

Ю. Ю. Хазанович<sup>1</sup>  
І. Ю. Черепанська<sup>1</sup>  
Ю. В. Киричук<sup>1</sup>

## АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ КІНЦІВОК КРОКУЮЧОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА У ПРОСТОРІ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Запропоновано алгоритм визначення положення кінцівок крокуючого мобільного робота (МР) у просторі на базі раніше розробленого авторами методу, що є кінцевою множиною трикутників для представлення кожного зчленування кінцівки крокуючого МР. Цей алгоритм має лінійну структуру без розгалужень для поетапного виконання певної послідовності дій, які дозволяють визначити просторове положення кінцівок крокуючого МР. Роботу алгоритму розглянуто на прикладі абстрактної моделі шестиногого крокуючого МР з однаковою конструкцією тришарнірних кінцівок та тулубом у формі правильного шестикутника. Цей алгоритм дозволяє автоматизовано розрахувати та графічно відобразити положення кінцівки МР у просторі. Практична реалізація запропонованого алгоритму передбачається у спеціалізованому програмному забезпеченні.

Актуальність та важливість запропонованого алгоритму зумовлена недостатністю робіт та публікацій в цьому напрямку. У відомих наукових роботах у більшості випадків досліджувалися тільки питання розв'язання задач кінематики і динаміки крокуючих МР та побудова їхніх кінематичних моделей. При цьому, необхідно відмітити відсутність системного підходу, щодо алгоритмізації та автоматизації визначення положення кінцівок крокуючих МР у просторі, що обмежує їхнє практичне використання в реальних умовах. У зв'язку з цим передбачається, що запропонований алгоритм визначення положення кінцівок крокуючого МР дозволить частково вирішити цю проблему, що сприятиме впровадженню МР у різні сфери людської діяльності.

Очевидними перевагами запропонованого алгоритму є лінійність, простота, нерозгалуженість структури, його наочність, простота програмної реалізації. Застосування алгоритму дозволяє підвищити продуктивність та зменшити трудомісткість дій, виконуваних під час розв'язання задач визначення положень кінцівок крокуючих МР у просторі, скорочення часу виконуваних операцій та зниження інтелектуального навантаження на розробників.

**Ключові слова:** крокуючий мобільний робот, алгоритм роботи, блок-схема, математична модель визначення положення у просторі, геометричний центр мас тіла, положення кінцівки, автоматизація, метод трикутників.

### Вступ

На сьогодні одним із перспективних напрямків розвитку робототехніки є синтез мобільних роботів (МР), що спроможні вільно рухатись у тривимірному просторі. Незважаючи на те, що зараз створення та впровадження МР перебуває на початковій стадії розвитку, їх вже успішно використовують для виконання різних сільськогосподарських та лісогосподарських робіт, наприклад, для обрізки дерев [1], [2] тощо. Крім того, ведуться розробки щодо застосування МР для виконання різноманітних робіт у важкодоступних місцях, наприклад, для перевірки та контролю вентиляційних шахт і технічних каналів, проведення дослідницької діяльності під водою [3], [15], використання у вигляді транспортних засобів в автоматизованих транспортно-складських системах [4], [5], обслуговуванні та ремонті, наприклад, висотних будівель, високовольтних ліній електропередач [6] тощо. Також можливо використовувати МР у дослідницьких роботах, наприклад, для вивчення небесних тіл, [4], [7] та/або рятувальних операціях.

Проте, основними проблемами для їхнього промислового освоєння та ширшого впровадження залишається проблема відсутності методології моделювання роботів та зразків устаткування для

їхнього промислового використання [6]. При цьому однією з найважливіших задач синтезу МР є визначення положення їхніх кінцівок у тривимірному просторі. Одним з відомих методів розв'язання цієї задачі є раніше розроблений авторами статті метод визначення положення кінцівок крокуючого мобільного робота у просторі [8], [9]. Проте відсутність алгоритмічно-програмного забезпечення обмежує можливості його практичної реалізації в реальних умовах. Таким чином, очевидно, що розробка алгоритму визначення положення кінцівок крокуючого мобільного робота у просторі є конче необхідною.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на сьогодні існує низка наукових робіт, які висвітлюють дослідження кінематики та динаміки крокуючих МР. Однак всі ці дослідження не дозволяють говорити про системний підхід та не дозволяють побудувати алгоритм автоматизованого визначення положення кінцівки у просторі. Зокрема, у роботі [10] розглядається крокуючий МР типу робот-павук. Для визначення положення його кінцівки автори використовують модель Денавіта–Хартенберга для розв'язання прямої та оберненої задачі кінематики. В статті описана математична модель кінематики крокуючого МР, але відсутній алгоритм автоматизованого визначення положення кінцівки у просторі.

