

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.72>

УДК 621.865.8

Дослідження переміщення маніпулятора за допомогою апаратних та комп'ютерних моделей

Михайлов Євген Павлович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент каф. Підйомно-транспортного та робототехнічного обладнання
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8946-7999>; e.p.mihaylov@op.edu.ua. Scopus Author ID: 7005952631

Серединський Анатолій Вікторович¹⁾

Бакалавр каф. Підйомно-транспортного та робототехнічного обладнання
5716709@stud.op.edu.ua

¹⁾ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Одним із основних напрямів проєктування робототехнічних систем є кінематичний аналіз маніпуляторів, який дозволяє перейти до дослідження динаміки та синтезу управління рухом маніпуляторів на основі прямої та зворотної задач кінематики. В роботі основна увага зосереджена на розробці апаратних та комп'ютерних моделей переміщення різних елементів маніпуляторів. Для цього застосовано засоби, що використовуються для апаратного та комп'ютерного моделювання переміщення маніпуляторів. В роботі показано, як можна створити моделі маніпуляторів на основі апаратно-програмного комплексу Arduino. Розглянута можливість застосування для створення комп'ютерних моделей симулятора UnoArduSim, що має у своєму складі як пристрої комп'ютерного керування, а також інформаційні та виконавчі пристрої, що використовуються у робототехнічних пристроях. Для графічного відображення переміщення маніпулятора на комп'ютері застосована мова програмування Processing, яка дає можливість створювати анімаційні моделі. Розроблена спрощена апаратна модель маніпулятора з трьома сегментами, переміщення яких здійснюється за допомогою сервоприводів, та математична модель використання прямої та зворотної задач кінематики для визначення траєкторії переміщення робочого органу за відомими значеннями параметрів стану окремих сегментів, а також для визначення параметрів стану окремих сегментів за координатами робочого органу. Апаратна модель маніпулятора створена на основі апаратних та програмних засобів, які використовуються у складі апаратно-програмного комплексу Arduino та симулятора UnoArduSim, що дає можливість використовувати програмне забезпечення для дослідження маніпуляторів як на апаратній, так і на програмній моделі. Розроблена апаратно-комп'ютерна модель маніпулятора на основі Arduino та Processing для дослідження переміщення маніпулятора у ручному та автоматичному режимі. Створені комп'ютерні моделі на основі прямої та зворотної задач кінематики на основі мови Processing, де керування положенням окремих сегментів та робочого органу маніпулятора здійснюється шляхом переміщення мишки, а координати курсора визначають кути повороту окремих сегментів для прямої задачі кінематики або координати робочого органу для зворотної задачі кінематики. Вказані моделі можуть використовуватись для дослідження переміщення маніпуляторів та їх ланок, для створення програм шляхом навчання, коли у ручному режимі визначаються параметри ланок для встановлених послідовних положень робочого органу, на основі яких створюється програма для переміщення маніпулятора у автоматичному режимі, а також при проведенні дистанційного навчання.

Ключові слова: маніпулятор; апаратна модель; комп'ютерна модель; пряма задача кінематики; зворотна задача кінематики; мікроконтролер; симулятор; дистанційне навчання

Метою роботи є розробка апаратних та програмних моделей для дослідження переміщення маніпуляторів.

Важливим етапом проєктування програмного забезпечення для керування робототехнічними пристроями є дослідження переміщення його окремих ланок та робочого органу, що можна здійснювати у ручному режимі керування, та відпрацювання окремих фрагментів програми, що реалізують алгоритми переміщення в автоматичному режимі при створенні програми керування маніпулятором шляхом навчання. У разі неможливості здійснювати ці дослідження на реальному робототехнічному пристрої їх можна здійснити за допомогою апаратних та комп'ютерних моделей, створених за допомогою різних засобів моделювання.

Механіка цілеспрямованого руху передбачає вирішення прямої і зворотної задач кінематики, за допомогою чого можна здійснити розрахунок параметрів для керування маніпулятором, наприклад, шляхом дослідження переміщення окремих сегментів маніпулятора за допомогою апаратної та комп'ютерної моделі [1, 2].

