

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
(повне найменування факультету)

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ СИМУЛЯЦІЇ
ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ
RESEARCH ON THE USE OF INDUSTRIAL ROBOT SIMULATION SYSTEMS
IN PRODUCTION PROCESSES

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи БК-612м
Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Автоматизація, мехатроніка та робототехніка

МЄЛЬНІКОВ О.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВЕРЕНИЧ О.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент КОРОТУН А.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Автоматизація, мехатроніка та робототехніка
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри ІТЕЗ, к.т.н, доц.
О.Ю. МАЛИЙ
“ ” 2024 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

МЄЛЬНІКОВ Олег Володимирович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження використання систем симуляції
промислових роботів у виробничих процесах
Research on the use of industrial robot simulation systems in production processes

керівник проєкту (роботи) професор, ВЕРЕНИЧ Олена Володимирівна,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові,)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “23” квітня 2024 року № 162

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 30 травня 2024 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) після сворення середовища
промислового робота у середовищі RoboDK, повинна бути проведено
тестування та калібрування створеного робота

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, 1 Теоретичні відомості та постановка завдання,
2 Дослідження систем симуляції промислових роботів, 3 Проведення симуляції
промислового робота у середовищі RoboDK 4 Експлуатація, тестування та
експериментальне дослідження програми, Висновки, Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
слайди презентації

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Розділи 1-4	МИРОНОВА Н.О., доцент		
Нормоконтроль	ПОСПЕЄВА І. Є., ст.викладач		

7. Дата видачі завдання «01» березня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Постановка завдання роботи.	1 тиждень	Завдання, ТЗ
2	Аналіз предметної області.	1 тиждень	Розділ 1
3	Дослідження систем симуляції промислових прботів	2 тиждень	Розділ 2
4	Проведення симуляції промислового робота	3-4 тижні	Розділ 3
5	Тестування програми	5 тиждень	Розділ 3
6	Оформлення пояснювальної записки та відповідної документації	6-7 тиждень	
			Додатки
7	Нормоконтроль та рецензування.	8 тиждень	
8	Захист дипломної роботи.	9 тиждень	

Студент(ка)


(підпис)

Олег МЄЛЬНІКОВ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

Олена ВЕРЕНИЧ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи магістра:
155 с., 5 табл., 34 рис., 1 дод., 65 джерел.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ, СИСТЕМИ
МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ, ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ,
КОНТРОЛЬ РОБОТІВ, ВІРТУАЛЬНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ОПТИМІЗАЦІЯ
ВИРОБНИЦТВА, ROBODK, PYTHON, VSCodium, ТЕСТУВАННЯ
РОБОТІВ, КАЛІБРУВАННЯ РОБОТІВ, ISO 9283.

Об'єкт дослідження – системи моделювання промислових роботів у виробничих процесах.

Предмет дослідження – програмне забезпечення для моделювання та програмування промислових роботів у середовищі RoboDK.

Мета роботи – проведення симуляції промислового робота з ціллю ідентифікування ключових аспектів, які потребують уваги та вдосконалення у виробничих процесах.

Для реалізації програмної частини використовувалася мова програмування Python, програмне забезпечення RoboDK та середовище програмування VSCodium.

В результаті було проведено тестування промислового робота згідно стандарту ISO 9283.

ABSTRACT

Explanatory note to the diploma qualifying work of the master: 155 pages, 5 tables, 34 figures, 1 appendixes, 65 sources.

INDUSTRIAL ROBOTS SIMULATION, MODELING SYSTEMS, INDUSTRIAL ROBOTS, PRODUCTION PROCESSES, ROBOTIC CONTROL, VIRTUAL ENVIRONMENT, PRODUCTION OPTIMIZATION, ROBODK, PYTHON, VSCodium, ROBOT TESTING, ROBOT CALIBRATION, ISO 9283.

The object of research is systems for modeling industrial robots in production processes.

Subject of research are automated air quality monitoring systems. The subject of the study is software for modeling and programming industrial robots in the RoboDK environment.

The purpose of the work is to simulate a industrial robot in order to identify key aspects that require attention and improvement in production processes.

The Python programming language, RoboDK software, and the VSCodium programming environment were used to implement the software part.

As a result, the industrial robot was tested according to the ISO 9283 standard.

