УДК 681. 518:621.86+004.8 **doi: 10.26906/SUNZ.2025.2.70-75**

А. С. Янко, О. В. Михайліченко, О. І. Крук

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

ОПТИМАЛЬНІ АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОТЕХНІЧНОЮ ПЛАТФОРМОЮ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЇЇ ВИСОКУ ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Анотація. У статті представлено дослідження сучасних оптимальних алгоритмів автоматичного керування роботизованими платформами, що гарантують їх високу продуктивність, адаптивність та надійність. Проаналізовано основні способи руху мобільних роботів, такі як колісні, гусеничні та багатоланкові конструкції. Описані переваги та недоліки кожного підходу з точки зору підвищення енергоефективності та маневреності в складних умовах експлуатації. Особливу увагу приділено розробці адаптивних алгоритмів керування, які дозволяють платформі змінювати параметри руху у відповідь на умови навколишнього середовища. Для підвищення адаптивності системи пропонується використовувати лінійні квадратурні регулятори, а також нечіткі регулятори для забезпечення точного балансування та стабілізації рухів. Представлено алгоритмічні рішення для автоматичного керування параметрами руху платформи в умовах пересіченої місцевості та можливість динамічної реконфігурації маршрутів руху. Дослідження показує, що використання адаптивних алгоритмів дозволяє значно підвищити продуктивність роботизованих платформ, зменшити ризик перекидання та гарантувати стабільну роботу навіть в умовах високої мінливості навколишнього середовища. Запропонований підхід може бути використаний для створення нового покоління автономних систем, здатних ефективно вирішувати задачі навігації та руху в реальному часі.

Ключові слова: автоматичне керування, адаптивний алгоритм, колісні мобільні роботи, лінійний квадратичний регулятор, нечітка логіка, робототехнічна платформа.

Вступ

Розвиток сучасної робототехніки вимагає передових методів автоматичного керування для забезпечення надійності та ефективності мобільних робототехнічних платформ [1-3]. Саме автономні колісні мобільні роботи є дуже цікавим предметом як для наукових досліджень, так і для практичного застосування.

Однією з найважливіших проблем є адаптація алгоритмів керування до складних умов експлуатації, таких як пересічена місцевість, нестабільні навантаження та динамічні перешкоди.

Відсутність ефективних механізмів адаптації призводить до низької продуктивності робототехнічних платформ, підвищеного енергоспоживання та ризику виходу з ладу внаслідок механічних впливів.

Ця проблема особливо актуальна при розробці автономних систем, що використовуються в складних умовах, таких як пошуково-рятувальні операції та інженерні завдання у важкодоступних районах.

Традиційні методи керування, засновані на алгоритмах руху жорсткого тіла, часто виявляються неефективними через непередбачувані зміни зовнішніх факторів.

Розглядаються сучасні адаптивні підходи до автоматичного керування, які забезпечують гнучкість платформи та підвищують стійкість до зовнішніх впливів.

Запропоновано використання алгоритмів оптимізації, що поєднують класичні методи керування, такі як лінійні квадратичні регулятори, з сучасними підходами штучного інтелекту, такими як нечітка логіка та машинне навчання. Такий підхід має на меті покращити маневреність, зменшити ризик перекидання та ефективно використовувати наявні енергетичні ресурси.

Оптимальні алгоритми керування робототехнічною платформою

Для того, щоб визначити ефективний алгоритм автоматичного керування, необхідно спочатку визначити тип приводу. Це пов'язано з тим, що пересування мобільних платформ по землі і в різних середовищах базується на різних принципах. Найпоширенішими типами наземної мобільності є ті, що використовують спеціальні зовнішні пристрої, такі як колеса, ноги або гусениці. Рух багатотілесних систем також може базуватися на періодичній зміні конфігурації мобільної системи.