Оскільки метою моделювання є створення робототехнічних пристроїв, що використовують засоби визначення положення, розглянемо можливості, які надає апаратно-

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

програмний комплекс Arduino, що часто використовується у різних робототехнічних пристроях.

Цей комплекс представляє собою набір апаратно-програмних засобів, призначених для побудови простих систем автоматики і робототехніки [3], та відповідні комп'ютерні моделі на їх основі [4]. Апаратна частина цього комплексу складається з набору готових пристроїв. Повністю відкрита архітектура системи дозволяє вільно доповнювати комплекс Arduino.

Arduino може використовуватися як для створення автономних об'єктів автоматики, так і підключатися до програмного забезпечення на комп'ютері через стандартні інтерфейси. Апаратні компоненти комплексу Arduino включають як різні сенсори, у тому числі сенсори руху, за допомогою яких можна визначити положення та шлях переміщення, так і модулі регульованих приводів для електродвигунів постійного струму і крокових двигунів, а також сервоприводи. За допомогою таких приводів можна здійснити поворот на визначений кут, тому вони широко використовуються в робототехнічних пристроях з кутовим переміщенням сегментів. Програмування контролерів Arduino здійснюється за допомогою середовища розробки Arduino IDE, яке використовує спрощену мову програмування C++, тому для створення апаратних моделей роботів можна використовувати усі можливості цієї мови.

Проектування системи керування робота на основі апаратно-програмного комплексу Arduino здійснюється шляхом вибору необхідних апаратних компонент та розробки програми керування. Для керування сегментами маніпуляторів часто використовуються сервоприводи, які здійснюють поворот ланок у діапазоні від 0 до 180 градусів.

Найбільш поширеним засобом програмного моделювання робототехнічних систем на основі апаратно-програмного комплексу Arduino є симулятор UnoArduSim, який дає можливість створювати моделі систем керування з використанням інформаційних та виконавчих пристроїв та здійснити виконання програми в реальному часі (рис. 1). Вибір апаратних компонентів здійснюється за допомогою вікна конфігурації, де наведені моделі відповідних апаратних компонентів (рис. 2).

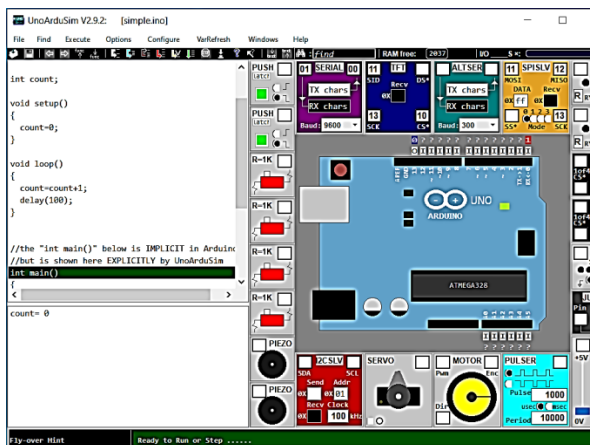


Рис. 1. Симулятор UnoArduSim

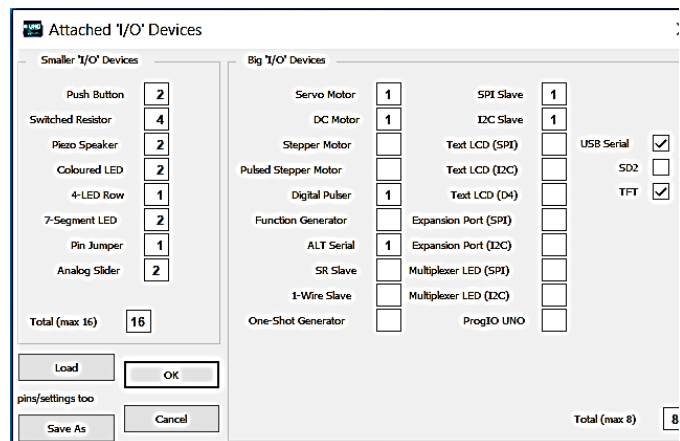


Рис. 2. Конфігурація UnoArduSim

Для створення комп'ютерної моделі маніпулятора може бути застосована відкрита мова програмування Processing, що використовується як легкий і швидкий інструментарій для створення зображень, анімації та розробки інтерфейсів.

