

# ДОДАТОК А

## Апробація результатів наукових досліджень

Міністерство освіти і науки України



**NURE**

Харківський національний університет  
радіоелектроніки

### ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

**ADED-2023**

(Випуск 2)

[електронне видання]



<http://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrov-analib-technologiey-avtomatizatsiyi-ta-melatroniki-kitap>



<http://icr.znu.edu.ua/>

Харків 2023



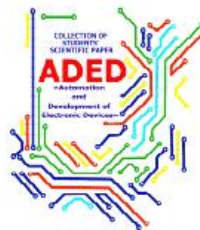
<http://kafedra.kda.edu.ua>

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

(KITAP)



### ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

**ADED-2023**

(Випуск 2)

[електронне видання]

Харків 2023

**Головний редактор:** **Невлюдов Ігор Шкарович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.

**Редакційна колегія:** **Филіпенко Олександр Іванович**, доктор технічних наук, професор, декан факультету Автоматики та комп'ютеризованих технологій, Харківського національного університету радіоелектроніки.  
**Цимбал Олександр Михайлович**, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.  
**Андрусевич Анатолій Олександрович**, доктор технічних наук, професор, начальник Криворізького коледжу національного авіаційного університету  
**Косенко Віктор Васильович**, доктор технічних наук, професор, зам. директора Державного підприємства «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості».  
**Замірець Микола Васильович**, доктор технічних наук, професор, директор Державного підприємства Науково-дослідного технологічного інституту приладобудування.  
**Свиць Володимир Митрофанович**, доктор технічних наук, професор, радник директора Державне науково-виробничє підприємство «Об'єднання Комунар».  
**Фомовська Олена Владиславівна**, кандидат технічних наук, доцент завідувач кафедри «Електронних апаратів» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.  
**Кузаренко Дмитро Володимирович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електронних апаратів» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського  
**Демська Наталія Павлівна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.  
**Фурманова Наталія Іванівна**, кандидат технічних наук, доцент, в.о. декана факультета Радіоелектроніки і телекомунікацій, Національного університету «Запорізька політехніка».

**Відповідальний редактор:** **Свєста Владислав В'ячеславович**, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.

Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices») ADED-2023 [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 2. – 386с.

Collection of Students' Scientific Paper «Automation and Development Of Electronic Devices» ADED-2023 Part 2 (Key infrastructure 2023) - Kharkiv/ The Editorial.: Nevludov I.Sh. (head), that all. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2023. – 386p with.

Рекомендовано рішенням Науково-технічної ради Харківського національного університету радіоелектроніки протокол №6 від 29.11.2018

Рекомендовано рішенням Вченої ради факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій Харківського національного університету радіоелектроніки протокол № 6 від 01.05.2023

Збірник містить наукові статті здобувачів першого (бакалаврського), другого (магістерського) рівня вищої освіти кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківського національного університету радіоелектроніки, кафедри Інформаційних технологій електронних засобів (ІТЕД) Запорізького національного технічного університету та кафедри Електронних апаратів (ЕА) Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського які навчаються за спеціальностями: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 172 Телекомунікації та радіотехніка, 171 Електроніка та 163 Біомедична інженерія. Статті надані в авторській редакції.

УДК 621.771.01

**АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ ТА РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗРАХУНКІВ ЕЛЕМЕНТІВ  
МАТРИЦІ ГОМОГЕННИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ ЗООМОРФНОГО МОБІЛЬНОГО  
РОБОТА**

**Manichkin M.**

Харківський національний університет радіоелектроніки  
Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14  
Email: maksym.manichkin@nure.ua

**Анотація:** В статті проведено аналіз кінематики зооморфних мобільних роботів типу Spot від Boston Dynamics. Розроблена кінематична схема моделі ноги зооморфного мобільного робота, та вирішена задача обчислення координат кінцевого положення останньої ланки робота на базі прямої задачі кінематики. Розроблені моделі для розрахунків елементів матриці гомогенних перетворень, що дозволяє прискорити розрахунки для побудови кінематики руху переміщення.

