

А. М. Кльон¹, А. В. Трет'як², О. С. Фомін², С. П. Ястреба³, А. С. Бурлаков⁴

¹ ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна

² Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

³ Полтавська філія Національного університету харчових технологій, Полтава, Україна

⁴ Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ БЮДЖЕТНОЇ ЧОТИРИКОЛІСНОЇ РОБО-ПЛАТФОРМИ З ОПТИЧНИМИ ДАТЧИКАМИ РУХУ

Анотація. У роботі досліджено точність позиціонування мобільного робота, зібраного на базі бюджетної чотириколісної платформи з оптичними датчиками руху. Описано конструкцію мобільного робота, схему системи керування та методику визначення лінійних і кутових переміщень за допомогою одометрії. Проаналізовано основні та побічні похибки позиціонування, зокрема систематичні та випадкові складові. Проведено калібрування, яке включало апаратне балансування платформи, корекцію ШІМ-сигналів та уточнення одометричної моделі шляхом введення поправних коефіцієнтів. Побудовано логарифмічні апроксимації коефіцієнтів корекції для різних типів руху. Експериментальні результати підтвердили ефективність запропонованого підходу: відносні похибки позиціонування зменшилися в середньому у 2...4 рази. Зроблено висновки щодо подальших шляхів підвищення точності з урахуванням обмежень вартості апаратної бази.

Ключові слова: мобільний робот; позиціонування; одометрія; оптичні енкодери; похибка; калібрування; бюджетна робо-платформа.

Вступ

Постановка проблеми. Похибка позиціонування є однією з найважливіших характеристик, що визначає здатність робота виконувати покладені на нього завдання [1]. У контексті мобільних роботів похибка позиціонування — це відхилення фактичного положення робота від заданого програмою або оператором, що може вимірюватися в абсолютних або відносних одиницях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних технологій позиціонування мобільних роботів, зокрема SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), EKF (Extended Kalman Filter), UWB (Ultra-Wideband), IMU (Inertial Measurement Unit), VO (Visual Odometry) та інших наведено в роботах [2, 3]. Дослідження [4–6] присвячені експериментальній оцінці точності позиціонування та методам його підвищення. Вибір тієї чи іншої технології визначається умовами експлуатації, бюджетом та вимогами до точності.

Метою статті є визначення похибки позиціонування мобільного робота на базі бюджетної чотириколісної платформи з оптичними датчиками руху та розробка методів підвищення точності його позиціонування. Це дозволить оцінити можливості бюджетної мобільної платформи та визначити доцільність її застосування при реалізації тих чи інших робототехнічних проєктів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Опис мобільного робота. Для досліджень був зібраний мобільний робот, основні компоненти якого наведено в табл. 1. Його основою є бюджетна чотириколісна платформа вартістю \$6–10, що значною мірою визначає точність позиціонування. Платформа включає акриловий корпус, чотири двигуни постійного струму 6В із редукторами 1:48, кріпильні елементи та диски з прорізами для оптичних датчиків.

Замість штатного відсіку під 4 батарейки типу AA використано відсік для 2 акумуляторів типу 18650 (7,2В). Керування двигунами здійснюється драйвером на базі мікросхеми L298N. Для вимірювання переміщень використовуються оптичні датчики типу FC-03. Управління реалізовано на базі плати Arduino Leonardo R3 з мікроконтролером ATmega32u4. Прийом команд забезпечує Bluetooth-модуль HC-06. Дані з датчиків виводяться на OLED-дисплей 0.96" (128×64) з інтерфейсом I2C. Схему робота наведено на рис. 1, загальний вигляд — на рис. 2.

Методика визначення переміщень. У дослідженні використано основні положення одометрії [7], які дають змогу визначати положення та переміщення робота за допомогою енкодерів, що рахують кількість обертів коліс. Перевагами методу є простота реалізації та низька вартість. Серед недоліків — накопичення помилок (drift), вплив ковзання та прокручування коліс, що призводить до зростання похибки.

