

В. А. Мирошник¹, В. О. Гурко², О. Г. Гурко³¹ХНАДУ, м. Харків, Україна, mirovla@ukr.net, ORCID iD: 0009-0007-8585-8258²ХНАДУ, м. Харків, Україна, volgurko@khadi.kharkov.ua, ORCID iD: 0009-0006-9216-6682³ХНАДУ, м. Харків, Україна, gurko@khadi.kharkov.ua, ORCID iD: 0000-0001-9905-8584

ВИКОРИСТАННЯ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ШЛЯХУ БУДІВЕЛЬНОГО РОБОТА

Використання будівельних автономних мобільних роботів є перспективним напрямком підвищення швидкості, якості та безпеки виконання будівельних робіт. Однак для виконання своїх функцій такі роботи повинні будувати свій шлях від початкової точки до кінцевої у надскладних умовах зашареного будівельного майданчика. В даній статті запропоновано систему планування оптимального шляху будівельного мобільного робота в невідомому середовищі з перешкодами, засновану на методах навчання з підкріпленням. Для побудови шляху система використовує дані, отримані від датчиків, що визначають положення та орієнтацію робота, параметри його руху та відстані до перешкод.

БУДІВЕЛЬНИЙ МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, ПЛАНУВАННЯ ШЛЯХУ, НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ.

V.A. Miroshnyk, V.O. Hurko, O.G. Gurko. The use of reinforcement learning to plan the path of a construction robot. Autonomous mobile construction robots are a promising way to increase construction work's efficiency, quality and safety. However, to fulfil their functions, such robots must build their path from the initial point to the final one in the highly complex conditions of a cluttered construction site. This paper proposes a system for planning the optimal path of a construction mobile robot in an unknown environment with obstacles based on reinforcement learning methods. The system uses data obtained from sensors that determine the pose of the robot, its motion parameters, and distances to obstacles to plan the path.

CONSTRUCTION MOBILE ROBOT, PATH PLANNING, REINFORCEMENT LEARNING.

Вступ

Мобільна робототехніка сьогодні переживає стрімкий розвиток, знаходячи застосування в найрізноманітніших сферах: від вантажних і пасажирських перевезень до сільського господарства, охорони здоров'я та військових технологій. Використання мобільних роботів дає змогу значно підвищити продуктивність, якість і безпеку виконуваних робіт.

Дедалі частіше мобільні знаходять своє застосування в будівельній галузі, де до цього застосовували здебільшого стаціонарні або маломобільні маніпулятори, паралельні або порталні роботи. Це зумовлено забезпеченням можливості виготовлення великомасштабних будівельних конструкцій, що перевищують робочий простір стаціонарного робота [1]. Будівельні мобільні роботи (БМР) беруть на себе такі завдання, як транспортування матеріалів, моніторинг темпів будівництва, контроль якості та безпеки виконуваних робіт [2–4]. При оснащенні додатковим будівельним обладнанням, таким як маніпулятори, вони можуть автономно здійснювати земляні, бетонні та інші види будівельних робіт [5, 6]. Використання мобільних роботів у будівництві є важливим кроком до створення розумних будівельних майданчиків, де інтегрування технологій автоматизації та цифровізації спрямоване на підвищення ефективності та темпів будівництва.

Одним із завдань під час розроблення та експлуатації мобільних роботів залишається планування їхніх рухів у невідомому навколишньому середовищі з перешкодами.

1. Аналіз публікацій

Як показує огляд літератури, розвиток БМР пішов за двома основними напрямками. Перший із них умовлений прагненням роботизувати вже наявні будівельні машини, такі як екскаватори, автогрейдери, бульдозери, навантажувачі, бетононасоси та вантажівки [5, 7–11]. Другий підхід пов'язаний з установкою на мобільне шасі роботизованого обладнання, призначеного для виконання певного виду будівельних робіт. Такі рішення дають змогу розширити функціональні можливості будівельних роботів і адаптувати їх до вимог сучасного будівництва [12]. Відповідні БМР можна класифікувати за видом виконуваних ними робіт.

1. Роботи, що виконують складальні та монтажні операції. Такі БМР призначені для переміщення елементів конструкцій й їх встановлення на необхідні місця. Наприклад, у [13] представлено роботів, які переміщують склопакети й допомагають у їхньому встановленні (рис. 1).