У роботі [11] автори ставлять за мету усунути недоліки стрибаючого МР, тому наводяться результати кінематичного аналізу спеціально сконструйованого шестиногого крокуючого МР, що може здійснювати багатоспрямовані стрибкові рухи. Для проведення кінематичного аналізу використано модель Денавіта–Хартенберга та розв'язано пряму та обернену задачі кінематики, наведено динамічну модель за формулою Лагранжа, побудовано динамічну систему керування та проведено експериментальні дослідження із застосуванням пакетів прикладних програм MATLAB і Adams для багатоспрямованого стрибкового руху МР, проте відсутній алгоритм автоматизованого визначення положення його кінцівок у просторі.

У роботі [12] описано процес розробки загальної кінематичної моделі крокуючого МР, розглянуто прямий та інверсний кінематичний аналіз для кожної його кінцівки. В роботі використовується штучна нейронна мережа для прогнозування кутів, часу навчання та загальної продуктивності та їхнього порівняння з отриманими аналітично. У роботі відсутній алгоритм для автоматизованого визначення положення кінцівки у просторі.

У роботі [13] пропонується кінематика стрибка крокуючого МР, що базується на моделі Денавіта–Хартенберга. Пропонована кінематика стрибка була перевірена на експериментальній крокуючій платформі. Результатами є стратегія стрибка, за зразком рухів павука, який може легко виконувати багатоспрямований стрибок, що дозволяє МР уникати перешкод. В роботі також подано алгоритм керування роботом у вигляді блок-схеми, проте відсутній алгоритм автоматизованого визначення положення кінцівки у просторі.

У статті [14] описано результати розробки шестиногого МР Snoopet, проаналізовано його кінематику та динаміку за допомогою моделі Денавіта–Хартенберга, алгоритм руху МР за трьома видами методів ходьби, проте відсутній алгоритм для автоматизованого визначення положення кінцівки у просторі.

У роботі [15] описано алгоритм керування для динамічного балансування центру тиску (ЦТ) крокуючого МР LittleCrabster з метою підтримання його динамічної рівноваги. У статті запропоновано алгоритм перемикання контролерів, який призводить до плавного переходу між контролерами ЦТ, щоб упоратися зі змінами параметрів моделі відповідно до зміни кількості опорних ніг під час ходьби. Продуктивність контролерів ЦТ та алгоритм перемикання контролерів перевірені декількома експериментами з використанням крокуючого МР. Описаний у статті робот виготовлений в рамках процесу розробки підводного крокуючого МР. Проте у статті відсутній алгоритм для автоматизованого визначення положення кінцівки МР у просторі.

Таким чином, автори статті ставлять собі за мету усунення прогалини, щодо алгоритмізації визначення просторових положень кінцівок крокуючого МР. З огляду на вказане *мета статті* — розроблення алгоритму визначення положення кінцівок крокуючого МР у просторі.

### Виклад основного матеріалу

Розроблений авторами алгоритм відтворює метод визначення положення кінцівок крокуючого МР у просторі, описаний у роботах [8], [9], та передбачає побудову кінцевої множини відповідних трикутників для кожного зчленування кінцівки крокуючого МР. Як МР використана абстрактна

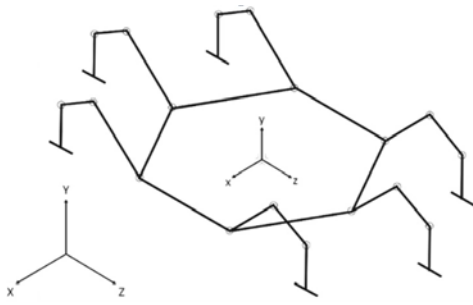


Рис. 1. Схематичне зображення абстрактної моделі шестиногого крокуючого МР

модель шестиногого крокуючого МР з однаковою конструкцією тришарнірних кінцівок та тулубом у формі правильного шестикутника (рис. 1). Метод дозволяє знайти положення кінцівки у просторі відносно геометричного центру мас  $O$  тіла МР [8], [9].

