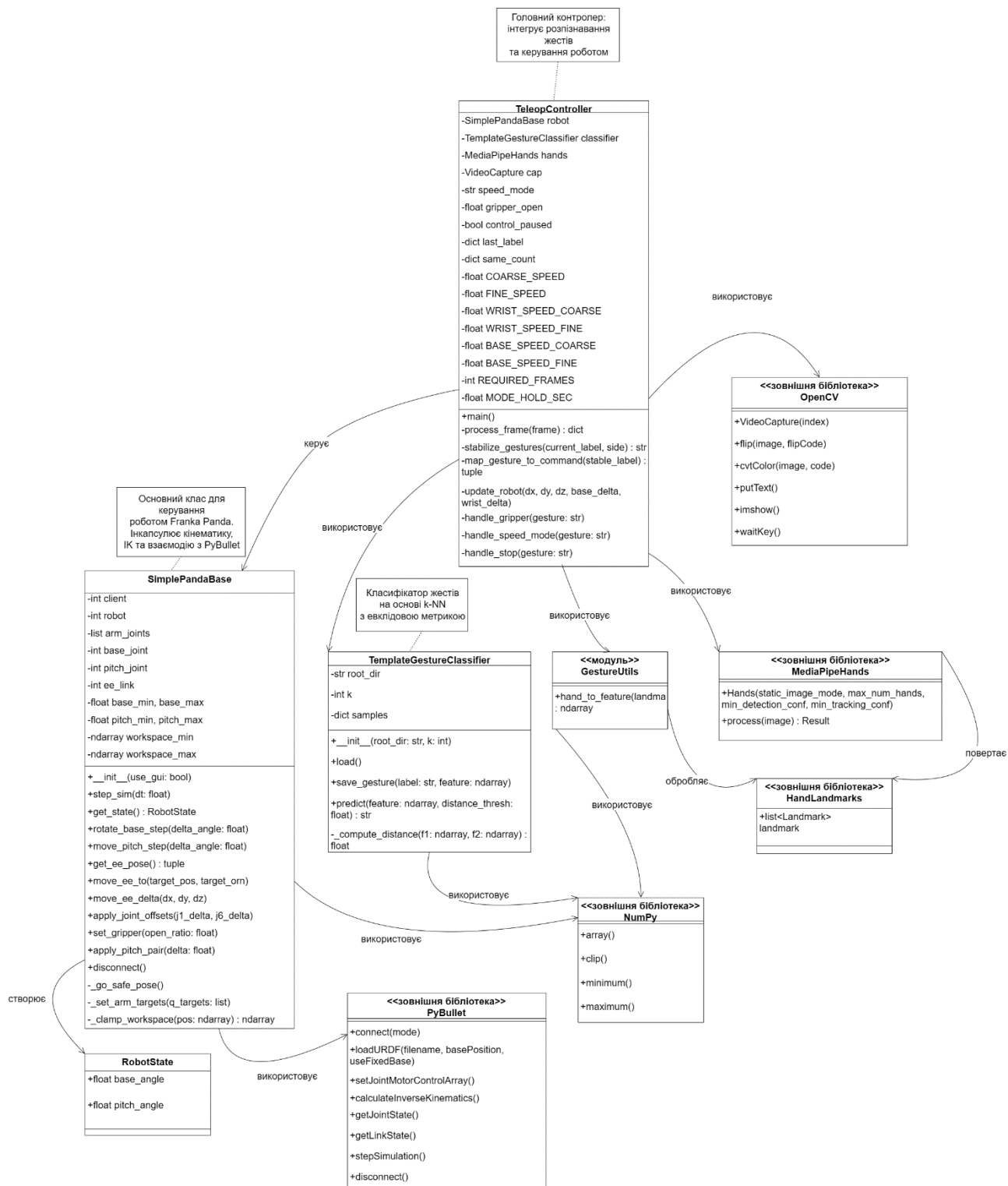


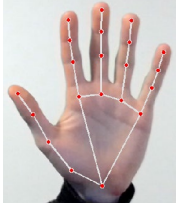
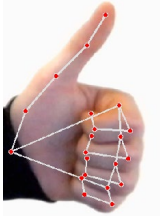
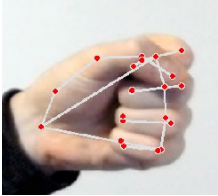
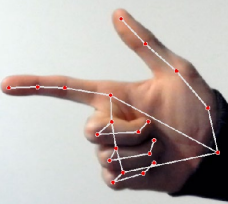
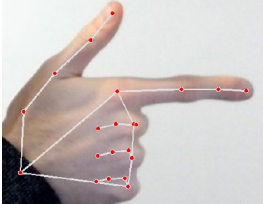
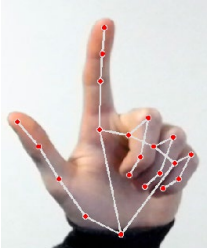
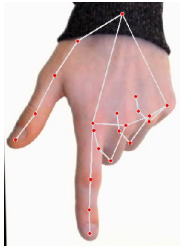
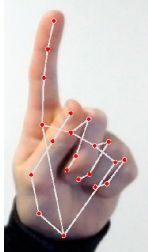
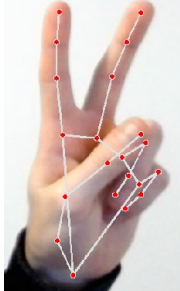
ДОДАТОК А

Архітектурна схема розробленої системи



ДОДАТОК Б

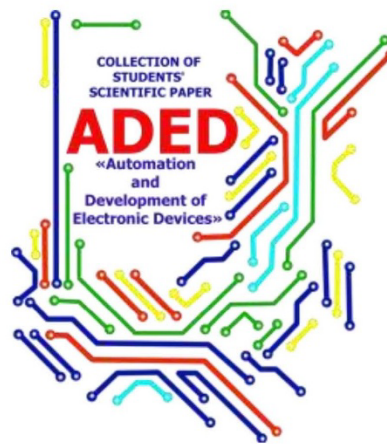
Таблиця з зображеннями використаних жестів

Назва в системі	Жест	
STOP		
GRIP_	OPEN	CLOSE
		
L_BASE_/BASE_	LEFT	RIGHT
		
PITCH_	UP	DOWN
		
SPEED_	COARSE/	FINE
		

ДОДАТОК В

Апробація результатів у статті

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(КІТАР)



ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2025

(Випуск 2)

[електронне видання]

Харків 2025

- Головий редактор** **Невлюдов Ігор Шакирович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.
- Редакційна колегія:** **Филипенко 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 робототехніки, 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 підприємство «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.
Свищ Володимир Митрофанович, доктор технічних наук, професор, радник директора Державне науково-виробниче підприємство «Об'єднання Комунар».
Фомовська Олена Владиславівна, кандидат технічних наук, доцент завідувач кафедри «Електронних апаратів» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.
Кухаренко 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 робототехніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.