Processing використовує мову програмування Java з додатковими спрощеннями, такими як додаткові класи та псевдонімі математичні функції та операції. Середовище також містить графічний інтерфейс для спрощення етапу компіляції та виконання програми [5].

У прикладах використання мови Processing є програма моделі руки Arm, що складається з двох ланок (сегментів) (рис. 3) [6].

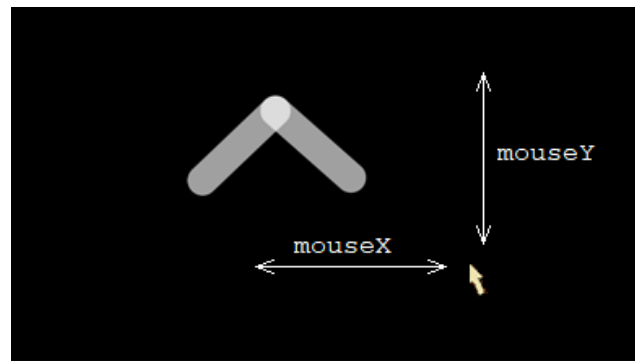


Рис. 3. Модель руки Arm

Кут кожного сегмента встановлюється за допомогою координат положення курсора мишки *mouseX* і *mouseY*.

Переміщення першого сегмента, також застосовуються до другого сегмента, оскільки вони знаходяться в одній групі, що визначається функціями *pushMatrix()* і *popMatrix()*.

Шляхом переміщення курсора мишки можна здійснити керування положенням робочого органу, що встановлюється на кінці другого сегмента.

Цей приклад може бути застосованим для створення комп'ютерної моделі маніпулятора.

Для дослідження переміщення роботів використовуються механіка цілеспрямованого руху, яка передбачає вирішення прямої і зворотної задач кінематики, за допомогою чого можна здійснити розрахунок параметрів для керування маніпулятора.

Для спрощення аналізу розглянемо, як вирішуються пряма і зворотна задачі кінематики на прикладі маніпулятора з двома суглобами які дуже часто використовуються у промисловому обладнанні. .

Такий маніпулятор застосовується, наприклад, у робота SCARA (рис. 4), а також у маніпулятора з паралельним переміщенням робочого органу на основі пантиографу (рис. 5).



Рис. 4. Робот SCARA



Рис. 5. Маніпулятор на основі пантиографу

Для опису переміщення ланок таких роботів можна використовувати двовимірну систему координат. Для переміщення відносно третьої координати можна застосовувати циліндричну систему координат, завдяки чому значно спрощується розрахунок переміщення.

Виходячи з кінематичної схеми наведених роботів розглянемо вирішування задачі розрахунку параметрів маніпулятора на основі прямої та зворотної задач кінематики для маніпулятора з двома керованими ланками та третьою ланкою, яка не змінює орієнтації при переміщенні (рис. 6).

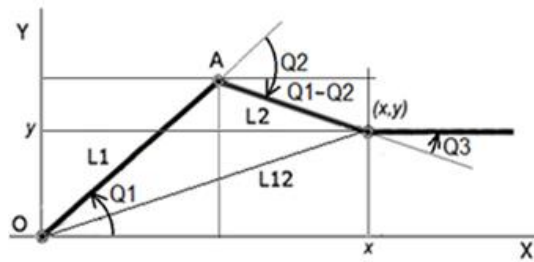


Рис. 6. Кінематична схема маніпулятора з трьома ланками

Пряма задача кінематики полягає в знаходженні координат робочого органу (x, y) по заданих $L1, L2, Q1, Q2$.

$L1$ і $L2$ – це, відповідно, довжини ланки 1 і ланки 2 маніпулятора, визначені конструкцією маніпулятора.