2. Роботи для складання несучих елементів конструкцій, яка є, мабуть, найскладнішим технологічним процесом для БМР. У традиційному будівництві несучі елементи зазвичай виготовляють зі сталі, деревини або бетону, перевозять із заводу-виготовлювача та збирають на майданчику, який зазвичай підготовано за допомогою опалубки, будівельних лісів та інших допоміжних конструкцій і обладнання, що допомагають робітникам збирати конструкцію. Такий великий набір допоміжних будівельних завдань перешкоджає створенню повністю автономної послідовності будівництва. Тому в багатьох дослідженнях пропонуються

роботи, здатні переміщатися конструкцією в процесі її зведення, використовуючи саму споруджувану конструкцію в ролі будівельних лісів [14, 15].



Рис. 1. Робот для скління вікон [13]

3. Роботи-муляри, що можна розглядати як встановлені на мобільні платформи маніпулятори [16].

4. Роботи – 3D принтери. Впровадження в будівництво адитивних технологій стало ще одним стимулом для розробки БМР. У даний час розробляється велика кількість подібних роботів, які можуть друкувати конструкції та вироби будь-якої форми і складності, починаючи від простих загороджень і закінчуючи складними архітектурними об'єктами, та з різних матеріалів, в тому числі, з металу (рис. 2) [1, 17–19].

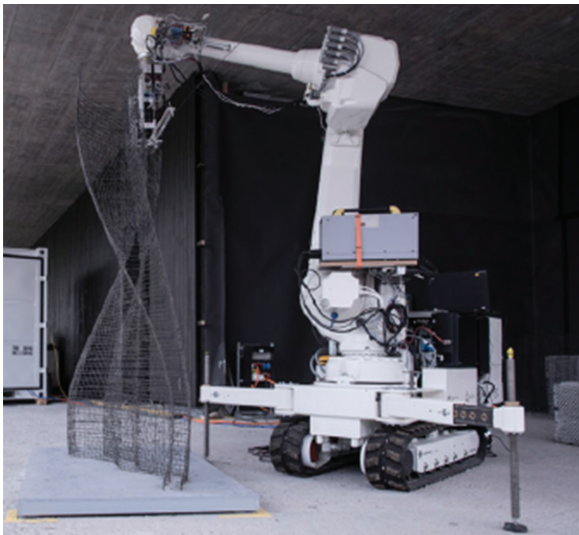


Рис. 2. БМР будує металеву сітку на дослідному будівельному майданчику [19]

2. Мета та постановка задачі

Таким чином, БМР є перспективним напрямком автоматизації будівництва. Водночас, їх використання пов'язане з певними проблемами. Однією з них є те, що будівельні майданчики являють собою дуже складні умови для застосування мобільних роботів, оскільки навколишнє середовище дуже захащене і неструктуроване [12]. БМР мають бути здатні переміщатися в таких складних умовах і локалізувати

себе в робочому середовищі [20]. Для прокладання шляху БМР та їхнього руху цим шляхом використовують різні підходи [7, 9, 21 - 23]. Однак складність навколишнього оточення вимагає використання систем, заснованих на використанні штучного інтелекту. У цій роботі розглядається рішення, яке використовує машинне навчання для побудови будівельним мобільним роботом шляху будівельним майданчиком.

Метою даної роботи є підвищення ефективності будівельного мобільного робота шляхом побудови оптимального шляху в складному та захащеному середовищі. Об'єктом дослідження є процес побудови шляху будівельним мобільним роботом.

Для досягнення поставленої мети необхідно побудувати комп'ютерну модель БМР, обрати метод машинного навчання та навчити модель системи планування шляху БДМ будувати шлях між заданими точками у просторі уникаючи зіткнень з перешкодами.

3. Навчання з підкріпленням

Машинне навчання — це швидко зростаюча частина науки про штучний інтелект. Методи машинного навчання, як показано на рис. 3, поділяються на такі: навчання з учителем, навчання без учителя, навчання з підкріпленням та напівкероване навчання.

