МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другого (магістерського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Система управління синхронізованою роботою роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1744 ___
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка_____

освітньої програми Автоматизація та_____
комп'ютерно-інтегровані технології_____

_____Мельник Д.В._____

Керівник доц., к.т.н. Міняйло Н.О._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»_ __
_____Курілець І. А._____

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно- інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва)
Спеціалізація
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри В.Л.Коваленко

"____" _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ
Мельнику Денису Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батьков)

1. Тема роботи (проекту) Система управління синхронізованою роботою роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні
Керівник роботи Міняйло Наталія Олександрівна , канд.техн.наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від від «27» лютого 2025 року № 313-с
2. Строк подання студентом роботи 01 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики, ДСТУ
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналітичний огляд роботів та маніпуляторів; опис технологічного процесу використання синхронізованих роботизованих маніпуляторів; розробка математичної моделі системи управління синхронізованою роботою маніпуляторів; розробка програмного забезпечення системи управління синхронізованими роботизованими маніпуляторами; тестування системи управління у режимі реального часу; висновки
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) : Загальна характеристика роботи; актуальність роботи; оптимізація траєкторій за допомогою кватерніонів; алгоритм запобігання колізіям : зони безпеки; програмне забезпечення та симуляція в CapelliaSim; тестування системи: сценарій колізії; розрахунок траєкторії руху зчленування маніпулятора; технічний зір; контроль струму; головні компоненти системи; збірка 6-ти

осьового маніпулятора; 3D-друк та прототипування колаборативного робота; висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Міняйло Н. О., доцент	02.09.2025	15.09.2025
2	Міняйло Н. О. , доцент	16.09.2025	07.10.2025
3	Міняйло Н. О. , доцент	08.10.2025	24.10.2025
4	Міняйло Н. О. , доцент	24.10.2025	14.11.2025
5	Міняйло Н. О. , доцент	14.11.2025	28.11.2025

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розробка технічного завдання	10.09.2025	
2	Аналітичний огляд роботів маніпуляторів	15.09.2025	
3	Розробка математичної моделі системи управління	07.10.2025	
4	Розробка програмного забезпечення системи управління маніпуляторів	24.10.2025	
5	Проведення експерименту і отримання результатів моделювання в CapelliaSim	03.11.2025	
6	Проектування та зборка маніпуляторів працюючих в єдиній робочий зоні	14.11.2025	
7	Тестування системи управління у режимі реального часу	24.11.2025	
8	Оформлення роботи, перевірка на плагіат, проходження нормоконтролю; розробка презентації роботи	28.11.2025	
9	Підготовка доповіді	01.12.2025	

Здобувач _____ Д.В. Мельник
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ Н.О. Міняйло
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Мельник Д.В. Система управління синхронізованою роботою роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно- інтегровані технології та робототехніка, науковий керівник Міняйло Н. О., Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2025.

У роботі виконано комплекс досліджень, спрямованих на розробку і вдосконалення ефективної методики управління, що забезпечує оптимізацію траєкторій руху, уникнення колізій між маніпуляторами та підвищення продуктивності промислових процесів.

У першому розділі розглядається історичний розвиток роботизованих маніпуляторів. Досліджуються основні компоненти маніпуляторів та розглядаються сучасні методи управління. Другий розділ містить детальний опис роботи маніпуляторів. Аналізується архітектура системи та алгоритми. У третьому представлені методи оптимізації траєкторій руху, алгоритми запобігання колізіям, а також застосування нейронних мереж. Четвертий розділ присвячений створенню програмної частини системи.

У п'ятому розділі описується тестування системи управління в режимі реального часу. Аналізується перевірка кінематики, траєкторій та уникнення колізій в симуляторі CoppeliaSim.

РОБОТ, МАНІПУЛЯТОР, РУХ, СЕНСОР, КОНТРОЛЛЕР, МАШИННИЙ ЗІР, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, ІНТЕРФЕЙС, ПРОГРАМУВАННЯ, ТЕСТУВАННЯ

ABSTRACT

Melnyk D.V. Control System for the Synchronized Operation of Robotic Manipulators in a Shared Workspace.

Master's qualification thesis for obtaining higher education in the specialty 174 «Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics». Scientific supervisor: Miniailo N.O. Zaporizhzhia National University, Yu. M. Potebnia Engineering Scientific and Educational Institute, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems. Zaporizhzhia, 2025.

This thesis presents a comprehensive set of studies aimed at developing and improving an effective control methodology that ensures trajectory optimization, collision avoidance between manipulators, and increased productivity of industrial processes.

The first chapter reviews the historical development of robotic manipulators, examines their main components, and considers modern control methods. The second chapter provides a detailed description of manipulator operation, analyzing system architecture and algorithms. The third chapter presents methods of trajectory optimization, collision avoidance algorithms, and the use of neural networks. The fourth chapter is devoted to the development of the software part of the system.

The final chapter describes real-time testing of the control system, including verification of kinematics, trajectories, and collision avoidance in the CoppeliaSim simulator.

ROBOT, MANIPULATOR, MOVEMENT, SENSOR, CONTROLLER, MACHINE VISION, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, INTERFACE, PROGRAMMING, TESTING

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РОБОТІВ ТА МАНІПУЛЯТОРІВ 11
1.1 Історичний розвиток роботизованих маніпуляторів 11
1.2 Класифікація роботизованих маніпуляторів 15
1.3 Основні компоненти роботизованих маніпуляторів 16
1.4. Сучасні методи управління синхронізованими системами маніпуляторів в єдиній робочій зоні 23
1.5 Постановка задачі проєктування 27
2 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИКОРИСТАННЯ СИНХРОНІЗОВАНИХ РОБОТИЗОВАНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ 30
2.1 Кінематика маніпуляторів 30
2.2 Динаміка та управління 40
2.3 Можливі конфлікти та обмеження 44
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗОВАНОЮ РОБОТОЮ МАНІПУЛЯТОРІВ 55
3.1 Математична модель узгодженого руху маніпуляторів у загальному робочому просторі 55
3.1.1 Алгоритми запобігання колізіям між маніпуляторами 57
3.1.2 Оптимізація траєкторій руху роботизованих маніпуляторів . 59
3.1.3 Інтеграція сенсорних систем для точного позиціонування 64
3.1.4 Управління взаємодією маніпуляторів у режимі реального часу 73
4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗОВАНИМИ РОБОТИЗОВАНИМИ МАНІПУЛЯТОРАМИ 80
4.1 Структура інтерфейсу для управління та моніторингу маніпуляторів 80

4.2 Аналіз технологічних процесів та відображення за допомогою CoppeliaSim 82
4.2.1 Проектування маніпулятора..... 86
Визначення загального передаточного відходження по формулі:..... 93
4.2.2 Побудова принципіальної схеми для підключення маніпуляторів..... 97
4.2.3 Реалізація програмного забезпечення для управління маніпуляторами 105
5. ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ 106
ВИСНОВКИ..... 112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 114

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасні виробничі процеси все частіше потребують автоматизації, що спричиняє зростання попиту на роботизовані системи. Використання декількох роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні дозволяє підвищити ефективність виконання складних технологічних операцій, таких як збирання, зварювання, пакування та сортування. Проте для забезпечення їх безпечної та ефективної роботи необхідно синхронізувати рух маніпуляторів, запобігаючи зіткненням, простою та некоректному виконанню завдань.

На даний момент більшість промислових підприємств використовують окремі роботизовані вузли без комплексного підходу до їх взаємодії в спільному просторі. Тому розробка системи управління синхронізованою роботою роботизованих маніпуляторів є актуальним завданням, яке дозволить оптимізувати робочі процеси, підвищити продуктивність та рівень безпеки на виробництві.

Метою роботи є розробка та дослідження системи управління синхронізованою роботою роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні для підвищення продуктивності, безпеки та ефективності роботи автоматизованих виробничих процесів.

Об'єкт дослідження – процес управління синхронізованою роботою декількох роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні.

Предмет дослідження – система управління, що забезпечує узгоджену та безпечну взаємодію роботизованих маніпуляторів під час виконання виробничих завдань.

Завдання дослідження: для досягнення поставленої мети необхідно вирішити задачі:

– провести аналіз існуючих методів управління групами роботизованих маніпуляторів та визначити основні вимоги до синхронізованої роботи;

– розробити алгоритми координації руху маніпуляторів з урахуванням пріоритетності завдань та уникнення зіткнень;

– створити математичну модель роботи системи управління, що забезпечує динамічний розподіл задач між маніпуляторами;

– розробити програмне забезпечення для реалізації алгоритмів синхронізації роботи маніпуляторів;

– дослідити ефективність запропонованої системи управління в умовах моделювання та тестування на реальному обладнанні.

Методи досліджень. У процесі дослідження використовуються методи математичного моделювання, алгоритмічного аналізу, комп'ютерного моделювання та програмування. Для оцінки ефективності управління застосовуються методи системного аналізу, статистичної обробки даних та експериментального тестування.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає у наступному:

– розробка нового алгоритму синхронізації руху роботизованих маніпуляторів у спільному робочому просторі;

– створення математичної моделі для аналізу та оптимізації розподілу завдань між маніпуляторами;

– встановлення залежностей між параметрами траєкторій руху маніпуляторів та ефективністю виконання виробничих завдань;

– розробка програмного забезпечення для адаптивного управління системою в режимі реального часу.

Практичне значення Розроблена система управління може бути використана для автоматизації складальних, пакувальних, вантажно-розвантажувальних та інших технологічних процесів, де задіяні кілька роботизованих маніпуляторів. Її впровадження дозволить підвищити продуктивність виробництва, забезпечити ефективний розподіл завдань між маніпуляторами та знизити ризик виникнення аварійних ситуацій.

Особистий внесок. Автором самостійно проведено аналіз існуючих методів управління групами роботизованих маніпуляторів, розроблено математичні моделі, алгоритми координації та програмне забезпечення для їх реалізації.

Апробація результатів. Основні результати дослідження були представлені на науково-технічній конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2025» (25 травня 2025 року, м. Запоріжжя), а також протестовані в програмному симуляторі та на наявній моделі роботизованих маніпуляторів.

Публікації:

1. Мельник Д. В., Міняйло Н. О. Актуальність синхронізації взаємодії роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні. Збірник наукових праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2025» Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2025. Т. 5 С. 181-183. URL: https://sites.znu.edu.ua/stud-sci-soc//2025/tom_5.pdf.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 29 найменувань, викладена на 117 сторінках включаючи 46 рисунків та 8 таблиць.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РОБОТІВ ТА МАНІПУЛЯТОРІВ

Розвиток робототехніки є одним із ключових напрямків сучасної науки та техніки. Впровадження роботизованих маніпуляторів у виробничі процеси значно підвищує ефективність, точність і безпеку роботи, а також мінімізує людський фактор.

Маніпулятор – це пристрій, що керується, для виконання рухомих функцій, аналогічних функціям руки людини при переміщенні об'єктів у просторі, оснащений робочим органом.

Застосування маніпуляторів у спільній робочій зоні вимагає розробки спеціалізованих систем управління, які забезпечують координацію та синхронізацію роботів. Це дозволяє уникати зіткнень, оптимізувати рух та підвищити загальну продуктивність системи.

Цей розділ розглядає класифікацію роботизованих маніпуляторів, їхню будову, принципи роботи, а також сучасні методи управління синхронізованими системами.

1.1 Історичний розвиток роботизованих маніпуляторів

Перший промисловий робот Unimate був розроблений у 1961 року Джорджем Деволом і Джозефом Енгельбергером у співпраці з компанією General Motors (рис. 1.1). Цей робот був встановлений на заводі GM у Трентоні, Нью-Джерсі, для виконання задач, пов’язаних із литтям металів. Unimate важив близько 1800 кг і працював на гідравлічній системі. Він міг виконувати повторювані дії з високою точністю, наприклад, переносити гарячі металеві деталі, зварювати та фарбувати.

Цей робот став першим кроком до автоматизації виробництва, що дозволило компаніям зменшити витрати на працю, підвищити продуктивність і знизити ризик травм серед робітників.

Unimate також започаткував нову галузь – промислову робототехніку.

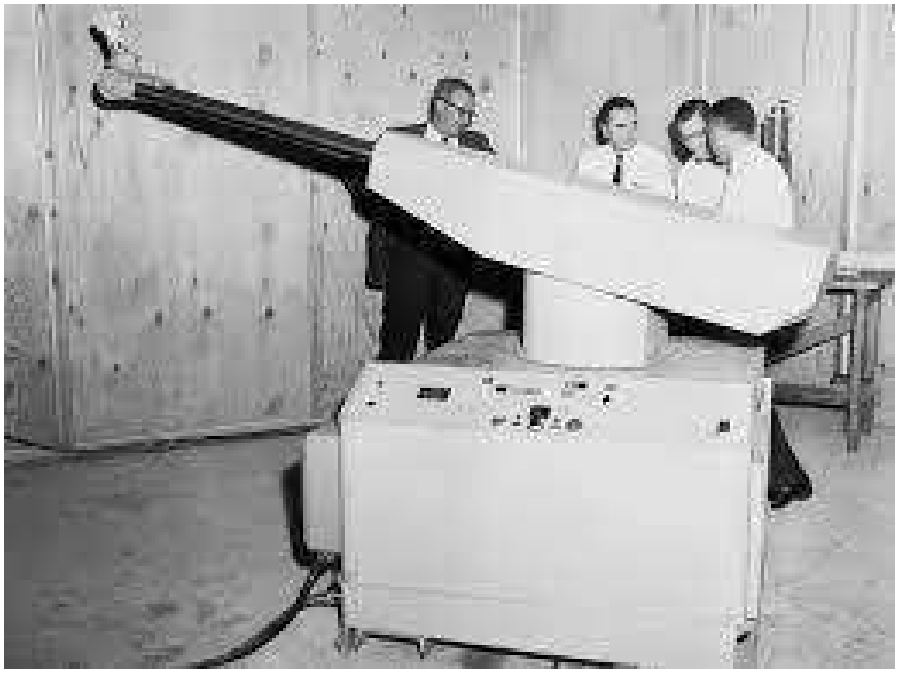


Рисунок 1.1 – Unimate на виробничій лінії General Motors

У 1980-х роках роботизовані маніпулятори стали активно впроваджуватися в промисловість завдяки розвитку електроніки та комп'ютерних технологій. Компанії Fanuc (Японія) та ABB (Швейцарія) стали лідерами у виробництві промислових роботів.

Fanuc зосередилася на створенні роботів для автомобільної промисловості, які могли виконувати такі задачі, як зварювання, складання та палітурування.

ABB розробила роботи для різних галузей, включаючи електроніку, харчову промисловість та фармацевтику.

Ці роботи були оснащені сервоприводами, що дозволяло їм працювати з високою точністю та швидкістю. Вони також стали більш програмованими, що дозволило адаптувати їх для різних завдань.

На початку 2000-х років з'явилися колаборативні роботи, або коботи, які стали новим етапом у розвитку робототехніки. Вони відрізнялися від традиційних промислових роботів тим, що могли працювати разом із людьми без необхідності фізичного відокремлення.

Промисловий робот Fanuc на виробничій лінії наведений на рис.1.2.



Рисунок 1.2 – Промисловий робот Fanuc на виробничій лінії

Universal Robots (Данія) стала піонером у виробництві роботів (рис. 1.3). Їхні роботи були компактними, легкими та простими у використанні.



Рисунок 1.3 – Колаборативний робот Universal Robots у дії

Коботи оснащені датчиками сили та безпеки, що дозволяє їм зупинятися при виявленні перешкод або контакту з людиною.

Ці роботи знайшли застосування у малих та середніх підприємствах, де традиційні промислові роботи були недоступні через високу вартість та складність інтеграції.

Сучасні роботизовані маніпулятори (рис. 1.4) інтегрують передові технології, що робить їх більш автономними та ефективними.

– штучний інтелект (ШІ): дозволяє роботам самостійно навчатися та оптимізувати виконання завдань. Наприклад, роботи можуть аналізувати дані з попередніх операцій і покращувати свою продуктивність.

– інтернет речей (IoT): забезпечує зв’язок між роботами та іншими пристроями, що дозволяє створювати «розумні» виробничі лінії. Роботи можуть обмінюватися даними в реальному часі, що підвищує ефективність виробництва.

– машинне бачення: дозволяє роботам розпізнавати об’єкти, аналізувати їхні характеристики та приймати рішення. Наприклад, роботи можуть сортувати деталі за розміром, кольором або формою.



Рисунок 1.4 – Сучасний робот з машинним зором у виробничому цеху

Сучасні роботи використовуються у різних галузях, включаючи медицину (хірургічні роботи), логістику (автономні складські роботи) та сільське господарство (роботи для збирання врожаю).

Історичний розвиток роботизованих маніпуляторів демонструє, як технології зробили їх від простих автоматів до високотехнологічних систем, здатних працювати разом із людьми та вирішувати складні завдання. Майбутнє робототехніки пов’язане з подальшим вдосконаленням ШІ, IoT та інших інновацій, що відкривають нові можливості для автоматизації.

1.2 Класифікація роботизованих маніпуляторів

Роботизовані маніпулятори класифікують за кількома основними критеріями.

1. За кінематичною структурою:

– послідовні (серійні) маніпулятори – складаються з ланок, з'єднаних послідовно, що забезпечує велику робочу область, але знижує жорсткість конструкції;

– паралельні маніпулятори – містять кілька незалежних кінематичних ланцюгів, що забезпечує високу точність і жорсткість.

– гібридні маніпулятори – поєднують характеристики серійних і паралельних механізмів.

2. За типом приводу:

– електричні – використовують сервоприводи для точного позиціонування;

– гідравлічні – забезпечують високу вантажопідйомність, але потребують складного технічного обслуговування;

– пневматичні – швидкі та легкі, проте менш точні.

3. За сферою застосування:

- промислові – використовуються в автоматизованих виробництвах (автомобілебудування, електроніка);

- медичні – забезпечують виконання високоточних операцій (Da Vinci);
- логістичні – виконують сортування, пакування та перевезення вантажів.

1.3 Основні компоненти роботизованих маніпуляторів

Роботизовані маніпулятори є ключовими елементами сучасної автоматизованої промисловості. Вони забезпечують гнучкість, точність і ефективність у різноманітних виробничих процесах. Щоб зрозуміти, як працюють ці складні пристрої, важливо розглянути їх основні компоненти. Роботизований маніпулятор складається з кількох ключових систем, які працюють спільно для виконання заданих завдань.

Маніпулятор складається з несущеї опорної конструкції, маніпупяціонної системи, робочих органів, приводів кінематичних пар, приводів приладів пересування робочих органів. Інколи замість терміну «маніпулятор» застосовується термін «маніпуляційна система».

Систематизовані елементи промислових роботів:

1. Станина, стояк чи корпус, опора – це ланка, до якої кріпяться рухомі інші ланки механізму.

2. Власний багатоланковий механізм маніпулятора.

3. Привід, який забезпечує подачу необхідної енергії для маніпулюювання.

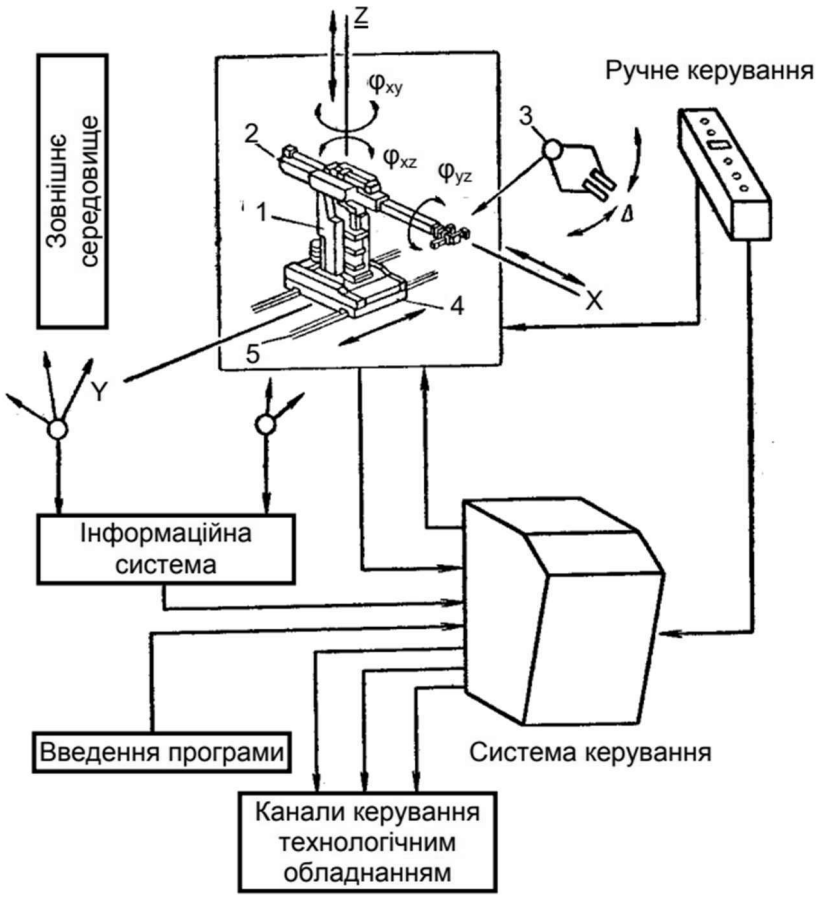
4. Система керування забезпечує управління рухом робота, контроль виконання заданої програми, переробку інформації, зв’язок з пристроями, реагування на певні явища.

5. Вимірювальна система виробляє вимір величин переміщень, кутів повороту окремих ланок маніпулятора, а також зміни швидкості по окремим осям маніпулювання.

6. Датчики, які входять до неї, роблять врахування впливу навколишнього середовища, заміри фізичних величин, розпізнання зразка і позиції зразка.

7. Система зв'язку (або система обміну інформації).

На рисунку 1.5 наведена структурна схема промислового робота, основні елементи конструкції і рухи робочих органів.



1 – корпус; 2 – рука; 3 – захватний пристрій; 4 – основа; 5 – шляхопровід; XX – рух руки вздовж поздовжньої осі; YY – рух корпуса маніпулятора по шляхопроводу; ZZ – рух руки вверх-вниз; φ_{yz} – обертання ротація захвату; φ_{xz} – коливання руки (поворот відносно осі YY); φ_{xy} – поворот корпуса маніпулятора навколо вертикальної осі

Рисунок 1.5 – Структурна схема промислового робота, основні елементи конструкції і рухи робочих органів

Механічна структура, або корпус, робота-маніпулятора забезпечує фізичну форму та можливість руху. Вона складається з послідовності жорстких тіл, які називаються ланками, з'єднаних між собою суглобами.

Ланки є жорсткими елементами, які формують «скелет» маніпулятора. Вони можуть мати різну форму та розміри, залежно від конструкції та призначення робота. Ланки зазвичай виготовляються з міцних, але легких матеріалів, таких як алюмінієві сплави або композитні матеріали, щоб мінімізувати інерцію та навантаження на приводи.

Суглоби забезпечують відносний рух між ланками, дозволяючи маніпулятору досягати різних положень та орієнтацій у просторі.

Основні типи суглобів, що використовуються в роботах-маніпуляторах, включають:

– обертові (Revolute,) суглоби: дозволяють ланкам обертатися одна відносно одної навколо осі, це найпоширеніший тип суглобів у маніпуляторах;

– призматичні (Prismatic) суглоби: дозволяють ланкам ковзати одна відносно одної в лінійному напрямку;

– інші, менш поширені типи суглобів, такі як сферичні, циліндричні та плоскі, але обертові та призматичні суглоби є основними будівельними блоками більшості промислових роботів.

Кількість ступенів вільності визначає рухливість маніпулятора. Кожен суглоб забезпечує один або кілька ступенів вільності. Типовий 6-осьовий маніпулятор має шість ступенів вільності: три для позиціонування в просторі (переміщення вздовж осей X, Y, Z) і три для орієнтації (обертання навколо осей X, Y, Z). Кількість ступенів вільності визначає складність завдань, які може виконувати маніпулятор.

На рисунку 1.6 зазначені системи координат при виконанні завдання роботом. У базовій системі координат визначається положення робота й у більшості випадків початкові положення ланок і зап’ястя. У системі

координат, зв’язаної з інструментом виражаються параметри положення інструмента за 6 ступенями рухливості (X, У, Z і А, В, С).

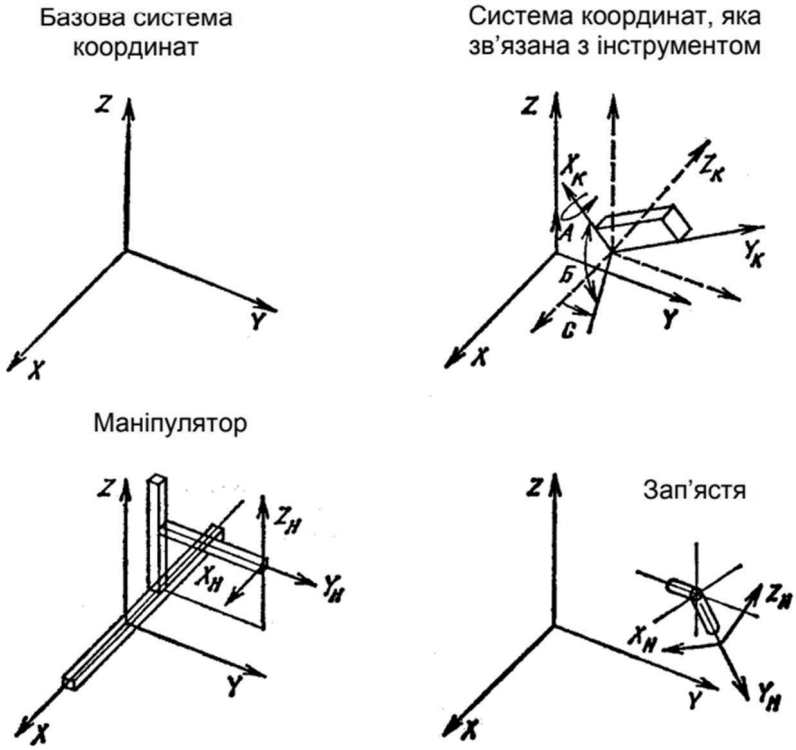


Рисунок 1.6 – Визначення систем координат при виконанні завдання роботом

Робот, маніпулятор і зап’ястя зв’язують базову систему координат із системою координат інструмента. Розрізняються осі декількох типів:

– вісь обертального руху являє собою таке з’єднання двох жорстких елементів, коли один з них може обертатися відносно іншого навколо фіксованої осі;

– вісь поступального руху являє собою таке з’єднання двох жорстких елементів, коли один може рухатися прямолінійно по іншому елементу.