$Q1$ – це кут повороту ланки 1 проти годинникової стрілки відносно осі x .

$Q2$ – це поворот ланки 2 маніпулятора за годинниковою стрілкою відносно сегменту 1.

$Q3$ – це кут повороту ланки 3 проти годинникової стрілки, орієнтація якого залишається постійною, тому $Q3 = Q1 - Q2$.

Вихідне положення кута $Q3$ становить 90° .

Згідно з цим маємо таке рішення для прямої задачі кінематики, за допомогою якої здійснюється знаходження координат робочого органу (x, y) по заданих $L1, L2, Q1, Q2$:

$$x = L1 \cdot \cos(Q1) + L2 \cdot \cos(Q1 - Q2), \quad (1)$$

$$y = L1 \cdot \sin(Q1) + L2 \cdot \sin(Q1 - Q2). \quad (2)$$

Для зворотної задачі кінематики відповідні значення кутів $Q1$ та $Q2$ для вказаних координат робочого органу (x, y) мають вигляд [1]:

$$Q1 = \arctg(y/x) + \arccos((L12 - L22 + L122) / 2 \cdot L1 \cdot L12),$$

$$Q2 = \pi - \arccos((L12 + L22 - L122) / 2 \cdot L1 \cdot L2),$$

де $L122 = x^2 + y^2$.

Звідси маємо:

$$Q1 = \arctg(y/x) + \arccos((L12 - L22 + x^2 + y^2) / 2 \cdot L1 \cdot (x^2 + y^2)^{1/2}), \quad (3)$$

$$Q2 = \pi - \arccos((L12 + L22 - (x^2 + y^2)) / 2 \cdot L1 \cdot L2). \quad (4)$$

Формули (1), (2), (3) та (4) можуть використовуватись для розрахування параметрів маніпуляторів системою керування на основі прямої та зворотної задач кінематики, наприклад, при використанні контролера Arduino, програмування якого здійснюється за допомогою відповідного варіанту мови C.

Для дослідження засобів визначення положення робота-маніпуляторів був розроблений лабораторний стенд, який для переміщення ланок використовує сервоприводи, де визначення переміщення здійснюється безпосередньо у програмі керування, що реалізована за допомогою апаратно-програмного комплексу Arduino.

Маніпулятор складається з трьох сегментів (рис. 7), для керування яких використовуються контролер Arduino, та серводвигуни, а саме, сегмент 1 – *servo0*; сегмент 2 – *servo1*; сегмент 3 – *servo2*. Керування у ручному режимі здійснюється за допомогою потенціометрів *POT0, POT1, POT2* (рис. 8).

Розглянемо з чого складається програма керування такого маніпулятора.

При застосуванні сервоприводів на початку програми треба встановити бібліотеку керування приводів *VarSpeedServo*, у разі використання для моделювання симулятора *UnoArduSim* використовується спрощена бібліотека *Servo*.