Фурманова Наталія Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, декан факультета Радіоелектроніки і телекомунікацій, Національного університету «Запорізька політехніка».
- Відповідальний редактор:** **Євсєєв Владислав В'ячеславович**, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.

Міністерство освіти і науки України



NURE

Харківський національний університет
радіоелектроніки

ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2025

(Випуск 2)

[електронне видання]



<http://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam>



<http://itez.zntu.edu.ua/>



<http://kafea.kdu.edu.ua>

Харків 2025

УДК 004.94

**АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
РОБОТИЗОВАНИМ МАНІПУЛЯТОРОМ НА ОСНОВІ РОЗПІЗНАВАННЯ
ЖЕСТІВ РУКИ**

І.М. Гайдук

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: illia.haiduk@nure.ua

Анотація: У статті проведено аналіз особливостей розробки системи управління роботизованим маніпулятором на основі розпізнавання жестів руки. Розглянуто принципи функціонування системи, що використовує технології комп'ютерного зору, а також інструменти OpenCV, MediaPipe та симуляційне середовище PyBullet. Наведено етапи створення системи – від збору та попередньої обробки зображень до інтерпретації жестів і передачі команд маніпулятору. Проаналізовано переваги, обмеження та перспективи використання таких підходів для створення інтуїтивних інтерфейсів взаємодії «людина-робот».

Ключові слова: роботизований маніпулятор, управління жестами, розпізнавання рук, комп'ютерний зір, OpenCV.

**ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT FEATURES OF A HAND-GESTURE-BASED
ROBOTIC MANIPULATOR CONTROL SYSTEM**

I. M. Haiduk

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauky Avenue

E-mail: illia.haiduk@nure.ua

Abstract: The article analyzes the development features of a hand-gesture-based robotic manipulator control system. It examines the operational principles of the system that employs computer vision technologies and tools such as OpenCV, MediaPipe, and the PyBullet simulation environment. The stages of system creation are presented, including image acquisition and preprocessing, gesture interpretation, and command transmission to the manipulator. The paper also highlights the advantages, limitations, and future prospects of implementing such approaches to build intuitive human-robot interaction interfaces.

Keywords: robotic manipulator, gesture control, hand recognition, computer vision, OpenCV.

Актуальність дослідження зумовлена потребою в інтуїтивних і безконтактних інтерфейсах керування роботизованими маніпуляторами. Такі системи є критично важливими у стерильних медичних середовищах, під час роботи в засобах індивідуального захисту на виробництві та для асистивних застосунків. Метою роботи є розроблення й експериментальна оцінка системи керування маніпулятором на основі розпізнавання жестів руки із використанням OpenCV, MediaPipe та симуляційного середовища PyBullet.

Управління жестами є однією з ключових технологій у взаємодії людини з робототехнічними системами. Завдяки розвитку комп'ютерного зору й алгоритмів машинного навчання стало можливим створення інтуїтивно зрозумілих систем, які дозволяють ефективно передавати команди роботам-маніпуляторам у реальному часі.

Розпізнавання жестів ґрунтується на обробці зображень, отриманих із камер, та інтерпретації ключових точок руки. Одним із найбільш поширених підходів є використання бібліотек, таких як MediaPipe, що забезпечують виявлення ключових точок руки з високою точністю [1-4]. MediaPipe використовує попередньо натреновані моделі для ідентифікації положення пальців і долоні, що дозволяє створювати жести різної складності.

Для більш складних завдань застосовуються глибокі нейронні мережі, такі як Convolutional Neural Networks (CNNs), які використовуються для розпізнавання складних жестів у динамічних середовищах (рис. 1).



Рисунок 1 – Алгоритм роботи CNN для розпізнавання жестів

Технології управління жестами інтегрують алгоритми розпізнавання з системами управління, такими як роботизовані маніпулятори. Для цього широко використовуються симуляційні платформи, наприклад, PyBullet, які дозволяють моделювати поведінку маніпулятора у віртуальному середовищі [4]. PyBullet – це потужне програмне середовище, призначене для симуляції фізичних процесів і робототехнічних систем. Воно базується на фізичному рушії Bullet Physics, відомому своєю точністю в обчисленнях динамічної фізики, і має зручний інтерфейс для програмування на мові Python. Це інструмент для наукових досліджень, навчання алгоритмів управління, а також тестування роботів і їх взаємодії із середовищем.

Однією з ключових переваг програми є можливість моделювання поведінки роботів у віртуальному середовищі з урахуванням гравітації, тертя, зіткнень і інших фізичних явищ (рис. 2).

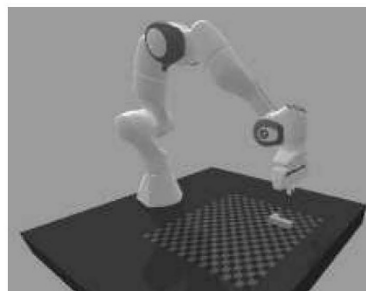


Рисунок 2 – Зображення робота у середовищі PyBullet

Завдяки підтримці формату URDF (Unified Robot Description Format) користувачі можуть завантажувати тривимірні моделі роботів і програмувати їх рухи, враховуючи кінематичні та динамічні обмеження. Це особливо важливо для розробників роботизованих систем, які прагнуть оптимізувати управління своїми пристроями перед впровадженням у реальних умовах.

Платформа PyBullet також забезпечує інструменти для роботи з сенсорами, включаючи моделювання камер, лідарів, акселерометрів і гіроскопів. Це дає більші можливості для створення автономних роботів, які здатні реагувати на зміни в навколишньому середовищі. Крім того, середовище активно використовується у сфері штучного інтелекту, зокрема для навчання алгоритмів підкріплення. Завдяки підтримці інтеграції з TensorFlow та PyTorch розробники можуть створювати інтелектуальні системи управління, які адаптуються до складних умов і приймають рішення у реальному часі [4].