Змієподібні рухи завжди викликали інтерес у біомеханіці та робототехніці. Розглянемо багатоланкову систему (рис. 1), що лежить у горизонтальній площині і складається з прямих жорстких ланок, з'єднаних послідовно циліндричними шарнірами, в яких розміщені виконавчі механізми. Позначимо через l_i довжину *i*-ї ланки, через m_i – масу і-го шарніра, а через M_i – крутний момент, що створюється *i*-м приводом. Для простоти ми нехтуємо масами ланок порівняно з масами шарнірів [4]. Система знаходиться в умовах сухого тертя, що підкоряються закону Кулона:

$$F_i = \frac{km_i g v_i}{|v_i|}, \text{ якщо } v_i \neq 0,$$
$$F_i \leq km_i g, \text{ якщо } v_i = 0. \quad (1)$$

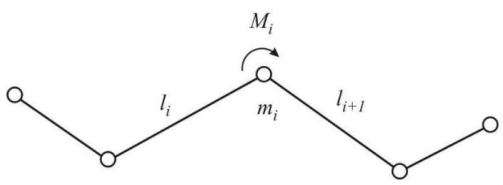

Рис. 1. Багатоланкова система

 © Янко А. С., Михайліченко О. В., Крук О. І., 2025

Багатоланкова система за умови (1), що складається з декількох ланок, може рухатися вздовж площини, чергуючи повільні та швидкі фази руху. Використовуючи повільну і швидку фази, багатоланкова система може виконувати поздовжні і поперечні обертальні рухи, а також може переміщатися з початкового положення і конфігурації в будь-яке положення і конфігурацію на площині. У повільній фазі рухаються лише кінцеві ланки, тоді як інші ланки залишаються нерухомими. Однак зі збільшенням ваги платформи такий тип руху не є надійним, оскільки збільшує навантаження на кріплення рухомих частин і навіть без урахування низької зносостійкості, ефективність занижена через тип матеріалу і вагу окремих ланок [4].

Перший виклик, з яким стикаються розробники автономних систем, – це автоматизована маневреність. Маневреність є найважливішою характеристикою в екстремальних ситуаціях, таких як дослідження далеких планет. Адже застрягання або перекидання позначатиме повний провал дорогої місії. Існує багато хороших прикладів механічних рішень, які поєднують в собі мобільність. Одним з найуспішніших прикладів є концепція MER explorer. Колеса – не єдине рішення, їх можна замінити рейками для кращої продуктивності або, як у випадку з Big-dog, ногами. Незважаючи на те, що існує широкий спектр механічних рішень для платформ, що розробляються, колеса залишаються найдешевшим і найпоширенішим елементом рушія [5].

Найпоширеніший спосіб побудови мобільних робототехнічних платформ – це використання двоколісного приводу з диференціальним керуванням і заднім стабілізатором; завдяки незалежному керуванню двома двигунами платформа може рухатися «голим». Такі робототехнічні платформи добре працюють у приміщеннях на рівних поверхнях і в місцях, доступних для людей на інвалідних візках. Існує багато комерційних платформ, заснованих на цьому механізмі пересування. Такі платформи дозволяють зосередитися на двох важливих аспектах інтелектуальних автономних платформ: зондуванні та прийнятті рішень. Однак у реальних умовах (як на вулиці, так і в приміщенні) доводиться мати справу з нерівностями поверхонь. Використання традиційних колісних робототехнічних платформ обмежене, оскільки платформа повинен підніматися і спускатися по сходах і долати перешкоди. Крім того, при проектуванні платформ, які повинні працювати в таких умовах, необхідно враховувати більш жорсткі обмеження, такі як вага, міцність і розмір, порівняно з пересуванням по рівній поверхні. Проєктування робототехнічних платформ, здатних вирішувати складні завдання в тривимірному світі, зміщує акцент на кінематичні можливості автономних машин, які є такими ж важливими, як сприйняття і прийняття рішень. Схема апаратної побудови подібної системи наведена на рис. 2.