**Ключові слова:** зооморфні мобільні роботи, кінематика, моделі розрахунку.

**ANALYSIS OF KINEMATICS AND DEVELOPMENT OF A MODEL FOR CALCULATING  
THE ELEMENTS OF THE HOMOGENEOUS TRANSFORMATION  
MATRIX FOR A ZOOMORPHIC MOBILE ROBOT**

**M. Manichkin**

Kharkiv National University of Radio Electronics  
Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14  
Email: maksym.manichkin@nure.ua

**Annotations:** The article analyzes the kinematics of zoomorphic mobile robots of the Spot type from Boston Dynamics. The kinematic scheme of the leg model of a zoomorphic mobile robot was developed, and the problem of calculating the coordinates of the final position of the last link of the robot based on the direct problem of kinematics was solved. Models have been developed for calculating the elements of the matrix of homogeneous transformations, which allows you to speed up the calculations for constructing the kinematics of movement.

**Key words:** zoomorphic mobile robots, kinematics, calculation models.

Сучасна робототехніка перебуває у постійному розвитку та еволюції, на яку постійно впливають новітні інформаційні технології та досягнення в галузі штучного інтелекту, нейронних мереж і т.д., що дає можливість для виконання завдань усередині приміщень та на відкритому повітрі. Наприклад, автономні мобільні роботи можуть використовуватися для постачання товарів, інспекції та обслуговування різних систем. В останній час, отримали широке розповсюдження дослідження зооморфних мобільних роботів [1-2]. Дослідження кінематики зооморфних мобільних роботів, таких як Spot від Boston Dynamics, є актуальним у сучасній робототехніці з кількох причин:

- зооморфні роботи мають унікальні характеристики, які дозволяють їм виконувати складні маніпуляційні та пересувальні в певних для людини середовищах. Наприклад, Spot може пересуватися по нерівній поверхні, перестрибувати через перешкоди та лазити сходами. Для того, щоб робот міг виконувати такі завдання, необхідно визначити та оптимізувати його кінематику.

- зооморфні роботи знаходять застосування в багатьох галузях, таких як промисловість, медицина, авіація, геологія та ін.

- зооморфні роботи можуть використовуватися в умовах, де є небезпечність для людини. Наприклад, Spot може використовуватися для розвідки у зоні надзвичайної ситуації чи

воніших дій. Дослідження кінематики дозволяють розробити алгоритми, які дозволяють роботу безпечно виконувати свої завдання.

Таким чином, дослідження кінематики зооморфних мобільних роботів типу Spot мають велике практичне значення та є актуальними у сучасній робототехніці.

Spot від Boston Dynamics – це зооморфний мобільний робот із чотирма ногами, який використовує балансування та гнучкість для стійкості та маневреності [3]. Кінематика робота визначає його рухи та управління і включає в себе координати швидкості та прискорення. Загальний вигляд зооморфного мобільного робота Spot від Boston Dynamics представлено на рисунку 1.



Рисунок 1 – Загальний вигляд зооморфного мобільного робота Spot від Boston Dynamics

Одна з ключових особливостей кінематики Spot – це управління кінцівками робота, які можуть працювати як незалежні "ноги" для пересування по складному рельєфу та подолання перешкод. Кожна кінцівка складається з трьох сегментів і має три ступені свободи, що забезпечує високу мобільність і гнучкість робота.

Іншою важливою особливістю кінематики Spot є використання гнучких зв'язків між сегментами кінцівок, які дозволяють роботу пристосовуватися до різних поверхонь та утримувати баланс в умовах змінного гравітаційного поля.

Для управління рухом та позиціонуванням робота Spot використовуються різні алгоритми та методи, включаючи алгоритми зворотної кінематики, моделювання динаміки та адаптивне управління.

Аналіз кінематики Spot дозволяє більш глибоко зрозуміти принципи роботи цього зооморфного робота та розробити ефективніші методи управління та позиціонування. На самперед необхідно зрозуміти, яка схема використовується для реалізації кінематики мобільного робота Spot Boston Dynamics. На даний момент часу існує три базових схеми, які представлені на рисунку 2.

Трисегментний пантограф (також відомий як триланковий механізм) – це механічний пристрій, що складається з трьох ланок, з'єднаних шарнірно та використовуваний для передачі руху або зміни масштабу об'єкта. Пантографи використовують у різних галузях, включаючи науку, мистецтво, техніку та інші [4-7].