ЗМІСТ

Перелік скорочень та умовних познач.....	8
Вступ.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ПОСАНОВКА ЗАВДАННЯ	11
1.1 Загальна характеристика промислових роботів. Визначення та класифікація.....	11
1.2 Технічні характеристики промислових роботів.....	16
1.2.1 Апаратне забезпечення	16
1.2.2 Сенсорна система	24
1.3 Типи промислових роботів	28
1.4 Механічна конструкція та кінематика	37
2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ СИМУЛЯЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ	48
2.1 Опис програмних платформ для симуляції промислових роботів	48
2.2 Дослідження інструментів, що використовуються в системах симуляції промислових роботів	63
2.3 Переваги та недоліки систем симуляції промислових роботів	84
3 ПРОВЕДЕННЯ СИМУЛЯЦІЇ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА У СЕРЕДОВИЩІ ROBODK.....	90
3.1 API RoboDK	92
3.2 Створення віртуального середовища	101
3.3 Моделювання руху інструменту та програмування робота	104
3.4 Мови програмування. Offline Програмування	106
4 ЕКСПЛУАТАЦІЯ, ТЕСТУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМИ	112
4.1 Дослідження стандартів промислової автоматизації	112
4.2 Методика калібрації промислових роботів	119
4.3 Методика оцінки точності позиціонування промислових роботів згідно стандарту ISO 9283	125
4.4 Проведення тестування промислового робота в системі RoboDK	127

Висновки	138
Перелік джерел посилення	142
Додаток А Використання промислових роботів у виробництві	150

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

SBC	– Session Border Controller);
DOF	– Degrees of Freedom;
EOAT	– End of Arm Tooling,
MES	– Manufacturing Execution System;
LiDAR	– Light Detection and Ranging;
API	– Application Programming Interface;
CAD	– Computer-Aided Design;
CAM	– Computer-Aided Manufacturing;
GUI	– Graphical User Interface;
ROS	– Robot Operating System;
ODE	– Open Dynamics Engine;
IMU	– Inertial measuring device;
GPS	– Global Positioning System;
GA	– Genetic Algorithm;
URDF	– Unified Robot Description;
RViz	– Robot Visualization;
HIL	– Hardware-in-the-Loop;
USB	– Universal Serial Bus;
ML	– Meta Language;
IoT	– Internet of Things;
ЧПК	– числове програмне керування;
ПР	– промисловий робот;
ЦП	– центральний процесор.

ВСТУП

Зростання автоматизації та впровадження новітніх технологій у виробничі процеси є одним із ключових аспектів сучасного промислового розвитку. Використання промислових роботів стало невід'ємною частиною виробничих систем, дозволяючи підвищити ефективність, точність і безпеку праці. Однак інтеграція роботів у виробничі лінії є складним процесом, що вимагає ретельного планування, тестування та налагодження. Системи симуляції промислових роботів, що дозволяють моделювати та тестувати роботизовані процеси у віртуальному середовищі, набувають особливої значущості. Вони дають змогу виявити та усунути можливі проблеми ще до впровадження реальних роботів на виробництві, що значно знижує ризики та витрати.

Мета і задачі дослідження. Основною метою цього дослідження є проведення симуляції промислового робота з ціллю ідентифікування ключових аспектів, які потребують уваги та вдосконалення у виробничих процесах. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- виконати огляд існуючих систем симуляції промислових роботів;
- дослідити основні принципи роботи та можливості цих систем;
- оцінити переваги та недоліки використання симуляції у порівнянні з традиційними методами тестування роботів;
- розробити рекомендації щодо оптимального впровадження симуляційних систем у виробничі процеси.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є системи моделювання промислових роботів у виробничих процесах. Предметом дослідження виступає програмне забезпечення для моделювання та програмування промислових роботів у середовищі RoboDK.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених задач у роботі будуть використані методи системного аналізу, моделювання, експериментального дослідження та порівняльного аналізу.

Наукова новизна та практична цінність. Наукова новизна роботи полягає в комплексному дослідженні систем симуляції промислових роботів і їх впливу на ефективність виробничих процесів. Практична цінність результатів полягає у можливості зниження витрат та ризиків, пов'язаних з інтеграцією роботів у виробництво, за рахунок використання симуляційних технологій.