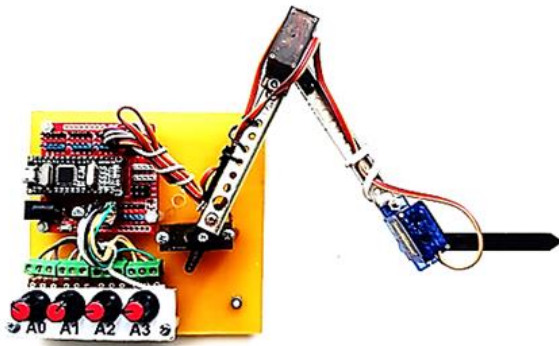


Рис. 7. Маніпулятор

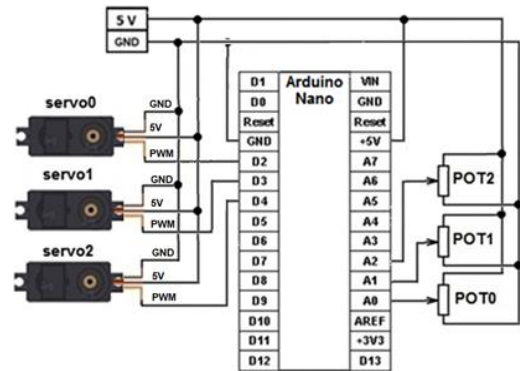


Рис. 8. Система керування

Після цього визначаються позначення сервоприводів за допомогою функції *Servo myservo*. Підключення сервоприводів до виходу *pin* визначається командою *myservo0.attach(pin)*. Для встановлення валу сервопривода *myservo* у вказаний кут *angle* застосовується команда *myservo.write(angle)*. Для опитування сигналу з потенціометрів та запису отриманих даних у змінну *val* використовується команда *val = analogRead(Ai)*, де *Ai* – аналоговий вхід, до якого підключений потенціометр.

Розроблена програма ручного керування маніпулятором за допомогою потенціометрів. Оскільки треба встановлювати кут повороту у градусах в діапазоні 0 - 180°, використовується функція масштабування *map(val, 0, 1023, 0, 180)*, оскільки з аналогового входу маємо сигнал у діапазоні 0 -1023. Для забезпечення сумісності з симулятором UnoArduSim використовується бібліотека *Servo*.

Була створена програмна модель маніпулятора за допомогою симулятора UnoArduSim.

У конфігурації встановлюємо три сервопривода, три слайдера для моделювання потенціометрів та канал передачі даних на комп'ютер (Рис. 9), після чого отримуємо відповідну модель, що показує, як здійснюється регулювання у режимі симуляції (Рис. 10).

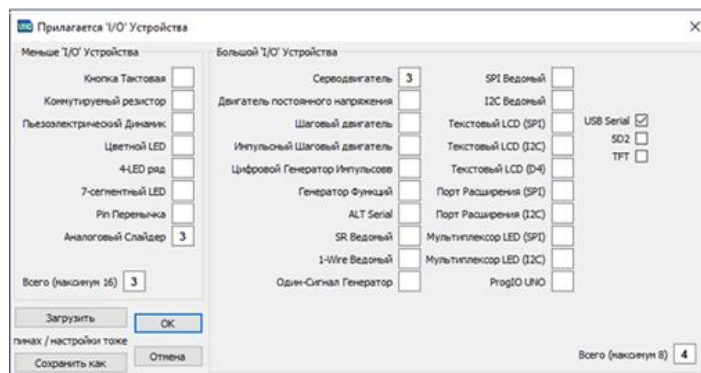


Рис. 9. Конфігурація маніпулятора

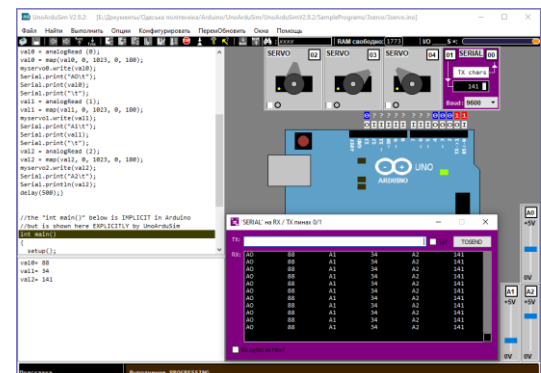


Рис. 10. Симулятор у режимі симуляції

Ця модель дозволяє створити зображення тільки виконавчих пристроїв, у даному випадку сервоприводів, тому далі розглянемо комп'ютерну модель маніпулятора на основі мови *Processing*, що дає можливість показати переміщення сегментів маніпулятора та яку можна використовувати як разом з апаратним стендом маніпулятора, так і самостійно.

Розглянемо, як можна здійснити відображення процесу керування за допомогою програми *Processing* [5, 6].

У першому випадку керування маніпулятором здійснюється за допомогою контролера *Arduino*, а дані про положення сегментів надсилаються до графічного відображення

маніпулятора, яке створено за допомогою програми Processing. За основу був прийнятий приклад Arm, наведений раніше (рис. 11).