– базова система координат;

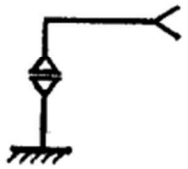
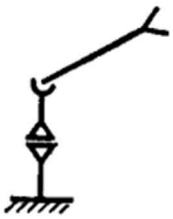
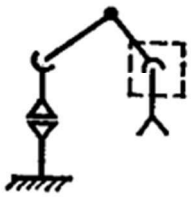
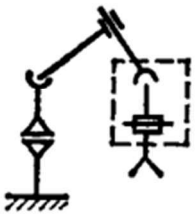
– система координат, яка зв’язана з інструментом;

– маніпулятор;

– зап’ястя.

У таблиці 1.1 показаний приклад кінематичної схеми.

Таблиця 1.1 – Приклади кінематичної схеми

1DOF C	2DOF CB	3DOF CBR	4DOF CBR/E	5DOF CBR/EP
				

Складне зчленування являє собою таке з’єднання двох жорстких елементів, коли один з них може обертатися відносно іншого навколо рухливої

осі.

Число можливих варіантів побудови промислового робота визначається наступним чином:

$$V = 6^{DF}, \qquad (1.1)$$

де V – число варіантів;

DF – число ступенів рухливості.

Очевидно, що число можливих варіантів побудови кінематичних ланцюгів велике, наприклад, для 6 осей можливо 46656 варіантів. Однак, більшість з них не застосовано з кінематичних розумінь.

Додаткові обмеження викликаються наступними причинами:

– точність позиціювання зменшується зі збільшенням числа ланок;

– зі збільшенням числа ланок значно збільшується обсяг обчислень, необхідних для керування рухом по траєкторії;

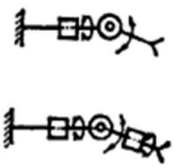
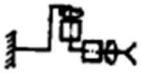
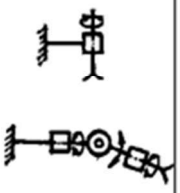
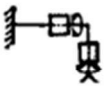
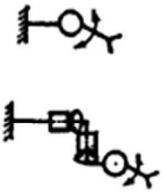
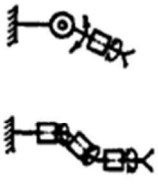
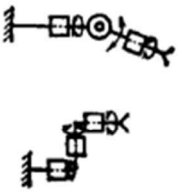
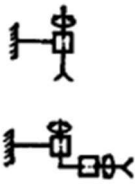
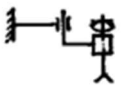
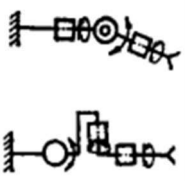
– додавання нової ланки викликає додаткові витрати (ланцюг живлення, гальмо, двигун, давач положення, керування приводом, пам’ять);

– зі збільшенням числа ланок ускладнюється енергопостачання.

В даний час число осей рухливості обмежується. Зазвичай, промисловий робот має до чотирьох осей маніпулятора і три осі в зап’ясті.

У таблиці 1.2 приведені найбільш розповсюджені схеми.

Таблиця 1.2 – Типові схеми побудови маніпуляторів і зап’ясть промислових роботів

Маніпулятор			Зап’ястя		
Зовнішній вигляд	Кінематична схема	Робочий простір			
					
					
					
					
					

Вибір системи керування роботом (циклове чи контурне) і числа програмно керованих осей залежить від вибору кінематичної схеми. Основна закономірність проектування роботів: застосування ланок поступального руху вимагає складних механічних пристроїв і досить простої системи керування. Для робота, побудованого на ланках обертального руху – навпаки. Таким чином, вибір кінематичної схеми – важливий етап проектування механічної частини і системи керування роботом.

Переважна більшість промислових роботів володіють однією з чотирьох варіантів:

– з полярною системою координатних переміщень;

– з циліндричною системою координатних переміщень;

– з шарнірно-зчленованою рукою;

– з декартовою системою координатних переміщень.

Передня частина руки робота має вирішальне значення для забезпечення високоавтоматизованого переміщення заготовок. Захвати робота, також відомі як кінцеві ефектори, – це частина робота, яка встановлюється на кінці маніпулятора робота і забезпечує з'єднання із заготовкою, яке можна порівняти з людською рукою.

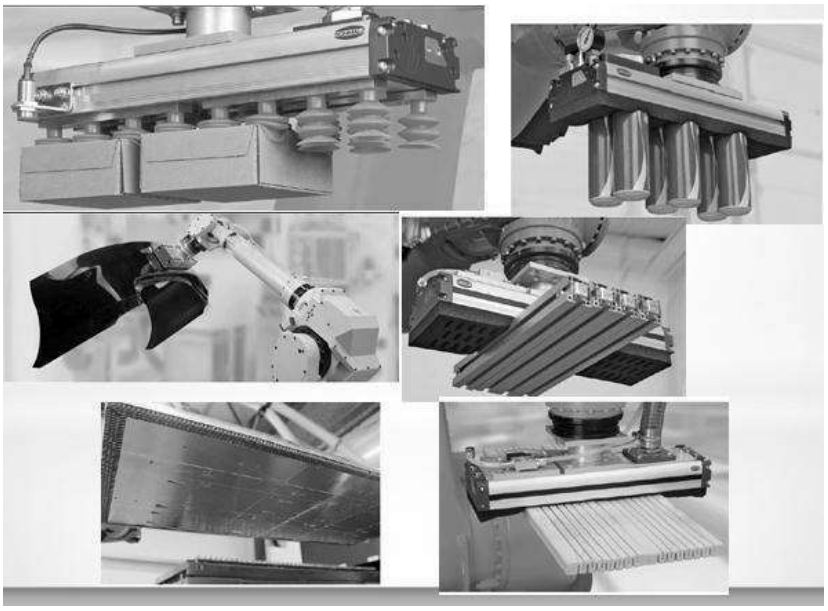


Рисунок 1.7 – Різноманітні варіанти захоплювачів

Основними експлуатаційними показниками захоплювальних пристроїв є зусилля захоплювання, час захоплювання, час відпускання, характерні розміри об'єкта, який захоплюється (мінімальний, максимальний).

Технічні характеристики захоплювальних пристроїв поділяються на чотири групи:

– показники, які є загальними для всіх типів захоплювальних пристроїв;

– показники захоплювачів;

– вакуумні захоплювальні пристрої;

– магнітні захоплювальні пристрої;

– струменеві захоплювальні пристрої.

Розуміння основних компонентів роботизованих маніпуляторів є важливим для тих, хто працює з робототехнікою, займається автоматизацією виробництва або просто цікавиться сучасними технологіями. Кожен компонент відіграє важливу роль у функціонуванні робота, і їхня спільна робота дозволяє виконувати широкий спектр складних та корисних завдань у різних галузях промисловості. Розвиток кожного з цих компонентів продовжує рухати вперед можливості та застосування роботизованих маніпуляторів у майбутньому.

1.4. Сучасні методи управління синхронізованими системами маніпуляторів в єдиній робочій зоні

Роботизовані маніпулятори широко застосовуються в промисловості, логістиці, медицині та інших сферах, що вимагають високої точності, повторюваності та безпеки. В умовах спільного робочого простору використання синхронізованих систем управління дозволяє покращити координацію рухів, оптимізувати ресурси та уникати колізій між маніпуляторами. Синхронізована робота кількох роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні стає все більш актуальною в сучасній

промисловості, особливо на великих підприємствах. Така система дозволяє значно підвищити продуктивність, гнучкість та ефективність виробничих процесів, дозволяючи виконувати складні операції, які неможливі для одного маніпулятора або людини.

Основними викликами для управління синхронізованими маніпуляторами:

- забезпечення безперервного узгодженого руху декількох роботів у загальному просторі;
- оптимізація траєкторій руху для мінімізації енергоспоживання;
- реалізація адаптивних алгоритмів, що дозволяють маніпуляторам взаємодіяти в режимі реального часу;
- використання штучного інтелекту та машинного навчання для передбачення поведінки маніпуляторів.

Методи управління синхронізованими системами маніпуляторів:

1. Централізоване управління – базуються на використанні єдиного контролера, що обробляє всі команди для групи маніпуляторів.

Основні переваги:

– повний контроль над рухами всіх маніпуляторів;
– можливість глобальної оптимізації траєкторій.

Недоліки:

– високі вимоги до обчислювальних ресурсів;
– залежність від єдиного центру управління (ризик відмови всієї системи).

2. Децентралізоване управління – коли кожен маніпулятор має власний локальний контролер, що координується через обмін даними між маніпуляторами.

Основні переваги:

– вища надійність (відмова одного маніпулятора не впливає на всю систему);

– гнучкість та можливість швидкого адаптування.

Недоліки:

– складність забезпечення точної синхронізації;

– вища затримка в обміні даними між маніпуляторами.

3. Гібридні методи управління – комбінують централізовані та децентралізовані підходи:

– центральний сервер визначає загальну стратегію руху;

– локальні контролери виконують дрібномасштабні корекції в режимі реального часу.

Такий підхід є компромісним рішенням, що дозволяє досягти високої ефективності та надійності.

Для управління синхронізованими системами маніпуляторів застосовують сучасні інтелектуальні системи, які забезпечують узгоджену роботу кількох роботів у спільному робочому просторі. Такі системи ґрунтуються на методах штучного інтелекту – нейронних мережах, нечіткій логіці, машинному навчанні та мультиагентних алгоритмах. Вони дають можливість автоматично планувати траєкторії, розподіляти завдання між маніпуляторами, уникати зіткнень і адаптувати рухи у режимі реального часу. Використання інтелектуального управління значно підвищує точність, швидкодію та надійність роботи синхронізованих робототехнічних комплексів.

1. Використання машинного навчання – алгоритми глибокого навчання та підкріпленого навчання дозволяють маніпуляторам:

- адаптуватися до змін у робочому середовищі;
- навчатися на основі попереднього досвіду;
- оптимізувати рухи для мінімізації енергоспоживання та зношування.

Компанія Boston Dynamics використовує нейронні мережі для управління роботизованими системами, що дозволяє їхнім маніпуляторам навчатися новим завданням без програмування.

2. Моделювання траєкторій на основі ШІ – сучасні системи можуть прогнозувати рух маніпуляторів за допомогою математичних моделей, заснованих на алгоритмах ШІ.

Основні алгоритми:

– метод оптимального керування – обчислення оптимальної траєкторії з урахуванням обмежень;

– метод прогнозування траєкторій – передбачення майбутніх позицій маніпуляторів на основі їхньої поточної поведінки.

З розвитком Індустрії 4.0 роботизовані маніпулятори стають частиною інтернету речей (IoT), що дозволяє їхнім системам:

- передавати дані в хмару для аналізу;
- взаємодіяти в реальному часі через 5G-зв'язок;
- автоматично діагностувати несправності.

3. Використання SCADA-систем дозволяє моніторити роботу всіх маніпуляторів у режимі реального часу керувати системами віддалено. аналізувати продуктивність та виявляти відхилення.

Сучасні методи управління синхронізованими маніпуляторами включають централізовані, децентралізовані та гібридні підходи, а також активно застосовують штучний інтелект, IoT та хмарні технології.

Використання цих методів дозволяє:

- підвищити ефективність та швидкість роботи маніпуляторів;
- оптимізувати витрати ресурсів;
- гарантувати безпеку та точність синхронізованої роботи роботизованих систем.

Розвиток роботизованих маніпуляторів змінює виробництво, логістику та медицину. Основний виклик – забезпечення синхронізації роботи кількох маніпуляторів у єдиній робочій зоні, що вимагає впровадження інтелектуальних систем управління.

1.5 Постановка задачі проєктування

В умовах автоматизованих виробничих процесів все частіше виникає необхідність синхронізованої роботи декількох роботизованих маніпуляторів у спільному робочому просторі. Це може бути, наприклад, лінія складання автомобілів, логістичний центр або автоматизований склад.

Основні виклики, пов'язані із синхронізацією роботи маніпуляторів, включають:

– оптимальний розподіл завдань між маніпуляторами для підвищення продуктивності;

– запобігання зіткненням та ефективне використання робочого простору;

– гнучкість та адаптивність системи управління до змін у середовищі;

– для вирішення цих завдань використовуються різні алгоритмічні та програмні методи.

Основні завдання для синхронізованої роботи маніпуляторів:

1. Алгоритмічна координація.

Для ефективної роботи системи необхідно організувати координацію маніпуляторів, тобто визначити:

– які завдання виконуватиме кожен робот;

– як розподілити навантаження між роботами;

– яка послідовність дій для мінімізації простоїв.

Розподіл завдань може здійснюватися двома основними підходами:

– статичний розподіл – кожен маніпулятор отримує завдання заздалегідь, відповідно до заздалегідь визначеного плану;

– динамічний розподіл – завдання розподіляються в режимі реального часу на основі аналізу поточного стану системи.

Статичний розподіл простіший, але менш гнучкий, у той час як динамічний розподіл дозволяє швидко адаптуватися до змін.

Система уникнення зіткнень має запобігати ситуаціям, коли дві або більше роботизованих руки можуть перетнути свої траєкторії. Для цього використовуються:

– сенсорні системи контролю простору (лідар, 3D-камери);

– зональне управління – розподіл робочої зони між маніпуляторами;

– прогнозування траєкторій – аналіз майбутніх позицій роботів.

Одним із ключових методів уникнення зіткнень є динамічне коригування траєкторій у режимі реального часу.

2. Глобальна система управління

Є два основні підходи до організації управління синхронізованими маніпуляторами:

2.1) Централізоване управління – використання єдиного контролера, який керує всіма маніпуляторами.

Переваги: висока точність координації, оптимізація всіх траєкторій.

Недоліки: високе навантаження на обчислювальні ресурси, відсутність гнучкості.

2.2) Децентралізоване управління – кожен маніпулятор має свій локальний контролер, який координує дії з іншими через обмін даними.

Переваги: висока надійність, незалежність від одного центрального блоку.

Недоліки: складність забезпечення узгоджених дій.

Гібридні системи поєднують переваги обох підходів, забезпечуючи баланс між гнучкістю та координацією.

3. Методи синхронізації маніпуляторів

Методи графової оптимізації дозволяють будувати математичну модель системи, де кожен маніпулятор є вузлом у графі, а його можливі переміщення – ребрами графа.

Основні особливості:

– використання теорії графів для моделювання взаємодії роботів;

– визначення оптимальних траєкторій для уникнення колізій;

– використання алгоритмів пошуку найкоротшого шляху (наприклад, алгоритм Дейкстри).

4. Алгоритми прогнозування рухів

Машинне навчання та нейронні мережі можуть прогнозувати майбутні положення маніпуляторів.

Основні технології:

– глибоке навчання (Deep Learning) для передбачення поведінки маніпуляторів;

– розширений Калман-фільтр для оцінки майбутніх станів;

– підкріплене навчання (Reinforcement Learning) для оптимізації рухів роботів.

– прогнозування дозволяє уникати небезпечних ситуацій, коли маніпулятори можуть перетнути траєкторії один одного.

5. Зворотний зв’язок у реальному часі

Для динамічного коригування рухів маніпуляторів система отримує дані із сенсорів, які контролюють:

– положення кожного робота;

– швидкість та прискорення руху;

– зовнішні перешкоди у робочій зоні.

Зворотний зв’язок забезпечує швидку реакцію системи на зміни в навколишньому середовищі.

Висновки. Синхронізація роботи роботизованих маніпуляторів є ключовим завданням для багатьох галузей промисловості. Основною метою проєктування є забезпечити максимізацію продуктивності виробничої ділянки шляхом динамічного розподілу завдань та безколізійного планування траєкторій у реальному часі з адаптацією до змін зовнішнього середовища. Для вирішення цього завдання найкращим підходом є поєднання гібридної архітектури з використанням штучного інтелекту.

2 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИКОРИСТАННЯ СИНХРОНІЗОВАНИХ РОБОТИЗОВАНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ

2.1 Кінематика маніпуляторів

Кінематика роботів – це розділ механіки, що присвячений аналітичному опису руху ланок маніпулятора без урахування силових факторів (моментів та сил), що цей рух спричиняють. Побудова точних кінематичних моделей є критично важливим етапом для розуміння та прогнозування поведінки промислових роботів.

У робототехніці зазвичай оперують двома просторами: декартовим та простором кватерніонів. Будь-яке перетворення між системами координат можна розкласти на дві складові: трансляцію (лінійне зміщення) та обертання (ротацію).

Для математичного опису обертання існує широкий спектр інструментів:

- кути Ейлера;
- параметри Кейлі-Клейна та вектори Гіббса;
- спінові матриці Паулі;
- метод «вісь-кут»;
- кватерніони Гамільтона та ортонормальні матриці.

Попри різноманіття методів, загальноприйнятим стандартом у робототехніці стали однорідні перетворення на базі матриць розмірністю 4x4. Фундаментальним підходом для опису геометрії ланцюгів є параметри Денавіта-Гартенберга (далі DH), запропоновані у 1955 році, які дозволяють описати перехід між двома суглобами за допомогою всього чотирьох параметрів.

Кінематичні моделі у сфері роботопроектування побудовані у вигляді сегментів (беручи до уваги руку це плече, передпліччя, долоні тощо), що

з’єдннані шарнірами (відповідні суглоби руки). Взаємодію та поведінку цих суглобів описують різні напрямки кінематики, представлені нижче.

Схема зв’язку прямої та зворотної кінематики наведена на рисунку 2.1.

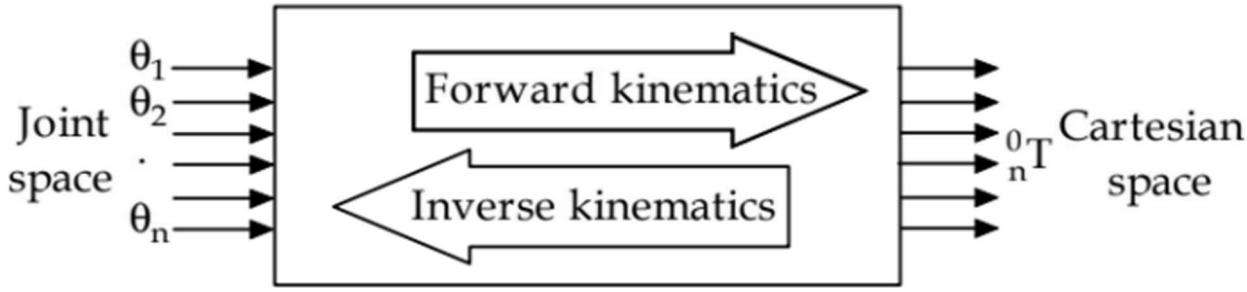


Рисунок 2.1 – Схема зв’язку прямої та зворотної кінематики

1. Пряма кінематика.

У даному напрямку маніпулятор складається з послідовних ланок, які кріпляться один до одного за допомогою поворотних або призматичних шарнірів від базової рами через кінцевий ефект. Розрахунок положення та орієнтації кінцевого ефектора в термінах змінних шарнірів називається прямою кінематикою. Для того, щоб мати пряму кінематику для механізму робота в систематизованому вигляді, необхідно використовувати відповідну кінематичну модель.

Метод Денавіта-Гартенберга, який використовує чотири параметри, є найпоширенішим методом опису кінематики робота. Ці параметри a_{i-1}, α_{i-1}, d_i і θ_i – довжина ланки, поворот ланки, зсув ланки і кут з’єднання відповідно. До кожного з’єднання прикріплена координатна рамка для визначення параметрів DH. Вісь Z_i координатної рамки спрямована вздовж напрямку обертання або ковзання з’єднання.

На рисунку 1.2 показано призначення координатної рамки для загального маніпулятора.

Аналізуючи особливості прямої кінематики (FK), слід зазначити, що цей підхід базується на суворій ієрархічній залежності «зверху-вниз». У такій моделі рух батьківської ланки безпосередньо визначає просторове

положення та орієнтацію всіх дочірніх сегментів кінематичного ланцюга. Процес моделювання відбувається послідовно: спочатку фіксується стан проксимальної ланки (плече), після чого розраховується положення дистальних елементів (передпліччя, кисті) при незмінному стані попередніх вузлів.

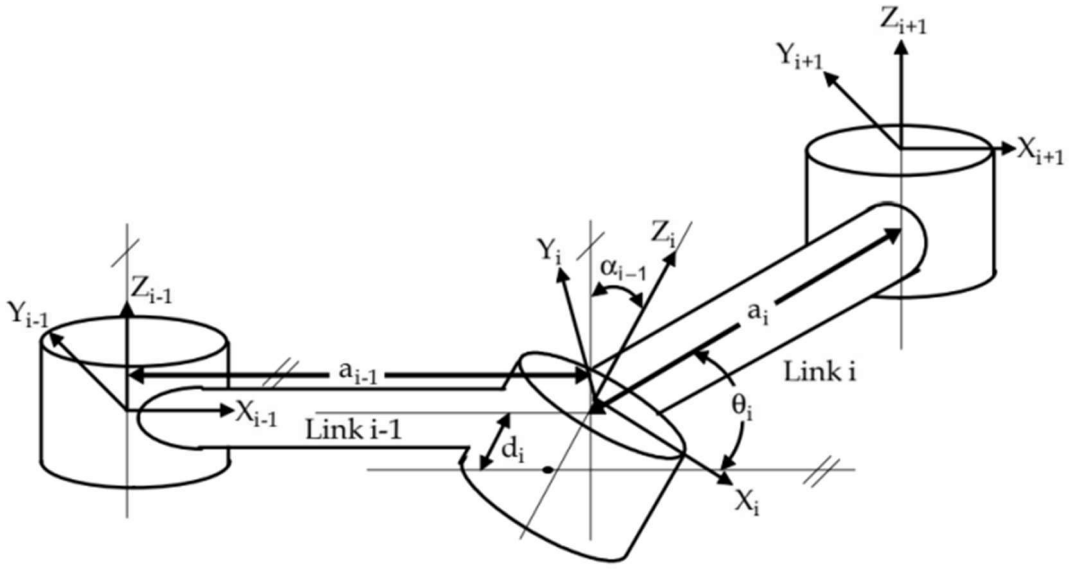


Рисунок 2.2 – Присвоєння координатних рамок для загального маніпулятора

Однак такий алгоритм не є оптимальним для задач даного дослідження. Концепція прямої кінематики, що передбачає поетапний розрахунок від кореня до кінцевого ефектора, суперечить біомеханічній природі людських рухів. Природна моторика є більш комплексною та скоординованою, і рідко підпорядковується жорсткому послідовному шаблону, характерному для FK-алгоритмів.

2. Обернена кінематика.

Задача зворотної кінематики (Inverse Kinematics, IK) є фундаментальною проблемою робототехніки, дослідження якої тривають вже багато десятиліть. Її вирішення є критично необхідним для реалізації алгоритмів керування маніпуляторами.

Основна складність полягає в розбіжності систем координат: цільові завдання (траєкторії руху) формулюються в декартовому просторі (який описується вектором положення та матрицею орієнтації), тоді як система

керування приводами оперує в просторі суглобів (просторі узагальнених координат, представленому кутами поворотів або лінійними переміщеннями ланок).

Суть зворотної задачі кінематики полягає у математичному перетворенні

бажаного положення та орієнтації кінцевого ефектора (робочого органу) з декартового простору в набір відповідних кутів суглобів.

Слід зазначити, що розв'язання ІК пов'язане зі значними обчислювальними витратами, що створює певні виклики для систем керування в реальному часі, особливо за наявності сингулярностей або надлишкових ступенів вільності. Схематичне зображення координатних систем в контексті зворотної кінематики наведено на рисунку 2.3.

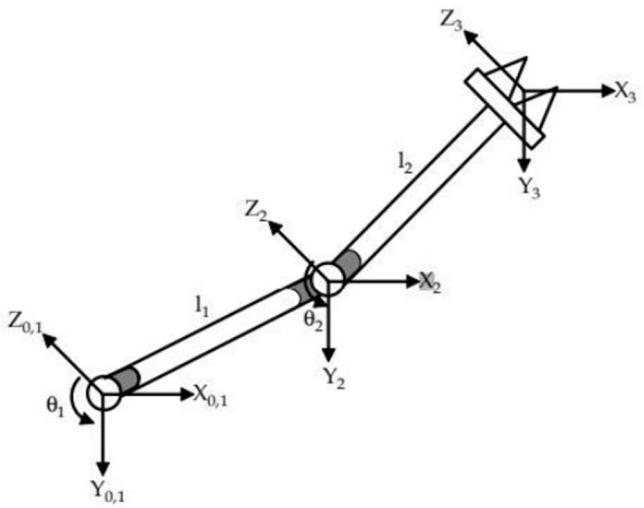


Рисунок 2.3 – Система координат для плоского маніпулятора

Незважаючи на те, що зворотна кінематика (Inverse Kinematics, IK) оперує тією ж структурною схемою ланцюга, що й пряма, логіка розрахунків є діаметрально протилежною. В основі ІК лежить ієрархічний принцип «знизу-вгору» (від дистальних ланок до проксимальних), де ініціатором руху виступає кінцевий ефектор.

Механізм дії полягає в наступному: зміна положення або орієнтації цільової ланки (ефектора) накладає кінематичні обмеження, які змушують

адаптуватися всі попередні (батьківські) сегменти ланцюга для збереження цілісності структури. При цьому, якщо керуючий вплив прикладається до проміжної ланки, система поводиться гібридно: батьківські сегменти перераховуються за алгоритмами зворотної кінематики, тоді як дочірні відносно активної ланки – продовжують рух за законами прямої кінематики.

З точки зору біомеханіки, концепція ІК є значно релевантнішою для моделювання антропоморфних рухів. Моторика людини – це складний, багатокомпонентний процес, спрямований на досягнення цілі (наприклад, взяття об'єкта), де мозок фокусується на положенні кисті, а не на послідовному розрахунку кутів плеча та ліктя.

Саме тому методи зворотної кінематики є стандартом у сучасній робототехніці та комп'ютерному моделюванні при вирішенні задач точного позиціювання робочого органу в заданих координатах простору.

Отже, кінематичний аналіз поділяється на два класи задач:

1. Пряма кінематика – визначення положення робочого органу за відомими кутами суглобів. Задача завжди має єдине аналітичне рішення і не вимагає значних обчислювальних ресурсів.

2. Зворотна кінематика – визначення необхідних кутів суглобів для досягнення робочим органом заданої точки простору. Процес ускладнюється нелінійністю рівнянь та наявністю сингулярностей (точок втрати ступенів вільності).