Блок-схема алгоритму показана на рис. 2. Робота алгоритму починається із завантаження вхідної інформації (блок 2) про геометричні розміри тулуба та довжини ланок  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  кінцівки робота, що задаються на етапі конструювання крокуючого МР та кути:  $\alpha_1$  — кут між площиною положення геометричного центра мас  $O$  та ланкою  $AB$ ,  $\beta_1$  — кут між ланками  $AB$  та  $BC$ ,  $\gamma_1$  — кут між ланками  $BC$  та  $CD$  (рис. 3).

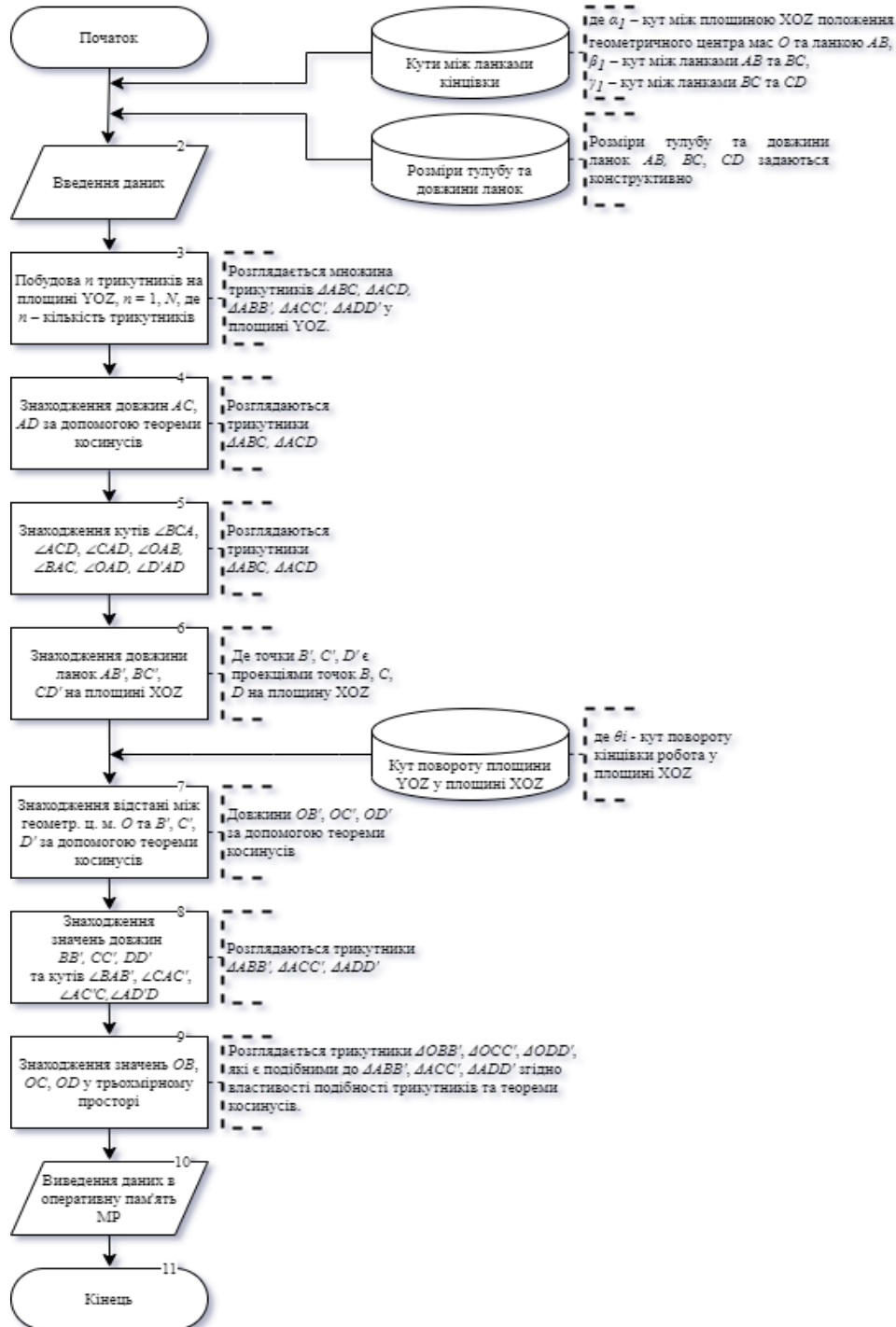


Рис. 2. Блок-схема алгоритму визначення положення кінцівок крокуючого МР у просторі