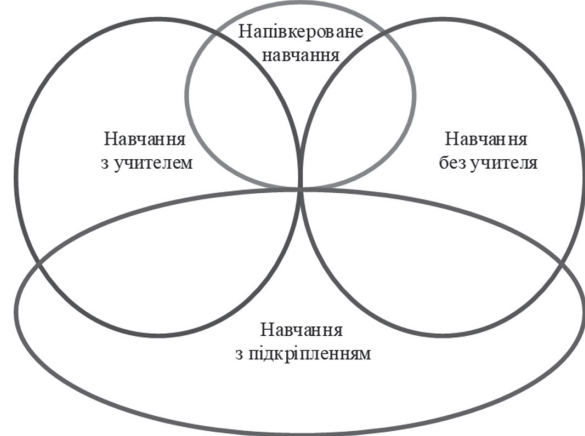


Рис. 3. Діаграма Венна для методів машинного навчання

В даній роботі для побудови шляху БМР будемо використовувати навчання з підкріпленням (НП), оскільки воно не потребує наявності заздалегідь зібраних даних [24]. Натомість навчання здійснюється на основі взаємодії з навколишнім середовищем (рис. 4) та системи винагород за прийняті рішення.

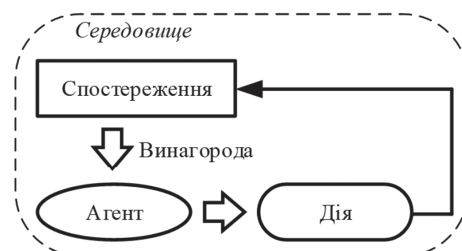


Рис. 4. Блок-схема навчання з підкріпленням

Термін «підкріплення» вперше був використаний в психології в 1920-х роках і заснований на ідеї навчання методом проб і помилок. Згодом ця ідея стала популярною в інформатиці, а у 1989 році запровадження Q -навчання, як технології машинного навчання з підкріпленням, стало важливим проривом в області штучного інтелекту.

Сутність використання НП для вирішення завдання навігації БМР полягає у навчанні агента (тобто БМР) тому, як діяти в невідомому середовищі, досягаючи оптимального значення Q -функції (« Q » – від англ. «*quality*», тобто «якість»), що дає найкращі результати для всіх станів. Q -функція показує, наскільки цінною є дія з точки зору максимізації майбутньої винагороди. У спрощеному вигляді Q -функцію можна записати так:

$$Q[s, a] = R[s, a] + \gamma \cdot \max(Q[s', a']), \quad (1)$$

де s – елемент множини станів $S(s_1, s_2, \dots, s_n)$, у якій може перебувати агент; a – елемент множини дій агента $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$; s' – елемент попереднього стану з множини станів S , в яких може перебувати агент; a' – елемент попередньої дії агента; γ – коефіцієнт швидкості навчання, що може приймати значення від 0 до 1.

Для того, щоб БМР був здатний взаємодіяти з середовищем, на ньому встановлюються відповідні датчики для визначення просторово-часової орієнтації БМР та перешкод.

4. Синтез системи планування шляху БМР

Розглянемо систему планування шляху робота, що працюватиме на основі НП. У якості об'єкта керування чотириколісний БМР з бортовим поворотом, його Simulink-модель надана на рис. 5. Завдання системи – визначити шлях робота від початкової до кінцевої точки за наявності перешкод. Як вже зазначалося, вважається, що БМР обладнаний датчиками для визначення положення та орієнтації робота (x, y, θ) в глобальній системі координат, поступальної v , та обертальної ω швидкостей.

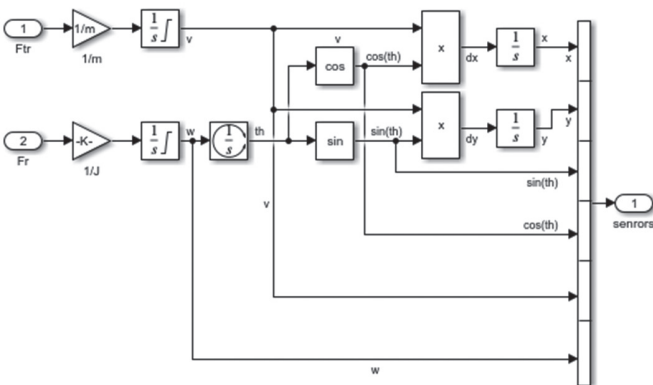


Рис. 5. Simulink-модель БМР

Для синтезу системи використано Reinforcement Learning Toolbox пакета MATLAB, що дозволяє