Система управління жестами включає три основні компоненти:

- детекція жестів – отримання даних з камер і виявлення ключових точок;
- інтерпретація жестів – перетворення жестів у зрозумілі для машини команди;
- передача команд – інтеграція із системами управління, що забезпечує рух маніпулятора відповідно до заданих жестів.

Розробка починається з вибору апаратного та програмного забезпечення. У рамках створення системи управління жестами доцільно використовувати потужну бібліотеку комп'ютерного зору OpenCV, яка надає інструменти для обробки й аналізу зображень, а також MediaPipe, що забезпечує виявлення ключових точок руки із високою точністю. Для моделювання рухів маніпулятора та тестування алгоритмів застосовується симуляційна платформа PyBullet, яка дозволяє перевіряти систему у віртуальному середовищі до її фізичного впровадження.

Першим етапом роботи системи є отримання зображень руки користувача за допомогою оптичного сенсора, такого як веб-камера. Це зображення підлягає попередній обробці.

Калібрування камери дозволяє мінімізувати геометричні спотворення та налаштувати параметри для коректного визначення просторових характеристик.

Обробка зображення виконується за допомогою OpenCV – здійснюється нормалізація кольорів, видалення шумів, а також виділення області цікавості (ROI), що зосереджує увагу на руці користувача [5].

MediaPipe – це універсальна та високопродуктивна платформа для розробки систем комп'ютерного зору й обробки мультимедійних даних, створена компанією Google. Завдяки своїй гнучкості та потужності MediaPipe стала основою для багатьох інноваційних рішень у сфері розпізнавання образів, жестів і обробки відео у реальному часі. Особливістю цієї технології є її здатність працювати на різних пристроях, включаючи мобільні телефони, персональні комп'ютери та вбудовані системи.

Одним із найпоширеніших застосувань MediaPipe є розпізнавання жестів і відстеження рук. Інструмент MediaPipe Hands використовує глибокі нейронні мережі для визначення положення 21 ключової точки на руці, включаючи кінчики пальців, суглоби та центр долоні (рис. 3).



Рисунок 3 – Розпізнавання ключових точок руки

Ці дані слугують основою для аналізу положення руки в просторі, розпізнавання жестів і інтерактивного управління пристроями.

Основою системи є алгоритми розпізнавання жестів. Існує два методи:

– евристичні методи, вони підходять для визначення простих жестів, наприклад «скоплення» чи «відкриття руки»;

– глибокі згорткові нейронні мережі (CNN), які забезпечують точне розпізнавання складніших жестів, таких як динамічні рухи пальців чи комбіновані жести [6-8].

Після класифікації жестів система передає відповідні команди до маніпулятора. Це досягається за допомогою PyBullet, що симулює поведінку маніпулятора у реальному часі. Команди, отримані внаслідок аналізу жестів, перетворюються на рухи суглобів робота. Наприклад, жест «скоплення» може відповідати зміні кута нахилу суглоба маніпулятора для фіксації об'єкта.

ВИСНОВКИ. У роботі проведено аналіз підходів та інструментів, що застосовуються під час розробки системи управління роботизованим маніпулятором на основі розпізнавання жестів руки. Показано, що поєднання бібліотек OpenCV і MediaPipe забезпечує високу точність і швидкість обробки зображень у реальному часі, а використання симуляційного середовища PyBullet дозволяє безпечно моделювати рухи маніпулятора й оптимізувати алгоритми управління до етапу фізичної реалізації. Проведений аналіз підтвердив ефективність інтеграції технологій комп'ютерного зору та машинного навчання для створення інтуїтивних інтерфейсів взаємодії «людина-робот».

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку адаптивних алгоритмів, здатних враховувати індивідуальні особливості користувача та зміни зовнішнього середовища, а також на реалізацію системи із використанням реального маніпулятора.

ЛІТЕРАТУРА

1. MediaPipe Hands Documentation, Google Developers. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://google.github.io/mediapipe/solutions/hands>.
2. Bortnikova, V., & et al. (2019). Structural parameters influence on a soft robotic manipulator finger bend angle simulation. In 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), IEEE, 35-38.
3. Жарікова І. В. Дослідження механічних параметрів гнучких комутаційних структур для мобільних роботизованих платформ / І. В. Жарікова, Д. О. Нікітін // Виробництво & Мехатронні Системи 2024 : матеріали VIII-ої Міжнародної конференції, 25-26 жовтня 2024 р. – Харків, 2024. – С. 110-113.