Окрім підвищення маневреності робототехнічних платформ на різних ділянках місцевості, необхідно забезпечити автоматичний захист від перекидання, що є однією з найбільших проблем для всіх наземних транспортних засобів. Вирішення цієї проблеми лежить в площині модифікації конструкції шасі та автоматичних алгоритмів контролю за рухом.

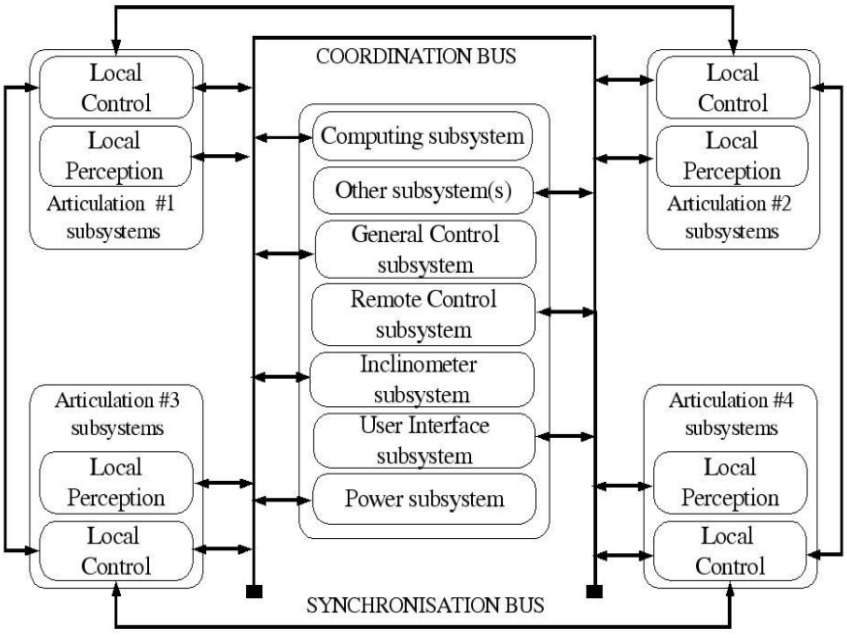

Рис. 2. Схема системи керування [5]

Для вирішення проблеми нестійкості колісно-ножних роботів на складних ділянках місцевості пропонується платформа з підпружиненими колесами і ногами та адаптивним механізмом втягування колісно-ножного механізму, який утримує тіло паралельно землі для забезпечення плавного подолання перешкод.

Основними режимами роботи робототехнічної платформи є режим роботи на колесах і режим роботи на колесах і ногах, які перемикаються обертан-

ням тазостегнового двигуна. Енергоефективність підвищується завдяки використанню колісного режиму на рівній місцевості та колісного режиму на перешкодах і пересіченій місцевості.

Коли платформа зберігає положення стоячи, механізм з'єднання ніг утримується нерухомим за рахунок блокування двигуна тазостегнового суглоба. В цей час вона може бути еквівалентною двоколісному самобалансуючому роботу.

Центр мас знаходиться над віссю коліс робота, а положення робота у світовій системі координат – $[x_b, y_b, z_b, \alpha]^T$, де координата положення середньої точки осі ведучих коліс робота – $[x_b, y_b, z_b + r]$, α – курсовий кут робота, відстань між центрами двох коліс – b, а радіус колеса – r, кути повороту лівого та правого коліс – θ_L, θ_R, а переміщення лівого та правого коліс – X_L, X_R відповідно. Припустимо, що маса тіла спрощеного робота дорівнює M, довжина тіла дорівнює L, момент інерції тіла навколо осі Y дорівнює I_b, а координата положення центру мас тіла дорівнює $[x,\ 0,\ z]$.

Момент інерції кожного шатуна в центрі мас дорівнює I_{CI}, який отримано за допомогою програмного забезпечення для моделювання [6]. Кут нахилу та довжина тіла еквівалентної моделі зображені на рис. 3.