Позначимо кут повороту сегмента 1 (плеча) $angle1$, який встановлюється за допомогою позиції потенціометра POT0, а сегмента 2 (передпліччя) $angle2$, який встановлюється за допомогою потенціометра POT1. Сегмент 3 (робочий орган) не повинен змінювати орієнтацію при переміщенні, тому його кут дорівнює $angle3 = angle1 - angle2$. За допомогою відповідної програми здійснюється визначення кутів повороту сегментів для Arduino, що використовуються для керування програмної моделі, що була створена за допомогою програми Processing (рис. 12).

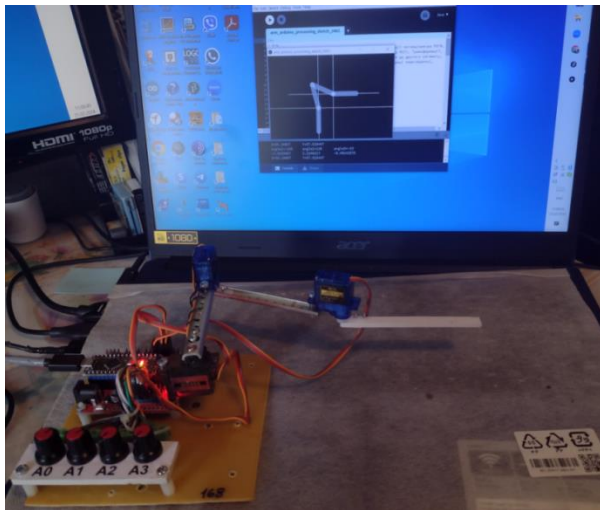


Рис. 11. Стенд маніпулятора з відображенням переміщення за допомогою програми Processing

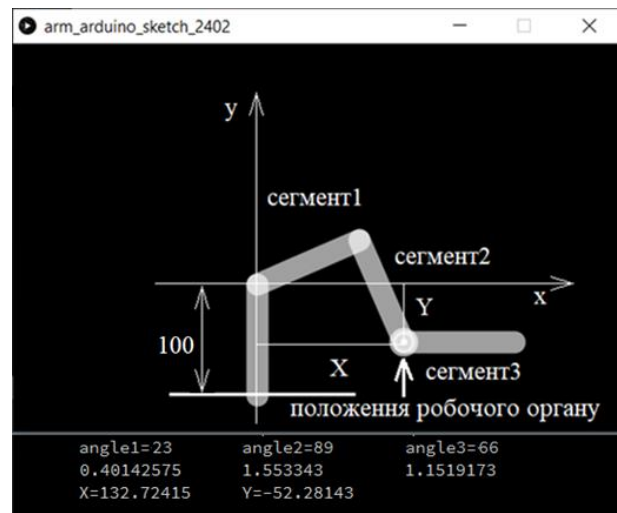


Рис. 12. Відображення маніпулятора

Були розроблені програми для керування сегментами маніпулятора за допомогою мишки на основі формул (1) та (2) з підрахунком координат робочого органу, використовуючи пряму задачу кінематики аналогічно тому, як це здійснювалось у моделі руки Arm (рис. 13), а також керування положенням робочого органу на основі формул (3) та (4) з підрахунком кутів повороту сегментів, використовуючи зворотну задачу кінематики (рис. 14).