4. Ihor N., Iryna Z., Artem B. IMPROVEMENT OF THE COMMUTATION SYSTEM FOR A MOBILE ROBOT PLATFORM USING POLYIMIDE STRUCTURES //The 4 th International scientific and practical conference “Eurasian scientific discussions” (May 8-10, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2022. 403 p. – 2022. – С. 157.
5. Molchanov S., Gupta S., Pulli K., Kim T. Hand Gesture Recognition with 3D Convolutional Neural Networks // IEEE Conference on Computer Vision. – 2016. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7780769>.
6. PyBullet Documentation. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pybullet.org>.
- 7 Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – Springer, 2010. – 812 с.
8. Zhou H., Han X., Li Y., Liu S. Hand Gesture Recognition via Deep Learning: A Survey and Performance Evaluation // arXiv preprint arXiv:2111.00038. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/2111.00038>.

Науковий керівник: Жарікова Ірина Володимирівна, доцент кафедри КІТАР, кандидат технічних наук, доцент.

ДОДАТОК Г

Демонстраційний матеріал

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кафедра КІТАР

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: система управління роботизованим маніпулятором на основі розпізнавання жестів руки

Виконав:
студент групи КТРСм-24-1
Гайдук Ілля Михайлович

Керівник:
доцент кафедри КІТАР
Жарікова Ірина Володимирівна

1

Мета роботи

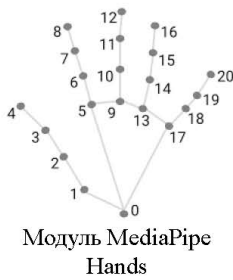
Мета роботи – підвищення ефективності й надійності керування роботизованим маніпулятором, шляхом застосування жестового інтерфейсу на основі комп'ютерного зору та симуляційного моделювання з урахуванням вимог безпеки та зручності оператора.

Об'єкт дослідження – процес людино-машинної взаємодії під час керування роботизованими маніпуляторами.

Предмет дослідження – методи та програмні засоби розпізнавання жестів руки й алгоритми перетворення цих жестів у керуючі дії для маніпулятора Franka Emika Panda.

2

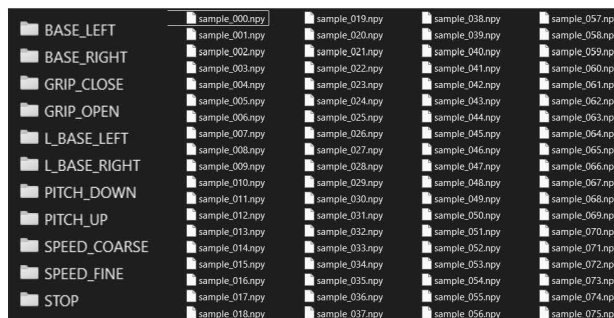
Технології комп'ютерного зору



- Визначає 21 ключову точку кисті в реальному часі.
- Працює з однієї RGB-камери.
- Забезпечує стабільні 3D-координати навіть при часткових поворотах руки.
- Використовується як основа для формування вектора ознак.
- Обробка та нормалізація відеопотоку.
- Перетворення формату BGR → RGB, фліп кадру, підготовка до MediaPipe.
- Відображення стану системи: текст, статуси, журнали.

3

База даних жестів



- Переваги підходу:
 - проста й розширювана (легко додати новий жест або нові зразки);
 - не потребує перенавчання великої нейромережі;
 - адаптація під конкретного користувача через дозапис еталонів;
 - модуль класифікації не прив'язаний до конкретного робота чи симулятора.