інтегрувати контролер з моделлю МБР у Simulink. Для моделювання НП контролера, використано блок «RL Agent» бібліотеки «Reinforcement Learning» пакета Simulink. Блок має три входи: «observation», «reward» та «isdone». На вхід «observation» подається 6×1 вектор координат стану МБР $[x, y, \sin(\theta), \cos(\theta), v, \omega]^T$ від блоку, що моделює МБР (рис. 5). Вхід «reward» отримує значення винагороди, що розраховується на підставі інформації щодо та отриманої за допомогою зворотного зв'язку.

Нагорода розраховується на основі поточних координат стану БМР, виконаної дії, факту досягнення або недосагнення мети, а також того, чи було зіткнення з перешкодою:

$$R = k_1 e^{\alpha x^2} + k_2 e^{\beta y} + k_3 \sum_{i=1}^m u_i^2 + k_5 g + k_6 c + k_7, \quad (2)$$

де $k_1, k_2, \dots, k_6$ – вагові коефіцієнти, що встановлюють рівень винагороди (при доданому значенні) або штрафу (при від'ємному значенні) за відповідну дію або стан; k_7 – від'ємний коефіцієнт, що діє як базовий штраф за кожен крок та стимулює швидке досягнення мети; α, β – коефіцієнти, що регулюють чутливість винагороди до змін координат x та y ; u_i – i -й керуючий вплив; m – кількість керуючих впливів; g – бінарна функція, що свідчить про досягнення або недосагнення БМР мети; c – бінарна функція, що свідчить про наявність або відсутність зіткнення робота з перешкодою.

На останній вхід блоку «RL Agent» – «isdone» – подається умова завершення епізоду навчання: БМР досяг поставленої мети або відбулося зіткнення.

На підставі вказаних входів контролер формує 2×1 вектор керуючих дій на виконавчі механізми БМР

$$u = [u_1 \quad u_2]^T, \quad (3)$$

де u_1 – сила тяги, що забезпечує лінійний рух БМР, змінюючи його швидкість v ; u_2 – момент сили обертання БМР.

Для навчання обрано алгоритм Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), який поєднує можливості глибокого навчання з алгоритмами оптимізації стратегій для середовищ з безперервним простором дій. DDPG використовує дві нейронні мережі: актор і критик. Мережа актора прогнозує найкращу дію для даного стану, тоді як мережа критика оцінює якість цієї дії, обчислюючи значення Q -функції. Таким чином, критик допомагає актору вдосконалювати свою політику. Для дослідження середовища DDPG застосовує механізм додавання випадковості до дій, що дозволяє ефективно знаходити нові шляхи оптимізації.

З огляду на особливості алгоритму DDPG, при розрахунку Q -функції (1) дія a' обирається не випадково, а через мережу актора, яка пропонує оптимальну дію для нового стану s' .

5. Результати моделювання

Навчання робота проводилося протягом 500 епізодів. Кожен епізод починався з випадкового положення і завершувався, коли БМР досягав цільової точки, стикався з перешкодою або виконував задану кількість ітерацій. У процесі навчання БМР отримував винагороду, яка збільшувалася в міру його наближення до мети, значну винагороду за досягнення мети та великий штраф за зіткнення з перешкодами. Характерний приклад зміни винагороди з плином часу відображено на рис. 6. Приклад шляху, побудованого та пройденого БМР, відображено на рис. 7.