Розрахунок куту проведений за формулою:

$$\phi = \arctan\left(\frac{x}{z-r}\right), \quad L = \sqrt{x^2 + (z-r)^2}. \qquad (2)$$

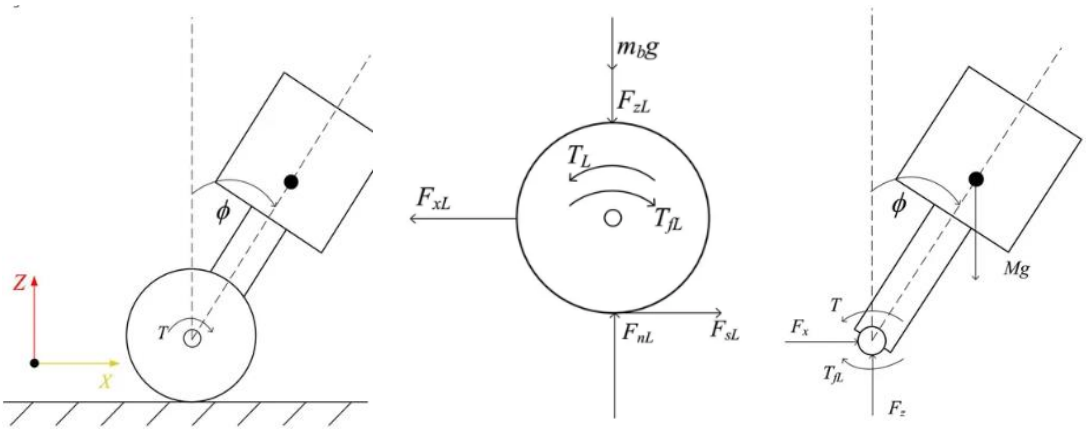

Рис. 3. Схемографічні зображення механізмів [6]

При аналізі стрибків робота через перешкоди, завдяки симетричній конструкції робота, центр мас в процесі руху може утримуватися тільки в зміщенні в напрямку X і Z у світовій системі координат, а процес стрибка аналізується відповідно до методу аналізу плоских роботів. Балансування та керування швидкістю робота реалізовано методом лінійного квадратичного регулятора (Linear quadratic regulator, LQR).

Хоча розроблене механічне рішення забезпечує гнучкість і мобільність, що дуже важливо в умовах пересіченої місцевості, воно також створює певні проблеми, пов'язані з автономною роботою платформи. В автономному режимі контролер платформи покладається виключно на власні дані з датчиків і правила керування та повинен мати можливість коригувати їх на ходу. Проблеми управління можна пояснити двома типовими ситуаціями. Найпростіша ситуація зображена на рис. 4, коли обидві секції коліс мають однакову перешкоду однакової форми. Значення $\vec{V}$ на рис. 4 і 5 вказують тип і направлення активної швидкості колеса [7].

Більш складна ситуація зображена на рис. 5, коли колісні секції (wheel section) наштовхуються на перешкоди різної форми, створюючи таким чином різні навантаження на відповідні колісні пари на кожній стороні платформи ($\vec{V}_{\text{RSection}}, \vec{V}_{\text{LSection}}$ – індикатори швидкості правої та лівої колісної секції).