Для мобільного робота була написана програма керування, що працює за наступним принципом. Команди вводяться з мобільного пристрою за допомогою додатка Serial Bluetooth Terminal (або подібного) у вигляді цифри: 1 – рух прямо; 2 – рух назад; 3 – поворот праворуч; 4 – поворот ліворуч. За замовчуванням лінійне переміщення (прямо та назад) дорівнює 500 мм, кутовий поворот (вліво та вправо) – 90 градусів. Однак команда керування через крапку може мати другий аргумент – лінійне або кутове переміщення, задане у міліметрах або градусах (залезно від номеру команди). Наприклад, команда «1.750» відповідає переміщенню вперед на 750 мм, а команда «3.180» – повороту праворуч на 180 градусів. При цьому значення другого аргументу (величини переміщення) може бути довільним. Переміщення робота здійснюється по горизонтальній гладкій поверхні, яка встелена ватманом. Швидкість переміщення при скважності ШІМ 150 (із 255 можливих) стано-

вить приблизно 165 об/хв. Після переміщення на задану відстань, яка вимірюється імпульсами оптичних енкодерів, робот зупиняється, а на OLED-дисплей виводяться:

- розрахункова кількість імпульсів (Pulses), яка відповідає заданій відстані переміщення;
- фактична кількість імпульсів від енкодерів: FL – переднього лівого колеса, FR – переднього правого колеса, BL – заднього лівого колеса, BR – заднього правого колеса.

Повний код програми керування розміщений у репозиторії GitHub [8].

Таблиця 1 – Компоненти мобільного робота

№ з/п	Загальний вигляд	Назва
1		Робо-платформа 4х колісна двопалубна повнопривідна
2		Драйвер двигунів на базі чипа L298N
3		Оптичний датчик перешкоди FC-03
4		Дисплей 0.96" I2C 128x64 (жовто-синій) SSD1315
5		Bluetooth модуль HC-06
6		Плата Arduino Leonardo R3

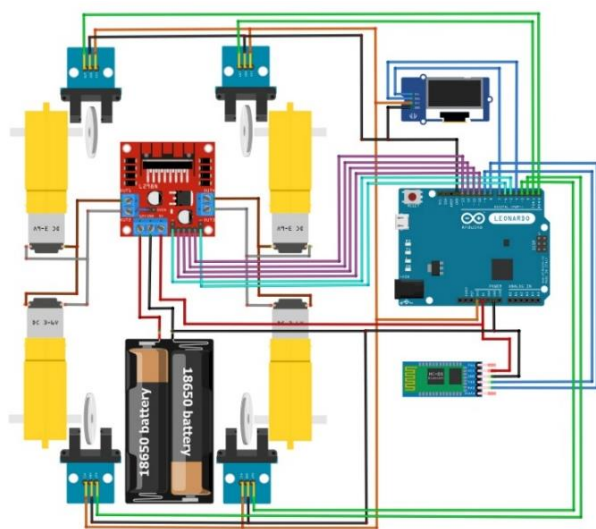


Рис. 1. Схема мобільного робота (виконана в програмі Fritzing)

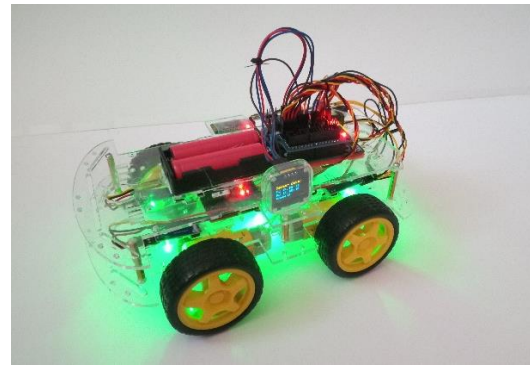


Рис. 2. Загальний вигляд мобільного робота

Розрахункова кількість імпульсів оптичного енкодера визначається за відомими одометричними залежностями:

- для лінійного переміщення:

$$N_{рл} = \frac{S_p \cdot n}{D_k \cdot \pi}, \quad (1)$$

для кутового переміщення:

$$N_{рк} = \frac{R_n \cdot \alpha_p \cdot n}{180 \cdot D_k}, \quad (2)$$

де S_p – величина необхідного лінійного переміщення, мм; $D_k = 2R_k$ – діаметр колеса, мм (рис. 3, а); n – кількість прорізів диску оптичного датчика; R_n – радіус повороту, мм (рис. 3, б); α_p – величина необхідного кута повороту, град.

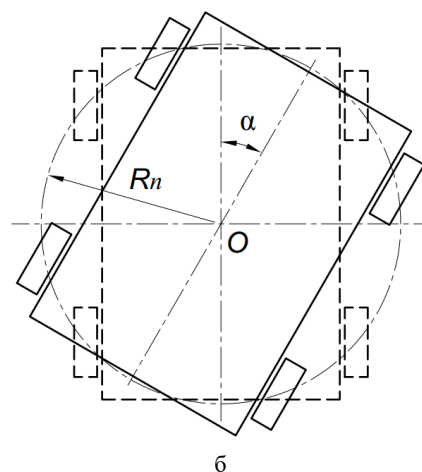
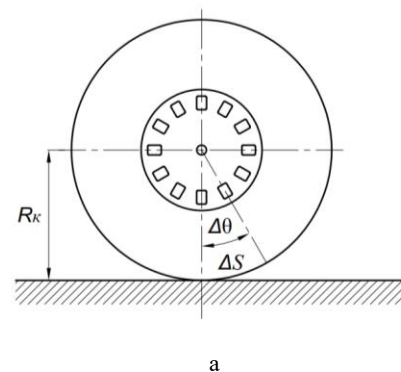


Рис. 3. Схеми до визначення розрахункової кількості імпульсів оптичних датчиків: а – при лінійному переміщенні; б – при повороті

Аналіз похибок позиціонування. Попередні тестування мобільного робота при лінійному переміщенні та повороті дозволили виявити похибки позиціонування, які можна умовно розбити на основні та побічні. Основні похибки – це відхилення від головного напрямку руху: ΔS – при лінійному переміщенні та $\Delta\alpha$ – при повороті (рис. 4). При цьому

$$\Delta S = |S_\phi - S_p|,$$

$$\Delta\alpha = |\alpha_\phi - \alpha_p|,$$

де S_ϕ (α_ϕ) – фактичне лінійне (кутове) переміщення, мм (град).

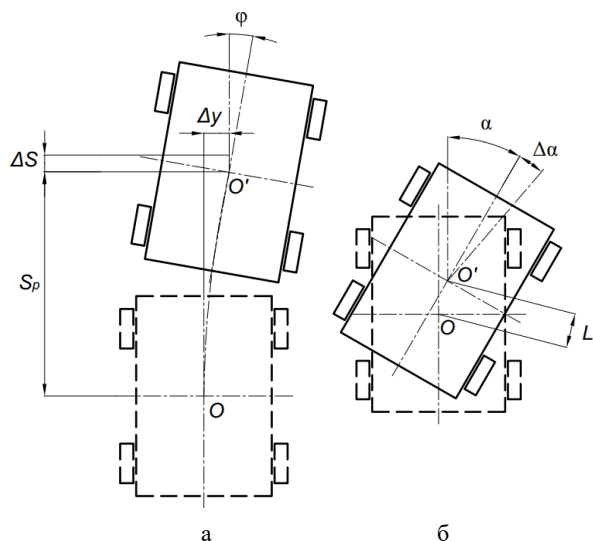


Рис. 4. Похибки позиціонування при лінійному переміщенні (а) і повороті (б)

До побічних похибок відносяться зміщення в бік від прямої лінії Δy , поворот на кут ϕ при лінійному переміщенні та зміщення від центру повороту L при повороті. Своєю чергою, кожна з цих похибок має систематичну та випадкову складові.

