

ІНФОРМАЦІЙНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

Мельникова О.Є.¹, Герасін О.С.²

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова,
студент, Україна

² Кандидат технічних наук, ²

² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова,
к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Швидке поширення використання роботів-маніпуляторів у різноманітних сферах життєдіяльності вимагає застосування сучасних методів моделювання для оптимізації проектування їх конструкції, розрахунку кінематики та руху, які є одними із ключових завдань робототехніки. Робота присвячена розробці інформаційно-обчислювального комплексу для дослідження кінематики триланкового маніпулятора за допомогою програмного пакету Matlab Robotics Toolbox. Представлено програмне забезпечення, яке реалізує розрахунок прямої та зворотної задачі кінематики, а також здійснює планування траєкторії руху маніпулятора. Для задання параметрів робота використано представлення Денавіта-Хартенберга, зворотню задачу кінематики розв'язано методом градієнтного спуску, а для побудови траєкторії руху застосовано метод поліноміальної інтерполяції. Розроблений інформаційно-обчислювальний комплекс дозволяє вводити та змінювати параметри маніпулятора, запускати відповідні алгоритми для планування траєкторії, визначення положення й орієнтації робочого органу, а також візуалізувати його поведінку у тривимірному просторі.

Ключові слова: інформаційно-обчислювальний комплекс, кінематика маніпулятора, пряма задача кінематики, зворотня задача кінематики, траєкторія руху, інтерфейс.

Застосування роботів і маніпуляторів у різних сферах життя стрімко зростає, охоплюючи виробництво, медицину, військову справу та науку. Ефективне проектування таких пристроїв потребує використання відповідних програмних засобів автоматизації розрахунків за сучасними методами моделювання, які дозволяють досліджувати кінематику, оптимізувати конструкцію та планувати рух.

Для комплексного дослідження та аналізу кінематики ланкових маніпуляторів необхідно послідовно розв'язати три взаємопов'язані задачі:

пряму та обернену кінематику, а також планування траєкторії у просторі узагальнених координат [1]. Вирішення цих задач є необхідною умовою для подальшого моделювання та ефективного керування рухом маніпулятора. Основними методами дослідження кінематики й динаміки маніпуляторів є геометричний [2], векторний [3, 4] і матричний методи [5]. Найбільш універсальним є метод матриць на базі представлення Денавіта-Хартенберга (ДХ-представлення), оскільки він підходить для розрахунку будь-якого маніпулятора з поступальними або обертальними кінематичними парами за допомогою ЕОМ.

Метою даної роботи є створення інформаційно-обчислюваного комплексу моделювання кінематики триланкового робота-маніпулятора для автоматизації розрахунків на ранній стадії проектування.

Для досягнення поставленої мети розроблено програмний додаток з використанням інструментів пакету Matlab Robotics Toolbox. Цей пакет надає широкий спектр функцій для моделювання як мобільних, так і маніпуляційних роботів, дозволяє програмувати алгоритми для обчислення кінематики, динаміки та побудови траєкторії роботів. Крім того, цей пакет дозволяє працювати з різними типами даних, зокрема векторами та однорідними перетвореннями, які необхідні для подальшої візуалізації та аналізу результатів [6].

Пряма задача кінематики полягає у визначенні положення та орієнтації робочого органу за заданими значеннями узагальнених координат маніпулятора [1]. Спочатку визначаються параметри та структура маніпулятора відповідно до принципів Денавіта-Хартенберга [1], після чого знаходяться координати центра захвату у вигляді матриці однорідного перетворення. У кодї програми маніпулятор представлений як набір ланок, описаних у ДХ-представленні через вектор об'єктів класу *Link* [6]:

$$L(i) = \text{Link}[\theta(i), d(i), a(i), \alpha(i), \text{offset}(i)]. \quad (1)$$

Ініціалізовані параметри окремих ланок об'єднані в єдину кінематичну структуру за допомогою класу *SerialLink*. Так формується об'єкт *Robot*, що містить усі параметри маніпулятора: кількість ланок – i , кути між

зчленуваннями – θ , зміщення – d , довжину ланок – a , кут повороту ланок – α і тип з'єднання – offset . Для визначення координат положення захвату застосовується функція $f_{\text{kine}}(\theta_i)$, яка дозволяє провести необхідні обчислення і на виході отримати шукану однорідну матрицю маніпулятора.