Повні аналітичні розв'язки існують лише для вузького класу простих механізмів (наприклад, тих, що мають зап'ястя Ейлера). У більшості випадків для управління в реальному часі застосовуються складні ітеративні алгоритми.

3.Теорія перцептивного управління

Теорія перцептивного управління (далі ТПУ) – це теорія, що описує модель поведінки, заснована на властивостях контурів управління з негативним зворотним зв’язком. Контур керування підтримує контрольовану змінну на рівні або поблизу еталонного значення за допомогою впливу своїх

виходів на цю змінну, опосередкованого фізичними властивостями навколишнього середовища.

ТПУ глибоко пов'язана з біологічною кібернетикою, системною біологією, теорією керування та концепцією зворотних зв'язків. На відміну від низки моделей у поведінковій та когнітивній психології, теорія ґрунтується на ідеї кругової причинності. Тим самим вона теоретично тотожна поняттю керування об'єктом, але відрізняється акцентом саме на контролі внутрішньої репрезентації фізичного світу.

Керування формою або розташуванням об’єкта вимагає зміни сприйняття відчуттів або інтенсивності (які контролюються системами нижчого рівня). Цей організаційний принцип діє на всіх рівнях, аж до найабстрактніших філософських і теоретичних конструкцій.

У той час як інженерна система управління має еталонне значення або задане значення, яке регулюється зовнішнім органом, еталонне значення для біологічної системи управління не може бути встановлене таким чином. Задане значення повинно виходити з якогось внутрішнього процесу. Якщо є спосіб впливати на поведінку, то будь-яке сприйняття може бути миттєво приведене до стану, визначеного вищими рівнями, а потім підтримуватися в цьому стані, незважаючи на непередбачувані збурення. В ієрархії систем управління вищі рівні коригують цілі нижчих рівнів як засіб досягнення власних цілей, встановлених ще вищими системами. Це має важливі наслідки для будь-якого запропонованого зовнішнього контролю автономної живої системи управління (організму). На найвищому рівні еталонні значення (цілі) встановлюються спадковістю або адаптивними процесами.

Для оптимальної роботи вихідні функції повинні бути організовані таким чином, щоб вихід кожної системи контролю впливав лише на одну змінну навколишнього середовища, яку вона сприймає. Спочатку збурення мають великий вплив на кути з’єднань, але з часом кути з’єднань стають ближчими до еталонних сигналів завдяки реорганізації системи.

Застосування теорії перцептивного управління у ї системі синхронізованих маніпуляторів є концептуальним проривом. Це змінює саму філософію побудови алгоритмів: від «виконання команд» до «підтримання бажаного стану сприйняття.

У класичній робототехніці контролер керує за принципом: «рухайся в точку X» (керування виходом). У теорії перцептивного управління контролер керує за принципом: «Дій так, щоб твоє сприйняття дистанції до перешкоди завжди відповідало безпечному значенню» (керування входом).

Для синхронізації роботів це означає перехід від траєкторного планування (яке часто ламається при непередбачуваних змінах) до ситуативного реагування на основі «кругової причинності».

Переваги ТПУ для спільної робочої зони:

1. Стійкість до збурень: якщо один робот затримався або людина увійшла в зону, «сприйняття» системи зміниться. Контролер автоматично сповільнить іншого робота не тому, що це прописано в жорсткому коді, а тому, що це єдиний спосіб утримати помилку сприйняття (ризик зіткнення) на нулі.

2. Відсутність складного перепланування: не потрібно щоразу перераховувати всю траєкторію. Робот просто «ковзає» вздовж поверхні обмежень, мінімізуючи різницю між бажаним і дійсним сприйняттям.

В основу розроблюваної системи покладено принципи ТПУ. На відміну від класичних розімкнених систем управління, де керуючий вплив формується на основі попередньо розрахованої моделі, теорія розглядає поведінку маніпуляторів як процес безперервного контролю вхідних сенсорних даних (сприйняття).

Система функціонує за принципом негативного зворотного зв'язку:

$$\mathrm{A}(t) = K \cdot \big(R - P(t)\big), \tag{2.1}$$

де A(t) – дія (корекція швидкості/траєкторії);

R – референтне значення (наприклад, мінімальна допустима відстань між ланками);

P(t) – поточне сприйняття простору, отримане через систему технічного зору;

K – коефіцієнт підсилення.

Такий підхід забезпечує реалізацію концепції кругової причинності, де дії робота (вихід) миттєво змінюють його сприйняття середовища (вхід), дозволяючи динамічно компенсувати збурення (вібрації, люфти, появу перешкод) без необхідності повного перерахунку глобального плану руху.

Розглянемо задачу стеження, в якій маніпулятор повинен утримувати захват суміщеним з рухомою ціллю на столі. Модель передбачає, що перцептивний сигнал відображає величину входу q_i (наприклад, відстань між ціллю T та захватом C): $p = C - T$.

У реальних організмах існує затримка сприйняття τ мілісекунд, тож у кожен момент часу сигнал p відповідає більш ранньому стану:

$$p(t) = C(t - \tau) - T(t - \tau), \tag{2.2}$$

Сигнали p та задане значення r надходять до компаратора; вихід – сигнал помилки $e = r - p$. Керувальний вплив (швидкість руху курсора) пропорційний помилці з коефіцієнтом підсилення G: $V = G \cdot e$.

Нове положення захвата:

$$C_{new} = C_{old} + G \cdot e \cdot dt, \tag{2.3}$$

Модель уточнюється з урахуванням демпфування d, щоб точніше відповідати реальній поведінці:

$$C_{new} = C_{old} + [(G \cdot e) - (d \cdot C_{old})] \cdot dt, \tag{2.4}$$

Робоча зона (робочий простір) маніпулятора – це область у просторі, в межах якої кінець-ефектор (захват, інструмент) може виконувати рухи. Для кожного маніпулятора робочу зону визначають за параметрами кінематики:

– довжини ланок;

– кути повороту суглобів;

– допустимі переміщення лінійних осей.

У результаті робоча зона має вигляд:

– кільця (тороїда) для полярних або циліндричних систем;

– сектора сфери для роботів зі сферичною кінематикою;

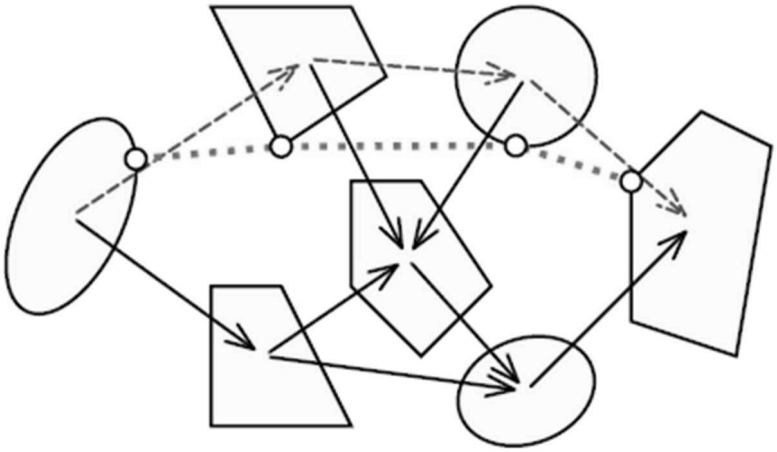
– прямокутного паралелепіпеда або складної об’ємної фігури – для роботів з лінійними приводами.

Задача пошуку найкоротшого шляху є однією з найважливіших і найпоширеніших задач комбінаторної оптимізації. У версії з одним джерелом і однією ціллю ця задача полягає у пошуку шляху мінімальної довжини, що з’єднує дві задані вершини графа, де довжина шляху визначається як сума довжин його ребер. Зазвичай довжини ребер є фіксованими скалярами, що надаються як вихідні дані, і припущення щодо їхніх значень мають суттєвий вплив на складність задачі.

Початкова область розташована ліворуч, цільова – праворуч, а решту областей можна використовувати для підзарядки. Пари областей, розташованих достатньо близько одна до одної для здійснення перельоту дрона, з’єднані ребром. Мета полягає в мінімізації загальної довжини польоту.

Оптимальне керування гібридними динамічними системами з дискретним часом є основним застосуванням, на якому ми зосереджуємося в цій статті, і є прикладом задачі, формулювання якої у вигляді найкоротшого шляху у графах опуклих множин є нетривіальним. У цьому випадку опуклі множини визначені в об’єднаному просторі станів та керування динамічної

системи. Кожен дискретний крок у часі відповідає переходу по ребру в графі опуклих множин, а довжини ребер характеризують, наприклад, енергію, витрачену на перехід між станами (ця довжина дорівнює нескінченності, якщо рух несумісний із динамікою системи).



Початкова множина розташована ліворуч, а цільова множина – праворуч (ребра графа зображено стрілками, а найкоротший шлях позначено зеленою штриховою лінією, червоні крапкові лінії з'єднують оптимальні положення вершин уздовж найкоротшого шляху)

Рисунок 2.4 – Приклад задачі пошуку найкоротшого шляху у графі опуклих множин

Для створення 3D-модель робочої зони маніпулятора з перетином для кожного маніпулятора:

– задаються всі мінімальні та максимальні кути та переміщення;

– обчислюється досяжність кінця ланки за формулами прямої кінематики;

– точки досяжних положень наносяться у 3D – графік;

– утворена область – робоча зона.

В системі працює два або більше маніпуляторів, важливо визначити зони, де їхні робочі простори перетинаються.

Перетин робочих зон визначають для:

– запобігання зіткненням між маніпуляторами;

– визначення ділянок, де потрібно встановити: обмеження по швидкості, логічні блокування, пріоритети руху;

– коректного планування траєкторій;

– можливості спільного виконання операцій двома маніпуляторами.

Перевірка робочих зон та їх перетину дозволяє:

– забезпечити безпечну роботу синхронізованих маніпуляторів;

– мінімізувати ризик колізій;

– оптимізувати розташування маніпуляторів у робочому просторі;

– правильно вибрати стратегію управління.

На рисунку 2.5 зображена 3D-модель робочої зони маніпуляторів з перетином.

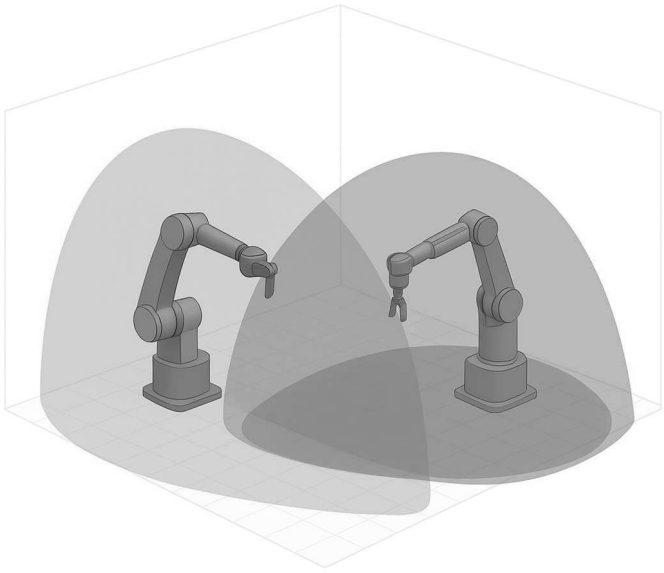


Рисунок 2.5 – 3D-модель робочої зони маніпуляторів з перетином

2.2 Динаміка та управління

В робототехніці при взаємодії двох маніпуляторів завжди є обмеження:

– геометричні (обмеження по зоні робочого простору);

– контактні (спільний вантаж);

– динамічні (максимальні сили, швидкості).

Рівняння Ейлера-Лагранжа використовуються для моделювання руху шляхом знаходження екстремуму функціоналу (дії), що описує систему. Вони є основою для виведення диференціальних рівнянь руху, які описують еволюцію механічної системи з часом.

Рівняння Лагранжа особливо корисні, оскільки дозволяють працювати з узагальненими координатами та уникнути необхідності явного врахування сил реакцій зв'язків у разі використання відповідного формалізму (рівняння Лагранжа другого роду). Рівняння природно дозволяють врахувати такі обмеження через узагальнені координати та лагранжієві множники, без прямого введення сил реакцій, тому ці рівняння – це оптимальний інструмент для опису динаміки та управління двох синхронізованих маніпуляторів у одній робочій зоні.

Рівняння Лагранжа другого роду – це диференціальні рівняння руху механічної системи в узагальнених координатах. Вважаємо, що зв'язки, накладені на систему, голономні, стаціонарні та ідеальні.

Розглядається голономна механічна система, що складається з n матеріальних точок і має S ступенів свободи. Положення кожної точки визначається щодо деякого центру радіусом-вектором $\overline{(r_i} = 1, 2, 3, \dots, n)$.

Вибираємо S узагальнених координат q_j (j=1, 2, 3,….,S). Загальне рівняння динаміки вимагає, щоб при будь-якому русі механічної системи з ідеальними зв'язками в кожен даний момент часу сума елементарних робіт всіх активних сил і всіх умовно прикладених сил інерції на всякому можливому переміщенні системи дорівнювала нулю:

$$\sum_{i=1}^{n}(\vec{F}_i - m_i\vec{a}_i)\delta\vec{r}_i = 0, \tag{2.5}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\delta A_i^{(a)} + \sum_{i=1}^{n}\delta A_i^{(ин)} = 0. \tag{2.6}$$

Сума елементарних робіт активних сил в узагальнених координатах має вигляд:

$$\sum_{i=1}^{n}\delta A_i^{(a)} = Q_1^{(a)}\delta q_1 + Q_2^{(a)}\delta q_2 + \ldots + Q_S^{(a)}\delta q_S \ , \tag{2.7}$$

$$Q_j^{(a)} = \sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i\frac{\partial\vec{r}_i}{\partial q_j}, \qquad (j=1,2,3,\ldots,S). \tag{2.8}$$

Суму елементарних робіт сил інерції на можливому переміщенні системи можна написати аналогічно (2.6) у вигляді:

$$\sum_{i=1}^{n}\delta A_i^{(ин)} = Q_1^{(ин)}\delta q_1 + Q_2^{(ин)}\delta q_2 + \ldots + Q_S^{(ин)}\delta q_S \ , \tag{2.9}$$

де узагальнені сили інерції відібражають формулами:

$$Q_j^{(ин)} = \sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i^{(ин)}\frac{\partial\vec{r}_i}{\partial q_j} = -\sum_{i=1}^{n}m_i\vec{a}_i\frac{\partial\vec{r}_i}{\partial q_j}, \qquad (j=1,2,3,\ldots,S). \tag{2.10}$$

Підставляючи (2.6) і (2.8) в (2.9), отримаємо запис загального рівняння динаміці в узагальнених координатах у вигляді:

$$(Q_1^{(a)} + Q_1^{(ин)})\delta q_1 + (Q_2^{(a)} + Q_2^{(ин)})\delta q_2 + \ldots + (Q_S^{(a)} + Q_S^{(ин)})\delta q_S = 0. \tag{2.11}$$

Оскільки варіації $\delta q_j \neq 0$ між собою незалежні, та рівність 2.11 справедлива тільки у випадку:

$$\left.\begin{aligned} &Q_1^{(a)} + Q_1^{(ин)} = 0, \\ &Q_2^{(a)} + Q_2^{(ин)} = 0, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &Q_S^{(a)} + Q_S^{(ин)} = 0. \end{aligned}\right\} \tag{2.12}$$

Отримана система S рівнянь руху механічної системи. Цими рівняннями можна безпосередньо користуватися при вирішенні завдань динаміки. Перетворивши в рівняннях (2.11) вирази для узагальнених сил інерції через кінетичну енергію системи, отримаєм рівняння Лагранжа II роду.

$$Q_j^{(ин)} = -\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{a}_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} = -\sum_{i=1}^{n} m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} \tag{2.13}$$

Перетворимо праву частину цього виразу так, щоб вона містила швидкості точок системи. Відмітимо, щоб вона містила швидкості точок системи. Відмітимо, що:

$$\frac{d}{dt}(\vec{V}_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j}) = \frac{d\vec{V}_i}{dt} \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} + \vec{V}_i \frac{d}{dt}(\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j}),$$

звідки $\frac{d\vec{V}_i}{dt} \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} = \frac{d}{dt}(\vec{V}_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j}) - \vec{V}_i \frac{d}{dt}(\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j}) = \frac{d}{dt}(\vec{V}_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j}) - \vec{V}_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial q_j}$, отже

$$-Q_i^{(ин)} = \sum_{i=1}^{n} m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^{n} m_i \frac{d}{dt}(\vec{V}_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j}) - \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{V}_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^{n} m_i \frac{d}{dt}(\vec{V}_i \frac{\partial \dot{\vec{r}}_i}{\partial \dot{q}_j}) - \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{V}_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial q_j} =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} m_i \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_j}(\frac{V_i^2}{2}) - \sum_{i=1}^{n} m \frac{\partial}{\partial q_j}(\frac{V_i^2}{2}) = \sum_{i=1}^{n} \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_j}(\frac{m_i V_i^2}{2}) - \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial}{\partial q_j}(\frac{m V_i^2}{2}) =$$

$$= \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_j} \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i V_i^2}{2} - \frac{\partial}{\partial q_j} \sum_{i=1}^{n} \frac{m V_i^2}{2} = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j}. \tag{2.14}$$

Тут в цьому виводі перетворення виразу сили інерції до вигляду здійснене аналогічно перетворенню виразу до вигляду в попередньому виведенні рівнянь Лагранжа з II закону Ньютона. Підставляючи отримані вирази сил інерції в систему рівнянь, отримуємо систему S диференціальних рівнянь руху механічної системи в узагальнених координатах або рівняння Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j^{(a)}, \quad (j = 1,2,3,\ldots,S). \tag{2.15}$$

Важлива перевага цих рівнянь полягає в тому, що їх вигляд і кількість не залежать ні від кількості тіл (або точок), що входять в дану механічну систему, ні від того, як ці тіла рухаються. Число рівнянь дорівнює числу ступенів свободи. Крім того, при ідеальних зв'язках, до правих частин рівнянь входять узагальнені активні сили і, отже, ці рівняння дозволяють заздалегідь виключити з розгляду всі наперед невідомі реакції зв'язків. Основне завдання динаміки механічної системи в узагальнених координатах полягає в тому, щоб, знаючи узагальнені сили Q_1, Q_2,…, Q_S і початкові умови $q_1(0)$, $q_2(0)$, …, $q_s(0)$, знайти закон руху механічної системи.

На відміну від кінематичного планування, яке оперує лише координатами та кутами, динамічна оптимізація розглядає маніпулятор як фізичну систему з масою та інерцією. Головною метою цього етапу є знаходження такого керуючого впливу (крутних моментів приводів τ), який забезпечує переміщення по траєкторії з мінімальними витратами ресурсів, компенсуючи при цьому всі зовнішні та внутрішні сили.

2.3 Можливі конфлікти та обмеження

Координація рухів для уникнення конфліктів і колізій (зіткнень) це складне завдання в робототехніці, яке називається багатоагентним плануванням шляху або плануванням руху для кількох роботів.

Проблема пошуку «найкоротшого» шляху від однієї вершини до іншої через підключений граф цікавить багатьох доменів, найбільш помітних в Інтернеті, де вона використовується для пошуку оптимального маршруту для пакету даних. Термін «найкоротший» тут позначає мінімальну сукупну вартість краю, яка може бути фізичною відстанню (у роботизованому додатку), затримкою (у мережевому додатку) або будь-яким іншим

показником, важливим для конкретної програми. Графік з довільними довжинами країв показаний на рисунку 2.6.

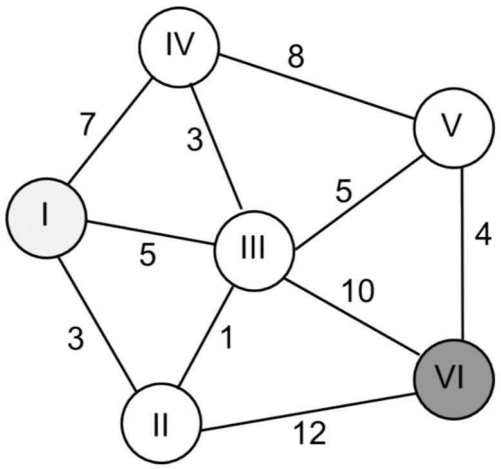


Рисунок 2.6 – Загальна проблема планування шляху від вершини I до вершини VI. Найкоротший шлях - I-II-III-V-VI довжиною 13

Для того щоб розібратися з фізичним втіленням робота, що ускладнює процес планування шляху, робот зводиться до точкової маси і всі перешкоди в навколишньому середовищі виростають на половину найдовшого витягування робота від його центру. Це уявлення відоме як простір конфігурації, оскільки воно зменшує представлення робота до координат x та y у площині (рис. 2.7).

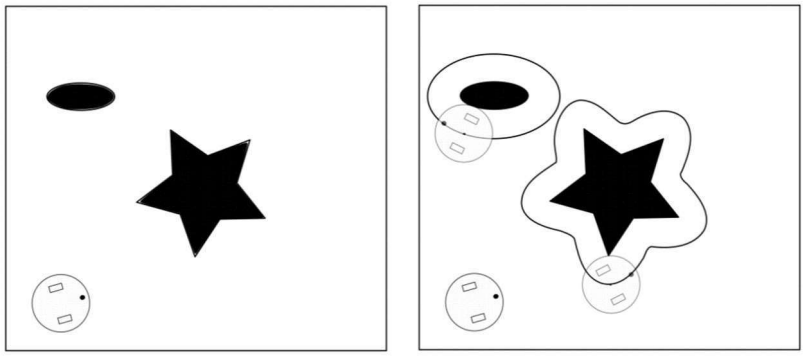


Рисунок 2.7 – Карта з перешкодами та її представленням у просторі конфігурації, яку можна отримати, збільшивши кожну перешкоду розширенням робота

Простір конфігурації тепер може бути використаний як основа для карти сітки або безперервного представлення.

Одним з найбільш ранніх і найпростіших алгоритмів є алгоритм Дейкстри. Починаючи з початкової вершини, де повинен починатися шлях, алгоритм позначає всіх прямих сусідів початкової вершини вартістю, щоб туди потрапити. Потім він виходить з вершини з найменшою вартістю до всіх сусідніх вершин і позначає їх вартістю, щоб дістатися до них через себе, якщо ця вартість нижча. Після перевірки всіх сусідів вершини алгоритм переходить до вершини з наступною найнижчою вартістю. Як тільки алгоритм досягає вершини мети, він закінчується, і робот може слідувати за краями, що вказують на найнижчу вартість краю.

На рис. 2.6 Дейкстра спочатку позначить вузли II, III та IV вартістю 3, 5 та 7 відповідно. Потім він продовжить досліджувати всі краї вузла II, який до цих пір має найнижчу вартість. Це призведе до виявлення того, що вузол III насправді може бути досягнутий у кроках 3+1 < 5, а вузол III буде позначений вартістю 4. Для того, щоб повністю оцінити вузол II, Дейкстра потрібно оцінити решту ребра перед переходом далі і позначити вузол VI з 3 + 12 = 15.

Вузол з найменшою вартістю тепер вузол III (4). Тепер ми можемо позначити вузол VI з 14, який менше 15, і мітка вузла V з 4 + 5 = 9, тоді як вузол IV залишається на 4 + 3 = 7. Хоча ми вже знайшли два шляхи до мети, один з яких кращий за інший, ми не можемо зупинитися, оскільки все ще існують вузли з невивченими краями та загальною вартістю нижче 14. Дійсно, продовження дослідження з вузла V призводить до найкоротшого шляху I-II-III-V-VI вартістю 13, без інших вузлів для дослідження.

Оскільки Дейкстра не зупиниться, поки не буде вузла з нижчою вартістю, ніж поточна вартість до мети, ми можемо бути впевнені, що найкоротший шлях буде знайдений, якщо він існує. Можна сказати, що алгоритм завершений.

Оскільки Дейкстра завжди спочатку досліджуватиме вузли з найменшою загальною вартістю, середовище досліджується порівняно з фронтом хвилі, що походить від початкової вершини, врешті-решт доходячи до мети. Це, звичайно, дуже неефективно, зокрема, якщо Дейкстра вивчає вузли далеко від мети. Це можна візуалізувати, додавши пару вузлів зліва від вузла I на малюнку 2.6 Дійкстра досліджуватиме всі ці вузли, поки їх вартість не перевищить найнижчу знайдену для мети. Це також можна побачити при спостереженні алгоритму Дейкстри на сітці, як показано на рис. 2.8.

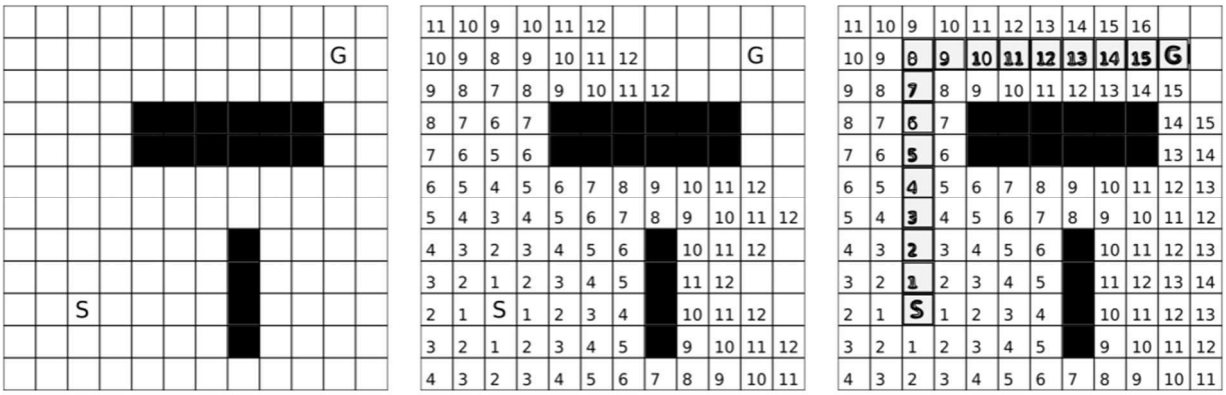


Рисунок 2.8 – Алгоритм Дейкстри знаходить найкоротший шлях від 'S' до 'G', припускаючи, що робот може рухатися тільки в бічному напрямку (не по діагоналі) з вартістю одна комірка сітки. Зверніть увагу на декілька клітинок, які залишаються невивченими після того, як найкоротший шлях (сірий) знайдений, оскільки Дейкстра завжди спочатку розглядає комірку з найменшою вартістю шляху

Замість того, щоб досліджувати у всіх напрямках, знання приблизного напрямку мети може допомогти уникнути дослідження вузлів, які явно неправильно для спостерігача людини. Такі спеціальні знання, якими володіє такий спостерігач, можна закодувати за допомогою евристичної функції, більш химерного слова для «правила великого пальця». Наприклад, ми могли б дати пріоритет вузлам, які мають меншу оціненну відстань до мети, ніж інші. Для цього ми б позначили кожен вузол не тільки фактичною відстанню,

яку нам знадобилося, щоб дістатися туди (як в алгоритмі Дейкстри), але і орієнтовною вартістю «як ворона летить», наприклад, обчисливши евклідову відстань або відстань Манхеттена між вершиною, яку ми дивимося, та вершиною мети . Цей алгоритм відомий як A* (Харт, Нільссон і Рафаель 1968). Залежно від середовища, A* може виконувати пошук набагато швидше, ніж алгоритм Дейкстри, і виконує те ж саме в гіршому випадку. Це проілюстровано на рис. 2.9 за допомогою метрики відстані Манхеттена, яка не допускає діагональних рухів.