Випадкові складові спричинені неконтрольованими факторами й підлягають лише фільтрації. Систематичні можуть бути зменшені шляхом калібрування.

Основні причини систематичних похибок:

- різна швидкість двигунів. В ідеалі швидкість лівих та правих коліс має бути однаковою (при лінійному русі напрямком обертання коліс однакокий, при повороті – різний), але через різні ККД, знос та навантаження фактичні швидкості двигунів можуть дещо відрізнятися;

- механічні люфти та геометричні похибки мобільної платформи: наявність зазорів в механічних передачах, різний діаметр коліс (навіть декілька міліметрів грають роль), непаралельність півосей призводять до руху по дузі замість прямої при лінійному переміщенні та зміщення центру повороту при повороті;

- зміщення центру ваги мобільного робота відносно центра повороту призводить до несиметричного навантаження коліс, в результаті чого на колесах виникають різні сили тертя, а при повороті з'являються додаткові сили інерції;

- неточності у ШІМ-сигналі (PWM), особливо на низьких швидкостях: в Arduino-роботах ШІМ-керування не завжди лінійне.

Калібрування. Під калібрування мобільного робота розуміється процес виявлення та компенсації систематичних похибок у русі, щоб робот рухався максимально точно і передбачувано.

В рамках калібрування вжиті такі заходи:

- проведено комплексне балансування платформи, метою якого був рівномірний розподіл ваги робота на всі колеса, при цьому центр ваги був розташований максимально близько до центру повороту;

- програмним способом була дещо збільшена швидкість правих коліс при прямолінійному русі. Це пов'язано з тим, що робот замість прямої систематично слідував дугою, з ухилом праворуч. Головною причиною цього є механічні люфти та геометричні похибки мобільної платформи, такі як перекіс коліс;

- проведена корекція одометричної математичної моделі, яка полягала у введенні поправних коефіцієнтів до формул (1) та (2):

$$N_{рл}^к = K_л \cdot N_{рл}, \quad (1')$$

$$N_{рк}^к = K_к \cdot N_{рк}, \quad (2')$$

де $N_{рл}^к$ ($N_{рк}^к$) – відкоригована розрахункова кількість імпульсів енкодера при лінійному переміщенні (повороті); $K_л$ ($K_к$) – коефіцієнт корекції при лінійному переміщенні (повороті):

$$K_л = S_p / S_\phi, \quad (3)$$

$$K_к = \alpha_p / \alpha_\phi. \quad (4)$$

Визначення коефіцієнтів корекції здійснювалось за такою методикою. Для лінійного переміщення були взяті 5 значень заданої відстані S_p : 250, 500, 750, 1000 та 1500 мм. Аналогічно, для кутового переміщення прийняті 5 заданих значень кута повороту: 45, 90, 180, 270 та 360 градусів. Для кожного з прийнятих значень проведені 10 вимірів та отримані відповідні значення фактичного переміщення S_ϕ або α_ϕ .

На рис. 5 наведені бокс-діаграми коефіцієнтів $K_л$ та $K_к$ для прямолінійного руху та повороту, розрахованих за формулами (3), (4). Як видно з цих діаграм, коефіцієнти корекції змінюються залежно від відстані переміщення (лінійної чи кутової), отже є функціями, а не константами.

На рис. 6 наведені графіки логарифмічної апроксимації, побудовані на медіанних значеннях коефіцієнтів корекції $K_л$ та $K_к$. Логарифмічна модель точно описує експериментальні залежності, коефіцієнт кореляції для лінійного руху становить 0,98, а для повороту – 0,67.