Зворотна задача кінематики полягає у визначенні узагальнених координат $\theta_e = (\theta_1 \dots \theta_3)^T$, за яких маніпулятор досягає заданого положення та орієнтації захвату [1], за допомогою метода градієнтного спуску, що ґрунтується на пошуку мінімуму критерію оптимізації

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \left((x_r - x(\theta))^2 + (y_r - y(\theta))^2 + (z_r - z(\theta))^2 \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\theta = (\theta_1 \dots \theta_3)^T$ – вектор приєднаних координат, x_r, y_r, z_r – задані координати захвату, $x(\theta), y(\theta), z(\theta)$ – координати захвату, визначені в процесі розв'язання прямої задачі кінематики.

В кодї задано довільні значення початкових кутів $\theta_0 = (0 \ 0 \ 0)$, ітераційні коефіцієнти $\gamma = (1 \ 1 \ 1)$ та координати положення й орієнтації робочого органу. На основі цих значень метод ітеративно оновлює кути θ за формулою:

$$\theta = \theta - \gamma \cdot (J^T \cdot e), \quad (3)$$

де J – якобіан, e – вектор помилки між поточними та цільовими координатами. Ітерації тривають доки помилка не стане меншою за заданий поріг, після чого значення узагальнених координат $\theta_e = (\theta_1 \dots \theta_3)^T$ виводиться у вікні програми.

Для планування траєкторії захвату маніпулятора в просторі узагальнених координат необхідно визначити контрольні точки, через які він проходить, а також моменти часу їх досягнення [7]. Після визначення узагальнених координат $\theta_e = (\theta_1 \dots \theta_3)^T$ плавний перехід між початковим та кінцевим положеннями маніпулятора забезпечується методом градієнтного спуску. Для розв'язання цієї задачі в інформаційно-обчислювальному комплексі застосовується метод поліноміальної інтерполяції, реалізований у функції $jtraj(\theta_0, \theta_e, t)$. Дана функція використовує поліном 5-го порядку з нульовими граничними умовами для швидкості та прискорення. Після введення параметрів $\theta_0, \theta_e, [t_0, t_e]$ на виході формується матриця розмірністю $t \times N$, де t – число кроків за часом, а N – кількість ланок маніпулятора.

Інтерфейс розробленого додатку представлено на рис. 1. Він містить єдине головне вікно, що складається з полів для введення параметрів маніпулятора, зокрема довжин ланок (L_1 , L_2 , L_3), кутів зчленувань у градусах (Θ_1 , Θ_2 , Θ_3) та координат положення робочого органу маніпулятора (X , Y , Z). Також передбачені функціональні кнопки для обчислення прямої та зворотної кінематики. При натисненні на кнопку «Пряма кінематика» програма обчислює положення та орієнтацію захвату, відповідно до введених значень кутів Θ_1 - Θ_3 . У разі вибору кнопки «Зворотна кінематика» здійснюється обчислення кутів зчленувань, необхідних для досягнення заданої точки у просторі, а також візуалізація траєкторії руху маніпулятора.

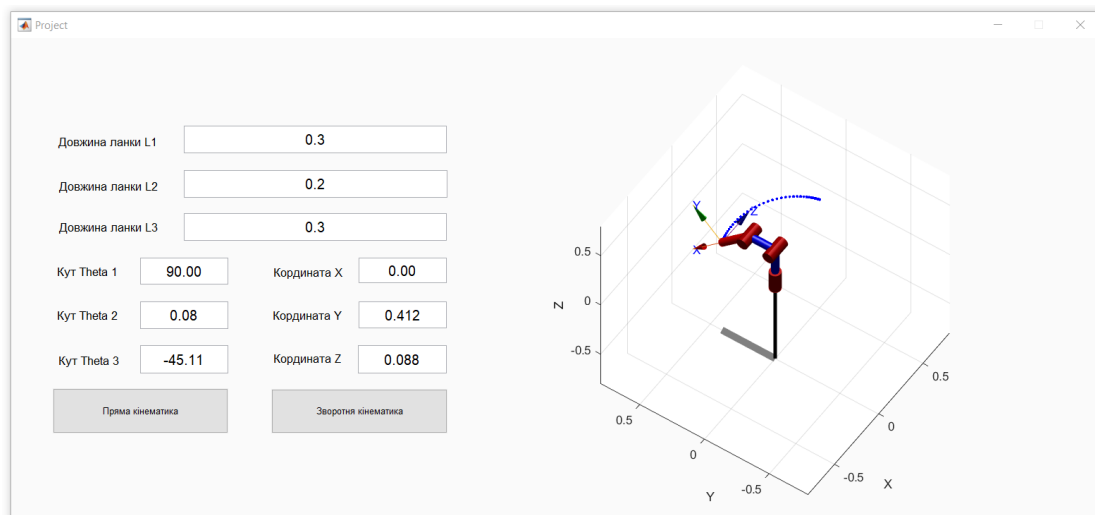


Рисунок 1 – Інтерфейс інформаційно-обчислюваного комплексу

Перевагою запропонованого програмного забезпечення є можливість тривимірної візуалізації результатів та автоматизація розрахунків. Інтерактивна 3D-модель маніпулятора відображає його поточний стан, положення кінцевого захвату, а також зміни у структурі механізму при варіюванні вхідних параметрів.