Рис. 13. Визначення координат робочого органу маніпулятора

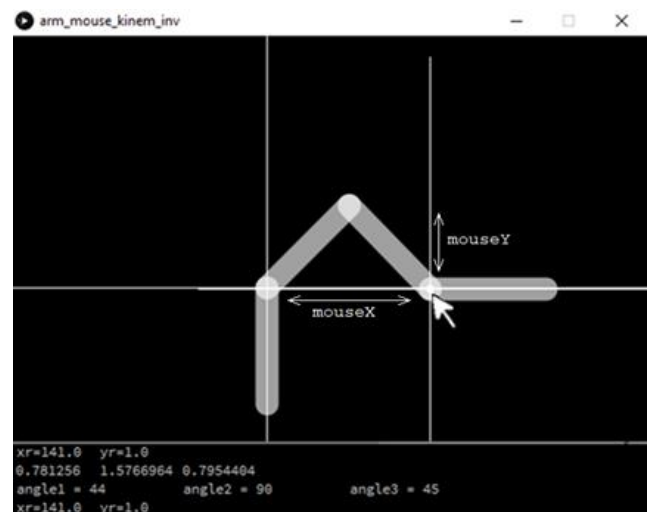


Рис. 14. Визначення кутів повороту сегментів маніпулятора

Розроблені моделі можуть використовуватись для дослідження переміщення маніпуляторів та їх ланок, для створення програм шляхом навчання, коли у ручному режимі визначаються параметри ланок для встановлених послідовних положень робочого органу, на основі яких створюється програма для переміщення маніпулятора у автоматичному режимі, а також при проведенні дистанційного навчання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Михайлов Є. П., Лінгур В. М. «Навчальний посібник з дисципліни Маніпулятори та промислові роботи. Для студентів бакалаврів, спеціальності: 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеве машинобудування». ОНПУ. Одеса: Україна. 2019.
2. Цвіркун Л. І., Грулер Г. «Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб.». *М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн.* НГУ. Дніпро: Україна. 2017.
3. “ARDUINO.UA”. – URL: <https://arduino.ua> (дата звернення 22.09.2025).
4. “UnoArduSim. Simulator Download. UnoArduSimV2.9.2”. – URL: <https://sites.google.com/site/unoardusim/simulator-download?authuser=0> (дата звернення 22.09.2025).
5. “Welcome to Processing”. – URL: <https://processing.org/> (дата звернення 22.09.2025).
6. “Processing. Examples. Arm”. – URL: <https://processing.org/examples/arm.html> (дата звернення 22.09.2025).

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.72>

UDC 621.865.8

Research on manipulator movement using hardware and computer models

Yevgen P. Mykhaylov¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department of Hoisting and Conveying Machines and Robotics Equipment
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3906-3960>; alladenysova@gmail.com. Scopus Author ID: 57193405766

Anatolii O. Seredynskyi¹⁾

Bachelor of the Department of Hoisting and Conveying Machines and Robotics Equipment
5716709@stud.op.edu.ua

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

One of the main directions of designing robotic systems is the kinematic analysis of manipulators, which allows us to proceed to the study of dynamics and synthesis of manipulator motion control based on forward and inverse kinematics problems. The work focuses on the development of hardware and computer models of the movement of various manipulator elements. For this purpose, tools used for hardware and computer modeling of manipulator movement are used. The work shows how to create manipulator models based on the Arduino hardware-software complex. The possibility of using the UnoArduSim simulator to create computer models is considered, which includes both computer control devices and information and executive devices used in robotic devices. The Processing programming language is used to graphically display the manipulator movement on a computer, which makes it possible to create animated models. A simplified hardware model of a manipulator with three segments, the movement of which is carried out using servo drives, and a mathematical model of using direct and inverse kinematics problems to determine the trajectory of movement of the working body from known values of the state parameters of individual segments, as well as to determine the state parameters of individual segments from the coordinates of the working body have been developed. The hardware model of the manipulator is created on the basis of hardware and software tools used in the Arduino hardware-software complex and the UnoArduSim simulator, which makes it possible to use software to study manipulators both on the hardware and software model. A hardware-computer model of the manipulator based on Arduino and Processing has been developed to study the movement of the manipulator in manual and automatic modes. Computer models based on direct and inverse kinematics problems have been created based on the Processing language, where the position of individual segments and the working body of the manipulator is controlled by moving the mouse, and the cursor coordinates determine the angles of rotation of individual segments for the direct kinematics problem or the coordinates of the working body for the inverse kinematics problem. These models can be used to study the movement of manipulators and their links, to create programs through training, when in manual mode the parameters of the links are determined for the established sequential positions of the working body, on the basis of which a program is created for moving the manipulator in automatic mode, as well as during distance learning.

Keywords: manipulator; hardware model; computer model; forward kinematics problem; inverse kinematics problem; microcontroller; simulator; distance learning