Апробація результатів. За результатами роботи було опубліковано тези в науково-практичній конференції викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та студентів «Тиждень науки-2023» та «Тиждень науки-2024» [63 - 65].

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Загальна характеристика промислових роботів. Визначення та класифікація

Галузь промислової робототехніки охоплює широкий спектр автоматизованих систем, призначених для виконання різноманітних завдань у промислових умовах. Ці машини, які часто називають промисловими роботами, відіграють ключову роль у сучасному виробництві, сприяючи підвищенню ефективності, точності та загальної продуктивності. Визначення та класифікація промислових роботів є основою для розуміння їхнього застосування, можливостей та еволюції робототехнічних технологій у промисловості.

Промисловий робот (ПР) — автоматична машина, що програмується й використовується у виробничому процесі для виконання рушійних функцій, аналогічних функціям людини, при переміщенні предметів виробництва та технологічної оснастки. Для виконання цих функцій ПР має маніпулятор та пристрій керування.

Маніпулятором називають пристрій, що імітує робочі та рушійні функції людської руки і працює автоматично або керується оператором.

ПР є широко розповсюдженими засобами автоматизації виробничих процесів оскільки мають гнучкі технологічні властивості. Зазвичай ПР використовують для операцій зварювання, складання, фарбування, пакування, контролю продукції та випробування [1].

Для захоплення й утримання об'єктів, маніпулятори оснащені захватними пристроями.

До складу маніпулятора входять:

- основний механізм;
- передавальний механізм;
- механізми захватних пристроїв;
- механізми зрівноважування;

– механізм розвідки рухів.

Основний механізм містить несучі ланки й може бути схематично представлений як незамкнутий просторовий механізм із декількома ступенями свободи.

Передавальні механізми в маніпуляторах призначені для передачі руху від двигуна до основних ланок. У якості передатних пристроїв використовуються різні механізми: важільні, зубчасті, гвинтові, зубчато-ремінні. Ступінь складності передавального механізму залежить від розташування двигуна. Якщо двигун розташований на ланці, сусідній від ланки, до якої передається рух, то передавальний механізм є більш простим по конструкції. Однак, двигун у цьому випадку розташований на рухливій ланці й переміщається разом з маніпулятором.

Якщо двигун розташований на підставі, то конструкція механізму сильно ускладнюється.

Промислові роботи є високотехнологічними механічними або програмованими системами, розробленими для виконання різноманітних завдань в промисловому виробництві та інших виробничих середовищах. Їхнє призначення полягає в автоматизації та оптимізації виробничих процесів шляхом виконання завдань, які традиційно виконувались людьми або важкоавтоматизованими механізмами. Основними характеристиками промислових роботів є їхні програмованість, гнучкість та здатність взаємодіяти з оточуючим середовищем [2].

Основні риси промислових роботів включають:

- автоматизація завдань – промислові роботи призначені для виконання рутинних, монотонних або складних завдань у виробничому процесі. Це може включати в себе операції, такі як зварювання, розміщення, обробка матеріалів, збирання та ін.;

- програмованість - роботи можуть бути програмовані для виконання конкретних завдань або навіть адаптуватися до нових завдань

зміною програмного коду. Це дозволяє їм бути гнучкими та придатними для різних виробничих умов;

- сенсори та взаємодія - промислові роботи часто обладнані різноманітними сенсорами, такими як візуальні системи, датчики тиску, гіроскопи та інші. Це дозволяє їм сприймати оточуюче середовище та реагувати на зміни в реальному часі;

- гнучкість та адаптивність - промислові роботи можуть адаптуватися до різних умов виробництва та виконувати різноманітні завдання без необхідності зміни конструкції;

- безпека - забезпечення безпеки операторів та навколишнього середовища є важливою характеристикою. Деякі роботи обладнуються системами безпеки, такими як датчики зупинки, щоб уникнути аварій та небезпек;

- інтеграція виробничих процесів - промислові роботи можуть бути інтегровані в комплексні системи виробництва, обмінюючи інформацію та взаємодіючи з іншими автоматизованими системами.

Всі ці риси роблять промислові роботи важливою складовою сучасних виробничих процесів, сприяючи підвищенню ефективності, точності та безпеки в промисловому середовищі.