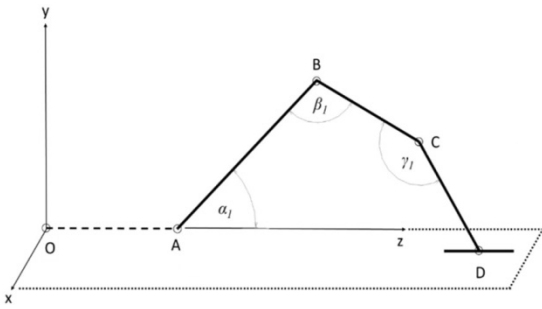


Рис. 3. Схематичне зображення тришарнірної кінцівки абстрактної моделі шестиногого крокуючого МР: точка  $O$  — геометричний центр мас;  $A$  — точка з'єднання кінцівки з тубулом;  $AB$  — стегнова ланка,  $BC$  — гомілкорова ланка,  $CD$  — довжина лапки; точка  $D$  — п'ятка кінцівки лапки (стопа)

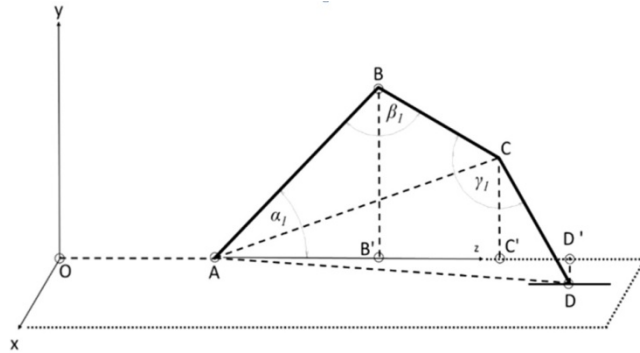


Рис. 4. Проекції зчленувань кінцівки абстрактної моделі крокуючого МР на площину  $YOZ$

Кінцівка МР представляється у вигляді множини трикутників  $\triangle ABC$ ,  $\triangle ACD$ ,  $\triangle ABB'$ ,  $\triangle ACC'$ ,  $\triangle ADD'$  у площині  $YOZ$  (рис. 4) (блок 3).

З метою знаходження довжин  $AC$  та  $AD$ , а також знаходження множини кутів  $\angle BCA$ ,  $\angle ACD$ ,  $\angle CAD$ ,  $\angle OAB$ ,  $\angle BAC$ ,  $\angle OAD$ ,  $\angle D'AD$  розглядають трикутники  $\triangle ABC$ ,  $\triangle ACD$  (блок 4 та блок 5).

Безпосереднє знаходження довжин  $AB'$ ,  $BC'$ ,  $CD'$  на площині  $XOZ$ , де точки  $B'$ ,  $C'$ ,  $D'$  є проекціями точок  $B$ ,  $C$ ,  $D$  на площину  $XOZ$ , здійснюється у блоці 6.

Знаходження відстані  $OB'$ ,  $OC'$ ,  $OD'$  між геометричним центром мас (точка  $O$ ) та проекціями (точка  $B'$ , точка  $C'$ , точка  $D'$ ) шарнірного зчленування на площині  $XOZ$ , (рис. 4) здійснюється у блоках 7 та 8. Для цього розглядаються трикутники  $\triangle ABB'$ ,  $\triangle ACC'$ ,  $\triangle ADD'$ , де необхідно знайти значення довжин  $BB'$ ,  $CC'$ ,  $DD'$ , що є спільними для трикутників  $\triangle ABB'$ ,  $\triangle ACC'$ ,  $\triangle ADD'$  та  $\triangle OBB'$ ,  $\triangle OCC'$ ,  $\triangle ODD'$  відповідно та знайти кути  $\angle BAB'$ ,  $\angle CAC'$ ,  $\angle AC'C$ ,  $\angle AD'D$ .