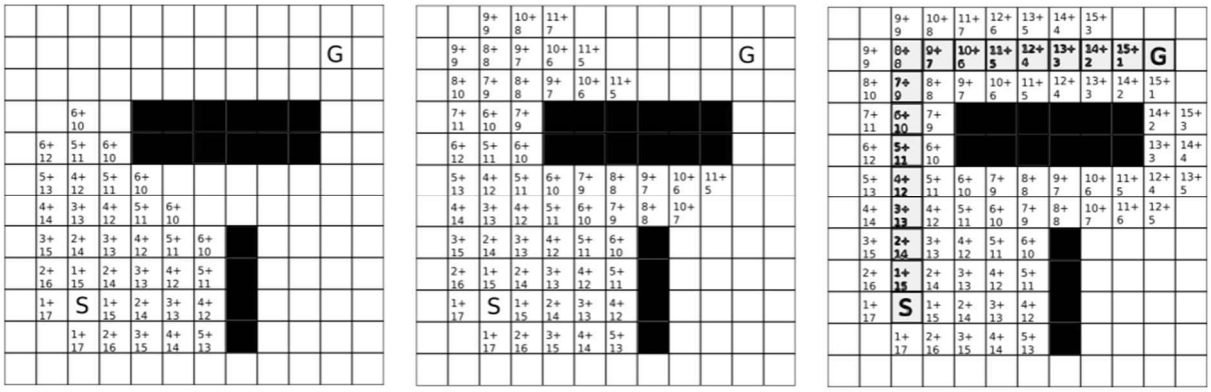


Рисунок 2.9 – Пошук найкоротшого шляху від 'S' до 'G', припускаючи, що робот може подорожувати тільки в бічному напрямку (не по діагоналі) з вартістю одна на комірку сітки за допомогою алгоритму A*. Подібно до Дейкстри, A* оцінює лише комірку з найменшою вартістю, але враховує оцінку залишкової відстані

Розширення A*, яке вирішує проблему дорогого перепланування при появі перешкод на шляху робота, відоме як D* (Stentz 1994). На відміну від A*, D* починається від вершини мети і має можливість змінювати витрати частин шляху, які включають перешкоду. Це дозволяє D* перепланувати навколо перешкоди, зберігаючи більшу частину вже розрахованого шляху.

A* і D* стають обчислювально-дорогими, коли простір пошуку великий, наприклад, через дрібнозернисту роздільну здатність, необхідну для завдання, або розміри задачі пошуку високі, наприклад, при плануванні руки

з кількома ступенями свободи. Рішення цих проблем забезпечуються алгоритмами планування шляху на основі вибірки.

В роботи була досліджена низка повних алгоритмів для задачі планування шляху, тобто вони знайдуть рішення в кінцевому підсумку, якщо воно існує. Повні рішення часто нездійсненні, однак, коли можливий простір стану великий. Це стосується роботів з декількома ступенями свободи, таких як зброя. На практиці більшість алгоритмів є лише повною роздільною здатністю, тобто лише завершеною, якщо роздільна здатність досить дрібнозерниста, оскільки державний простір повинен бути дещо дискретизований, щоб вони працювали (наприклад, у сітці), і деякі рішення можуть бути пропущені як функція роздільної здатності дискретизації.

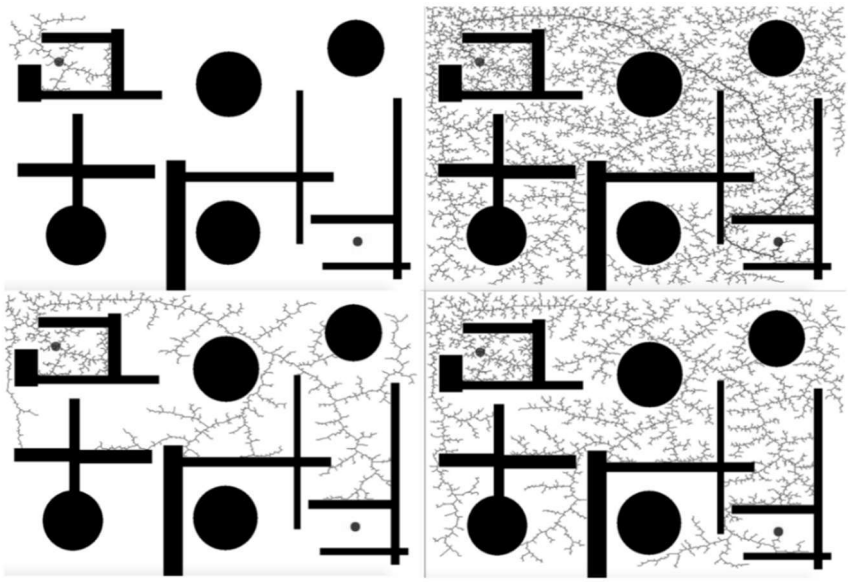


Рисунок 2.10 – Проти годинникової стрілки: Випадкове дослідження 2D простору пошуку за допомогою випадкових точок вибірки та підключення їх до графіка до тих пір, поки не буде знайдений можливий шлях між початком і метою

Замість того, щоб оцінювати всі можливі рішення або використовувати неповне зворотне кінематичне рішення на основі Якобіана, планувальники на основі вибірки створюють можливі шляхи шляхом випадкового додавання

точок до дерева, поки не буде знайдено якесь рішення або не закінчиться час. Оскільки ймовірність знайти шлях наближається до одного, коли час йде до нескінченності, планувальники шляхів на основі вибірки є імовірнісно завершеними. Яскравими прикладами планувальників на основі вибірки є швидке вивчення випадкових дерев (RRT) (LaValle 1998) та імовірнісних дорожніх карт (PRM) (Кавракі, Свістка, Latombe & Overmars 1996). Приклад виконання RRT для невідомої мети, тим самим зводячи задачу планування шляху до задачі пошуку, показаний на рис. 2.10.

Цей приклад добре ілюструє, як планувальник на основі вибірки може швидко досліджувати велику частину простору та вдосконалювати рішення з часом. Тоді як RRT можна розуміти як вирощування одного дерева з початкової точки робота, поки одна з його гілок не потрапить у ціль, імовірнісні дорожні карти створюють дерево шляхом випадкових точок вибірки в державному просторі, перевіряючи, чи не стикаються вони, з'єднуючи їх із сусідніми точками за допомогою шляхів, які відобразити кінематику робота, а потім за допомогою класичного графіка алгоритмів найкоротшого шляху знайти найкоротші шляхи на отриманій структурі. Перевагою такого підходу є те, що така імовірнісна дорожня карта повинна бути створена лише один раз (за умови, що середовище не змінюється) і потім може бути використана для декількох запитів. Тому PRM є алгоритмом планування шляху декількох запитів. На відміну від цього, RRT відомі як алгоритми планування шляху одного запиту.

На практиці межа між різними історичними алгоритмами стала дуже розсіяною, і існують варіанти одного запиту та багатозапитів як RRT, так і PRM. Важливо зазначити, що не існує алгоритму/евристики срібної кулі, і навіть їх набори параметрів є дуже специфічними для проблем. Тому ми обмежимо нашу дискусію корисною евристикою, яка є спільною для планувальників на основі вибірки.

Основний алгоритм.

Дозволяти X бути d-вимірним простором стану. Це може бути або стан робота, заданий з точки зору перекладу та обертання (6 розмірів), його підмножина, або спільний простір з одним виміром на можливий кут з'єднання. Нехай G X – d-куля (d-мірна сфера) у державному просторі, який вважається метою, і t дозволеного часу.

Планувальник дерев працює наступним чином:

Дерево = Ініт (X, початок);

У ТОЙ ЧАС ЯК минувЧас () < t I No Goal Found (G) DO

newpoint = стан, з якого потрібно розгорнути (Дерево);

newsegment = Створити шлях до дерева (нова точка);

ЯКЩО вибрати Додати (новий сегмент) ТОДІ

Tree=Insert (Дерево, новий сегмент);

ENDIF

КІНЕЦЬ ЧАСУ

Повернення Дерево

Цей процес можна повторювати на отриманому дереві стільки часу, скільки дозволяє час. Це відомо як алгоритм *AnyTime*. Враховуючи відповідну метрику відстані, вартість до мети може зберігатися на кожному вузлі дерева (набагато простіше, якщо виростити дерево від мети для початку), що дозволяє легко отримати найкоротший шлях. У цьому алгоритмі є чотири ключові моменти:

1. Пошук наступної точки, яку потрібно додати до дерева (або відкинути) (StateToExpandFrom).

2. З'ясовуємо, де і як з'єднати цю точку з деревом з урахуванням кінематики робота (CreatePathToTree).

3. Перевірка, чи підходить цей шлях, тобто без зіткнень.

4. Пошук наступного пункту для додавання.

Видатний метод полягає в тому, щоб вибрати випадкову точку в просторі станів і з'єднати її з найближчою існуючою точкою в дереві або до

мети. Це вимагає пошуку всіх вузлів у дереві та обчислення їх відстані до точки кандидата. Інші підходи ставлять переваги для вузлів з меншою кількістю градусів (ті, які ще не мають дуже багато зв'язків) і вибирають нову точку в його околицях. Обидва підходи дозволяють швидко досліджувати весь державний простір.

Якщо є обмеження, накладені на шлях робота, наприклад, робот повинен тримати чашку і тому не повинен обертати зап'ястя, цей вимір можна просто вийняти з державного простору.

Після того, як можливий шлях буде знайдений, цей простір можна зменшити до еліпсоїда, який обмежує максимальну довжину шляху. Цей еліпсоїд можна побудувати, встановивши провід максимальної довжини шляху між початком і метою і штовхаючи його назовні ручкою. Вся область, яка може бути досягнута за допомогою пера, обмеженого проводом, може містити точку, яка може призвести до коротшого шляху. Цей підхід особливо ефективний при паралельному запуску декількох копій одного і того ж планувальника та обміні найкоротшими шляхами після їх виявлення (Otte & Correll 2013).

З'єднання точок з деревом. Нова точка класично пов'язана з найближчою точкою вже в дереві або з метою. Це можна зробити, розрахувавши відстань до всіх точок, які вже знаходяться в дереві. Однак це не обов'язково генерує найкоротший шлях. Нещодавнє вдосконалення було зроблено RRT*, який з'єднує точку з деревом таким чином, що мінімізує загальну довжину шляху. Це можна зробити, розглянувши всі точки дерева в межах d-кулі (на 2D-карті, d = 2, тобто коло) від фіксованого радіуса від точки для додавання і знайшовши точку, яка мінімізує загальну довжину шляху до початку.

Додавання точки до дерева - це також хороший час, щоб врахувати конкретну кінематику робота, наприклад автомобіля. Тут місцевий планувальник може бути використаний для створення відповідної траєкторії, яка враховує орієнтацію транспортного засобу в кожній точці дерева.

Перевірка зіткнень. Ефективні алгоритми тестування зіткнень заслуговують виділеного розділу. Хоча проблема інтуїтивно зрозуміла в плануванні конфігурації простору в 2D (робот зводиться до точки) і може бути вирішена за допомогою простого тесту «точка-в-полігоні», проблема більше залучена для маніпуляторів, які піддаються самозіткненню.

Оскільки перевірка зіткнень займає до 90% часу виконання в задачі планування шляху, успішним методом збільшення швидкості обчислень є «лінива оцінка зіткнень». Замість того, щоб перевіряти кожну точку на предмет можливого зіткнення, алгоритм спочатку знаходить відповідний шлях. Тільки тоді він перевіряє кожен сегмент цього шляху на наявність зіткнень. Якщо деякі сегменти знаходяться в зіткненні, вони видаляються, і алгоритм продовжується, але зберігає сегменти успішного шляху, які були без зіткнень.

Оскільки шляхи випадково відібрані, вони, швидше за все, будуть хиткими і не оптимальними. Наприклад, grid-карта генерує серію різких поворотів, а підхід на основі вибірки поверне зигзагоподібні випадкові шляхи. Результати можна кардинально покращити, запустивши додатковий алгоритм, який згладжує шлях. Одним із способів зробити це є з'єднання точок шляху за допомогою сплайнів, кривих або навіть фрагментів траєкторії, які, як відомо, є здійсненними для конкретної платформи.

Крім того, можна також використовувати модель фактичної платформи та використовувати контролер зворотного зв'язку для мобільних роботів та для зброї, зразок серії точок перед роботом та генерувати траєкторію, якою робот може фактично керувати. У поєднанні з динамікою цей підхід відомий як модельно-прогнозне управління. Однак слід подбати про те, що отримані шляхи дійсно вільні від зіткнень.

Висновки. Планування шляху є постійною дослідницькою проблемою. Пошук вільних шляхів зіткнення для механізмів з високим ступенем свободи, таких як кілька маніпуляторів, що працюють у загальному просторі, систем мульти-роботів або систем, що включають динаміку (і, отже, додавання

похідних змінних стану до проблеми планування) може зайняти неприйнятно багато часу.

Хоча планувальники шляхів на основі вибірки можуть різко прискорити час пошуку певного рішення, вони не є оптимальними і борються з конкретними ситуаціями, такими як вузькі проходи. Не існує алгоритму «срібної кулі» для вирішення всіх проблем планування шляху та евристики, які призводять до масового прискорення в одному сценарії, можуть бути згубними для інших. Крім того, алгоритмічні параметри в основному спеціальні, і правильне налаштування
їх під конкретне середовище може різко підвищити продуктивність.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗОВАНОЮ РОБОТОЮ МАНІПУЛЯТОРІВ

3.1 Математична модель узгодженого руху маніпуляторів у загальному робочому просторі

Ефективність системи керування маніпуляторами у загальному робочому просторі безпосередньо залежить від точності опису їх кінематичних і динамічних властивостей. У зв'язку з цим, першочерговим завданням є розробка адекватної математичної моделі маніпуляторів. Ключова складність моделювання полягає в необхідності врахування нелінійних факторів, зокрема сил сухого та в’язкого тертя. Окрім того, критично важливим є аналіз пружних деформацій у ланках та механічних передачах (переважно зубчатих або ремінних), що з’єднують приводи з рухомими зчленуваннями.

Для лінеаризації рівнянь, що описують поведінку маніпуляційної системи при малих змінах координат елементів механізму, диференціюють за часом координати положення ланок у складному механізмі, які описуються нелінійними залежностями. Після цього швидкості зміни координат положення ланок для кожної конфігурації будуть вже задовольняти лінійним рівнянням. При цьому важливо, щоб усі прирости змін координат елементів маніпуляційної системи промислового робота були достатньо малими, оскільки в іншому випадку така лінеаризація призведе до значних похибок.

Розглянемо просту модель плоского горизонтального дволанкового робота-маніпулятора (рис. 3.1), що працює в режимах малих швидкостей. Розв'язання задачі орієнтації руху забезпечує перехід до задачі позиціонування т. В.

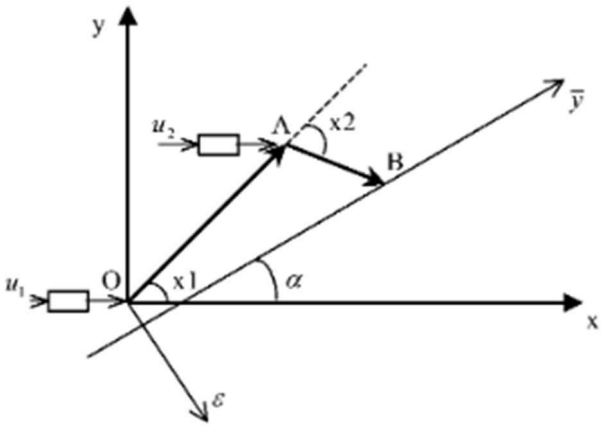


Рисунок 3.1 – Прямолінійних рух маніпулятора

Необхідною умовою для розв'язання задачі орієнтації є отримання сигналів керування. Насправді керування орієнтацією твердого тіла будується на основі вимірювань певних датчиків кутового положення, які визначають положення зв'язаних осей відносно деяких напрямків у просторі. Задача керування полягає в тому, щоб на основі цієї інформації розробити алгоритм оптимального функціонування ланок.

Отже, при умовах:

$$\mathrm{x} = \begin{bmatrix} \mathrm{x}_1 \\ \mathrm{x}_2 \end{bmatrix}; \tag{3.1}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}; \tag{3.2}$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}; \tag{3.3}$$

Рівняння стану ОУ має вигляд:

$$\dot{\mathrm{x}_1} = b_1 u_1; \tag{3.4}$$

$$\dot{\mathrm{x}_2} = b_2 u_2, \tag{3.5}$$

де x_1, x_2 – кутове переміщення ланок;

u_1, u_2 – керуючі сигнали;

b_1, b_2 – коефіцієнти.

Заданими a_1, a_2 – довжини ланок, α – кут, утворений прямою у з віссю x.

Таким чином, задача керування заданим плоским маніпулятором зводиться до визначення сигналів u_1, u_2, при яких точка B переміщується по траєкторії $\bar{y}$ із заданою швидкістю.

3.1.1 Алгоритми запобігання колізіям між маніпуляторами

Розробка алгоритмів запобігання колізіям для двох маніпуляторів у спільній робочій зоні – задача, що вимагає балансу між точністю геометричної моделі та швидкодією обчислень.

Існує два основні підходи для запобігання колізіям між маніпуляторами

1. Офлайн-планування.

– траєкторії обох роботів прораховуються заздалегідь;

– використовується діаграма «Час-Шлях».

Перевага: гарантована відсутність колізій при штатному виконанні.

Недолік: не працює, якщо виникають непередбачувані затримки або зовнішні перешкоди.

2. Онлайн-реакція.

– роботи перевіряють стан один одного в реальному часі (кожні n мілісекунд);

– використовуються методи потенціальних полів або динамічне масштабування часу.

Перевага: адаптивність.

Для поставленої задачі (робота в одному робочому просторі) доцільно використати гібридний алгоритм з пріоритетами. Один маніпулятор (Master) виконує своє завдання незалежно, а другий (Slave) постійно моніторить відстань до Master-а і, у разі небезпеки, змінює швидкість або зупиняється.

Алгоритм роботи:

1. Зчитування стану: отримання поточних кутів суглобів q_1 (робот 1) та q_2 (робот 2).

2. Пряма кінематика: розрахунок координат центрів сфер/капсул для кожної ланки в базовій системі координат.

3. Виявлення найближчих точок: розрахунок мінімальної відстані d_{min} між усіма парами ланок робота 1 та робота 2.

4. Логіка керування:

- якщо $d_{min} > d_{safe}$ (безпечна зона) – рух з номінальною швидкістю;
- якщо $d_{stop} < d_{min} \leq d_{safe}$ (зона попередження) – Slave знижує швидкість ($v_{slave} = k \cdot v_{nom}$, де $k < 1$);
- якщо $d_{min} \leq d_{stop}$ (критична зона) – Slave екстрено зупиняється.

Математичний опис розрахунку відстані (для капсул – геометричних фігур, які використовуються для спрощеного опису форми ланки маніпулятора).

Нехай ланка першого робота представлена відрізком S_1 (від точки A до B), а ланка другого – відрізком S_2 (від C до D).

Завдання зводиться до пошуку мінімальної відстані між двома відрізками у 3D просторі.

Вектори відрізків:

$$u = B - A; \tag{3.6}$$

$$v = D - C; \tag{3.7}$$

$$w = A - C. \tag{3.8}$$

Мінімальна відстань між прямими визначається через скалярні та векторні добутки. Якщо відстань між «скелетами» капсул (відрізками) позначити як d_{seg}, то умова колізії:

$$d_{seg} < r_1 + r_2, \tag{3.9}$$

де r_1, r_2 – радіуси капсул.

Умови:

– якщо $d_{seg} > 0$ – зіткнення немає;

– якщо $d_{seg} \leq 0$ – відбулася колізія (роботи «врізалися» або доторкнулися).

3.1.2 Оптимізація траєкторій руху роботизованих маніпуляторів

Під час роботи двох маніпуляторів в обмеженому просторі, точність і плавність керування орієнтацією стають критично важливими для уникнення колізій. Використання рівнянь кватерніонів є найкращім підходом для опису та оптимізації орієнтації в сучасній робототехніці, особливо для маніпуляторів з 6-ма і більше ступенями вільності.

При плануванні траєкторії робота необхідно оптимізувати дві складові руху (рис. 3.2):

– положення: координати x, y, z. (використовуються звичайні вектори);

– орієнтацію: кут нахилу та повороту інструменту (тут виникають головні математичні проблеми).

Кожна система координат формується на основі трьох правил:

1. Вісь z_{i-1} направлена уздовж вісі і-го з’єднання.

2. Вісь x_i перпендикулярна вісі z_{i-1} и направлена від неї.

3. Вісь y_i доповнює вісь x_i , z_i так щоб система координат була правобічна.

Коли два маніпулятори маневрують близько один до одного, їм часто доводиться приймати складні, вигадливі орієнтації, щоб уникнути зіткнення частинами робота або інструментами. Якщо використовувати кути Ейлера, існує ризик, що в критичний момент, намагаючись ухилитися від іншого робота, один з маніпуляторів потрапить у стан кінематичної сингулярності («шарнірний замок»). У цьому стані робот втрачає керованість по одній з осей, що може призвести до непередбачуваного ривка і, як наслідок, до аварії.

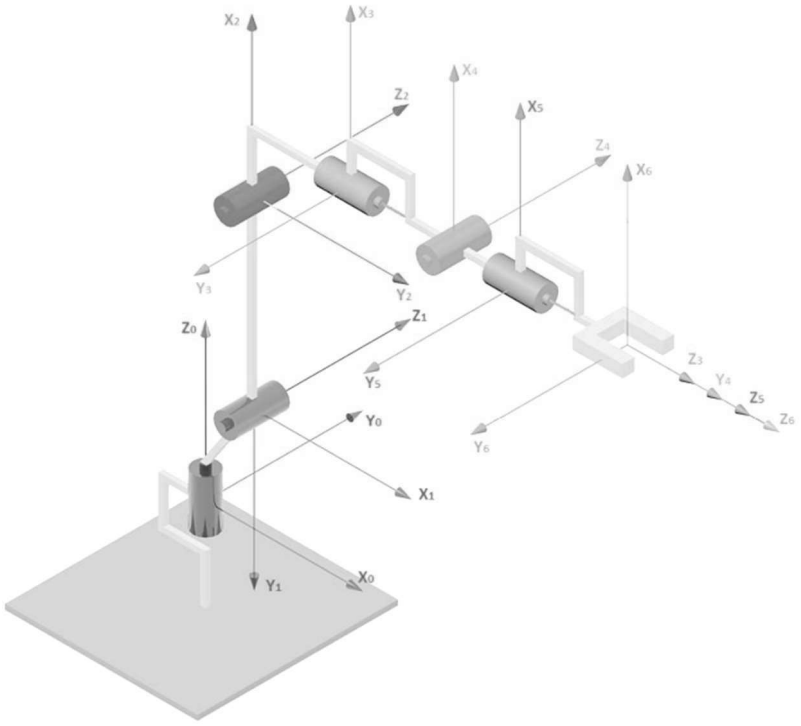


Рисунок 3.2 – Система локальних координат робота-маніпулятора

Кватерніони забезпечують гладкий опис орієнтації в усьому робочому просторі. Оптимізатор завжди може знайти безпечний шлях обертання, незалежно від поточного положення робота.

При оптимізації руху двох роботів розмірність задачі подвоюється. Вектор стану системи X стає дуже великим. Використання матриць повороту для опису орієнтації невиправдано роздуває цей вектор і сповільнює обчислення. Кватерніони дозволяють тримати розмірність задачі в розумних межах, що критично для оптимізації в реальному часі.

Нехай нормований кватерніон Λ_1 задає поворот ланки OA на кут x_1 відносно осі Z:

$$\Lambda_1 = \left(cos\frac{x_1}{2} + sin\frac{x_1}{2}k\right)a_1. \quad (3.10)$$

А нормований кватерніон Λ_2 задає поворот ланки AB на кут x_2 відносно осі Z':

$$\Lambda_2 = \left(cos\frac{x_2}{2} + sin\frac{x_2}{2}k\right)a_2. \qquad (3.11)$$

Два послідовні повороти Λ_1 і Λ_2 відповідають оператору множення кватерніонів $\Lambda_1 \cdot \Lambda_1$, який характеризує один поворот на кут ψ навколо v.

$$N = \Lambda_2 \cdot \Lambda_1 = cos\frac{\psi}{2} + sin\frac{\psi}{2}v = \lambda_0 + \lambda_1 i + \lambda_2 i + \lambda_3 k. \qquad (3.12)$$

Компоненти кватерніона $(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ є кінематичними параметрами і носять назву параметрів Родріга-Гамільтона. Ці параметри не вироджуються при будь-якому положенні твердого тіла (тобто не стають нескінченними ні самі параметри, ні швидкості їх зміни), на відміну від кутів Ейлера. Число параметрів Родріга-Гамільтона дорівнює чотирьом, тобто є одне рівняння зв'язку, на відміну від шести рівнянь зв'язку у випадку напрямних косинусів. З іншого боку, ці параметри характеризують найбільш природний спосіб задання положення твердого тіла за допомогою плоского обертання. Скінченне обертання твердого тіла (тобто рух тіла, що має нерухому точку) має ту особливість, що воно завжди залишає нерухомою у просторі одну вісь [12].

Вісь і кут результуючого обертання визначаються за компонентами результуючого кватерніона на основі правил їх множення.