Робот як машина складається з двох основних частин - виконавчих систем та пристрої управління ними з сенсорною системою. У свою чергу виконавчі системи включають одну або кілька маніпуляційних систем (зазвичай у вигляді механічних маніпуляторів) та системи пересування, що є тільки у рухомих (мобільних) роботів.

При виборі об'єкта роботизації попередньо вибирають операції обробки або технологічні процеси; визначають мету роботизації; комплексно аналізують обрану операцію або технологічний процес; визначають тип ПР, його основні технічні дані; орієнтовно здійснюють техніко-економічний аналіз ефективності роботизації і виносять остаточний висновок про доцільність роботизації наміченого об'єкта.

ПР класифікують за різними ознаками (рис. 1.1): за характером виконуваних операцій (технологічні, допоміжні і універсальні); за ступенем спеціалізації (спеціальні, цільові та багатоцільові); за типом виробництва (ливарне, механообробне, штампо-пресоване, складальне, зварювальне, транспортно-складські, термообробка та нанесення покриття); за системою координат (декартова, полярна, циліндрична та ангулярна); за типом приводу (електромеханічний, пневматичний, гідравлічний та комбінований); за характером відпрацьованих програм (жорсткопрограмні, гнучкопрограмні та адаптивні) та за характером програмування швидкості та переміщень (позиційні, контурні та комбіновані).

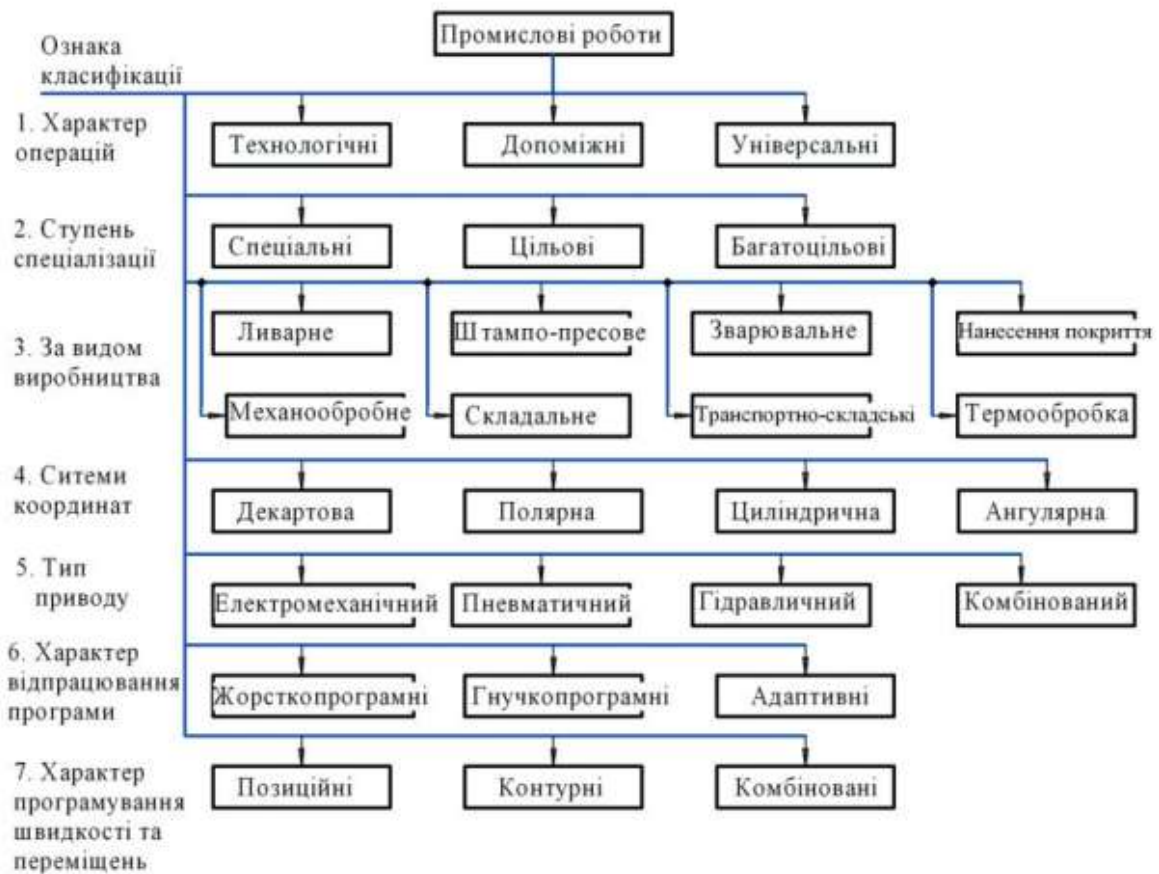


Рисунок 1.1 - Класифікація промислових роботів [1]

Кожний промисловий робот-маніпулятор має технічні параметри (рис. 1.2). До основних відносять: вантажопідйомність; точність

позиціонування; призначення; тип керуючої програми; мобільність; форма і розміри робочої зони; число ступенів свободи.