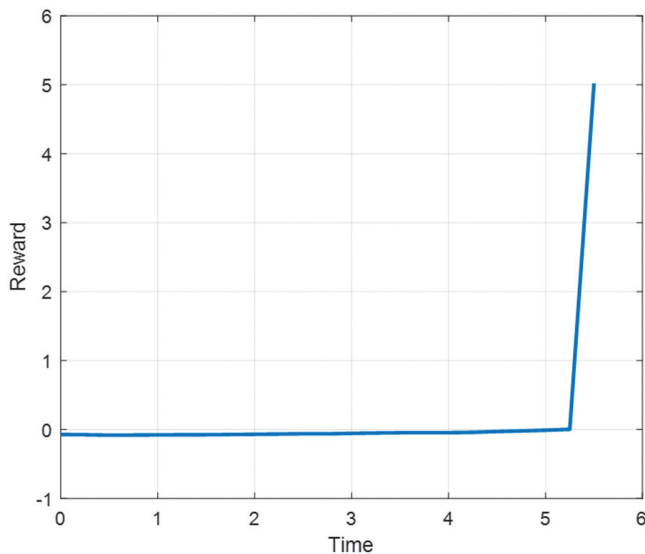


Рис. 6. Зміна винагороди БМР з плином часу на одному з епізодів навчання

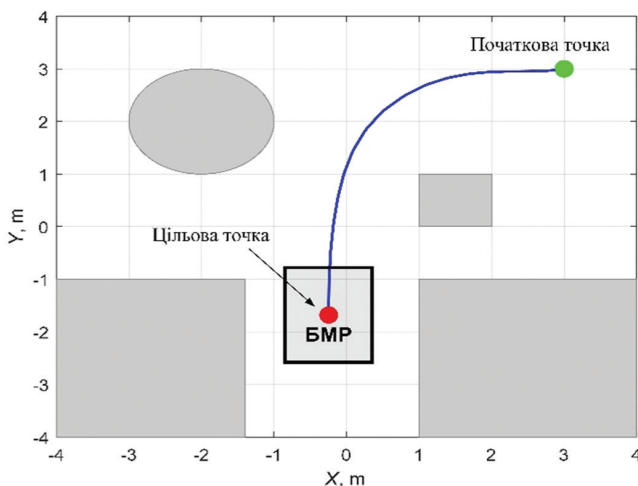


Рис. 7. Побудований БМР шлях

Як видно з рис. 7 робот успішно знаходить шлях від початкової точки до заданої цільової між перешкодами уникаючи зіткнень.

Висновки

Використання на будівельних майданчиках автономних мобільних роботів є перспективним напрямком розвитку будівельної галузі. Застосування

таких роботів підвищить швидкість якості та безпеку будівництва, а також дозволить споруджувати складні конструкції. Однією з перешкод, що запобігають впровадженню БМР є неструктурованість та сильна зашарашеність оточуючого робота будівельного майданчика. Це ускладнює безпечне пересування БМР.

В дній роботі для синтезу системи планування шляху БМР зашарашеною місцевістю використано метод машинного навчання з підкріпленням. Для навчання системи використано DDPG. Цей алгоритм використовує нейронні мережі актора, що прогнозує найкращу дію для даного стану, та критика, яка допомагає мережі-актору вдосконалювати свою політику шляхом оцінки якості запропонованих актором дій.

У пакеті Simulink побудована модель БМР, з системою автоматичного планування шляху, що побудована за навчання за допомогою Reinforcement Learning Toolbox. Результати моделювання підтверджують ефективність отриманого рішення: БМР знаходить шлях з довільно обраної початкової точки до кінцевої уникаючи перешкод.

Подальша робота пов'язана з оцінкою ефективності системи планування шляху у динамічному середовищі.

Список літератури

- [1] Mobile Robotic Brickwork / K. Dörfler et al. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design. Springer, Cham, 2016. P. 204–217. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_15
- [2] Saidi K. S., O'Brien J. B., Lytle A. M. Robotics in Construction. Springer Handbook of Robotics. Berlin, Heidelberg, 2008. P. 1079–1099. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_48
- [3] Melenbrink N., Werfel J., Menges A. On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building. Automation in Construction. 2020. Vol. 119. P. 103312. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103312>
- [4] Yu S.-N., Jang J.-H., Han C.-S. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel. Automation in Construction. 2007. Vol. 16, no. 3. P. 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.003>
- [5] Linear Quadratic Gaussian Control for Robotic Excavator / Gurko A. Kyrychenko I., Yaryzhko A., Kononykhin O. The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems: proceedings. 2020. Vol. 2608. P. 144–155. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper12.pdf>
- [6] Mobile Manipulator for Autonomous Localization, Grasping and Precise Placement of Construction Material in a Semi-Structured Environment / P. Stibinger et al. IEEE Robotics and Automation Letters. 2021. Vol. 6, no. 2. P. 2595–2602. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3061377>
- [7] Гурко, О. Г., Гурко, В.О., Кучеренко, А.Ю. Керування рухом фронтального навантажувача за заданою траєкторією. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 2023. Вип. 101, т. 1. С. 26–34. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.26>