Оскільки просторовий рух робота здійснюється за рахунок поворотів у шарнірах A і B, а шарніри мають паралельні осі (тобто обертання відбувається навколо нерухомих осей Z і Z'), то, виходячи з вищесказаного, поворот у шарнірах A і B еквівалентний одному повороту на сумарний кут ψ = $x_1 + x_2$.

$$\Lambda_2 \cdot \Lambda_1 = a_1 a_2 cos\frac{x_1}{2}cos\frac{x_2}{2} - a_1 a_2 cos\frac{x_1}{2}sin\frac{x_2}{2} +$$
$$+a_1 a_2 cos\frac{x_2}{2}sin\frac{x_2}{2}k + +a_1 a_2 cos\frac{x_1}{2}sin\frac{x_2}{2}k +$$

$$+\begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & a_2 sin\frac{x_2}{2} \\ 0 & 0 & a_1 cos\frac{x_1}{2} \end{vmatrix} = a_1 a_2 \left(cos\frac{x_1 + x_2}{2} + sin\frac{x_1 + x_2}{2} k \right) \quad (3.13)$$

Компоненти результуючого кватерніона запишемо у вигляді двох скалярних рівностей:

$$\begin{cases} \lambda_0 = a_1 a_2 cos\dfrac{x_1 + x_2}{2} \\ \lambda_0 = a_1 a_2 sin\dfrac{x_1 + x_2}{2} \end{cases} \quad (3.14)$$

Вони описують скінченне обертання. Тобто, кватерніон перетворення обертання N визначає вектор скінченного обертання, що переводить систему координат xOy в $\bar{y}O\varepsilon$.

Як сигнали кутового положення використовуються величини компонент кватерніона N, що задає перехід від заданої системи координат до зв'язаної.

Використання кватерніонів дозволяє подати кінематичні рівняння у найбільш природному вигляді, коли пов'язуються однорідні параметри, що характеризують елементарне обертання (вектор кутової швидкості) і скінченне обертання (компоненти кватерніона).

При виведенні кінематичних рівнянь слід враховувати, що на практиці знайшли застосування рівняння, в яких фігурують проекції вектора кутової швидкості ω руху рухомої системи координат відносно вихідної або на цю вихідну, або на рухому систему координат (а не взагалі на довільний базис).

Цим пояснюється те, що в кінематичних рівняннях використовуються проекції кватерніона на початковий і кінцевий базиси перетворення, тобто параметри Родріга-Гамільтона.

Кінематичне рівняння руху плоского маніпулятора в термінах кватерніонів має вигляд:

$$\dot{N} = \frac{1}{2} N \cdot \omega, \tag{3.15}$$

де N – кватерніон скінченного повороту;

ω – кватерніон кутової швидкості обертання.

Рівнянню відповідають чотири скалярні рівняння:

$$\begin{cases} 2\dot{\lambda}_0 = -\omega_1\lambda_1 - \omega_2\lambda_2 - \omega_3\lambda_3 \\ 2\dot{\lambda}_1 = -\omega_1\lambda_0 - \omega_2\lambda_3 - \omega_3\lambda_2 \\ 2\dot{\lambda}_2 = -\omega_2\lambda_0 - \omega_3\lambda_2 - \omega_1\lambda_2 \\ 2\dot{\lambda}_3 = -\omega_3\lambda_0 - \omega_1\lambda_2 - \omega_2\lambda_3 \end{cases} \tag{3.16}$$

З урахуванням рівняння очевидно, що кінематичне рівняння у формі не вироджується при будь-яких значеннях параметрів. Суттєвою перевагою є і те, що в рівняннях відсутні тригонометричні функції, що економить машинний час. Величина кватерніона кутової швидкості ω визначається проекціями на зв'язану систему координат його вектора:

$$\omega_{\bar{y}0\epsilon} = \omega_1 i_1 + \omega_2 i_2 + \omega_3 i_3, \tag{3.17}$$

Компоненти кватерніона для розглянутого прикладу обчислюються за формулами:

$$\begin{cases} \omega_1 = 0 \\ \omega_2 = 0 \\ \omega_3 = 2(\dot{\lambda}_3\lambda_0 - \dot{\lambda}_0\lambda_3) \end{cases} \tag{3.18}$$

які набудуть вигляду:

$$\begin{cases} \omega_1 = 0 \\ \omega_2 = 0 \\ \omega_3 = a_1^2 a_2^2 \end{cases} \quad (3.19)$$

Рівняння визначають величину кутової швидкості скінченного повороту, яка є фізичною характеристикою руху і може бути виміряна.

Кватерніони надають апарат, що дозволяє найзручнішим чином описувати всі операції, пов'язані з описом та дослідженням руху твердого тіла.

Використання кватерніонів виявляється найбільш доцільним з огляду на дві обставини.

По-перше, дослідження стійкості процесів орієнтації, виконане з використанням параметрів Родріга-Гамільтона, дозволяє робити висновки про стійкість системи в цілому. Кватерніони дозволяють знайти найбільш загальний вигляд функціональних залежностей, що забезпечують стійке керування.

По-друге, компоненти кватерніона можуть бути використані як керуючий сигнал, що має місце, коли ці параметри обчислюються в системі керування. Застосування компонент кватерніона як сигналів керування дозволяє отримати не лише стійке керування кутовим рухом твердого тіла, а й, у ряді випадків, керування, досить близьке до оптимального.

3.1.3 Інтеграція сенсорних систем для точного позиціонування

Забезпечення високої точності позиціонування робочого органу є одним із критичних завдань у сучасній робототехніці, особливо в таких застосуваннях, як прецизійне складання, мікроелектроніка, лазерне зварювання та хірургія. Теоретичні моделі кінематики та динаміки маніпулятора, навіть побудовані з використанням апарату кватерніонів, описують ідеалізовану систему. Однак у реальних умовах експлуатації виникають похибки, спричинені неточностями виготовлення ланок, люфтами

в механічних передачах, пружними деформаціями під навантаженням та температурним дрейфом.

Традиційні системи керування базуються на даних внутрішніх (пропріоцептивних) сенсорів – енкодерів або резольверів, встановлених на валах приводів. Вони забезпечують високу точність вимірювання кутів повороту окремих зчленувань. Проте, пряма кінематична задача, вирішена на основі цих даних, накопичує похибки вздовж усього кінематичного ланцюга маніпулятора, що призводить до значного відхилення фактичного положення кінцевого ефектора від розрахункового.

Для компенсації цих відхилень та досягнення субміліметрової точності необхідна інтеграція зовнішніх (екстероцептивних) сенсорних систем, які дозволяють замкнути контур керування безпосередньо за положенням робочого органу в декартовому просторі.

До основних типів сенсорних систем, що підлягають інтеграції для задач точного позиціонування, належать:

1. Системи технічного зору. Використання камер (моно- або стереопар) та лазерних сканерів дозволяє визначати положення маніпулятора відносно робочих об'єктів у режимі реального часу. Це критично важливо для адаптивного керування в неструктурованому середовищі.

2. Лазерні трекери та інтерферометри. Забезпечують найвищу точність вимірювання абсолютних координат спеціальних відбивачів, закріплених на робочому органі, але зазвичай мають обмежену робочу зону та високу вартість.

3. Силомоментні датчики. Встановлюються на зап'ясті маніпулятора і дозволяють коригувати траєкторію на основі силової взаємодії з об'єктом, що опосередковано підвищує точність виконання контактних операцій.

Ключовою проблемою інтеграції різнорідних сенсорів є необхідність комплексування даних. Інформація від енкодерів (швидка, але з накопичувальною похибкою) та систем технічного зору (точна в абсолютних координатах, але повільніша і зашумлена) має бути об'єднана для отримання

оптимальної оцінки стану системи. Для цього застосовуються методи стохастичної фільтрації, зокрема розширений фільтр Калмана або фільтри частинок.

Ефективна інтеграція сенсорних систем вимагає також проведення процедур взаємного калібрування, тобто точного визначення матриць трансформації між системами координат сенсорів (наприклад, камери) та базовою системою координат маніпулятора. Тільки за умови коректного математичного опису та надійної програмно-апаратної інтеграції сенсорів стає можливим реалізація алгоритмів керування зі зворотним зв'язком за положенням, що гарантує задану точність виконання технологічних операцій.

Метою роботи є розробка системи керування для безпечного та узгодженого функціонування двох роботизованих маніпуляторів у спільному робочому просторі. Для забезпечення високої точності та плавності рухів, математичний опис орієнтації робочих органів реалізовано з використанням апарату кватерніонів, що дозволяє уникнути кінематичних сингулярностей при складному просторовому маневруванні. Критично важливе завдання запобігання зіткненням між маніпуляторами вирішується шляхом впровадження гібридного алгоритму з пріоритетами («Master-Slave») та використанням методу геометричної апроксимації ланок капсулами для швидкого розрахунку дистанцій у реальному часі.

При зіткненні маніпулятора з перешкодою виникає різке підвищення струму. Якщо воно більше заданого значення, то потрібно зупинити маніпулятор.

Контроль струму буде виконуватись за допомогою датчиків, виконаних на базі мікросхеми ACS712ELC, яка в своєму складі містить дуже точний лінійний датчик Холла, інтегрований на кристал мікросхеми, і мідного провідника, розміщеного близько до кристалу. Електричний струм, протікаючи через провідник, створює магнітне поле, яке фіксується датчиком Холла і перетворюється в напругу, пропорційно значенню вхідного струму.

За допомогою датчика струму було експериментально встановлено граничне значення струму (табл. 3.1.).

Таблиця 3.1 – Характеристики сервоприводів

Рівень струму пускового	до 1,5 А
Рівень струму робочого	до 1,1 А
Рівень струму при зіткненні	1,8 А

На рисунку 3.3 представлений алгоритм роботи програми.



Рисунок 3.3 – Блок схема алгоритму контролю струму сервоприводів

Інтегрування в систему управління технології машинного зору перетворює систему з «сліпо» (яка покладається лише на енкодери та попередньо задану модель середовища) на адаптивну, здатну реагувати на динамічні зміни в робочій зоні.

Розроблена підсистема технічного зору використовує алгоритм детектування об'єктів, заснований на методі колірної сегментації (блок-схема алгоритму наведена на рис. 3.4).

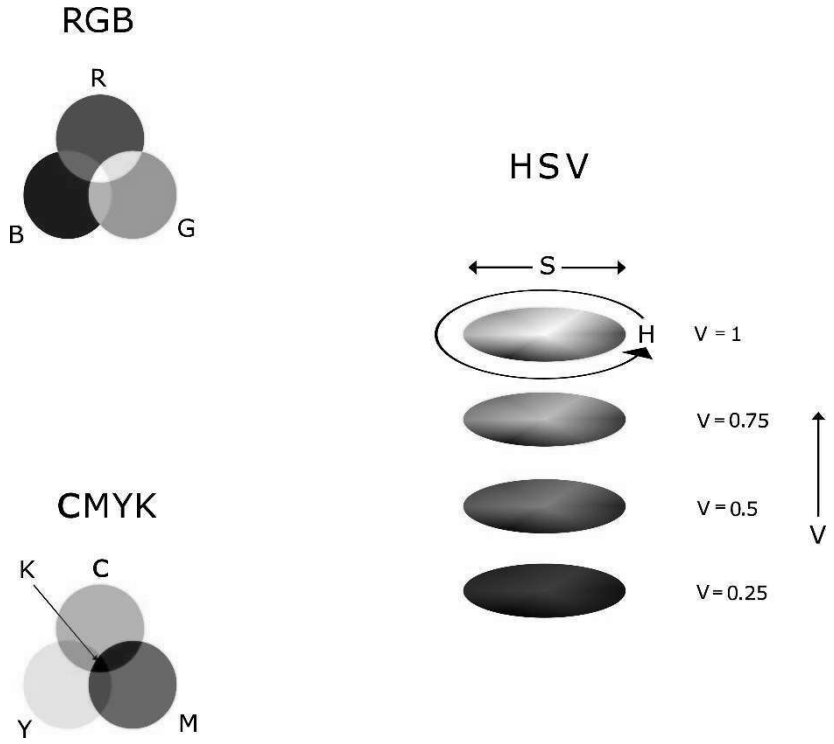


Рисунок 3.4 – Алгоритм детектування об'єктів, заснований на методі колірної сегментації

Головним завданням цього модуля в контексті даної роботи є надійне виділення динамічних перешкод або спеціальних кольорових маркерів на об'єктах маніпулювання із відеопотоку, що надходить у реальному часі від камери.

Первинний відеосигнал від сенсора надходить у колірній моделі RGB, де кожен піксель описується інтенсивністю трьох базових компонентів. Геометрично цю модель зручно представляти у вигляді колірного куба.

Однак, пряме використання моделі RGB для задачі сегментації перешкод у програмній реалізації (з використанням бібліотеки OpenCV) виявилося неоптимальним. Основний недолік RGB у контексті робототехніки полягає у високій кореляції між компонентами кольору та інтенсивністю освітлення. Зміна зовнішнього освітлення або поява тіней у робочій зоні призводить до значної зміни значень усіх трьох каналів (R, G і B) одночасно, що унеможливлює налаштування стабільних порогових значень для виділення об'єкта.

Для вирішення цієї проблеми в роботі застосовано попереднє перетворення зображення у колірний простір HSV. Модель HSV є значно ефективнішою для задач комп'ютерного зору, оскільки вона розділяє інформацію про власне колір (компонента H) та його освітленість (компонента V). Це дозволяє налаштувати алгоритм сегментації так, щоб він був інваріантним до змін освітленості, реагуючи лише на колір перешкоди, що критично важливо для надійної роботи системи безпеки маніпуляторів.

Розглянемо алгоритм розпізнавання і функції які він викликає.

У моделі HSV (рис. 3.5) колір розкладається на 3 складові:

– Hue (колірний тон) – частота колірної хвилі, яка відбивається від об'єкта, змінюється від 0 ° до 360 °;

– Saturation (Насиченість) – є чистотою кольору, змінюється від 0 до 100%;

– Value (Brightness) – загальна яскравість кольору, змінюється від 0 до 100%.

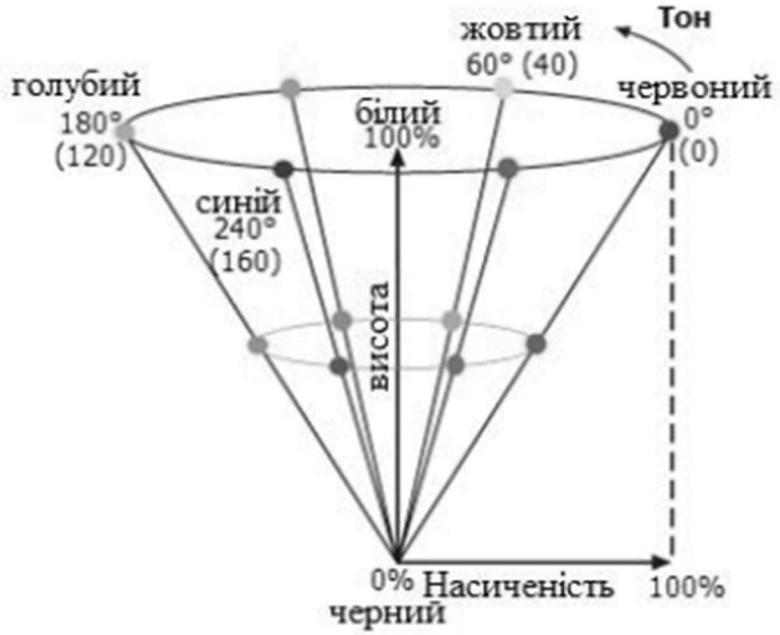


Рисунок 3.5 – Просторове відображення моделі HSV

Для переходу між колірними моделями існують такі вирази:

$$S = \begin{cases} 0, & \text{якщо } MAX = 0 \\ 1 - \dfrac{MIN}{MAX}, & \text{інакше} \end{cases} \tag{3.20}$$

$$\mathrm{H} = \begin{cases} 60 \text{ x } \dfrac{G - B}{MAX - MIN} + 0, \text{якщо } MAX = R \text{ і } G \geq B \\ 60 \text{ x } \dfrac{G - B}{MAX - MIN} + 360, \text{якщо } MAX = R \text{ і } G < B \\ 60 \text{ x } \dfrac{G - B}{MAX - MIN} + 120, \text{якщо } MAX = G \\ 60 \text{ x } \dfrac{G - B}{MAX - MIN} + 240, \text{якщо } MAX = B \end{cases} \tag{3.21}$$

$$V = MAX, \tag{3.22}$$

де MAX – максимальне значення з R, G, B;

MIN – мінімальне з них.

H ϵ [0, 360]

S, V, R, G, B ϵ [0, 1]

Після конвертації потрібно встановити межі для кожного каналу, які дозволять виділити об'єкт потрібного кольору. Функція CvInvoke.cvInRange (), формує бінарне зображення, яке виходить з тих пікселів каналу, значення яких більше MIN і менше MAX.

Далі для всіх трьох одержані порогових зображень виконується операція логічного «І» (тобто в результуючому вікні «hsv and» білими будуть тільки ті пікселі, які є у всіх трьох порогових зображень) за це відповідає спеціально створена функція cvAndHsvImage ().

Далі визначаємо контури виділеної ділянки і знаходимо координати, центра обмежувального прямокутника за допомогою розробленої в рамках роботи функції RecDetection ().

В результаті виконання вищезгаданої функції, об'єкт виділеного кольору був поміщений в прямокутну область.

Блок схема розробленої функції «RecDetection» наведена на рис. 3.6.



Рисунок 3.6 – Блок схема розробленої функції «RecDetection»

3.1.4 Управління взаємодією маніпуляторів у режимі реального часу

Шлях – це суто просторове поняття, що являє собою набір точок, які з'єднують початкове та кінцеве положення. Натомість траєкторія включає часовий компонент; вона не лише визначає положення, але й задає розклад руху, включаючи швидкість та прискорення маніпулятора в кожний момент часу.

При плануванні у робочому просторі інтерполяція відбувається між контрольними точками безпосередньо у робочому просторі (наприклад, для кінцевого ефектора), а задача оберненої кінематики вирішується на кожному часовому кроці під час виконання. У просторі з'єднань обернена кінематика вирішується лише для контрольних точок, а інтерполяція траєкторії відбувається між отриманими кутами з'єднань.

Управління кооперативною або спільною роботою двох маніпуляторів у єдиному робочому просторі висуває принципово нові вимоги до системи керування порівняно з управлінням окремим роботом. Ключовим викликом стає необхідність роботи в режимі реального часу. Це означає, що система повинна гарантовано зчитувати дані з сенсорів, обробляти їх, приймати рішення та видавати керуючі сигнали на приводи в межах жорстко фіксованого малого інтервалу часу (такту керування, зазвичай 1-10 мс).

Масштабування часу – це метод, що дозволяє застосувати певний часовий профіль (наприклад, трапецієподібний або поліноміальний) до іншого типу траєкторії. У контексті обертання це дає можливість масштабувати нормалізований час (від 0 до 1) для траєкторії орієнтації, щоб вона також мала властивості, наприклад, трапецієподібного профілю швидкості, а не лише лінійного.

Для спрощення задачі узгодження та уникнення конфлікту керування в режимі реального часу застосовується ієрархічний підхід. Одному маніпулятору надається високий пріоритет (Master), і він виконує основне технологічне завдання. Система управління другого маніпулятора (Slave) в

реальному часі моніторить відстань до Master-робота та динамічних перешкод, і реактивно змінює свою швидкість (масштабування швидкості) аж до повної зупинки для забезпечення безпечної дистанції.

Порівняльний аналіз різних методів реалізації взаємодії на основі моделювання типових траєкторій руху отримали наступні результати (рис. 3.7).

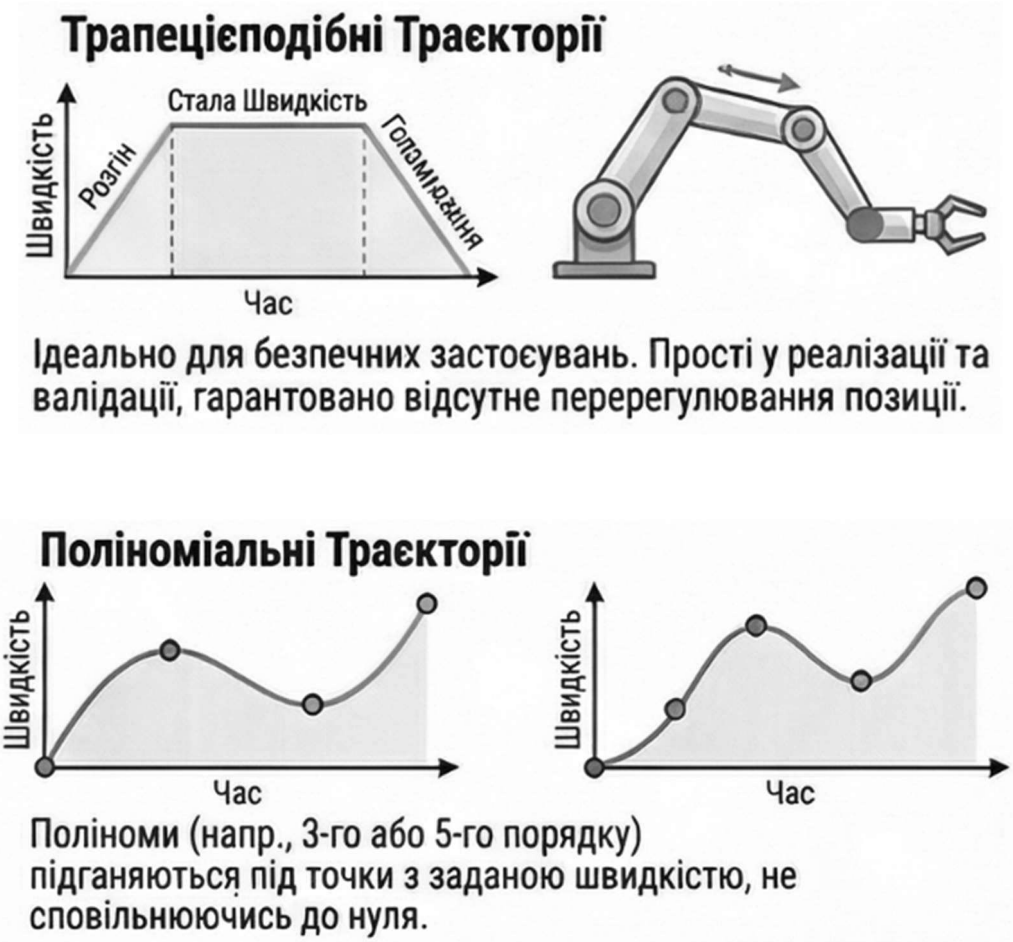


Рисунок 3.7 – Проведено порівняльний аналіз різних методів реалізації взаємодії на основі моделювання типових траєкторій руху

На графіку траєкторій видно, що Slave-робот чітко дотримується заданого геометричного шляху без просторових відхилень.

Графік швидкостей ідеально ілюструє принцип роботи запропонованого ієрархічного підходу. У момент часу (приблизно t = 25-30

с), коли роботи зближуються, швидкість Master-робота (суцільна лінія) залишається незмінною. Натомість швидкість Slave-робота плавно знижується («просідає») для пропуску ведучого робота, після чого плавно відновлюється до номінального значення. Відсутність різких коливань свідчить про стабільність алгоритму.

На основі проведеного аналізу для реалізації в системі управління обрано метод уникнення колізій за допомогою масштабування швидкості. Цей підхід є найкращим, оскільки він:

– повністю відповідає обраній ієрархічній стратегії Master-Slave;

– гарантує безпеку руху без зміни геометрії запланованої траєкторії веденого робота;

– забезпечує плавний профіль швидкості без шкідливих осциляцій, що є критично важливим для довговічності та точності реальних мехатронних систем.

Графіки на рис. 3.8 наочно ілюструють, що кубічні поліноми забезпечують неперервність положення та швидкості, але не прискорення.

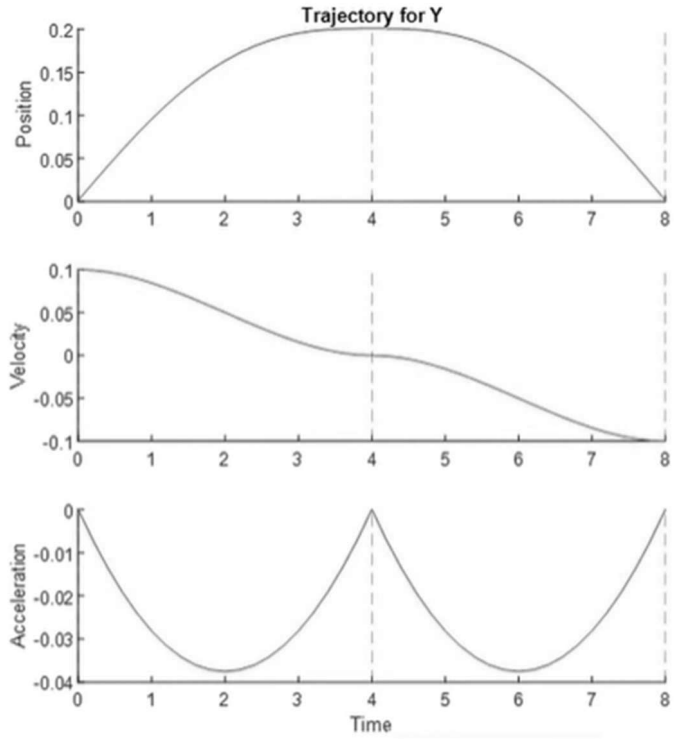


Рисунок 3.8 – Графіки кубічних поліномів траєкторії руху

Це призводить до потенційних проблем з плавністю руху в реальних роботизованих системах через різкі зміни сил та моментів.

Для забезпечення переміщення робочого органу маніпулятора між ключовими точками технологічного процесу необхідно виконати планування траєкторії у просторі узагальнених координат (просторі зчленувань). Критичною вимогою до генерованих траєкторій є забезпечення плавності руху, що визначається неперервністю функцій положення, швидкості та прискорення.

Найпростішим підходом є використання кубічних поліномів (поліномів 3-го порядку), які дозволяють задати граничні умови для положення та швидкості. Однак, як видно з аналізу динаміки, використання кубічних сплайнів призводить до розривів функції прискорення на межах сегментів траєкторії. Фізично це проявляється у вигляді теоретично нескінченних ривків, що викликає небажані вібрації конструкції, підвищений знос механічних передач та зниження точності позиціювання.

З огляду на необхідність забезпечення високих динамічних характеристик та довговічності розроблюваної системи двох маніпуляторів, для генерації базових траєкторій обрано використання поліномів 5-го.