Також для проведення розрахунку вводиться кут  $\theta_i$ ; повороту кінцівки робота у площині  $XOZ$  (рис. 5), величина якого дорівнює кутам  $\angle OAB'$ ,  $\angle OAC'$ ,  $\angle OAD'$  трикутників  $\triangle OAB'$ ,  $\triangle OAC'$ ,  $\triangle OAD'$  відповідно (рис. 6), де  $i$  — порядковий номер кінцівки МР.

Для визначення відстані від геометричного центру мас (точка  $O$ ) до шарнірних зчленувань (точок  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ), тобто відстані  $OB$ ,  $OC$ ,  $OD$  у тривимірному просторі, у блоці 9 цього алгоритму, аналізуються трикутники  $\triangle ABB'$ ,  $\triangle ACC'$ ,  $\triangle ADD'$  та  $\triangle OBB'$ ,  $\triangle OCC'$ ,  $\triangle ODD'$  і за властивістю подібності трикутників, визначається їхня подібність. Крім того, у блоці 9, за теоремою косинусів обчислюються величини  $OB$ ,  $OC$ ,  $OD$  у тривимірному просторі.

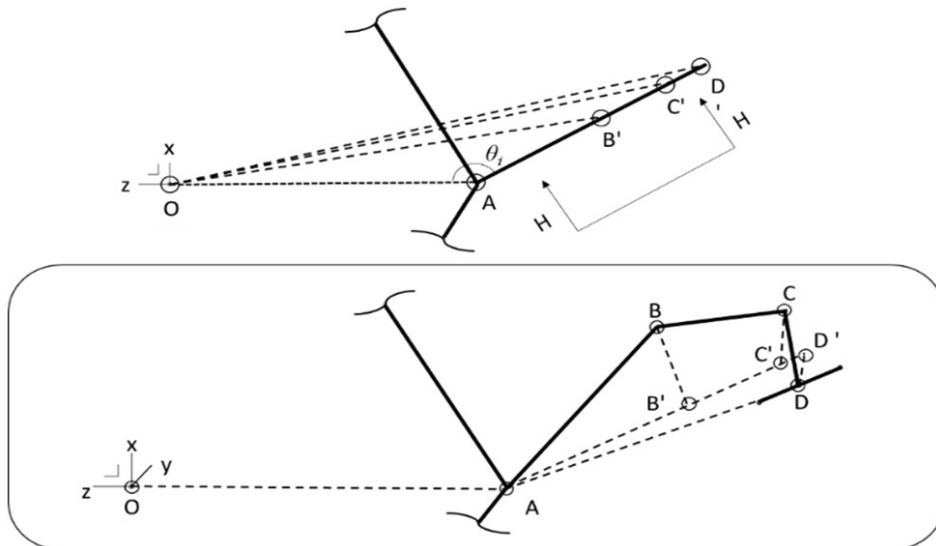


Рис. 5. Відстані, що характеризують:  $OB'$  — відстань між геометричним центром мас та проекцією шарнірного зчленування стегна;  $OC'$  — відстань між геометричним центром мас та проекцією шарнірного зчленування гомілки;  $OD'$  — відстань між геометричним центром мас та проекцією шарнірного зчленування лапки