Кожна ланка пантографа складається з кількох сегментів, які можуть вільно обертатися навколо осей шарнірів, що з'єднують їх. Звичайні пантографи виготовляють з легких та міцних матеріалів, таких як алюміній або титан, щоб забезпечити високу точність та надійність під час роботи. Трисегментний пантограф також може використовуватися для переміщення та управління роботами, а також для інших застосувань, де потрібна точність та стабільність при передачі руху [8-12].

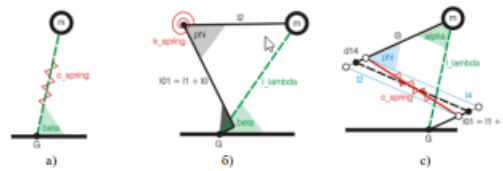


Рисунок 2 – Схематичне представлення кінематики для зооморфних роботів

Базуючись на схемі трисегментного пантографа, розробимо кінематичну модель ноги зооморфного мобільного робота Spot, яка представлена на рисунку 3.

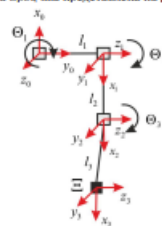


Рисунок 3 – Розроблена кінематична схема моделі ноги зооморфного мобільного робота

Пряма задача кінематики необхідна для обчислення координат кінцевого положення останньої ланки робота. У нашому випадку, вона буде вирішуватися для ноги крокуючого робота. Як точку відліку виберемо центр мас нашої конструкції, її початкові координати  $O(x_0, y_0, z_0)$ . Шуканими будуть координати положення ступні робота, які відповідають точці  $E(x_3, y_3, z_3)$ . Для цього на базі рисунку 3 розробимо матрицю обертання для кожного з'єднання:

для з'єднання 0-1:

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

для з'єднання 1-2:

$$R_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \Theta_2 & -\sin \Theta_2 & 0 \\ \sin \Theta_2 & \cos \Theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_2 & -\sin \Theta_2 & 0 \\ \sin \Theta_2 & \cos \Theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

для з'єднання 2-3:

$$R_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \Theta_3 & -\sin \Theta_3 & 0 \\ \sin \Theta_3 & \cos \Theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_3 & -\sin \Theta_3 & 0 \\ \sin \Theta_3 & \cos \Theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Наступним кроком розрахуємо вектори зміщень, для кожного з'єднання розробляємого зооморфного мобільного робота:

для з'єднання 0-1:

$$d_0^0 = \begin{bmatrix} -s\Theta_1 \cdot l_1 \\ -c\Theta_1 \cdot l_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

для з'єднання 1-2:

$$d_1^1 = \begin{bmatrix} c\Theta_2 \cdot l_2 \\ s\Theta_2 \cdot l_2 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

для з'єднання 2-3:

$$d_2^2 = \begin{bmatrix} c\Theta_3 \cdot l_3 \\ s\Theta_3 \cdot l_3 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

На базі отриманих матриць (1-3) та векторів зміщень (4-6), отримуюмо матрицю гомогенних перетворень з використанням наступної формули:

$$H_n^0 = \begin{bmatrix} R_{n+1}^0 & d_{n+1}^0 \\ 00 & 01 \end{bmatrix}$$

де  $n$  – порядковий номер координатної системи виконавчого механізму, в результаті було отримано матрицю гомогенних перетворень, яка має наступний загальний вид (7) та фінальний вид (8):

$$H_3^0 = H_1^0 \times H_2^0 \times H_3^0. \quad (7)$$

$$H_j^0 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} \quad (9)$$

де  $h_{mn}$  – елементи матриці  $H_j^0$  ( $n$  – номер рядку,  $m$  – номер стовпця).

Внаслідок чого, всі елементи матриці (9) можна розрахувати за наступними моделями, які представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Моделі розрахунків елементів матриці гомогенних перетворень