Математична модель такої траєкторії для кожного зчленування має вигляд:

$$q(\tau) = a_5\tau^5 + a_4\tau^4 + a_3\tau^3 + a_2\tau^2 + a_1\tau \quad + a_0, \tag{3.23}$$

де q(t) – значення узагальненої координати (наприклад, кута повороту суглоба) в момент часу t;

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – постійні коефіцієнти полінома, які розраховуються на основі граничних умов (початкових і кінцевих значень положення, швидкості та прискорення).

З метою розрахунку траєкторії зручно виразити її в параметричній формі, як функцію з відповідним параметром нормалізації σ = σ(t). Враховуючи траєкторію q(t), визначену між точками q_i і q_f з часом в дорозі T = t_f – t_i, її вираження в нормалізованій формі виглядає наступним чином:

$$q(t) = q_i + h\sigma(\tau), \tag{3.24}$$

$$\text{з } h = q_f - q_i \ \ i\text{:}$$

$$\sigma(t) = [a + (1 - t_a)\tau]$$

$$0 \leq \sigma(t) \leq 1, \tau = \frac{t - t_i}{\mathrm{T}}, 0 \leq \tau \leq 1 \text{ (час нормалізації).}$$

Звідси:

$$\begin{cases} \dfrac{dq(t)}{dt} = \dfrac{h}{T}\sigma'(\tau) \\ \dfrac{d^2q(t)}{dt^2} = \dfrac{h}{T}\sigma''(\tau) \\ \cdots \\ \dfrac{d''q(t)}{dt} = \dfrac{h}{T^n}\sigma^{(n)}(\tau) \end{cases}$$

Максимальні значення швидкості, прискорення отримані відповідно до максимальних значень функцій $\sigma^{(n)}(t)$: шляхом зміни часу проходження T траєкторії, допоможе задовольнити обмеження в умовах кінематичного насичення.

Таблиця 3.2 – Функції траєкторій, які можуть бути параметризовані

Траєкторія	Функція	Конфіцієнти взяти для параметризації
Полінома третього степеня	$q(\tau) = a_5\tau^5 + a_4\tau^4 + a_3\tau^3$	a_0=0, a_1=0, a_2=3, a_3=-2
Полінома п'ятого степеня	$q(\tau) = a_5\tau^5 + a_4\tau^4 + a_3\tau^3 + a_2\tau^2 + a_1\tau + a_0,$	a_0=0, a_1=0, a_2=3, a_3=-2, a_4=3, a_5=3,
Гармонійна	$q(\tau) = \frac{1}{2}(1 - \cos(\pi\tau))$	$\sigma'(0{,}5), \sigma''(0{,}5), \sigma'''(0{,}5)$
Циклоїдна	$q(\tau) = \tau - \frac{1}{2\pi}\sin(2\pi\tau)$	$\sigma'(0{,}5), \sigma''(0{,}25), \sigma'''(0)$

Таблиця 3.3 – Максимальні значення швидкості, прискорення і ривка

Траєкторія	Функція
Полінома третього степеня	$\dot{q}_{max} = \frac{3h}{2T}\ \ddot{q}_{max} = \frac{6h}{T^2}$
Полінома п'ятого степеня	$\dot{q}_{max} = \frac{15h}{8T}\ \ddot{q}_{max} = \frac{10\sqrt{3h}}{3T^2}\ \dddot{q}_{max} = \frac{60h}{T^3}$
Гармонійна	$\dot{q}_{max} = \frac{\pi h}{2T}\ \ddot{q}_{max} = \frac{\pi^2 h}{2T^2}\ \dddot{q}_{max} = \frac{\pi^3 h}{2T^3}$
Циклоїдна	$\dot{q}_{max} = 2\frac{h}{T}\ \ddot{q}_{max} = 2\pi\frac{h}{T^2}\ \dddot{q}_{max} = 4\pi^2\frac{h}{T^3}$

Ми можемо спланувати траєкторію з $q_i = 10°$, $q_f = 50°$, для приводів з такими характеристиками $\dot{q}_{max} = 30°/c$, $\ddot{q}_{max} = 80°/c$. В практиці використовується рівняння таких траєкторій результати яких наведенні в таблиці 3.4, коли h = 40 °.

Таблиця 3.4 – Кінематичний розрахунок траєкторії

Траєкторія	Формули	Обмеження	T_{min}
Полінома третього степеня	$\begin{cases} \dot{q}_{max} = \frac{3h}{2T} \\ \ddot{q}_{max} = \frac{6h}{T^2} \end{cases}$	$\begin{cases} T = \frac{3h}{60} = 2 \\ T = \sqrt{\frac{6h}{80}} = 1{,}732 \end{cases}$	2
Полінома п’ятого степеня	$\begin{cases} \dot{q}_{max} = \frac{15h}{8T} \\ \ddot{q}_{max} = \frac{10\sqrt{3h}}{3T^2} \end{cases}$	$\begin{cases} T = \frac{15h}{240} = 2{,}5 \\ T = \sqrt{\frac{10\sqrt{3h}}{240}} = 1{,}699 \end{cases}$	2,5
Гармонійна	$\begin{cases} \dot{q}_{max} = \frac{\pi h}{2T} \\ \ddot{q}_{max} = \frac{\pi^2 h}{2T^2} \end{cases}$	$\begin{cases} T = \frac{\pi h}{60} = 2{,}094 \\ T = \sqrt{\frac{\pi^2 h}{160}} = 1{,}571 \end{cases}$	2,094
Циклоїдна	$\begin{cases} \dot{q}_{max} = 2\frac{h}{T} \\ \ddot{q}_{max} = 2\pi\frac{h}{T^2} \end{cases}$	$\begin{cases} T = 2\frac{h}{60} = 2{,}667 \\ T = \sqrt{2\pi\frac{h}{80}} = 1{,}772 \end{cases}$	2,667

Висновки. В даному розділі було успішно розроблено та імплементовано математичну модель узгодженого руху двох маніпуляторів на базі кватерніонів. Інтегрована підсистема безпеки, заснована на спрощених геометричних моделях (капсулах) та реактивній логіці керування швидкістю веденого робота, що має довести свою ефективність у запобіганні колізіям у розділі тестування.

З таблиці 3.4 можемо зробити висновок, що за допомогою кінематичного розрахунку траєкторії можна не тільки задовольнити обмеження на систему приводу, які виникли в умовах насиченості, але і визначити мінімальний час проходження шляху для різних траєкторій, що дасть нам змогу вибрати найбільш оптимальну траєкторію.

4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗОВАНИМИ РОБОТИЗОВАНИМИ МАНІПУЛЯТОРАМИ

4.1Структура інтерфейсу для управління та моніторингу маніпуляторів

Розроблений графічний інтерфейс користувача призначений для забезпечення ефективної та безпечної взаємодії оператора з комплексом двох роботизованих маніпуляторів у режимі реального часу. Головними функціями інтерфейсу є візуалізація поточного стану роботів та робочого середовища, надання інструментів для задання технологічних завдань, а також відображення критично важливої діагностичної інформації від підсистеми безпеки та технічного зору.

Інтерфейс побудовано за модульним принципом, де функціональні блоки згруповані у відповідні панелі для інтуїтивного сприйняття інформації оператором.

Загальна структура головного вікна програми складається з п'яти основних функціональних зон (рис. 4.1):

- центральна панель 3D-візуалізації сцени;
- панель керування режимами та завданнями;
- панель моніторингу стану маніпуляторів (Master/Slave);
- панель діагностики системи безпеки та запобігання колізіям;
- панель трансляції даних системи технічного зору.

1. Центральна панель 3D-візуалізації сцени.

Ця панель є основним елементом моніторингу просторового положення системи. Вона транслює «цифровий двійник» робочого середовища із симулятора (CoppeliaSim) у реальному часі. Окрім фотореалістичного відображення маніпуляторів та об'єктів, ключовою

особливістю цієї зони є візуалізація службової геометричної інформації системи безпеки:

Напівпрозорих капсул, що апроксимують ланки маніпуляторів.

Динамічних векторів (ліній), що з'єднують найближчі точки між потенційно конфліктуючими об'єктами (Master-Slave, Робот-Перешкода). Колір цих ліній змінюється залежно від відстані (наприклад, зелений → жовтий → червоний), сигналізуючи про рівень небезпеки.

2. Панель керування режимами та завданнями.

Містить елементи інтерфейсу (кнопки, перемикачі, поля введення) для оперативного керування комплексом:

– кнопка «Аварійна зупинка» (E-STOP): програмний аналог фізичної кнопки безпеки, що миттєво зупиняє обидва маніпулятори;

– вибір режиму роботи: меремикання між режимами (наприклад, «Ручне керування окремими роботами», «Автоматичне виконання траєкторії», «Кооперативний режим Master-Slave»).

– завантаження/запуск траєкторій: вибір файлів із попередньо розрахованими траєкторіями руху.

3. Панель моніторингу стану маніпуляторів.

Ця зона розділена на дві незалежні підсекції для «Master» та «Slave» маніпуляторів відповідно. Для кожного робота в реальному часі відображаються:

Поточні значення узагальнених координат (кутів поворотів у шарнірах).

Декартові координати та орієнтація (у кутах Ейлера або кватерніонах) робочого органу в базовій системі координат.

Поточний статус виконання завдання (наприклад: «Очікування», «Рух до цілі», «Завершено»).

4. Панель діагностики системи безпеки.

Ця панель є критично важливою для оцінки роботи алгоритму запобігання колізіям. Вона відображає ключові метрики в реальному часі:

– мінімальна дистанція (d_{min}): Числове значення найкоротшої відстані між об'єктами в робочій зоні;

– коефіцієнт масштабування швидкості (S_v): графічний індикатор (слайдер або прогрес-бар) та числове значення поточного коефіцієнта (від 0% до 100%), що показує, наскільки система безпеки сповільнює Slave-маніпулятор;

– статус тривог: кольорові індикатори зон безпеки (наприклад: «Норма», «Зона попередження», «Критична зона/Зупинка»).

5. Панель трансляції даних системи технічного зору.

Відображає відеопотік з віртуальної камери, встановленої в робочій зоні. Панель може працювати у двох режимах:

– «сире» зображення: пряма трансляція RGB-зображення.

– оброблене зображення: відображення результатів роботи алгоритмів комп'ютерного зору, наприклад, накладання обмежувальних рамок на детектовані динамічні перешкоди або підсвічування сегментованих об'єктів за кольором.

Така структура інтерфейсу забезпечує оператора повною ситуаційною обізнаністю, дозволяючи контролювати як виконання технологічного процесу, так і коректність роботи автоматичних систем безпеки.

4.2 Аналіз технологічних процесів та відображення за допомогою CoppeliaSim

Робототехнічний симулятор CoppeliaSim з інтегрованим середовищем розробки, що базується на архітектурі розподіленого керування: кожним об’єктом/моделлю можна окремо керувати за допомогою вбудованого сценарію, плагіна, вузла ROS, віддаленого клієнта API або використовувати індивідуальне рішення. Це робить CoppeliaSim дуже універсальним і ідеальним для застосування з декількома роботами. Контролери можуть бути написані на C/C++, Python, Java, Lua, Matlab або Octave. CoppeliaSim

використовується для швидкої розробки алгоритмів, моделювання автоматизації виробництва, швидкого створення прототипів і перевірки, навчання, пов’язаного з робототехнікою і багато іншого.

У середовищі CoppeliaSim існує два основні підходи до вирішення зворотної задачі кінематики (ЗЗК):

– через налаштування у графічному інтерфейсі

– за допомогою написання скриптів.

Для моделювання роботи з маніпулятором NiryoOne застосовується другий підхід – програмування у скриптах. Ідея методу полягає в тому, щоб змусити кінцеву точку маніпулятора рухатися синхронно з цільовим об'єктом по одній траєкторії. Реалізується це шляхом задання руху цілі в коді програми та встановлення батьківського зв'язку між нею та робочим органом робота. Таким чином, вирішення ЗЗК зводиться до забезпечення слідування робочого органу за ціллю. Для чисельного розрахунку ЗЗК CoppeliaSim пропонує різні методи, зокрема метод найменших квадратів, доступний через інтерфейс.

Модель NiryoOne у CoppeliaSim має структуру, що відповідає її документації.

1. Фізичний рівень (ієрархія сцени)

Це «скелет» симуляції. У дереві об'єктів (Scene Hierarchy) це зазвичай виглядає так:

Robot_1_Base (база робота 1)

Joint_1 (обертальні з'єднання)

Link_1 (ланки корпусу)

Joint_6

Gripper (захват/інструмент)

Sensor (датчик наближення для виявлення деталі)

Robot_2_Base (база робота 2) – аналогічна структура.

Environment (робочий стіл, конвеєр, перешкоди).

Product/Cuboid (Об'єкт маніпуляції).

2. Кінематичний рівень

Щоб роботи рухалися не просто по кутах суглобів, а в конкретні точки простору (X, Y, Z), використовується інверсна кінематика (IK).

IK Group: спеціальний об'єкт у CoppeliaSim, який пов'язує:

– Tip: точка на кінці захвату робота (реальне положення);

– Target: точка-пустушка (Dummy), куди робот має прийти;

– Path (Шлях): якщо рух заданий траєкторією, в сцені буде об'єкт «Path», прив'язаний до робота.

3. Рівень безпеки

Це саме те місце, де вирішується ваша проблема із зіткненнями. У професійно налаштованій сцені мають бути створені Collections (олекції):

Collection_Robot1: включає всі частини першого робота.

Collection_Robot2: включає всі частини другого робота.

Collection_Environment: Столи, стійки, нерухомі об'єкти.

Логіка перевірки колізій (у коді або налаштуваннях):

Перевірка 1: Collection_Robot1 VS Collection_Robot2 (Робот об робота).

Перевірка 2: Collection_Robot1 VS Collection_Environment.

4. Логічний рівень

Це «мозок» системи, що зазвичай використовується одна з двох моделей:

Модель А: Централізована («Master» - «Slave»)

Є один Main Script (або скрипт на окремому об'єкті-пустушці «Controller»), який керує обома роботами:

Я даю команду роботу 1 взяти деталь. Поки він не закінчить і не відійде в безпечну зону, робот 2 стоїть і чекає (блокування).

Модель Б: Децентралізована (Сигнали)

Кожен робот має свій скрипт і спілкується через Signals (глобальні змінні):

Робот 1: «Входить в небезпечну зону»

> sim.setIntegerSignal('Zone_Busy', 1)

Робот 2: перед рухом перевіряє: «Зона вільна?»

> if sim.getIntegerSignal('Zone_Busy') == 0 then move() else wait() end

Структура зображена в дереві моделі, показаному на рисунку 4.1.

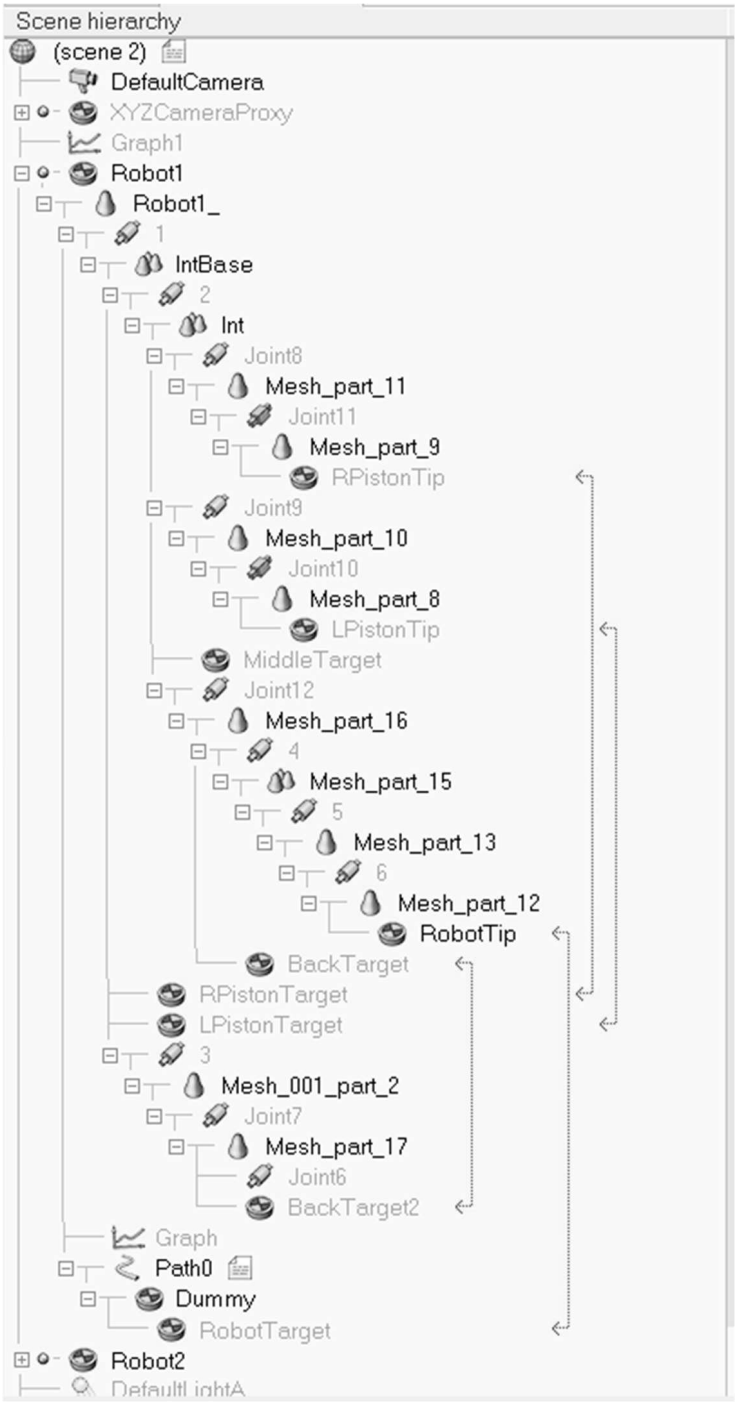


Рисунок 4.1 – Ієрархія частин маніпулятора

4.2.1 Проектування маніпулятора

Привід руху маніпулятора розділено на 4 етапи. Компресор використовує електрику для вироблення стисненого повітря. Будь-який з них може бути джерелом живлення для пневматичної системи, накопичуючи потенційну енергію. З компресора це повітря переміщалося в резервуар. Він зберігається тут доти, доки роботизований маніпулятор не буде задіяний, щоб можна було використовувати систему негайно, а не чекати, доки повітряний компресор створить достатній тиск.

Ефектор робота розміщується за допомогою трьох паралелограмних механізмів, які складаються з наступних наборів ланок: {1,2,4,6}, {0,1,3,5} і {5,6,7,8}. Для кожного руху роботизованого маніпулятора ланки 0, 5 та 8 паралельні одна одній, і тим самим завжди тримають ефектор (ланка 8) паралельним горизонталі.

На рис. 4.2 показана кінематична схема руки промислового робота.

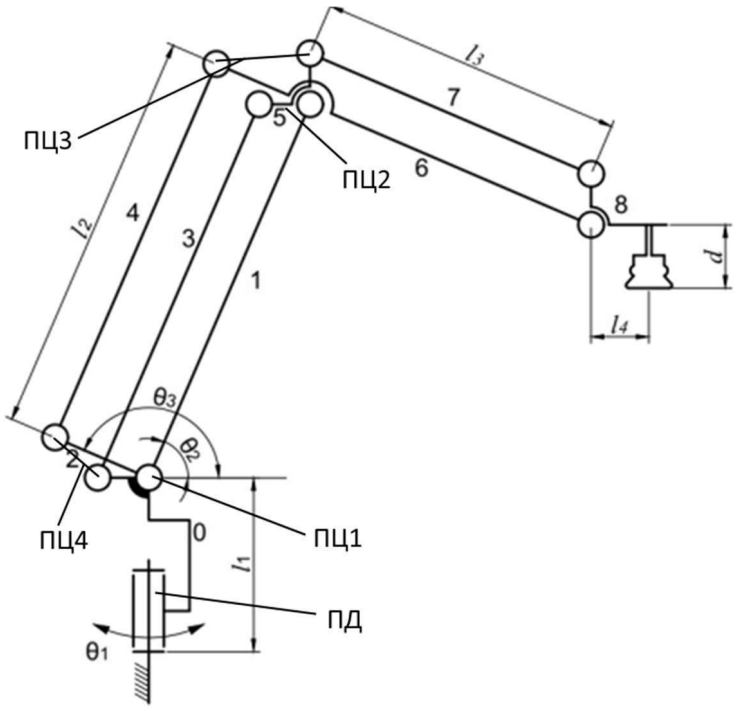


Рисунок 4.2 – Кінематична схема робота-маніпулятора [7]

На схемі позначені місця встановлення основного приводного механізму пневмодвигуна реверсивного (ПД), який забезпечує обертання маніпулятора на платформі навколо своєї вісі. А також чотирьох пневматичних циліндрів (ПЦ-1…ПЦ4), що запеспечують рух окремих частин роботизованого маніпулятора, і чотирьох п'ятилінійних трипозиційних розподільників (Р1…Р5) – клапанів, які керують потоком повітря до і від пневмоциліндрів. Розподільний колектор (РК), який розподіляє стиснене повітря до всіх елементів схеми від компресора

Робот має три ступені свободи, що відповідають кутам обертання θ_1, θ_2 і θ_3. Три крокові двигуни, розміщені на кожному з'єднанні, використовуються для управління рухами ланок 0, 1 і 2. Ці рухи плануються для створення бажаного руху ефектора. Перед плануванням траєкторії необхідно визначити значення кутів з'єднань, розв'язавши кінематичну задачу.

Для вибору двигуна необхідно визначити його споживчу потужність по параметрам вихідного елемента механізму, використано формулу:

$$\text{P} = \frac{F \cdot V}{\eta_{\text{общ}}} = \frac{950 \cdot 0{,}041}{0{,}913} = 42{,}664 \text{ Вт.} \qquad (4.1)$$

де F – зусилля опору переміщенню, Н;

v – швидкість переміщення м/с;

$\eta_{\text{общ}}$ – ККД всього механізму, який визначається по формулі:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_1 \; [1, \text{табл. } 3, \text{стор. } 15] = 0{,}913$$

В конструкціях роботів широко застосовують гвинтову передачу. В даному проєкті використовується кульково-гвинтову передачу. Порівнянно з гвинтови передачами з тертям ковзання вони характеризуються значно більшим ККД, меньшим зношенням, більшою точністю ходу і підвищеною довговічністю.

В гвинтових кулькових парах між робочими поверхнями гайка і гвинт поміщені сталеві кульки.

Кулькові передачі відрізняються одна від одної в основному формою профілю витків різьби. Приміняють профілі витків гвинта і гайки: круглі, овальні, трикутні і прямокутні. В даному проєкті обрано круглий профіль витків різьби.

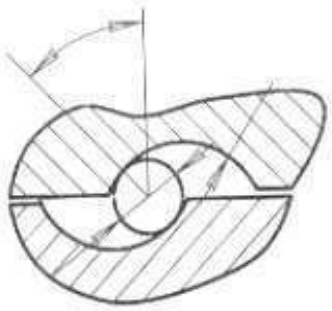


Рисунок 4.3 – Кулькова передача з круглим профілем різьби

Вибір матеріалу для гвинта – легована сталь 30ХГСА і для гайки – ШХ9.

Таблиця 4.1 – Межі плинності і міцності сталей

	Гвинт	Гайка
$\sigma_в$, МПа	1100	700
$\sigma_т$, МПа	850	375

Визначемо допустимі напруження на розтягнення-стиск:

а) гвинт [σ] = 0,3σТ = 0,3 · 850 = 340 МПа;

б) гайка [σ] = 0,3σТ = 0,3 · 375 = 150 МПа.

Визначимо внутрішній діаметр d_1 різьби гвинта з умовами.

1) Міцність і стійкість (для гвинтів будь-якої величини):

$$d_1 = \sqrt{\frac{4kF}{\pi[\sigma]\varphi(1-\alpha^2)}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}3 \cdot 950}{3{,}14 \cdot 340 \cdot 0{,}54}} = 5{,}343 \text{ мм} \qquad (4.2)$$

2) Гнучкість (по Ясинському):

$$d_1 = \frac{\gamma l}{\theta[\gamma]} = \frac{1 \cdot 560}{0{,}25 \cdot 70} = 18{,}67 \text{ мм} \qquad (4.3)$$

де d_1 – внутрішній діаметр різьби гвинта, мм;

k – коефіцієнт, який враховує дію скручувальних моментів гвинтової пари і опорної п’яти;

F – осьова сила, Н;

a = d_0/ d_1 – відношення внутрішнього діаметру до зовнішнього, для суцільного перерізу a = 0;

φ – коефіцієнт зменьшення основного припустимого напруження, обирається з довідника;

γ – коефіцієнт приведення довжини гвинту;

θ – коефіцієнт повноти гнучкості;

l – хід гвинта l = S, мм.

Приймаємо d_1 = 21,8 мм.

Отримане значення $d_ш$ округлюємо до найближчого стандартного діаметру кульок по (ГОСТ 3922-81):

$$d_ш = 0{,}2 \cdot 21{,}8 = 3{,}175 \text{ мм}$$

Визначимо радіус жолоба:

$$r_ж = 0{,}52 \cdot 3{,}175 = 1{,}68 \text{ мм}$$

Визначимо середній діаметр різьби:

$$D_{ср} = d_1 + 2(r_ж - a) = 21{,}8 + 2(1{,}68 - 0{,}084) = 25 \text{ мм} \qquad (4.4)$$

де а – величина зсуву центра радіусів профілей гвинта і гайки відносно центру кульки.

$$\text{а} = (r_{\text{ж}} - 0{,}5d_{\text{ш}}) \cdot cos\alpha_k = (1{,}68 - 0{,}5 \cdot 3{,}175) \cdot cos45° = 0{,}084 \qquad (4.5)$$

Приймаємо $D_{\text{ср}} = 25$ мм.

Крок різьби Р = 8 мм.

Визначимо число кульок в робочій області різьби по формулі:

$$Z_{\text{ш}} = \frac{\pi D_{cp} k}{d_{\text{ш}}} - 1 = \frac{3{,}14 \cdot 25 \cdot 2{,}5}{3{,}175} - 1 = 60 \qquad (4.6)$$

де k – число витків в одній замкнутій робочій області.

Визначимо довжину гайки:

$$L_2 = [\text{К}_0 + 1{,}5] \cdot \text{Р} = 30 \text{ мм} \qquad (4.7)$$

Визначимо зовнішній діаметр з умовою міцності її тіла на розтягнення-стиск

$$D_2 = \sqrt{\frac{4F}{\pi[\sigma]} + D_1^2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 950}{3{,}14 \cdot 150} + 26{,}29^2} = 28{,}343 \text{ мм} \qquad (4.8)$$

де F – осьова сила.