Функціональні залежності коефіцієнтів корекції мають вид:

- для лінійного переміщення:

$$K_л = f(S_p) = 0,0701 \cdot \ln(S_p) + 0,4383, \quad (5)$$

- для повороту:

$$K_к = f(\alpha_p) = 0,0216 \cdot \ln(\alpha_p) + 1,2138. \quad (6)$$

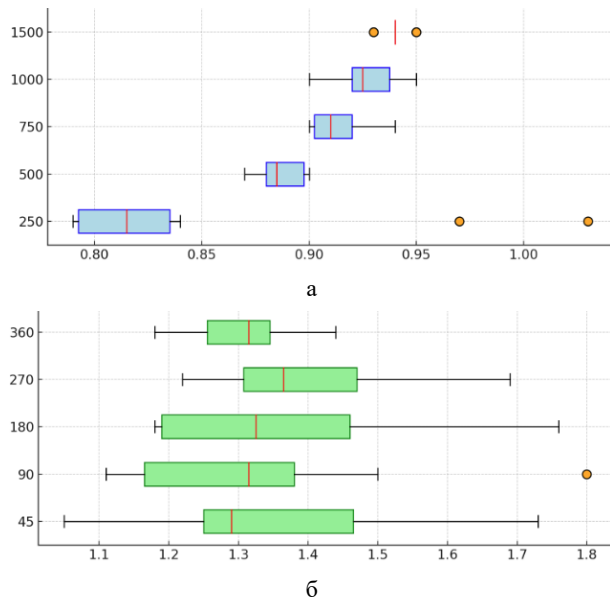


Рис. 5. Бокс-діаграми коефіцієнтів корекції K_L та K_K відповідно при прямолінійному русі (а) та повороті (б)

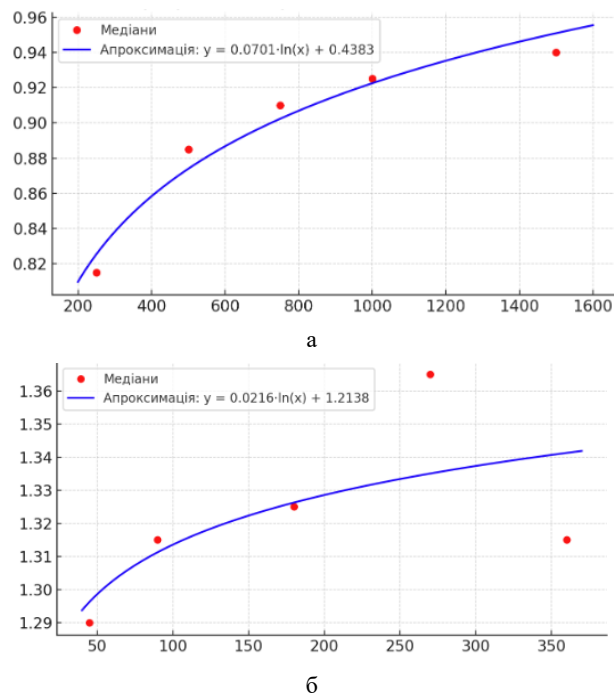


Рис. 6. Графіки логарифмічної апроксимації медіанних значень коефіцієнтів корекції при прямолінійному русі (а) та повороті (б)

Одержані залежності (5) та (6) відповідно до формул (1') та (2') враховані в програмі керування при обчисленні кількості імпульсів енкoderів, які відповідають заданій відстані переміщення: лінійний чи кутовий. Після цього була проведена друга серія експериментальних випробувань мобільного робота, в яких досліджувалась покращена точність його позиціонування.

Результати досліджень. Порівняльний аналіз показників точності позиціонування експериментальної платформи до та після калібрування проводиться за показниками відносної похибки: основної та побічної.

Основна відносна похибка розраховувалась за формулами:

- для лінійного переміщення:

$$\Delta_S = \Delta S / S_p \cdot 100\%, \quad (7)$$

- для повороту:

$$\Delta_\alpha = \Delta \alpha / \alpha_p \cdot 100\%. \quad (8)$$

Побічна відносна похибка:

- для лінійного переміщення:

$$\Delta_y = \Delta y / S_p \cdot 100\%, \quad (9)$$

- для повороту:

$$\Delta_L = 180 \cdot L / (\alpha_p \cdot \pi \cdot R_n) \cdot 100\%. \quad (10)$$

Порівняльний аналіз ілюструють графіки рис. 7–10. Криві, побудовані на всіх графіках, відповідають логарифмічній апроксимації медіанних значень відносної похибки.