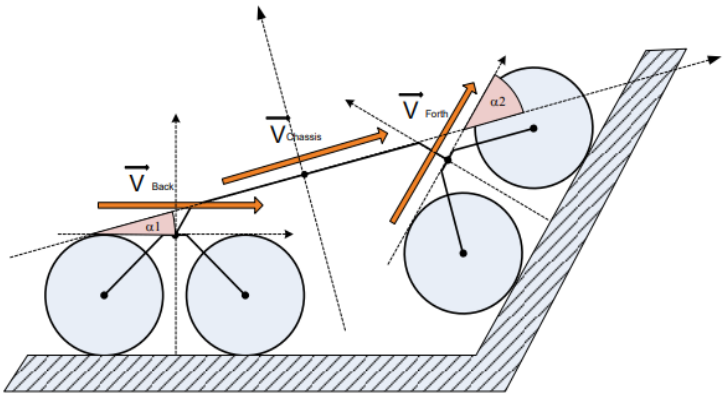

Рис. 4. Однонапрямлене переміщення

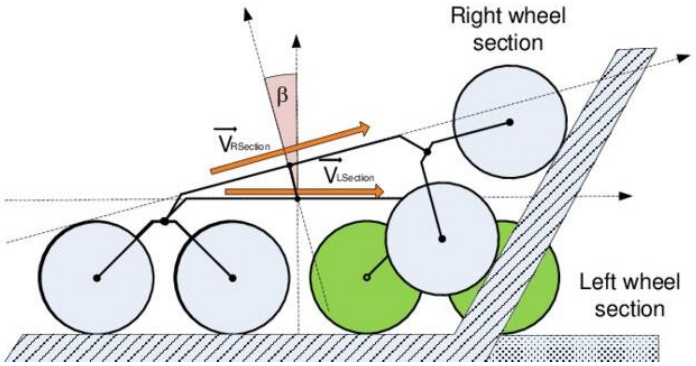

Рис. 5. Двонапрямлене переміщення

Алгоритм для вирішення двох проблем розділяється на етапи, в яких:

1. Фактичні значення коліс отримуються за допомогою датчиків обертання двигуна.

2. Положення колісних пар і секцій коліс зчитуються з вбудованих датчиків положення повороту потенціометрів;

3. Фактичні швидкості колісних пар і секцій коліс розраховуються за формулами відносно рисунків 4 і 5 відповідно:

$$\vec{V}_{new} = \frac{\vec{V}_{old}}{\cos(|\alpha_1 - \alpha_2|)},\ \vec{V}_{RSection} = \frac{\vec{V}_{RSection_old}}{\sin(\beta)}. \quad (3)$$

4. На цьому кроці застосовується нечіткий регулятор для того, щоб відрегулювати задані швидкості секцій коліс відповідно до розрахованої помилки секцій відповідно до розрахованих значень.

5. Визначає, чи зіткнулася платформа з винятком. У всьому циклі управління платформи управління платформою існує дисбаланс між необхідністю плавного руху, щоб уникнути фізичних пошкоджень, і швидкою реакцією, яка необхідна для реагування на потенційно небезпечні ситуації. Наприклад, потенційно небезпечні ситуації можуть виникнути при швидкій зміні положення четвертої колісної пари високої швидкості платформи Кожне з можливих виключень описується правилами виключень правилами, які визначаються експертами або емпіричним способом на тестах [7]. Покрокова структура такого алгоритму розглядається як відправна точка для розробки алгоритмів, які пропонують найвищу автоматичну стійкість до помилок і перешкод з можливістю додавання нових правил, тобто модульність алгоритму. Розуміння поведінки автоматичного керування робототехнічною платформою визначається шляхом порівняння ручного та автоматичного керування.

Як показано на рис. 6, чотириколісна керована робототехнічна платформа складається з модуля робота і модуля дистанційного керування. Модуль робота складається з чотирьох рульових серводвигунів, приводного двигуна постійного струму, електричного регулятора швидкості (Electric speed controller, ESC), мікроконтролера (Microcontroller) і модуля ZigBee. Модуль телеуправління складається з двовісного джойстика, мікроконтролера і модуля ZigBee. Модуль робота оснащений двома диференціальними редукторами, що з'єднують колеса, по одному в центрі кожної передньої і задньої осі [8].