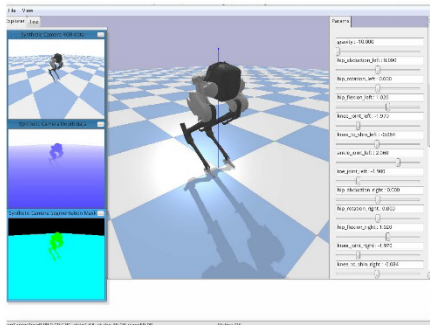
4

Відповідність жестів і команд робота

Рука	Жести	Назва в системі	Примітка
Будь-яка	Зупинка / STOP	STOP	Миттєво зупиняє рух робота; при утриманні ~2 с вмикає/вимикає керування жестами
	Відкрити хват	GRIP_OPEN	Закрити або відкрити хват
	Закрити хват	GRIP_CLOSE	
Ліва	Поворот бази вліво	L_BASE_LEFT	Повернути маніпулятор навколо вертикальної осі
	Поворот бази вправо	L_BASE_RIGHT	
	Наклони кисті вгору	PITCH_UP	Повернути суглоб зап'ястка
	Наклони кисті вниз	PITCH_DOWN	
Права	Рух кисті вперед по X	BASE_RIGHT	Зсунути кінцевий ефектор (X)
	Рух кисті назад по X	BASE_LEFT	
	Рух вгору по Z	PITCH_UP	Підняти кінцевий ефектор (Y)
	Рух вниз по Z	PITCH_DOWN	
	Перемикач режимів з грубого на точний	SPEED_COARSE/ SPEED_FINE	При стабільному жесті й утриманні ~2 с перемикає режими

5

Бібліотека PyBullet



PyBullet – фізичне симуляційне середовище, обране для роботи з маніпулятором Franka Emika Panda.

Переваги:

- вбудований солвер інверсної кінематики (calculateInverseKinematics);
- підтримка URDF-моделей робота;
- стабільна симуляція динаміки та зіткнень;
- плавне оновлення стану робота в реальному часі;
- можливість легко обмежувати робочу зону та параметри суглобів.

6

Обраний робот Franka Emika Panda



Основні характеристики:

- 7 DOF, висока маневровість, можливість обійти перешкоди;
- URDF модель, сумісна з PyBullet;
- висока точність позиціонування та змінена кінематика, добре підходить для ІК;
- двопальцевий хват із керуванням шириною відкриття.

7

Архітектура розробленої системи

1. Рівень сприйняття
 - Отримання кадру з камери.
 - MediaPipe → landmarks.
 - GestureUtils → нормалізований вектор ознак.
 - Класифікатор k-NN → семантичний жест (STOP, BASE_LEFT, GRIP_OPEN тощо).
2. Інтерпретаційний рівень
 - Стабілізація жестів у часі (3 кадри поспіль).
 - Мапінг жестів у команди (dx, dz, поворот бази, обертання зап'ястка).
 - Перемикання режимів швидкості (COARSE/FINE).
 - Реалізація STOP та паузи керування.
3. Рівень керування маніпулятором
 - Перетворення локальних координат у світові.
 - Обмеження робочої зони.
 - Інверсна кінематика через PyBullet.
 - Суглобове керування (база, зап'ясток).
 - Керування хватом.



Структурна схема архітектури розробленої системи

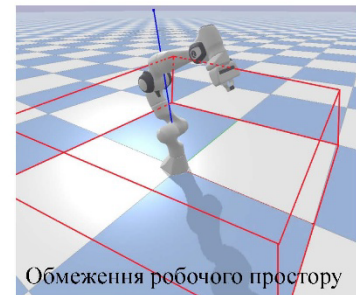
8

Механізми безпеки



1. Жест STOP (аварійна зупинка).
 - Миттєво блокує всі переміщення маніпулятора.
 - При утриманні $\approx 2\text{с}$ – вмикає/вимикає режим паузи керування.

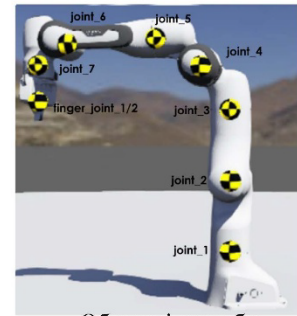
2. Робоча зона кінцевого ефектора.
 - Простір визначений у локальних координатах маніпулятора.
 - Обмежує X, Y, Z у межах безпечних значень.



Обмеження робочого простору

3. Обмеження суглобів
 - Поворот бази та суглоб зап'ястка фіксуються в ІК.
 - Неможливо випадково змінити їх під час декартового руху.

4. Фільтрація жестів
 - Жест впливає на рух лише після стабілізації (3 однакові кадри).
 - Знижує ймовірність небажаних реакцій через шум MediaPipe.