На рис. 7 представлені графіки відносної основної похибки при лінійному переміщенні до та після калібрування. Обидві криві відображають тенденції зменшення значень зі зростанням відстані. Відносна похибка після калібрування зменшилась приблизно у 2 рази.

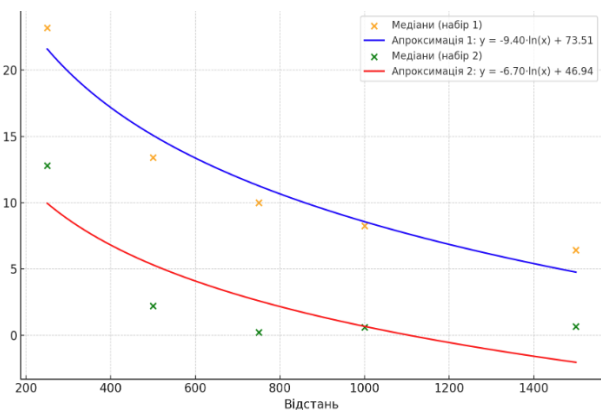


Рис. 7. Графіки відносної основної похибки при лінійному переміщенні (синя крива – до калібрування, червона крива – після)

На рис. 8 наведено графіки відносної побічної похибки при лінійному переміщенні.

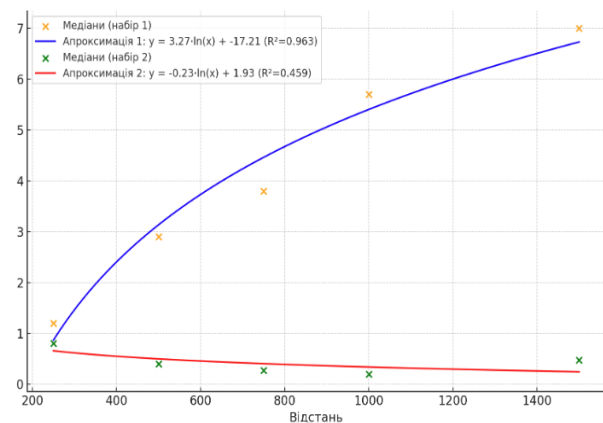


Рис. 8. Графіки відносної побічної похибки при лінійному переміщенні (синя крива – до калібрування, червона крива – після)

До калібрування побічна похибка мала чітку тенденцію збільшення, що пов'язано із рухом мобільного робота по дузі замість прямої. Після калібрування відносна похибка залишалась стабільною.

На рис. 9 представлені графіки відносної основної похибки при повороті. Обидві криві мало зале-

жать від кута повороту. Відносна похибка після калібрування зменшилась приблизно у 4 рази.

На рис. 10 наведено графіки відносної побічної похибки при повороті. До калібрування побічна похибка була стабільною, після калібрування – має тенденцію зменшення.

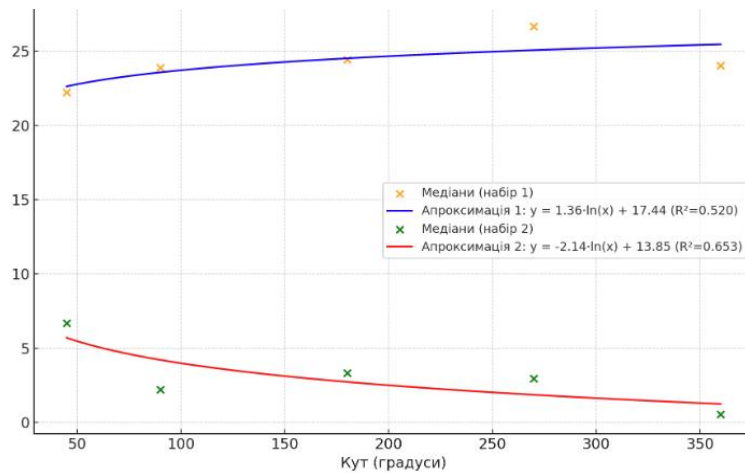


Рис. 9. Графіки відносної основної похибки при повороті (синя крива – до калібрування, червона – після)