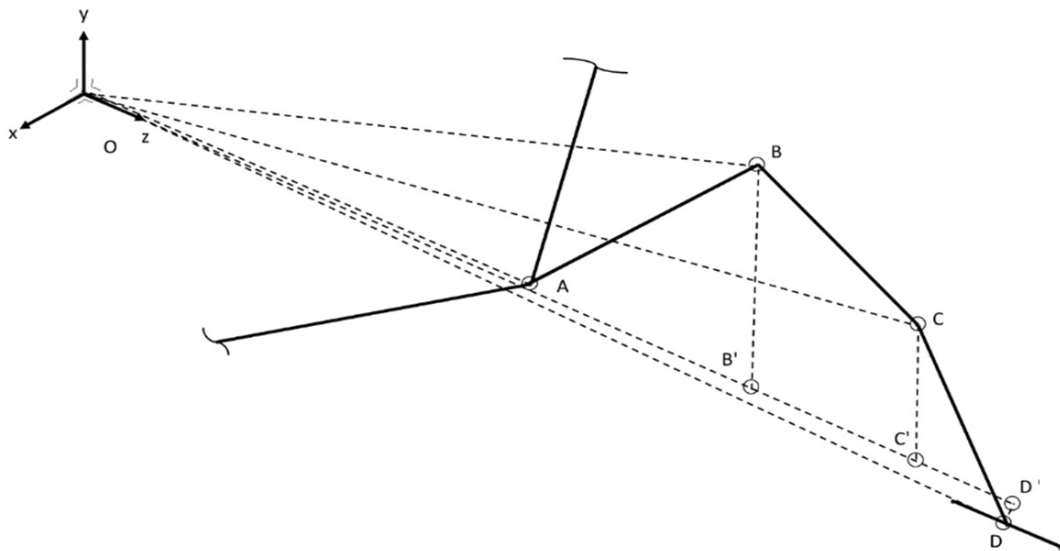


Рис. 6. Відстані, які характеризують:  $OB$  — відстань між геометричним центром мас та шарнірним зчленуванням;  $OC$  — відстань між геометричним центром мас та шарнірним зчленуванням гомілки;  $OD$  — відстань між геометричним центром мас та шарнірним зчленуванням лапки

На цьому робота алгоритму визначення положення кінцівок крокуючого мобільного робота у просторі завершується. Результати зберігаються в оперативній пам'яті комп'ютера. Кінцевим результатом запропонованого алгоритму є визначеність положення кінцівки у просторі.

### Висновки

Запропонований алгоритм визначення положення кінцівок крокуючого мобільного робота (МР) у просторі відтворює раніше розроблений авторами метод, який передбачає побудову кінцевої множини трикутників для представлення кожного зчленування кінцівки крокуючого МР.

Алгоритм дозволяє зменшити трудомісткість розрахунків, підвищити швидкодію виконуваних операцій, зменшити інтелектуальне навантаження розробників МР та підвищити продуктивність розрахунків. Очевидними перевагами пропонованого алгоритму є лінійність і нерозгалуженість структури, його наочність і простота програмної реалізації.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. В. Філяюшкін, «Огляд конструкцій крокуючих роботів», ЛОГОС, *Мистецтво наукової думки*, наук. журн., М. А. Голденблат, Ред. № 1 с. 157-160, 2018.
- [2] М. М. Поліщук, «Мобільний робот для обслуговування паркових та лісних деревних масивів», *Екологічні науки*, № 26, с. 132-137, 2019. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-3-26-24>.
- [3] І. М. Платов, і О. М. Павловський, «Алгоритм руху автономного робота-гексапода для переміщення у вузьких замкнутих просторах», *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*, зб. наук. пр., вип. 61 (1), с. 61-68, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46667>.
- [4] Ю. Ю. Хазанович, і Ю. В. Киричук, «Алгоритм керування крокуючих роботів», *Погляд у майбутнє приладобудування*, зб. пр. XV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 14-15 червня 2022 р. Київ, Україна.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022, 213 с.
- [5] *How Robotics in Logistics Helps Improve Supply Chain Efficiency*. [Electronic resource]. Available: <https://www.fingent.com/blog/how-robotics-in-logistics-helps-improve-supply-chain-efficiency/>.
- [6] М. М. Поліщук, «Автоматизований синтез мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі.» дис. д-ра техн. наук: 05.02.02 – Машинознавство. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2021, 377 с.
- [7] *How are Robots Used in Space Exploration*. [Electronic resource]. Available: <https://blog.bliley.com/robots-used-in-space-exploration>.
- [8] Ю. Ю. Хазанович, Ю. В. Киричук, і І. Ю. Черепанська, «Метод визначення положення кінцівок крокуючого мобільного робота у просторі», *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 34 (73), № 1, с. 136-143, 2023. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/21>.
- [9] Ю. Ю. Хазанович, і І. Ю. Черепанська «Визначення просторового положення кінцівок крокуючого мобільного робота», *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023*, матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2023), Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 19 квітня 2023 р, 126 с. : іл. ISBN 978-966-990-066-1.
- [10] Zihao Yang, Minghai Yuan, Xinhui Shi, Zenan Yang, and Mengyuan Li, "Mechanism Design and Kinematics Analysis of Spider-like Octopod Robot," *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1314 012109, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1314/1/012109>.