Елемент матриці	Формула розрахунку
1	2
$h_{11}$	$-\cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_3)$
$h_{12}$	$\cos\theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)$
$h_{13}$	$-\sin\theta_1$
$h_{14}$	$-\cos\theta_1 \cdot (\cos(\theta_2 - \theta_3) \cdot l_1 + \cos\theta_2 \cdot l_2) - \sin\theta_1 \cdot l_3$
$h_{21}$	$-\sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_3)$
$h_{22}$	$\sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)$
$h_{23}$	$\cos\theta_1$
$h_{24}$	$-\sin\theta_1 \cdot (\cos(\theta_2 - \theta_3) \cdot l_1 + \cos\theta_2 \cdot l_2) - \cos\theta_1 \cdot l_3$
$h_{31}$	$\sin(\theta_2 + \theta_3)$
$h_{32}$	$\cos(\theta_2 - \theta_3)$
$h_{33}$	0
$h_{34}$	$\sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot l_1 + \sin\theta_2 \cdot l_2$
$h_{41}$	0
$h_{42}$	0
$h_{43}$	0
$h_{44}$	1

Отримані моделі розрахунків елементів матриці гомогенних перетворень дозволять скласти таблицю Денавіта-Хатгенберга для параметрів керування положенням ланки зооморфного мобільного робота типу Spot від Boston Dynamics [13-16].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Bledt, Gerado et al. "MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot." IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2018, Madrid Spain, Institute of Electrical and Electronics Engineers, January 2019. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593885
2. Christian Gehring; Stelian Coros; Marco Hutter; Michael Bloesch; Markus A. Hoepfner; Roland Siegwart. (2013). Control of dynamic gaits for a quadruped robot. In IEEE International Conference on Robotics and Automation. Date of Conference: 06-10 May 2013. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631035
3. Spot® - The Agile Mobile Robot | Boston Dynamics. Available: <https://www.bostondynamics.com/products/spot>

4. Yevsieiev V. Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / Yevsieiev V., Starodubcev N. // Scientific Collection «InterConf», (141), 331-334.

5. Igor Nevludov; Vladyslav Yevsieiev; Svitlana Maksymova; Natalia Demska; Kostyantyn Kolesnyk; Oha Miliutina. (2022). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 07-11 September. DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002906

6. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2022). A ROBOTIC PROSTHETIC A CONTROL SYSTEM AND A STRUCTURAL DIAGRAM DEVELOPMENT. Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ», (August 12, 2022; Zurich, Switzerland), 113-114. <https://doi.org/10.36074/logos-12.08.2022.33>

7. Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N. Software Implementation Concept Development for the Mobile Robot Control System on ESP-32CAM // Current issues of science, prospects and challenges: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference (Vol. 2), June 10, 2022. Sydney, Australia: European Scientific Platform., 2022. P. 54-56

8. Yevsieiev V. Development of Architecture for Mobile Robot Control Based on Raspberry Pi Model 3 B+ / V. Yevsieiev, A. Skripkin // Scientific Horizon in the Context of Social Crises : The XI International Scientific and Practical Conference, April 6-8, 2022. – Tokyo, Japan, 2022. – P. 274-277.

9. Yevsieiev V. Analysis of Crawler Robots / V. Yevsieiev, S. Shmatko // "Innovations Technologies in Science and Practice" : The VI International Scientific and Practical Conference, February 15-18, 2022. – Haifa, Israel, 2022. – P. 510-514.

10. Yevsieiev V. Development of the Environmental Visualization System Based on ESP32-CAM / V. Yevsieiev, O. Luchaninova // Theory and Practice of Modern Science : The III International Scientific and Theoretical Conference, 1 April 2022. – Kraków, Republic of Poland, 2022. – Vol. 1. – P. 79-81.

11. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Сасєєв В. В., Новосєлов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – X., 2022. – 427 с.

12. Сасєєв В.В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6) // Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Сасєєв В. В. Підручник. – Харків : 2020. С. 257.

13. Attar, H., & et al. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Article ID 3046116. <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.

14. Розробка 3D-моделі зооморфного мобільного робота для вертикальних переміщень по металевим поверхням / І. Ш. Невлюдов, В. В. Сасєєв, Н. П. Демська, В. О. Руденко // Наука і техніка сьогодні. – 2022. – № 4(4). – С.163-174.

15. Vladyslav Yevsieiev, Nikolaj Starodubcev (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Diversity and Inclusion in Scientific Area», Value 140, P.648-651.

16. Розробка 3D-моделі зооморфного мобільного робота для вертикальних переміщень по металевим поверхням / І. Ш. Невлюдов, В. В. Сасєєв, Н. П. Демська, В. О. Руденко // Наука і техніка сьогодні. – 2022. – № 4(4). – С.163-174.

**ДОДАТОК Б**  
Демонстраційний матеріал