За умови D2 < D1 + 2P тоді з конструктивних міркувань приймаємо D2 < D1 + 2PD2.

Перевіряємо на міцність тіло гайки по приведеній напрузі з урахуванням її роботи на розтягнення-стиск і кручення відповідно умовам:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{F}{\mathrm{A}_2}\right)^2 + 4\left(\frac{\mathrm{T}_{\text{кр}}}{W_2}\right)^2} \leq [\sigma] = 7{,}07 \qquad (4.9)$$

де F – осьова сила;

$$\mathrm{T}_{\text{кр}} = F\frac{D_{\text{ср}}}{2}tg\left(\Psi + arctg\frac{k_1}{d_{msina_k}}\right) = 951\ \text{Н}\cdot\text{м} \qquad (4.10)$$

Крутний момент в кульковій парі:

(К1 = 0,008…0,01 мм)

$$\mathrm{A}_2 = \frac{\pi}{4}(D_2^4 - D_1^4) = 521{,}5\ \text{мм}^2 \qquad (4.11)$$

Площа поперечного перерізу тіла гайки по зовнішньому діаметру її різба:

$$W_2 = \frac{\pi(D_2^4 - D_1^4)}{16\cdot D_2} = 7{,}695\ \cdot 10^3 \qquad (4.12)$$

Полярний момент опору того самого перерізу:

Перевіряємо на міцність гвинт по приведеному напруженню з урахуванням роботи гвинта на розтягнення і кручення у відповідності з умовою:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{F}{A_b}\right)^2 + 4\left(\frac{T_{\text{кр}}}{W_b}\right)^2} \leq [\sigma] \qquad (4.13)$$

Площа поперечного перерізу гвинта по внутрішньому діаметру її різьби:

$$A_b = \frac{\pi}{4} d_1^2 (1 - a^2) = 134{,}37 \qquad (4.14)$$

Полярний момент опору того ж перерізу:

a = d_0/d_1 – відношення діаметра отвору полого гвинта до внутрішньому діаметру різьби для суцільного перерізу a = 0.

$$W_b = \frac{\pi}{16} d_1^3 (1 - a^4) = 1203 \qquad (4.15)$$

Перевіряємо кулькову передачу на довговічність (в годинах) по формулі:

$$L_h = \frac{1}{n_b} \left(\frac{15 \cdot Z_{ш}^{0,7} \cdot \varphi_m \cdot d_m^2}{[F_m]} \right)^{10/3} \geq [L_h] = 2{,}357 \cdot 10^4$$

$$\geq 2 \cdot 10^4 \qquad (4.16)$$

де φ –коефіцієнт коректування.

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0{,}002 \cdot d_m} = \frac{1}{1 + 0{,}002 \cdot 8} = 0{,}994 \qquad (4.17)$$

$n_в$ – частота обертання гвинта, мін $^{-1}$

$$n_в = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot v}{P \cdot n_1} = 492 \text{ мін}^{-1} \qquad (4.18)$$

Визначимо критичну частоту обертання холодного гвинта:

$$n_{\text{кр}} = 13{,}9 \cdot 10^7 \frac{d_n}{l^2} = 7722 \qquad (4.19)$$

де d_n = (0,4…0,6)d, мм;

l – відстань між опорної і серединної гайки для гвинта чи між опорною і серединної гайки, мм.

$$d_n = 0{,}6 \cdot 25 = 15 \text{ мм} \qquad (4.20)$$

Визначення загального передаточного відходження по формулі:

$$U_{\text{общ}} = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{в}}} = \frac{2000}{492} = 4{,}06 \qquad (4.21)$$

Через те що, в нас одна ступінь, то приймаємо:

$$U_{\text{зр}} = U_{\text{заг}} = 4{,}06$$

де $n_в$ – частота обертання гвинта, мін$^{-1}$

$$n_{\text{в}} = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot v}{P \cdot n_1} = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 0{,}041}{8 \cdot 1} = 492 \qquad (4.22)$$

де v – осьова швидкість переміщення гвинта, м/с;

P – крок різьби, мм;

n_l – число заходів гвинта.

Перспективним видом гнучкого зв’язку є зубчасті ремені. Вони мають високу тягову здатність і порівняно великий ККД. Передачі такого типу

працюють без змащення, стійкість до дії абразивних і агресивних середовищ, що дозволяє синхронізувати рух вхідної і вихідної ланок, прості в експлуатації.

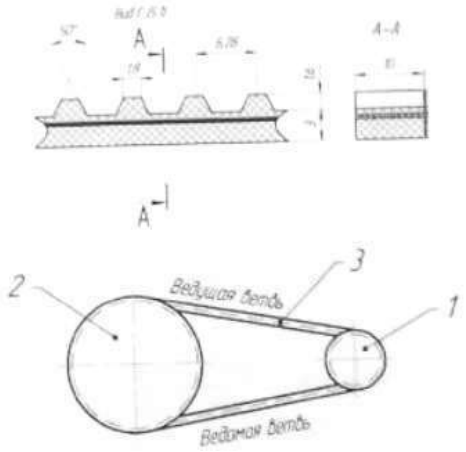


Рисунок 4.4 – Зубчаста ремінна передача

Найпростіша передача з зубчасним ременем складається з провідного 1 і веденого 2 шкивів і охоплюючого їх зубчатого ременя 3.

Перед розрахунком необхідно підібрати електричний двигун, визначити загальне передавальне відношення механізму вцілому, розподілити його по ступеням і визначити моменти, потужності і частоти обертання на провідному і веденому шкивах зубчато-ременної передачі.

Визначимо необхідну потужність електродвигуна:

$$P_{спож} = \frac{T_\omega}{\eta_{заг}}, \tag{4.23}$$

$$\eta_{заг} = \eta_{зр}\eta_{вр}\eta_{підш}^3 \tag{4.24}$$

де $\eta_{зр}$ = 0,97 – ККД зубчастої передачі;

$\eta_{зр}$ = 0,9 – ККД волнової зубчастої передачі;

$\eta_{підш}^3$ – ККД підшипників.

$$\eta_{заг} = 0{,}97 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}99 = 0{,}913$$

$$P_{спож} = \frac{12{,}2 \cdot 3{,}5}{0{,}913} = 41{,}38 \text{ (Вт)}$$

Розподіляємо загальне передавальне відношення механізму і цілому по ступеням. Приймаємо $U_{зр} = U_{заг} = 3{,}6$.

Визначаємо момент, потужність і частоту обретання на веденому шкиві зубчато-ремінної передачі:

$$T_2 = T_1 \cdot U_{зр} \cdot \eta_{1уч} = 2 \cdot 4{,}06 \cdot 0{,}913 = 7{,}8 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.25)$$

Частота обертання:

$$n_2 = \frac{n_1}{U_{зр}} = \frac{2000}{4{,}06} = 488 \text{ мін}^{-1} \quad (4.26)$$

Потужність:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_{1уч} = 42{,}64 \cdot 0{,}97 = 41{,}38 \text{ Вт} \quad (4.27)$$

По величині крутного моменту на провідному шкиві обираємо модуль зубчатого ременя:

$$m = 3$$

Визначимо число зубців малого шкиву: $Z_1 = 14$

Знаючи передавальне відношення зубчатого реміня визначаємо число зубців веденого шкива:

$$Z_2 = Z_1 \cdot U_{зр} = 14 \cdot 4{,}06 = 56{,}4 \quad (4.28)$$

Приймаємо $Z_2 = 56$

Діаметри провідного і веденого шкивів:

$d_1 = m \cdot Z_1 = 3 \cdot 14 = 42$ мм;

$d_2 = m \cdot Z_1 = 3 \cdot 56 = 168$ мм.

Швидкість ременя $V_{окр}$ використовується залежність:

$$V_{\text{окр}} = \frac{m \cdot Z_1 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = 4189 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 4{,}189 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (4.29)$$

Діюча частота веденого шкива:

$$n_2 = (1 - \varepsilon) n_1 \frac{d_1}{d_2} = 488 \text{ мін}^{-1} \quad (4.30)$$

Уточнення передавального відношення:

$$U_{\text{общ}} = \frac{n_1}{n_2} = 4{,}09 \quad (4.31)$$

Основні параметри зубчатого ременя і шкивів наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні параметри зубчатого ременя і шкивів

Параметри	Позн.	Значення
Модуль зачеплення, мм	m	3
Число зубців ременя	$Z_р$	84
Крок ременя, мм	$P_р$	6,28
Ширина зубу ременя, мм	S	1
Висота зубу ременя, мм	h	1,6
Товщина каркасу ременя, мм	H	3
Відстань від впадини зубу до нейтрального шару ременя, мм	δ	0,3
Кут профіля зубу, град	γ	50

Продовження таблиці 4.2

Параметри	Позн.	Значення
Ширина стрічки, мм	B	20
Ширина зубу шкива, мм	$S_ш$	3,2
Висота зубу шкива, мм	$h_ш$	2,7
Міжосьова відстань, мм	a	353
Тривалий діаметр провідного шкива, мм	d_1	40
Тривалий діаметр веденого шкива, мм	d_2	162
Діаметр вершини зубців провідного шкива, мм	d_{a1}	38
Діаметр вершини зубців веденого шкива, мм	d_{a2}	158
Діаметр впадини зубців проведного шкива, мм	d_{f1}	35,4
Діаметр впадини зубців веденого шкива, мм	d_{f2}	120
Радіус заокруглення головки зубців, мм	r_3	1,05
Радіус заокруглення впадини зубців, мм	r_4	1,2
Довжина зубців, мм	B3	23

4.2.2 Побудова принципіальної схеми для підключення маніпуляторів

Розробка принципової електричної схеми є критичним етапом переходу від теоретичного моделювання кінематики та динаміки маніпуляторів до їх фізичної імплементації.

Схема визначає електричну архітектуру роботизованого комплексу, об'єднуючи в єдину систему різнорідні компоненти: виконавчі механізми (сервоприводи або драйвери крокових двигунів), сенсори зворотного зв'язку (енкодери, кінцеві вимикачі), підсистему живлення та силової комутації. Від правильності проектування цього етапу напряму залежать надійність, точність позиціювання, електромагнітна сумісність та безпека функціонування всього комплексу.

Центральним елементом цієї схеми, її обчислювальним ядром, виступає мікроконтролер, який повинен забезпечувати обробку сенсорних

даних та генерацію керуючих сигналів у режимі реального часу. В якості головного обчислювального пристрою для системи керування маніпуляторами обрано платформу на базі мікроконтролера ESP32 (рис. 4.5) від компанії Espressif Systems. Цей вибір зумовлений низкою технічних характеристик, які роблять даний чіп оптимальним рішенням для задач сучасної робототехніки, особливо в контексті керування багатоланковими механізмами.

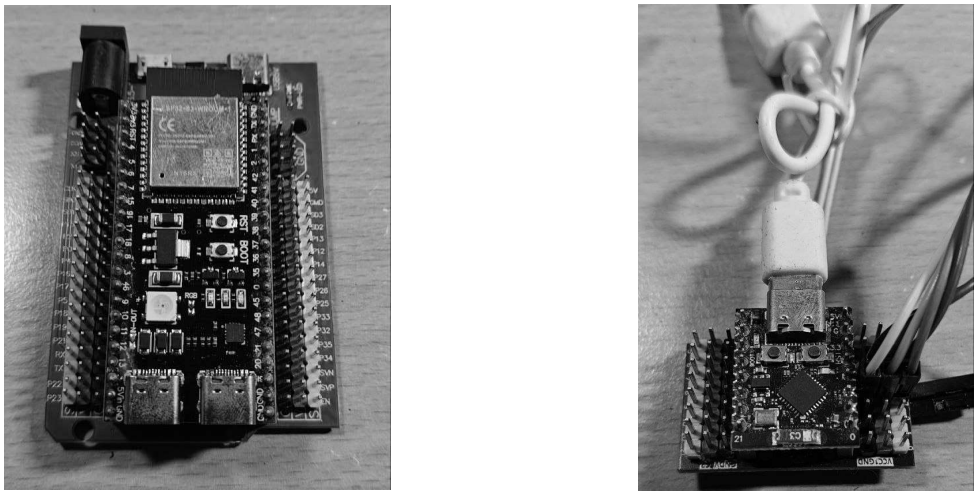


Рисунок 4.5 – Контролери ESP32

Технічні характеристики:

1. Процесор: Tensilica Xtensa LX6, двоядерний (або одноядерний), 32-розрядний.

- тактова частота: 160 або 240 МГц;
- продуктивність: до 600 DMIPS (Dhrystone MIPS);
- співпроцесор: з ультранизьким енергоспоживанням;
- пам'ять: 520 КБ SRAM.

Бездротовий зв'язок:

- Wi-Fi: 802.11 b/g/n;
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR та BLE.

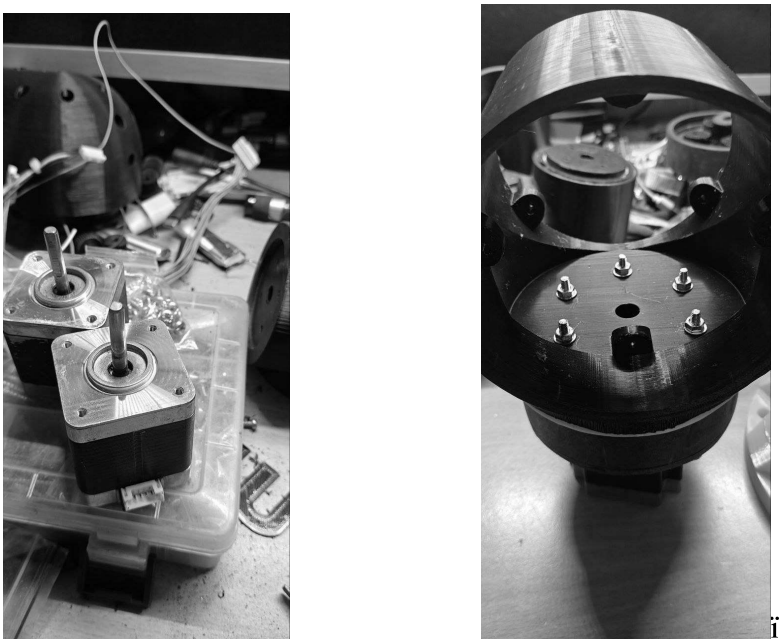
Периферійні інтерфейси:

– АЦП (Аналого-цифровий перетворювач): 12-разрядний, до 18 каналів;

– ЦАП (Цифро-аналоговий перетворювач): 2 × 8 біт;

– сенсорні інтерфейси: 10 портів для підключення ємнісних датчиків (GPIO, що вимірюють ємність).

Шагові двигуни NEMA 17 і NEMA 23 (рис. 4.6) відрізняються перш за все розмірами монтажного фланця: NEMA 17 має фланець 1,7 х 1,7 дюйма (близько 42 мм), а NEMA 23 – 2,3 х 2,3 дюйма (близько 57 мм).



ї

Рисунок 4.6 – Шагові двигуни NEMA17 и NEMA23

Для завдань комп'ютерного зору, таких як бездротова ідентифікація рухів маніпулятора обрано камеру ESP32-CAM (рис. 4.7) – це компактний та недорогий модуль розробки з підтримкою Wi-Fi, Bluetooth та вбудованою камерою, призначений для створення IoT-пристроїв з функціями відеоспостереження.



Рисунок 4.7 – Камера ESP32-CAM

Технічні характеристики:

1. Мікроконтролер: використовує двоядерний 32-бітний мікропроцесор Xtensa LX6 ESP32, що працює на частоті до 240 МГц.

2. Бездротовий зв'язок: Оснащений модулем Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth 4.2 LE, що дозволяє легко підключати його до мережі та інших пристроїв.

3. Камера: у стандартній комплектації зазвичай постачається з камерою OV2640 з роздільною здатністю 2 мегапікселі (максимум 1600x1200 пікселів). Можлива також установка камери OV7670.

4. Пам'ять: має 4 МБ зовнішньої флеш-пам'яті та 520 КБ вбудованої SRAM.

5. Зберігання даних: вбудований слот для карт microSD дозволяє зберігати зображення та відео локально (підтримка до 4 ГБ).

6. Інтерфейси: надає 9 програмованих виводів GPIO (General Purpose Input/Output), а також інтерфейси UART, SPI, I2C, PWM для підключення периферійних пристроїв.

7. Живлення: працює від джерела живлення 5 В.

Інші компоненти системи представлені на рис. 4.8 – 4.10.



Рисунок 4.8 – Драйвера крокових двигунів

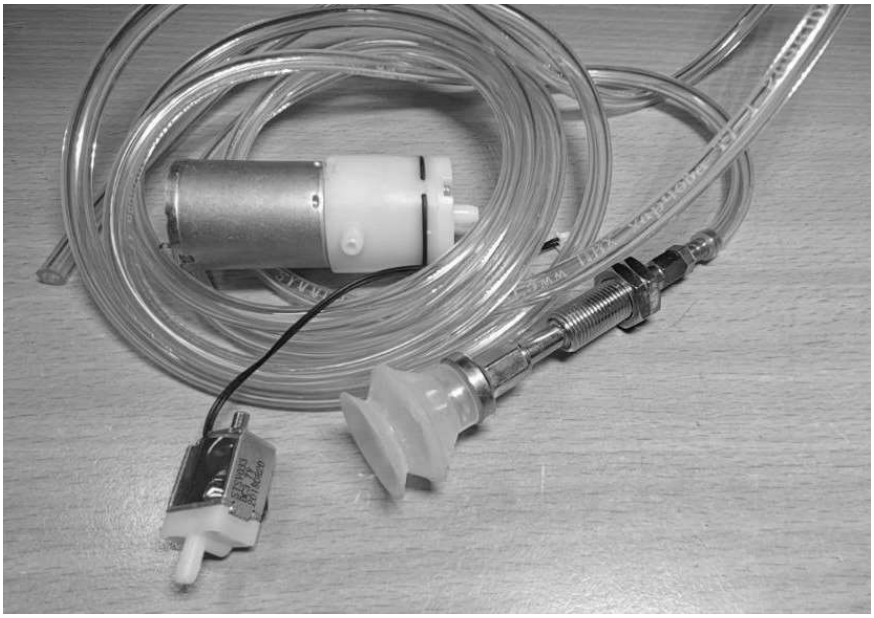


Рисунок 4.9 – Вакуумний захват



Рисунок 4.10 – Блок живлення 24 В

На рисунках 4.11 – 4.12 представлено фотографію фізичного прототипу малогабаритного роботизованого маніпулятора з послідовною кінематичною структурою.

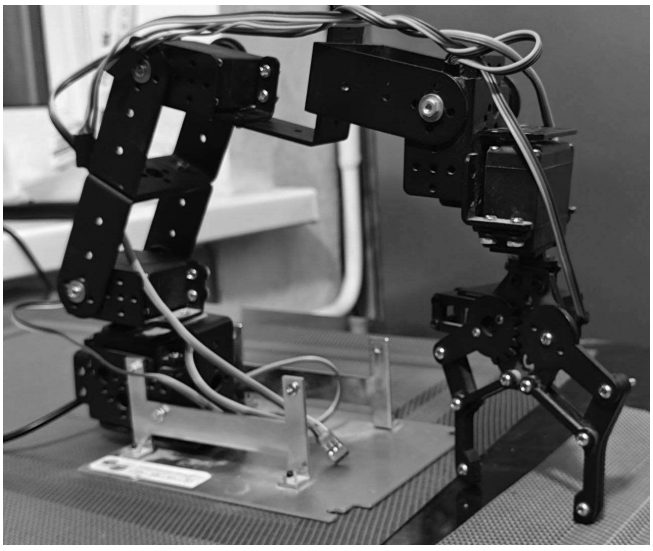
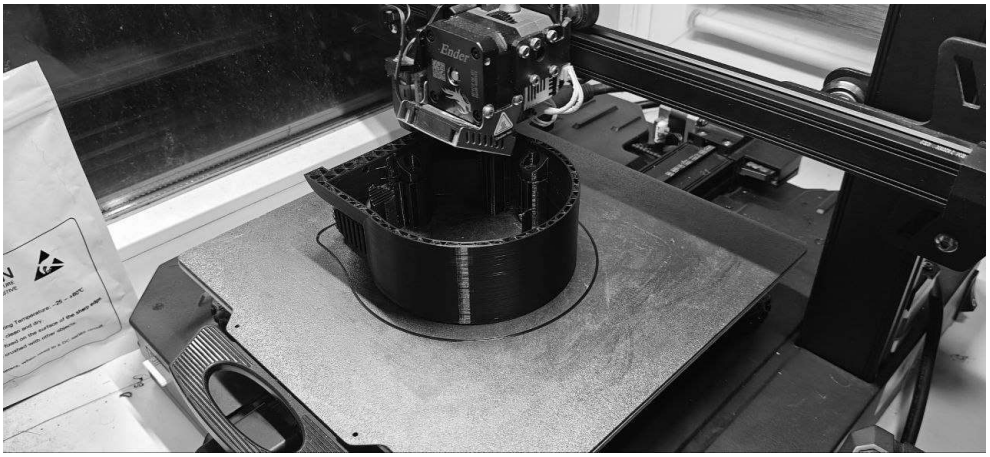


Рисунок 4.10 – Прототип маніпулятора

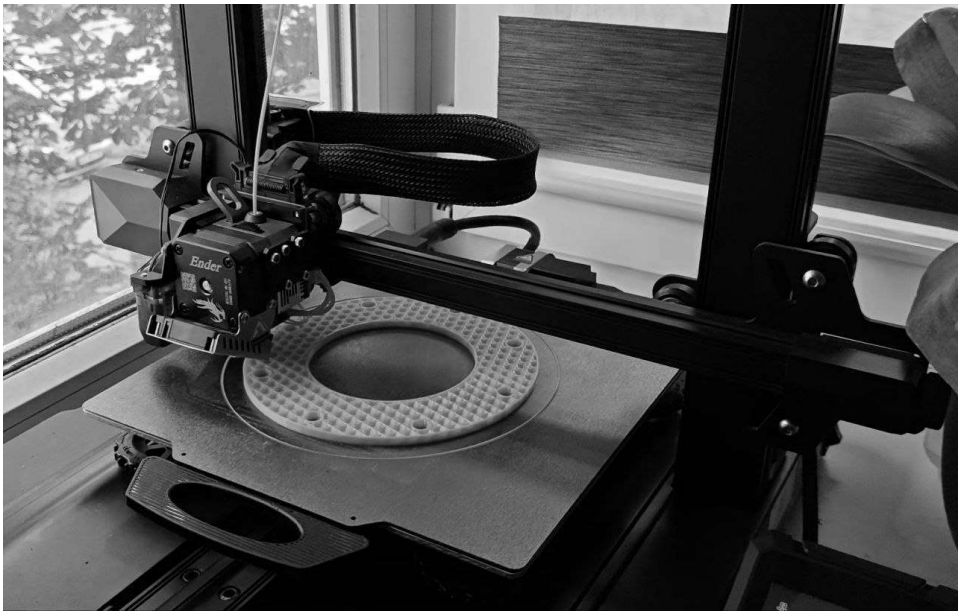


Рисунок 4.11 – Колаборативний робот у збірці

Етап 3-D друку деталей розробки наведені на рис. 4.13.



а



б



в

а, б, в – Етапи друку деталей

Рисунок 4.13 – 3-D друку деталей розробки

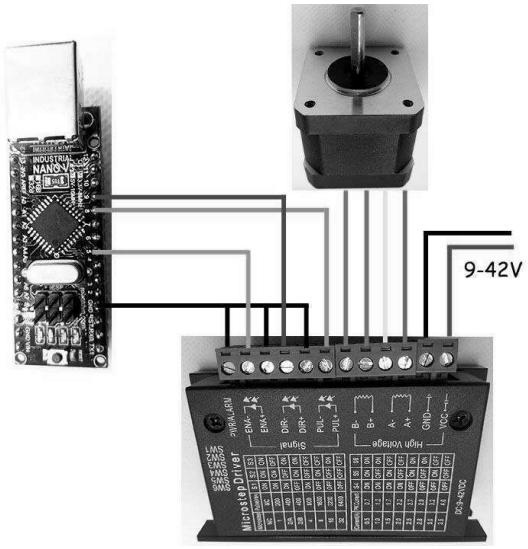


Рисунок 4.14 – Принципіальної схеми підключення маніпуляторів

4.2.3 Реалізація програмного забезпечення для управління маніпуляторами

Мета скрипту змусити об’єкт рухатися циклічно по заданій траєкторії у CoppeliaSim. Алгоритм роботи:

– отримує шлях і задає швидкість;

– щокадру визначає положення об’єкта;

– інвертує швидкість, коли об’єкт доходить до кінця або початку шляху;

– оновлює позицію вздовж траєкторії.

Реалізований скрипт програми наведено на рис. 4.15.

Simulation script "/Robot1/Path0"

```
if (sim_call_type==sim.syscb_init) then
    path=sim.getObjectHandle(sim.handle_self)
    sim.setPathTargetNominalVelocity(path,0) -- for backward compatibility
    beltVelocity=0.1
end


if (sim_call_type==sim.syscb_actuation) then
    local dt=sim.getSimulationTimeStep()
    local pos=sim.getPathPosition(path)
    local l=sim.getPathLength(path)
    if pos>0.999*l and beltVelocity>0 then
        beltVelocity=-beltVelocity
    end
    if pos<0.001*l and beltVelocity<0 then
        beltVelocity=-beltVelocity
    end
    pos=pos+beltVelocity*dt
    sim.setPathPosition(path,pos) -- update the path's intrinsic position
end
```

Рисунок 4.15 – Скрипт програми симуляції роботи маніпуляторів в одні робочій зоні

5. ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

В кваліфікаційній роботі проведено тестування системи управління в режимі реального часу для сценарію, де виявлено критичну помилку: колізію (зіткнення) двох роботизованих маніпуляторів.

Умови тестового Сценарію

Режим: симуляція з жорсткими часовими обмеженнями, де dt – крок симуляції, є фіксованим).

Об'єкти: два маніпулятори (6-осьові).

Завдання: виконання руху за попередньо розрахованими траєкторіями.

Інцидент: траєкторії перетинаються в просторі та часі. Роботи фізично торкаються один одного або проходять крізь один одного (якщо фізика «м'яка»).

На рис. 5.1 наведено проведення експерименту в програмному середовищі CoppeliaSim.