Висновки. В роботі створено інформаційно-обчислювальний комплекс з графічним інтерфейсом, який дозволяє з високим рівнем наочності моделювати кінематику триланкового робота-маніпулятора шляхом автоматизованого розв'язання прямих і зворотних задач, а також планування траєкторії на ранній стадії проектування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Спину Г. А. Промислові роботи - 2-ге вид., перероб. та дод. – К.: Вища школа, 1991. – 311 с.
2. A Geometric Approach to Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Manipulators for tokamaks maintenance [Електронний ресурс] / С. Lauretti, Т. Grasso, Е. Marchi // Mechanism and Machine Theory. – 2022. – Vol. 176. – 104967. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104967> (дата звернення: 30.03.2025).
3. Kinematic Modelling of Humanoid Robot Based on Vectorial Approach [Електронний ресурс] / N. Hadiddi, С. Mahfoudi, М. Bouaziz // ENP Engineering Science Journal. – 2024. – Vol. 4, no. 1. – Р. 35-43. – Режим доступу: <https://doi.org/10.53907/enpesj.v4i1.271> (дата звернення: 30.03.2025).
4. Kinematic Modeling of Robotic Manipulators [Електронний ресурс] / А. Singh, А. Singla // Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. – 2016. – Vol. 87, no. 3. – Р. 303-319. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s40010-016-0285-x> (дата звернення: 30.03.2025).
5. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2007. – 216 с.
6. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB / Peter Corke. – 73rd ed. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. – 570 p.
7. Системи управління маніпуляційних роботів: Методичні вказівки до лабораторних робіт / О. О. Черно, А. П. Гуров, М. В. Покровський, О. А. Авдеева. – Миколаїв: НУК, 2023. – 41 с.

INFORMATION AND COMPUTER COMPLEX FOR MODELING THE KINEMATICS OF A MANIPULATING ROBOT

Olena Melnykova, Oleksandr Gerasin

Abstract. *The rapid spread of applying the manipulator robots in various areas of life requires the use of modern modeling methods to optimize the design of their structure, calculation of kinematics and motion, which are one of the key tasks of robotics. The work is devoted to the development of information and computing complex for studying the kinematics of a three-link manipulator using the Matlab Robotics Toolbox software package. The presented software implements the calculation of the direct and inverse kinematics problem, and also plans the manipulator motion trajectory. The Denavit-Hartenberg representation was used to specify the robot parameters, the inverse kinematics problem was solved by the gradient descent method, and the polynomial interpolation method was used to construct the motion trajectory. The developed information and computing complex allows to enter and change the manipulator parameters, run the appropriate algorithms for trajectory planning, determine the*

position and orientation of the working tool, and visualize its behavior in three-dimensional space.

Keywords: *information and computing complex, manipulator kinematics, direct problem of kinematics, inverse problem of kinematics, motion trajectory, interface.*

REFERENCE

1. Spinu G. A. Industrial robots - 2nd ed., revised and supplemented. – K.: Higher School, 1991. – 311 p. [in Ukrainian].
2. A Geometric Approach to Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Manipulators for tokamaks maintenance [Electronic resource] / C. Lauretti, T. Grasso, E. Marchi // Mechanism and Machine Theory. – 2022. – Vol. 176. – 104967. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104967> (date of access: 30.03.2025).
3. Kinematic Modelling of Humanoid Robot Based on Vectorial Approach [Electronic resource] / N. Hadiddi, C. Mahfoudi, M. Bouaziz // ENP Engineering Science Journal. – 2024. – Vol. 4, no. 1. – P. 35-43. – Mode of access: <https://doi.org/10.53907/enpesj.v4i1.271> (date of access: 30.03.2025).
4. Kinematic Modeling of Robotic Manipulators [Electronic resource] / A. Singh, A. Singla // Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. – 2016. – Vol. 87, no. 3. – P. 303-319. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40010-016-0285-x> (date of access: 30.03.2025).
5. Tsvirkun L. I., Gruler G. Robotics and mechatronics: Textbook. – D.: National Mining University, 2007. – 216 p. [in Ukrainian].
6. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB / Peter Corke. – 73rd ed. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. – 570 p.
7. Control systems for manipulation robots: Methodical instructions for laboratory work / O. O. Chernov, A. P. Gurov, M. V. Pokrovsky, O. A. Avdeeva. – Mykolaiv: NUK, 2023. – 41 p. [in Ukrainian].