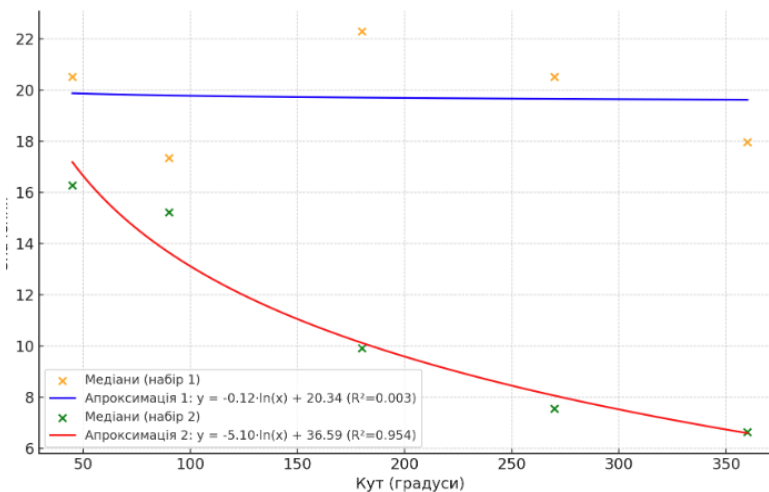


Рис. 10. Графіки відносної побічної похибки при повороті (синя крива – до калібрування, червона – після)

Висновки

1. Мобільний робот, зібраний на базі бюджетних платформ, має типові похибки позиціонування, які умовно можна розбити на основні та побічні. Основні похибки – це відхилення від головного напрямку руху: ΔS – при лінійному переміщенні та $\Delta \alpha$ – при повороті. До побічних похибок відносяться зміщення в бік від прямої лінії Δu , поворот на кут φ при лінійному переміщенні та зміщення від центру повороту L при повороті.

2. Кожна з вказаних похибок має систематичну та випадкову складові. Випадкові складові пов'язані з багатьма факторами та практично не піддаються обліку. Систематичні похибки можна виявити та значною мірою усунути за допомогою калібрування.

3. Основними причинами похибок позиціонування, які піддаються коригуванню або компенсації,

є різна швидкість електродвигунів, механічні люфти та геометричні похибки мобільної платформи, зміщення центру ваги мобільного робота відносно центра повороту.

4. Розроблена методика калібрування дозволила значно підвищити точність позиціонування мобільного робота на базі бюджетної чотириколісної робо-платформи з оптичними датчиками руху. Експериментальні результати підтвердили ефективність запропонованого підходу: відносні похибки позиціонування зменшились в середньому у 2...4 рази.

5. Подальшими кроками підвищення точності позиціонування мобільного робота є застосування додаткових сенсорів, повторне калібрування, застосування більш складних програмно-апаратних адаптивних систем керування. Проте при розробці подібних заходів необхідно приймати до уваги