- [11] Yaguang Zhu, Ziqi Fang, and Liang Zhang, *Dynamic Jump Motion Control of a Jumping Spider Robot with Redundant Degrees of Freedom*, 2019. <https://doi.org/10.1109/CAC48633.2019.8996895> .
- [12] Abdelrahman Sayed Sayed, et. all, "Experimental Modeling of Hexapod Robot Using Artificial Intelligence," A.-E. Hassanien et al. Eds., *AICV 2020*, AISC 1153, pp. 26-36, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44289-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44289-7_3) .
- [13] Yaguang Zhu, Long Chen, Qiong Liu, Rui Qin, and Bo Jin, "Omnidirectional Jump of a Legged Robot Based on the Behavior Mechanism of a Jumping Spider", *Appl. Sci.*, no. 8, 51, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8010051> .
- [14] Munadi, Ismoyo Haryanto, Toni Prahasto, and Analisa Kinematik, "Dinamik Dan Metode Gerak Kaki Model Snooper Hexapod Robot," *ROTASI Jurnal Teknik mesin* , vol. 17, no. 3, pp. 137-144, Juli 2015, <https://doi.org/10.14710/rotasi.17.3.137-144> .
- [15] J. Y. Kim, "Dynamic Balance Control Algorithm of a Six-Legged Walking Robot," *Little Crabster. J Intell Robot Syst.*, no. 78, pp. 47-64, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0074-1> .

Рекомендована кафедрою технологій та автоматизації машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 19.06.2023

**Хазанович Юрій Юрійович** — аспірант кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю, e-mail: ykVaderii@gmail.com ;

**Черепанська Ірина Юрїївна** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю, e-mail: cherepanskairina@gmail.com ;

**Киричук Юрій Володимирович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю, e-mail: kirichuky@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**Yu. Yu. Khazanovych<sup>1</sup>**  
**I. Yu. Cherepanska<sup>1</sup>**  
**Yu. V. Kirychuk<sup>1</sup>**

## Algorithm of Determining the Position of the Extremities of a Stepping Mobile Robot in Space

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

*The article presents an algorithm for determining the position of the limbs of a walking mobile robot (MR) in space, based on a method previously developed by the authors, which is a finite set of triangles for representing each joint of a limb of a walking mobile robot. The proposed algorithm has a linear structure without branches for the step-by-step execution of a certain sequence of actions that allow determining the spatial position of the limbs of a walking MR. The operation of the algorithm is considered on the example of an abstract model of a six-legged walking MR with the same design of three-hinged limbs and a body in the shape of a regular hexagon. This algorithm allows you to automatically calculate and graphically display the position of the MR's limb in space. The practical implementation of the proposed algorithm is provided in specialized software.*

*The relevance and importance of the proposed algorithm is determined by the lack of articles and publications in this direction. Known scientific works in most cases are devoted only to solving problems of kinematics and dynamics of walking MRs and building their kinematic models. At the same time, it is necessary to note the lack of a systematic approach to algorithmization and automation of determining the position of the limbs of walking MRs in space, which limits their practical use in real conditions. In this regard, it is assumed that the proposed algorithm for determining the position of the limbs of a walking MR will partially solve this problem, which will contribute to the introduction of MR into various areas of human activity.*

*The obvious advantages of the proposed algorithm are linearity, simplicity, unbranched structure, its clarity, and ease of software implementation. Application of the algorithm makes it possible to increase productivity and reduce the labor-intensiveness of actions performed when solving the problem of determining the positions of the limbs of walking MRs in space, reducing the time of performed operations and reducing the intellectual load on developers.*

**Keywords:** Walking mobile robot, work algorithm, block diagram, mathematical model for determining position in space, geometric center of body mass, limb position, automation, triangle method.

**Khazanovych Yurii Yu.** — Post-Graduate Student of the Chair of Automation and Non-destructive Testing Systems, e-mail: ykVaderii@gmail.com ;

**Cherepanska Iryna Yu.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Automation and Non-destructive Testing Systems, e-mail: cherepanskairina@gmail.com ;

**Kirychuk Yurii V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Automation and Non-destructive Testing Systems, e-mail: kirichuky@gmail.com