- [8] Smirnova, N., Yefimenko, O., Filatova, A., Demchenko, O. Improving the Efficiency of Road Machines During Introduction Innovative Control Systems. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, no. 73. P. 275–283. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_29.
- [9] Khan S., Guivant J. Nonlinear Model Predictive Path-Following Controller for a Small-Scale Autonomous Bulldozer for Accurate Placement of Materials and Debris of Masonry in Construction Contexts. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 102069–102080. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3098524>
- [10] Meiringer M., Kugi A., Kemmetmüller W. Semi-autonomous operation of a mobile concrete pump. *Automation in Construction*. 2023. P. 105079. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105079>
- [11] Volvo Autonomous Solutions. URL: <https://www.volvoautonomousolutions.com/en-en/our-solutions.html> (date of access: 02.10.2024)
- [12] Ardiny, H., Witwicki, S.J., Mondada, F. Are Autonomous Mobile Robots Able to Take Over Construction? A Review. *International Journal of Robotics*. 2015. Vol. 4, no. 3. P. 10-21.
- [13] Winlet Glazing Robots. Winlet. URL: <https://winlet.co.uk/> (date of access: 02.10.2024).
- [14] Material–Robot System for Assembly of Discrete Cellular Structures / B. Jenett et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. Vol. 4, no. 4. P. 4019–4026. <https://doi.org/10.1109/lra.2019.2930486>
- [15] Mobile Manipulator for Autonomous Localization, Grasping and Precise Placement of Construction Material in a Semi-Structured Environment / P. Štibinger et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6, no. 2. P. 2595–2602. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3061377>
- [16] Dindorf R., Woś P. Innovative solution of mobile robotic unit for bricklaying automation. *Journal of Civil Engineering and Transport*. 2022. Vol. 4, no. 4. P. 21–32. <https://doi.org/10.24136/tren.2022.014>
- [17] Mobile robotic fabrication beyond factory conditions: case study Mesh Mould wall of the DFAB HOUSE / K. Dörfler et al. *Construction Robotics*. 2019. Vol. 3, no. 1-4. P. 53–67. <https://doi.org/10.1007/s41693-019-00020-w>
- [18] The robot that can lay 1,000 bricks in an hour. BIM-Software - CAD Programm - BCM, AVA, CAFM & CAD-Software - ALLPLAN Deutschland GmbH. URL: <https://www.allplan.com/blog/the-robot-that-can-lay-1000-bricks-in-an-hour/> (date of access: 10.10.2024)
- [19] Mobile robotic fabrication at 1:1 scale: the In situ Fabricator / M. Giftthaler et al. *Construction Robotics*. 2017. Vol. 1, no. 1-4. P. 3–14. <https://doi.org/10.1007/s41693-017-0003-5>
- [20] Seward, D.W. Automating the Construction Workplace: Positioning and Navigational. *Construction Innovation*. 2002. Vol. 2, no. 3, pp. 167–189. <https://doi.org/10.1108/14714170210814757>
- [21] Lee S., Adams T. M. Spatial Model for Path Planning of Multiple Mobile Construction Robots. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2004. Vol. 19, no. 4. P. 231–245. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2004.00351.x>
- [22] Khan S., Guivant J., Li X. Design and experimental validation of a robust model predictive control for the optimal trajectory tracking of a small-scale autonomous bulldozer. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022. Vol. 147. P. 103903. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103903>
- [23] Schmidt, D., Berns, K. Construction site navigation for the autonomous excavator Thor. 2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), Queenstown, New Zealand, 2015, pp. 90-97. <https://doi.org/10.1109/ICARA.2015.7081130>
- [24] Бочкарьов О. Навчання з підкріпленням в автономних інтелектуальних системах : навч. посіб. Львів : Вид. Марченко Т.В, 2024. 125 с.

Надійшла до редколегії 20.11.2024