Обертові суглоби

9

Пряма та інверсна кінематика

1. Пряма кінематика маніпулятора (DH-модель)

Положення та орієнтація кінцевого ефектора визначаються через послідовність однорідних перетворень за модифікованою DH-конвенцією:

$${}^0T_7(q) = \prod_{i=1}^7 A_i(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i),$$

де A_i – матриця однорідного перетворення для i -ої ланки,
 $q = (\theta_1, \dots, \theta_7)$ – вектор суглобових координат.

2. Інверсна кінематика (метод демпфованих найменших квадратів)

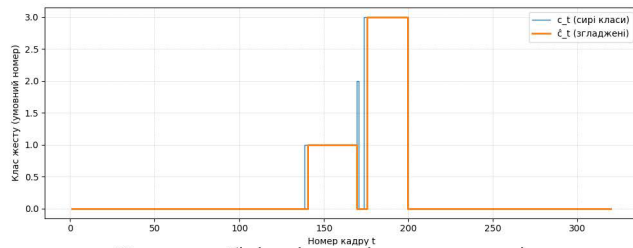
Для обчислення суглобових швидкостей за заданою швидкістю кінцевого ефектора використовується демпфований розв'язок через псевдообернену матрицю Джейкобі:

$$\dot{q} = J^T (J J^T + \lambda^2 I)^{-1} \dot{x},$$

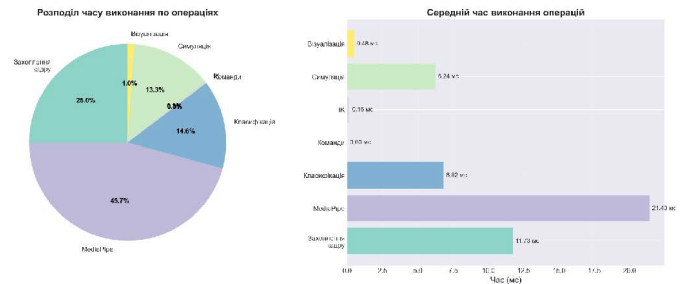
де
 J – матриця Якобі маніпулятора;
 \dot{x} – бажана лінійна/кутова швидкість кінцевого ефектора;
 λ – демпфуючий коефіцієнт;
 I – одинична матриця.

10

Експериментальні дослідження



Часова стабілізація розпізнавання жестів



Діаграма середнього часу циклу

11

Експериментальні дослідження

Жест	Успішно розпізнано	Точність, %
STOP	15 з 15	95
GRIP_OPEN	13 з 15	88
GRIP_CLOSE	14 з 15	90
L_BASE_LEFT	15 з 15	94
L_BASE_RIGHT	15 з 15	94
PITCH_UP	15 з 15	96
PITCH_DOWN	14 з 15	91
BASE_RIGHT	13 з 15	85
BASE_LEFT	15 з 15	94
SPEED_COARSE/ SPEED_FINE	15 з 15	98

Статистика точності розпізнавання жестів

12

Майбутні вдосконалення

- Підтримка динамічних жестів та послідовностей рухів
- Адаптація під реальний маніпулятор Franka Emika Panda
- Двуручне керування та комбіновані жести

13

Висновки

У роботі проведено комплексний аналіз сучасних роботизованих маніпуляторів та існуючих підходів до безконтактного керування, на основі якого обґрунтовано вибір MediaPipe для виділення ключових точок кисті та PyBullet для симуляції кінематики маніпулятора Franka Emika Panda. Розроблено модульну архітектуру системи жестового керування, що охоплює захоплення відеопотоку, відстеження руки, формування нормалізованого вектора ознак, шаблонну класифікацію жестів та керування маніпулятором у локальній системі координат. Побудовано математичну модель маніпулятора на основі модифікованої DH-конвенції та реалізовано розв'язання задачі інверсної кінематики засобами PyBullet. Впроваджено набір із 12 статичних жестів, включаючи жест екстреної зупинки STOP, а також механізми обмеження робочої зони та часової фільтрації для підвищення безпеки. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність системи: середня точність розпізнавання становить 92,5 %, а затримка від появи жесту до ініціації руху — близько 210 мс. Створений прототип може використовуватися як навчально-дослідницький стенд та основа для подальшої інтеграції з реальним робототехнічним обладнанням.

14