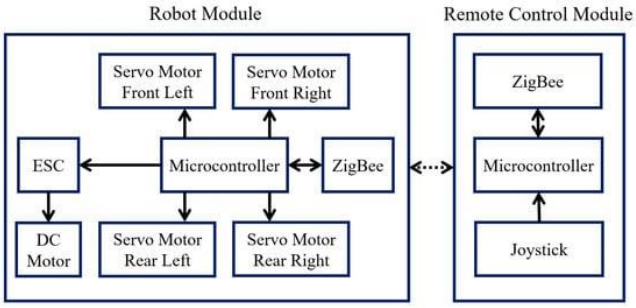

Рис. 6. Схема модулів контролеру

Ці диференціальні передачі передають потужність від приводних двигунів постійного струму через приводний вал на кожне колесо, дозволяючи колесам обертатися з різною швидкістю під час повороту робота. Використання чотирьох серводвигунів для горизонтальної орієнтації дозволяє розміщувати додаткові датчики і контролери, такі як LiDAR, камери і вбудовані контролери, на верхній частині рами робота. ZigBee в модулі робота використовується для отримання команд управління від модуля дистанційного керування і передачі інформації про стан робота, наприклад, про рівень заряду батареї, поточний кут повороту і швидкість робота [8]. Приклад стандартного розміщення вказаний на рис. 7.

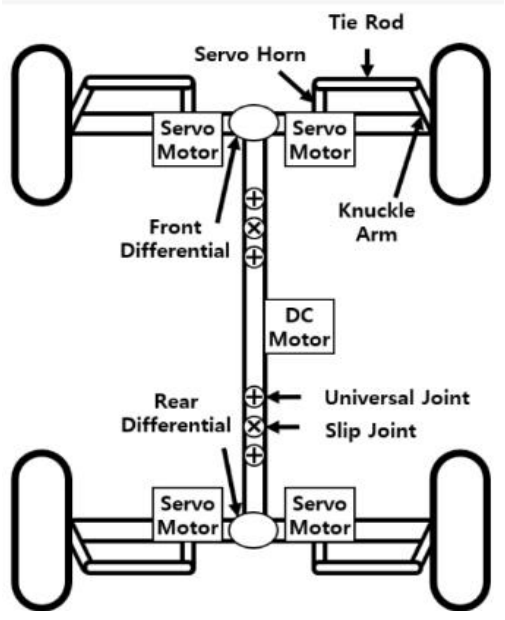

Рис. 7. Схема-базис розміщення модулів

Для кращого керування колісними роботами можна використовувати кілька методів. Пропорціонально-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор є найпростішим в реалізації і може забезпечити розумне керування, якщо правильно налаштувати параметри. Однак його продуктивність недостатня, і він неефективний для систем високого порядку і дробових систем. В [9] використовується за основну ПІД-регулятор дробового порядку, що має переваги ПІД-регулятора, а також виправлені недоліки.

Дробовий ПІД-коректор реалізується в звичайних системах керування зі зворотним зв'язком, як показано на рис. 8, де R(s) – керуючий сигнал, E(s) – відхилення, що виникає внаслідок різниці між заданим значенням R(s) і керованою змінною Y(s), C(s) – передавальна функція дробового коректора, G(s) – передавальна функція системи [9].

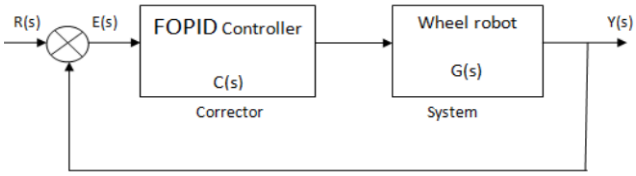

Рис. 8. Схема ПІД-коректору

Враховуючи порівняння існуючих методів і алгоритмів побудови виведемо базову структурну схему системи автоматичного руху в обхід перешкод (рис. 9).