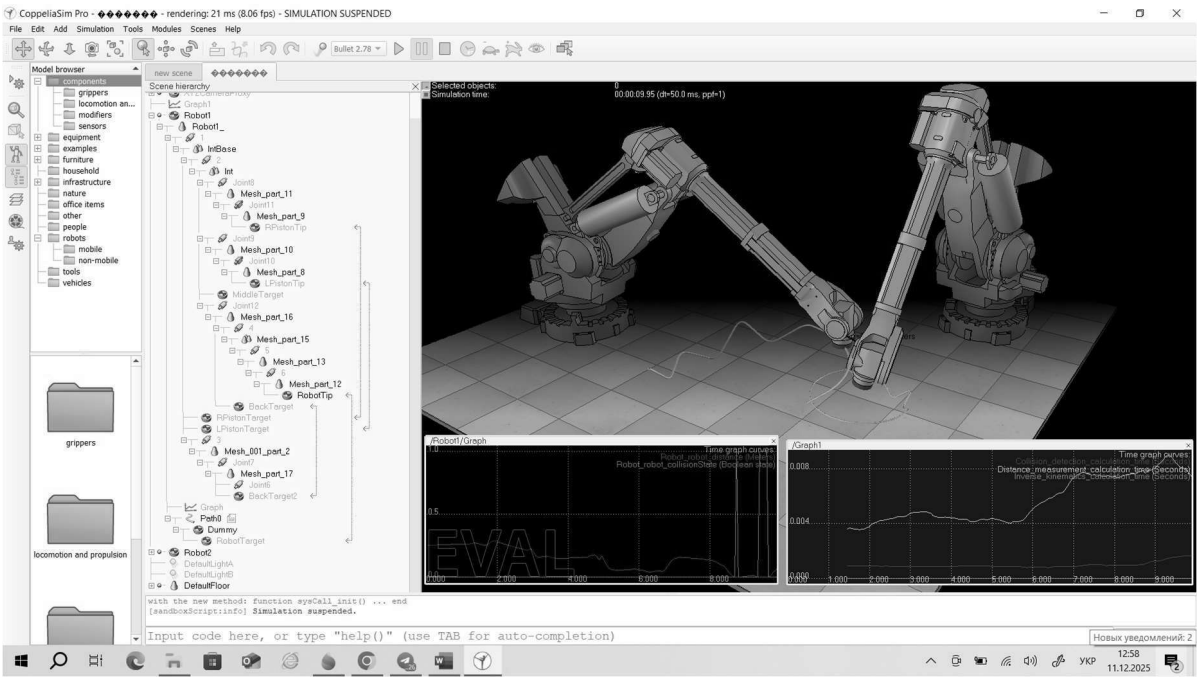


Рисунок 5.1 – Екран проведення експерименту в програмному середовищі CoppeliaSim (штатний режим)

Під час виконання робочого циклу два маніпулятори рухалися за незалежними траєкторіями, які через помилку планування перетнулися в одній точці простору та часу. Оскільки система управління не виконувала динамічну перевірку перешкод (*sim.checkCollision*), роботи не загальмували й зіткнулися своїми ланками або інструментами. На рис. 5.2 бачимо проблему (колізія) в роботі манітупяторів.

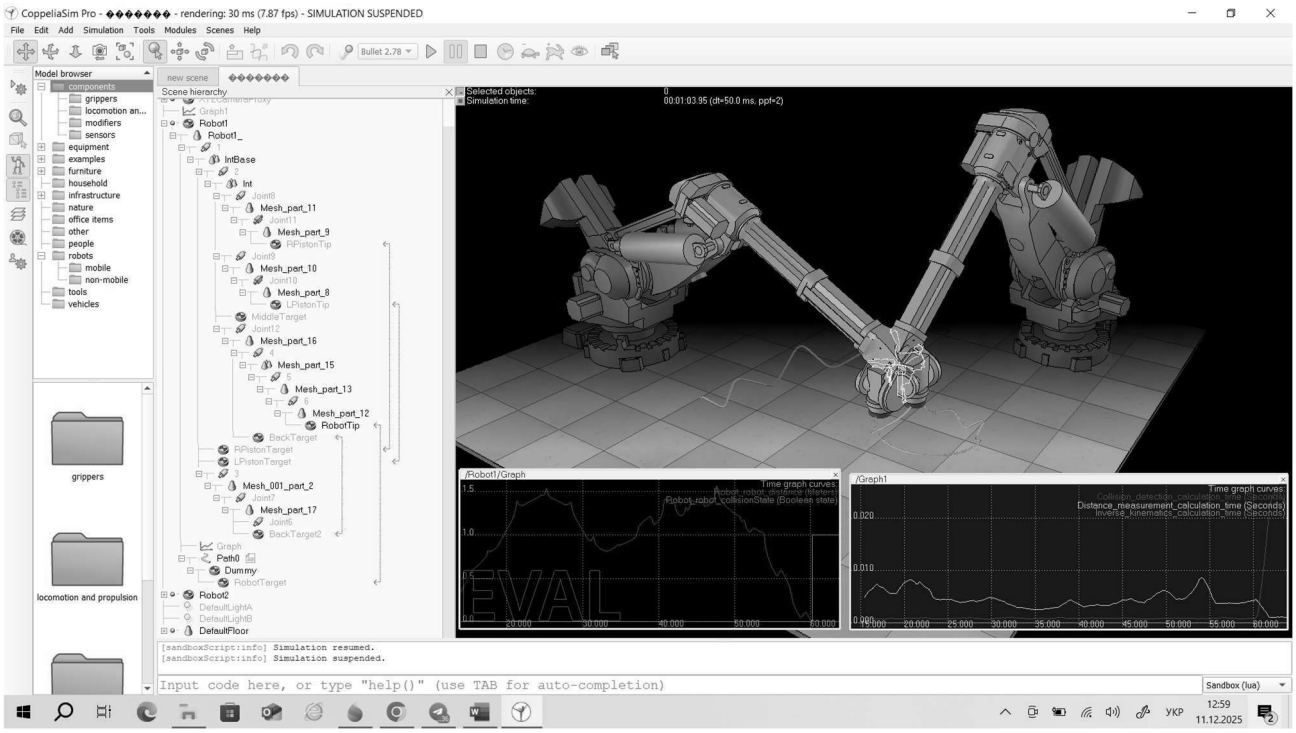


Рисунок 5.2 – Екран проведення експерименту в програмному середовищі CoppeliaSim (колізія)

У момент удару сервоприводи зазнали критичного перевантаження, що на графіках відобразилося як миттєвий піковий стрибок крутного моменту та різке падіння швидкості до нуля (рис. 5.3). Фізичний рушій симуляції відреагував на взаємне проникнення твердих тіл неприродною вібрацією, відштовхуванням об'єктів або аварійною зупинкою скрипту. Ця ситуація свідчить про відсутність синхронізації між роботами та вимагає впровадження зон блокування в алгоритм керування.

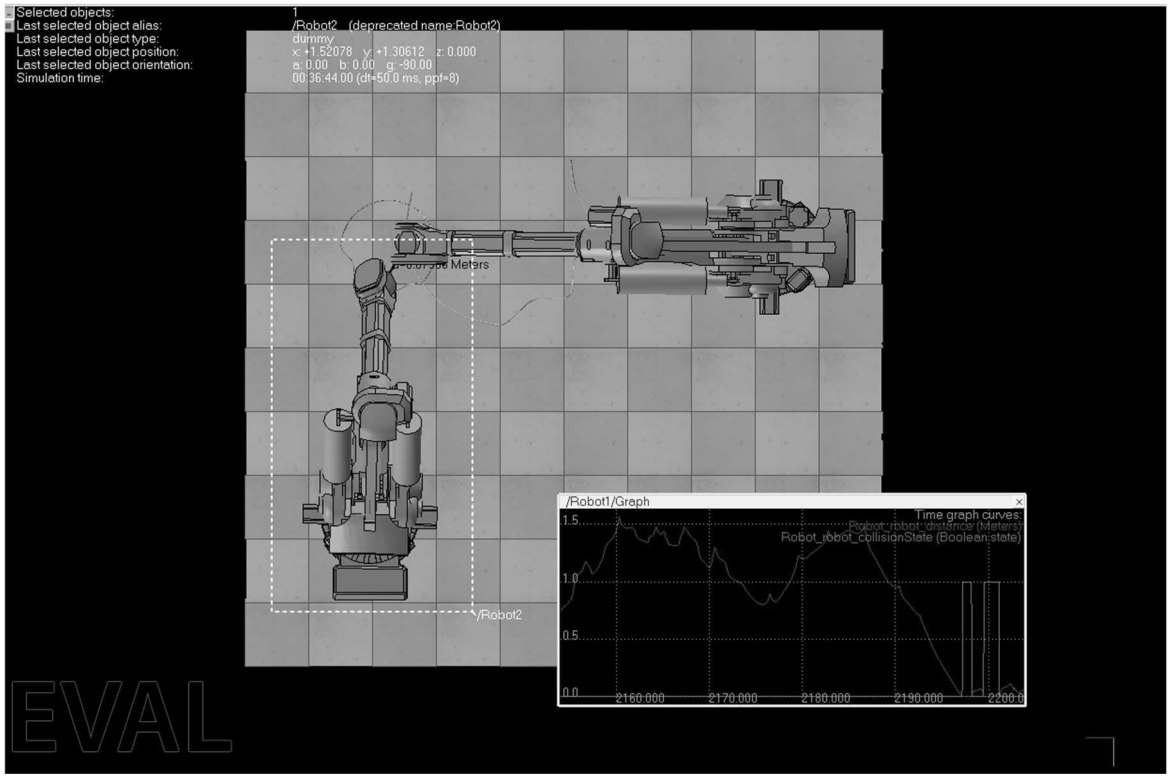


Рисунок 5.3 – Момент колізії маніпуляторів з відображенням телеметрії

У режимі реального часу система керування працює циклічно. Дослідження колізій дала можливість сформувати причини помилки:

1. Помилка планування.

– траєкторії були розраховані незалежно одна від одної. Планувальник Робота-1 не знав про існування Робота-2;

– в результаті, в момент часу t=10s, обидва роботи отримали команду прибути в точку P(x,y,z).

2. Відсутність динамічної перевірки.

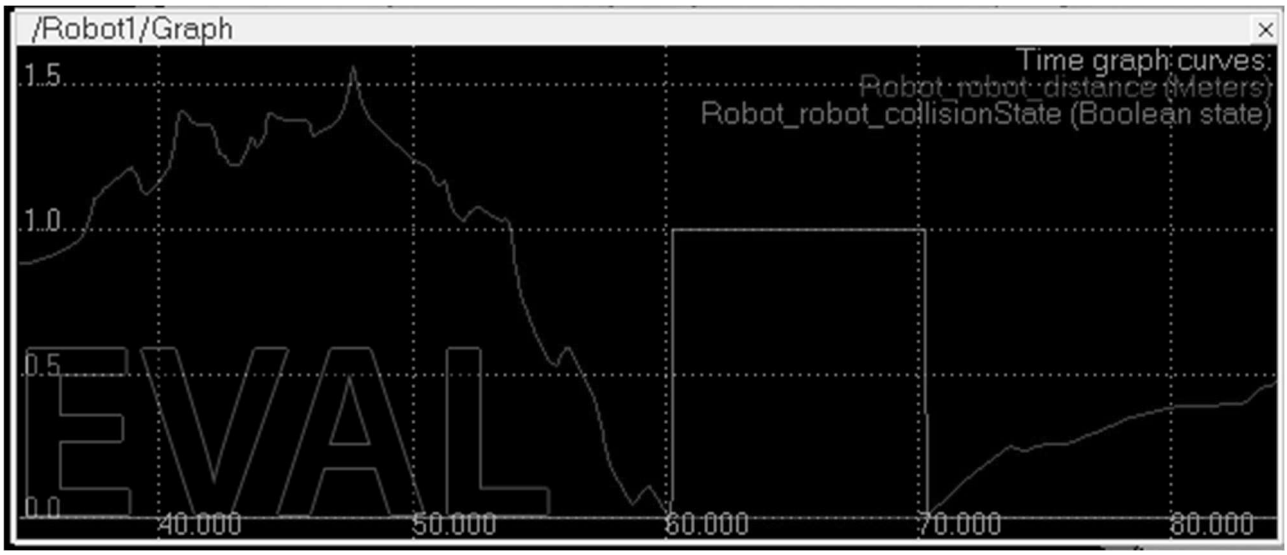
Система керування «сліпа», Вона просто подає кути на сервоприводи, не перевіряючи простір перед собою (відсутність *sim.checkCollision* у циклі *syscb_actuation*).

3. Розсинхронізація.

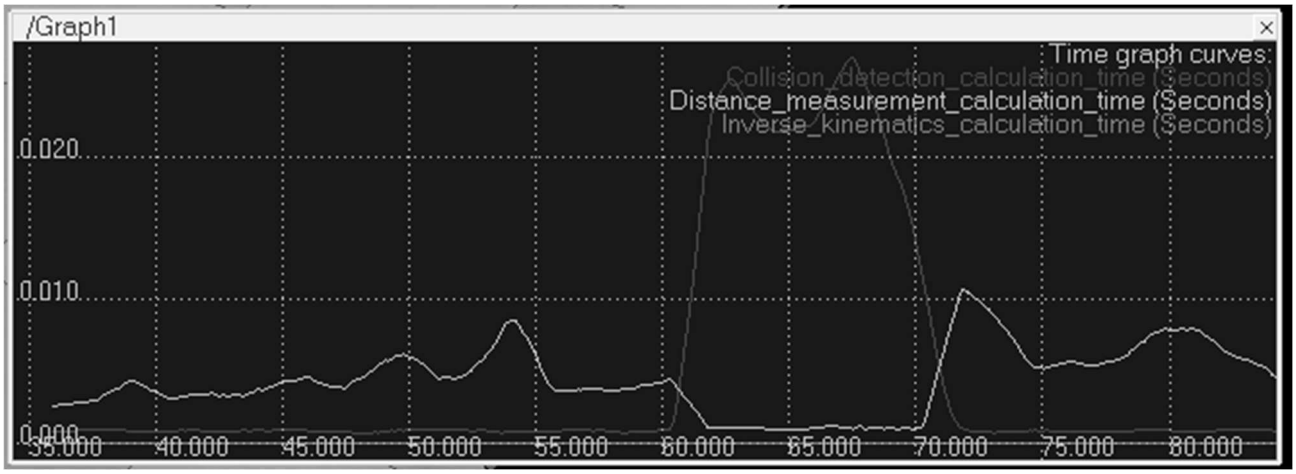
Траєкторії могли бути безпечними, якби робот А пройшов точку перетину на 2 секунди раніше. Але через затримку (*lag*) або помилку таймінгу, вони

опинилися там одночасно.

На рис. 5.4 наведені графіки роботи маніпуляторів.



а



б

а – маніпулятор «Master»; б – маніпулятор «Slave»

Рисунок 5.4 – Графік телеметрії параметрів роботи маніпудяторів

На графіках бачимо момент виникнення колізії (всплеск).

При фізичній реалізації проєкту колізії призвели б до механічного пошкодження:

- роботи можуть почати «вибухати» (розлітатися в сторони) або тремтіти, оскільки два твердих тіла не можуть займати один об'єм простору.
- суглоби можуть вивернутися за межі своїх фізичних обмежень.

Проведене тестування системи управління двома маніпуляторами в програмному середовищі CoppeliaSim дозволило зробити наступні висновки щодо надійності та ефективності поточного алгоритму керування:

1. Аналіз поведінки системи.

Тестування показало, що базова система управління успішно справляється з позиціонуванням окремого маніпулятора у вільному просторі. Однак, при роботі у спільному робочому просторі система демонструє критичну вразливість – «сліпоту» до динамічних перешкод. Як видно з графіків телеметрії (рис. 5.4), система продовжує подавати керуючий сигнал на приводи навіть у момент фізичного контакту, що призводить до пікових навантажень на сервоприводи та потенційного виходу обладнання з ладу.

2. Ідентифіковані проблеми виникнення колізій.

В ході експерименту було виокремлено ключові фактори, що унеможливлюють безаварійну роботу в поточному режимі:

– відсутність зворотного зв'язку про оточення: маніпулятори діють як ізольовані системи, не обмінюючись даними про свої майбутні положення.

– реактивна природа помилки: поточна система не здатна передбачити колізію, а факт зіткнення фіксується лише постфактум – через різке зростання крутного моменту та падіння швидкості.

– жорсткість траєкторій: попередньо розраховані траєкторії не піддаються корегуванню в реальному часі при виникненні розсинхронізації.

3. Шляхи уникнення колізій.

Висновки. Для вирішення виявлених проблем та забезпечення адаптивного керування пропонується модернізація системи шляхом інтеграції модуля машинного навчання на основі просторового відображення моделі HSV. Цей підхід передбачає перехід від "сліпого" виконання команд до системи технічного зору або просторового картування, де:

– просторове відображення: робочий простір розбивається на вокселі або зони. Використання колірної моделі HSV дозволяє ефективно сегментувати об'єкти в сцені, де, наприклад, Hue (відтінок) може кодувати

ідентифікатор робота або тип перешкоди, а Value (яскравість) – глибину або відстань до об'єкта;

– предиктивний аналіз: навчена нейронна мережа отримує на вхід «карту зайнятості» простору у форматі HSV. Модель аналізує поточні позиції та вектори швидкості маніпуляторів, прогнозуючи ймовірність перетину їхніх об'ємів у наступні такти часу ($t + \Delta t$);

– уникнення: при виявленні високої ймовірності колізії система автоматично генерує коригуючий сигнал (зупинка, уповільнення або локальна зміна траєкторії) ще до моменту фізичного контакту;

– таке рішення дозволить трансформувати систему з детермінованої в адаптивну, забезпечуючи безпечну взаємодію маніпуляторів навіть в умовах часових затримок або помилок планування.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі на тему: «Система управління синхронізованою роботою роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні» виконано комплексне дослідження та тестування системи управління роботизованими маніпуляторами, що працюють у спільному робочому просторі. На основі проведеного моделювання в середовищі CoppeliaSim та аналізу отриманих результатів зроблено такі висновки.

1. Встановлено, що використання детермінованих алгоритмів керування із попередньо розрахованими траєкторіями є недостатнім для забезпечення безпеки в реальному часі. Експериментально доведено, що система є нестійкою до розсинхронізації (часових затримок): навіть незначне відхилення від таймінгу призводить до перетину траєкторій маніпуляторів.

2. Виявлено, що основною причиною колізій є відсутність динамічного зворотного зв'язку про стан навколишнього середовища («сліпота» системи) та ізольоване планування рухів для кожного робота. Зафіксовано, що у момент зіткнення виникають критичні пікові навантаження на сервоприводи (стрибки крутного моменту), що в реальних умовах експлуатації неминуче призвело б до механічного пошкодження обладнання та простою виробництва.

3. Результати телеметрії показали, що реактивні методи захисту (зупинка після удару) є неефективними, оскільки спрацьовують вже після настання аварійної події. Це підтверджує необхідність впровадження предиктивних методів керування, здатних прогнозувати та попереджати колізії.

4. Запропоновано та обґрунтовано новий підхід до керування, що базується на використанні машинного навчання та просторового відображення робочої зони за моделлю HSV. Цей метод дозволяє трансформувати систему з «жорсткої» в адаптивну, надаючи їй здатність «бачити» перешкоди у вигляді воксельних карт зайнятості простору.

5. Впровадження запропонованої нейромережевої моделі дозволяє прогнозувати ймовірність перетину об'ємів роботів у наступні моменти часу та автоматично коригувати керуючі сигнали. Це забезпечує безаварійну взаємодію маніпуляторів, підвищує надійність автоматизованого комплексу та знімає жорсткі вимоги до ідеальної часової синхронізації процесів.

6. Верифікація запропонованих алгоритмів, проведена шляхом імітаційного моделювання у середовищі CoppeliaSim, підтвердила працездатність системи та можливість її застосування для автоматизації складних технологічних операцій у спільних робочих зонах. Використання цифрового двійника дозволило безпечно дослідити критичні режими роботи, зокрема сценарії колізій, без ризику пошкодження дороговартісного фізичного обладнання.

7. Запропонований підхід на основі машинного навчання довів свою ефективність у компенсації часових затримок, забезпечуючи адаптивність системи, якої неможливо досягти класичними жорсткими алгоритмами.

8. Практична цінність роботи полягає у створенні надійного механізму уникнення зіткнень, що є ключовою вимогою для безпечної інтеграції роботів у сучасні виробничі лінії стандарту Індустрії 4.0. Це дозволяє мінімізувати час простою виробництва через аварійні зупинки, оскільки система здатна прогнозувати та попереджати небезпечні ситуації превентивно. Крім того, розроблена методика просторового картування є універсальною і може бути легко масштабована для координації груп з трьох і більше маніпуляторів. Впровадження результатів дослідження сприятиме значному підвищенню продуктивності та експлуатаційної надійності роботизованих комплексів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлювання. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.

2. Аллахверанов Р. Ю., Альохіна С. В., Невлюдов І. Ш., Ромашов Ю. В. Основи моделювання та ідентифікація об’єктів автоматизації: навч.посібник. Харків: ХНУРЕ, 2023.

3. Проць. Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник . Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. 232с.

4. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демьска Н. П. Проєктування мобільних маніпуляційних роботів : Монографія. Харків : ХНУРЕ, 2022. 427 с.

5. Невлюдов І. Ш., Новоселов С. П., Сичова О. В. Застосування цифрових двійників в технічних засобах автоматизації для розроблення програмно-технічних комплексів АСУТП : навч. посіб. Харків : Видавництво Іванченка І.С., 2023. 267 с.

6. Іванов В.О., Дегтярьов І.М. Технологічні основи гнучких автоматизованих виробництв : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2022. 204 с.

7. Елбанхаві М., Сіміч М., Джазар Р.Н. Безперервне згладжування траєкторії для машиноподібних роботів з використанням B-сплайнових кривих //Журнал інтелектуальних та роботизованих систем. 2015. Т. 80. № Додаток 1. С. 23-56.

8. Комп’ютерне конструювання елементів машин. Навчальний посібник для здобувачів бакалаврів, спеціальність: 131 - Прикладна механіка, освітні програми: Мехатроніка та промислові роботи, Інженерія логістичних систем, спеціальність: 133 – Галузеве машинобудування, освітня програма:

Підйомнотранспортні, дорожні, меліоративні машини і обладнання: / Укл.: Михайлов Є. П. Одеса: Одеська політехніка, 2023. 233 с.

9. Шишута С. С., Сафронов П. С. Роботизована система розпізнавання об‘єктів та маніпулювання ними для виконання електрозварювальних робіт. Сучасні інформаційні та електронні технології (CIET-2021): труди міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 24 – 28 травня 2021 р. Одеса, 2021. С. 39-40. URL: http://www.tkea.com.ua/siet/archive/2021/39-40.pdf (дата звернення: 03.09.2025).

10. Літвін, О., Паньков, С. Роботизовані маніпулятори особливого призначення. Технічні науки та технології. Technical Sciences and Technologies. 1(19), 2020 С.81-88. URL: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1(19)-81-88. (дата звернення: 05.09.2025).

11. Інтернет ресурс. Getting Started with the CoppeliaSim Simulator. URL: https://robotics.northwestern.edu/ (дата звернення 24.11.2025).

12. Мельник Д. В., Міняйло Н. О. Актуальність синхронізації взаємодії роботизованих маніпуляторів в єдиній робочій зоні. Збірник наукових праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2025» Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2025. Т. 5 С. 181-183. URL: https://sites.znu.edu.ua/stud-sci-soc//2025/tom_5.pdf.

13. Нєнова Д. В. Моделювання робота-маніпулятора у програмному забезпеченні CoppeliaSim. 29-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 2. Харків : ХНУРЕ. 2025. С.8-10 с.

14. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Максимова С. С. Моделі та методи кіберфізичних виробничих систем в концепції Industry 4.0 : Монографія. Харків : 2023. 321 с.

15. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В. Проєктування мобільних роботів на базі одноплатних комп’ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6) : Підручник. Харків : 2020. 257 с.

16. Невлюдов І. Ш., Стародубцев М. Г. Конспект лекцій з дисципліни «Автоматизоване управління технологічними процесами» для студентів спеціальності 174. Харків: ХНУРЕ, 2023. 220 с.

17. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальностю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «АКІТ» : Навчальний посібник / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. 151 с.

18. Невлюдов І. Ш., Новоселов С. П., Сичова О. В. Застосування цифрових двійників в технічних засобах автоматизації для розроблення програмно-технічних комплексів АСУТП : навч. посіб. Харків : Видавництво Іванченка І.С., 2023. 267 с.

19. United Nations. The 17 Sustainable Development Goals. United Nations, 2025, Режим доступу: sdgs.un.org/goals (дата звернення: 18.03.2025). 3. Nienova D. Inverse Kinematics in Robotics: Case of Pick-and-Place Manipulators. «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025 [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей. Харків : ХНУРЕ, 2025. Вип. 1. С.111-115.

20. Surati, S., Hedaoo, S., Rotti, T., Ahuja, V., Patel, N. PickandPlaceRoboticArm: Areviewpaper. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Vol. 08. 2021. P. 2121-2129

21. Zhang X., Liniger A., Borrelli F. Optimization-based collision avoidance //IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2020. Т. 29. №. 3. P. 972-983.

22. Hoy M., Matveev A. S., Savkin A. V. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey //Robotica. 2015. Т. 33. №. 3. P. 463-497.

23. Amice A. et al. Finding and optimizing certified, collision-free regions in configuration space for robot manipulators //International Workshop on the

Algorithmic Foundations of Robotics. Cham : Springer International Publishing, 2022. P. 328-348.

24. Garrett C. R. et al. Integrated task and motion planning //Annual review of control, robotics, and autonomous systems. 2021. Т. 4. №. 1. P. 265-293.

25. Shanmugamani, K., Fazeeda M. The Implementation of Warehouse Management System (WMS) to Improve Warehouse Performance in Business to Business (B2B). International Journal of Industrial Management. 17 : 2023. P. 231-239. DOI: 10.15282/ijim.17.4.2023.10091 (дата звернення: 26.11.2025).

26. Suleiman, Z., Shaikholla, S., Dikhanbayeva, D., Shehab, E., Turkyilmaz, A. Industry 4.0: Clustering of concepts and characteristics. Cogent Engineering, 9(1) : 2022. URL: https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2034264 (дата звернення: 18.09.2025).

27. Gurin D. Key features and differences between Industry 5.0 and Industry 4.0.: Тези доповідей. Запоріжжя : XII Міжнародна науково-практичної конференція, 2024. URL: https://openarchive.nure.ua/handle/document/ 29571 (дата звернення: 22.1.2025).

28. Open AI. (2023). ChatGPT [велика мовна модель]. URL: https://www.openai.com/chatgpt (дата звернення: 22.11.2025).

29. CoppeliaSim. Robotics simulation platform. URL: https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/coppeliasim.html (дата звернення: 05.11.2025).