вартість робо-платформи. Якщо вимоги до точності позиціонування є достатньо жорсткими, слід придбати більш якісну та вартісну робо-платформу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Трет'як А.В., Кльон А.М. Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Полтава: Нац. ун-т «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка», 2024. 135 с. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/17597/1/ОСНОВИ%20РОБОТОТЕХНИКИ%20.pdf>
2. Huang, J., Junginger, S., Liu, H., & Thurow, K. (2023). Indoor Positioning Systems of Mobile Robots: A Review. – Robotics, 12(2), 47. URL: <https://doi.org/10.3390/robotics12020047>
3. Jakub Semborski, Adam Idzkowski. A review on positioning techniques of mobile robots. – Robotic Systems and Applications, June 2024. Vol 4, Issue 1, PP 30-43. URL: <https://doi.org/10.21595/rsa.2024.23893>
4. Zhou, S., Li, Z., Lv, Z., Zhou, C., Wu, P., Zhu, C., & Liu, W. (2023). Research on Positioning Accuracy of Mobile Robot in Indoor Environment Based on Improved RTABMAP Algorithm. Sensors, 23(23), 9468. URL: <https://doi.org/10.3390/s23239468>
5. Khoshrangbaf, M., Akram, V. K., Challenger, M., & Dagdeviren, O. (2025). An Experimental Evaluation of Indoor Localization in Autonomous Mobile Robots. Sensors, 25(7), 2209. URL: <https://doi.org/10.3390/s25072209>
6. McLoughlin, B. J., Pointon, H. A. G., McLoughlin, J. P., Shaw, A., & Bezombes, F. A. (2018). Uncertainty Characterisation of Mobile Robot Localisation Techniques using Optical Surveying Grade Instruments. Sensors, 18(7), 2274. <https://doi.org/10.3390/s18072274>
7. Ben-Ari, M., Mondada, F. (2018). Robotic Motion and Odometry. In: Elements of Robotics. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1_5
8. Github-репозиторій дослідження з визначення похибки позиціонування бюджетної чотириколісної робо-платформи з оптичними датчиками руху. URL: <https://github.com/AndriyKlyon/Mobile-Robot---budget-4W-platform>

Received (Надійшла) 11.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Кльон Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна;

Andriy Klyon - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of "Lifting and Transport Machines and Machine Elements", Higher Educational Institution "Pryazovskyi State Technical University", Dnipro, Ukraine; e-mail: klyon_a_m@pstu.edu; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-5105-0783>.

Трет'як Андрій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

Andrii Tretiak - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail: itm.Tretiak@nupp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3971-3078>.

Фомін Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

Olexandr Fomin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail: olexandr.fomin@nupp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0005-3487-9062>.

Ястреба Сергій Петрович - кандидат технічних наук, доцент, в.о. директора Полтавської філії Національного університету харчових технологій, Полтава, Україна.

Sergiy Yastreba - candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor Acting Director of the Poltava Branch of National University of Food Technologies, Poltava, Ukraine; e-mail: jastrebasergey@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0000-1371-1985>.

Бурлаков Анатолій Сергійович – магістрант, кафедра електромеханіки, факультет електроенерготехніки та автоматики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Київ, Україна;

Anatolii Burlakov – Master's student, Department of Electromechanics, Faculty of Electric Power Engineering and Automation, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Kyiv, Ukraine; e-mail: brlkv.anatol@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-1586-2339>.

Evaluation of positioning accuracy for a low-cost four-wheeled mobile robot with optical motion sensors

Andriy Klyon, Andrii Tretiak, Olexandr Fomin, Sergiy Yastreba, Anatolii Burlakov

Abstract. This paper investigates the positioning accuracy of a mobile robot built on a low-cost four-wheeled platform equipped with optical motion sensors. The design of the robot, the control system scheme, and the methodology for determining linear and angular displacements using odometry are described. Primary and secondary positioning errors are analyzed, including their systematic and random components. A calibration procedure was conducted, involving hardware weight balancing, PWM signal adjustments, and refinement of the odometric model through correction coefficients. Logarithmic approximations of the correction factors were constructed for different types of motion. Experimental results confirmed the effectiveness of the proposed approach: relative positioning errors were reduced on average by a factor of 2 to 4. Conclusions are drawn regarding further ways to improve positioning accuracy, taking into account the cost limitations of the hardware platform.

Keywords: mobile robot; positioning; odometry; optical encoders; error; calibration; low-cost robotic platform.