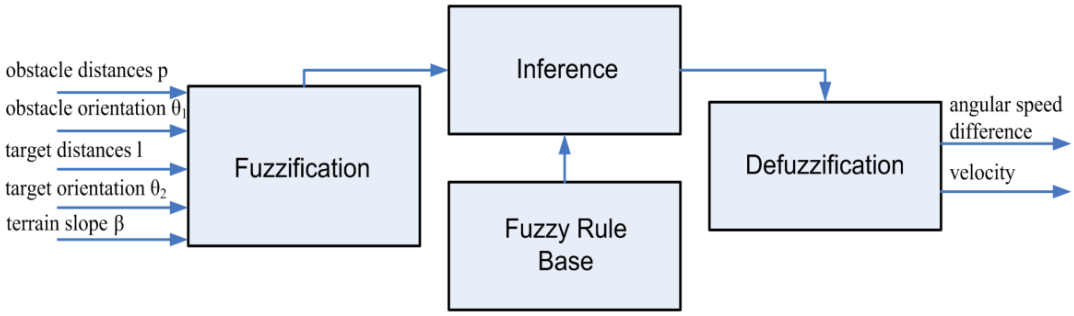

Рис. 9. Схема-базис алгоритму уникнення перешкод

Схема представлена на рис. 9 передбачає нечітке керування рухом автономної колісної мобільної роботизованої платформи в неструктурованому середовищі з перешкодами [10]. Результати моделювання показують ефективність та обґрунтованість поведінки уникнення перешкод у неструктурованому середовищі та керування швидкістю руху колісної мобільної роботизованої платформи запропонованої стратегії нечіткого керування. Пропонується для реалізації нечіткого регулятора використовувати метод дефазифікації за центром області. Ефективність запропонованого підходу підтверджується результатами моделювання, які демонструють високу точність та швидкість реакції системи на зміни у навколишньому середовищі. Застосування нечіткого керування дозволяє робототехнічній платформі плавно та безпечно обходити перешкоди, уникаючи різких змін траєкторії та забезпечуючи стабільність руху. Це особливо важливо для роботи в умовах обмеженого простору та високої щільності перешкод.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку більш складних алгоритмів нечіткого керування, які враховують динамічні зміни в навколишньому середовищі та дозволяють платформі адаптуватися до непередбачуваних ситуацій. Також планується провести експериментальні дослідження на реальній робототехнічній платформі для оцінки ефективності запропонованого підходу в реальних умовах.

Висновки

Автоматичне керування робототехнічними платформами є важливим фактором підвищення їх продуктивності та ефективності.

Дослідження показали, що вибір найкращого алгоритму керування залежить від конкретного завдання, вимог до продуктивності та складності системи. Кожен з розглянутих алгоритмів має переваги і недоліки, а їх ефективність може змінюватися в залежності від умов експлуатації. ПІД-регулятори широко використовуються в різних системах управління, в тому числі робототехнічних платформах, завдяки своїй простоті і універсальності.

Адаптивне керування ефективне для систем з невизначеними або мінливими параметрами, де алгоритм керування може автоматично підлаштовувати параметри у відповідь на зміну зовнішніх умов.

Нечітке управління та нейромережеве управління є потужними інструментами для управління складними системами, де важко побудувати точні математичні моделі.

Оптимальне керування забезпечує високу продуктивність і ефективність, але вимагає точних математичних моделей і є дорогим в обчислювальному плані. Для досягнення найкращих результатів часто надають перевагу комбінації різних алгоритмів керування.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку гібридних методів керування, які поєднують переваги різних підходів і враховують характеристики платформи робота і завдання. Важливо відзначити, що успіх автоматичного керування робототехнічною платформою залежить не тільки від вибору алгоритму керування, але й від багатьох інших факторів, таких як якість математичної моделі, точність вимірювань, ефективність системи зворотного зв'язку та якість програмного забезпечення.

