervised Anomaly Detection for Autonomous Robots via Mahalanobis SVDD with Audio-IMU Fusion. arXiv preprint arXiv:2505.05811. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2505.05811.
3. Bar-Shalom Y., Li X.R., Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2004. 390 p. ISBN 978-0471416555.
4. Macenski S., Foote T., Gerkey B. et al. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*. 2022. Vol. 7, № 66. DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074.