Тому комплексний підхід до проектування і реалізації систем автоматичного керування є запорукою успіху в створенні високоефективних і продуктивних робототехнічних систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Янко, А. С., Михайліченко, О. В., & Крук, О. О. (2024). Конструктивний аналіз бюджетних рішень для керування робототехнічними платформами. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, (4), 170–178. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.4.16
2. Yanko, A., Pedchenko, N., & Kruk, O. (2024). Enhancing the protection of automated ground robotic platforms in the conditions of radio electronic warfare. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (6), 136–142. https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/136
3. Лактіонов, О., Педченко, Н., Янко, А., & Боряк, Б. (2024). Моделювання базової конструкції робототехнічної платформи. Measuring and computing devices in technological processes, (3), 95–99. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-13
4. Chernousko, F. L. (2017). Locomotion Principles for Mobile Robotic Systems. Procedia Computer Science, 103, 613–617. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.081
5. Michaud, F., Létourneau, D., Arsenault, M., Bergeron, Y., Cadrin, R., Gagnon, F., Legault, M.-A., Millette, M., Paré, J.-F., Tremblay, M.-C., Lepage, P., Morin, Y., Bisson, J., & Caron, S. (2008). Multi-Modal Locomotion Robotic Platform Using Leg-Track-Wheel Articulations. Auton. Robots, 18, 137–156. http://dx.doi.org/10.1007/s10514-005-0722-1
6. Guo, T., Liu, J., Liang, H., Zhang, Y., Chen, W., Xia, X., Wang, M., & Wang, Z. (2022). Design and dynamic analysis of jumping wheel-legged robot in complex terrain environment. Frontiers in Neurorobotics, 16. https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1066714
7. Nikitenko, A., & Kulikovskis, G. (2010). Eight wheel robotic platform and its Fuzzy control system.
8. Bae, B., & Lee, D.-H. (2023). Design of a Four-Wheel Steering Mobile Robot Platform and Adaptive Steering Control for Manual Operation. Electronics, 12(16), 3511. https://doi.org/10.3390/electronics12163511
9. Ratsimbalison, C., Ratsimba, N., & Ramafiarisona, M. (2024). Automatic Control of a Wheeled Robot. International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology, 11, 1–6. https://doi.org/10.26662/ijiert.v11i2.pp1-6
10. Simon, J. (2017). Autonomous Wheeled Mobile Robot Control. Interdisciplinary Description of Complex Systems, 15, 222–227. https://doi.org/10.7906/indecs.15.3.6

Received (Надійшла) 25.02.2025
Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.04.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Янко Аліна Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Alina Yanko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer and Information Technologies and Systems of the National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
e-mail: al9_yanko@ukr.net; ORCID Author ID: https://orcid.org/0000-0003-2876-9316;
Scopus Author ID: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57094953000.

Михайліченко Олексій Валерійович – аспірант кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Mykhailichenko Oleksii – PhD student, Department of Automation, Electronics and Telecommunications of the National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
e-mail: aleksejmikhajlichenko@gmail.com; ORCID Author ID: https://orcid.org/0009-0009-3512-0030.

Крук Олег Іванович – аспірант кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Kruk Oleg – PhD student, Department of Automation, Electronics and Telecommunications of the National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
e-mail: olegkruk1975@gmail.com; ORCID Author ID: https://orcid.org/0009-0004-4241-2676;
Scopus Author ID: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59172145800&origin=recordpage.

Optimal automatic control algorithms for robotic platforms ensuring high performance and reliable operation

Alina Yanko, Mykhailichenko Oleksii, Kruk Oleg

Abstract. The article presents a study of contemporary optimal automatic control algorithms for robotic platforms, guaranteeing their high performance, adaptability, and reliability. The main modes of mobile robot locomotion, such as wheeled, tracked, and multi-legged designs, are analyzed. The advantages and disadvantages of each approach are described from the perspective of enhancing energy efficiency and maneuverability in complex operating conditions. Particular attention is paid to the development of adaptive control algorithms that allow the platform to change its motion parameters in response to environmental conditions. To enhance the system's adaptability, the use of linear quadratic regulators, as well as fuzzy controllers for ensuring precise balancing and motion stabilization, is proposed. Algorithmic solutions for automatic control of the platform's motion parameters in rough terrain and the possibility of dynamic reconfiguration of movement routes are presented. The research shows that the use of adaptive algorithms allows for a significant increase in the productivity of robotic platforms, a reduction in the risk of tipping, and guaranteed stable operation even in highly variable environmental conditions. The proposed approach can be used to create a new generation of autonomous systems capable of effectively solving navigation and motion tasks in real-time.

Keywords: automatic control, adaptive algorithm, wheeled mobile robots, linear quadratic regulator, fuzzy logic, robotic platform.