Параметр «призначення» зазвичай вказує основну галузь застосування даного робота. Параметр «вантажопідйомність» характеризує найбільшу масу (з врахуванням маси захватного пристрою), що може підняти обраний робот - маніпулятор при максимальній/мінімальній швидкості, максимальному вильоті руки та ін. За вантажопідйомністю роботи - маніпулятори поділяють на п'ять серій: 1) надлегка – до 1 кг; 2) легка – від 1 до 10 кг; 3) середня – від 10 до 100 кг; 4) важка – від 100 до 1000 кг; 5) надважка – від 1000 кг [2].



Рисунок 1.2 - Основні технічні параметри промислового робота [2]

Класифікація промислових роботів є ключовою для розуміння їхнього застосування, можливостей та впливу на виробництво. Завдяки автоматизації промислових процесів можна підвищити продуктивність, знизити витрати та покращити якість виробництва. Однак важливо також враховувати соціальні та економічні аспекти впровадження роботизації, забезпечуючи збалансований розвиток та ураховуючи потреби працівників [3].

1.2 Технічні характеристики промислових роботів

1.2.1 Апаратне забезпечення

Сьогодні робототехніка розширюється від обмежених переміщень на заводі до неконтрольованого середовища, яке тісно поділяється з людьми. Прогрес став можливим завдяки прогресу в цьому апараті, що забезпечує робототехніку, яка включає двигуни, частини та датчики, які застосовуються для створення та контролю руху, необхідного для вирішення певного завдання.

Апаратне забезпечення промислових роботів включає в себе складний набір компонентів: двигуни, датчики, приводи та блоки керування тощо [4].

Промислові роботи – це потужні машини, здатні виконувати численні виробничі програми, від простих до складних. Конструкція промислових роботів дозволяє їм виконувати функції, подібні до людських. Промислові роботи зазвичай складаються з кількох ключових апаратних компонентів, зокрема, а саме: маніпулятора (роботизованої руки), центрального процесора, сенсори, двигуни та приводи, кінцеві ефектори, живлення робота система керування роботом та інтерфейс зв'язку.

Розглянемо маніпулятор (роботизовану руку), що є механічною основою промислових роботів. Завдяки ряду з'єднань і зв'язків він імітує спритність людської руки, дозволяючи роботам виконувати низку завдань з точністю. Конструкція маніпулятора залежить від конкретного застосування, починаючи від простих операцій підбору та розміщення до складних завдань зі складання.

Цей критично важливий апаратний компонент відповідає за виконання запрограмованих рухів, що забезпечує універсальність галузей. Суглоби забезпечують гнучкість, а ланки забезпечують структуру для контрольованого руху. Чи то зварювання, фарбування чи обробка матеріалів, маніпулятор служить інструментом ефективності та точності промислових роботів.

Центральний процесор являє собою апаратно-програмний інтерфейс між датчиками робота і системою управління. Процесор аналізує команди для виконання роботом і направляє їх до певних компонентів робота. В автоматизованих роботах він обробляє інформацію, отриману від вхідних датчиків, інтерпретує інформацію, виконує обчислення і може застосовувати алгоритми машинного навчання. У цьому сенсі процесор функціонує як основний компонент мозку робота.

Процесор забезпечує додаткову обробку для обробки помилок. Коли робот не може виконати команду або коли щось несподіване відбувається в навколишньому середовищі, процесор визначає, як робот впорається з ситуацією.

Деякі приклади обробки помилок:

- повторна спроба виконання команди;
- запит ручного керування від робота-оператора;
- запис помилки як точки даних для машинного навчання;
- вимкнення робота.

Для напіваавтономного або ручного робота вхідні дані датчика можуть бути передані зовнішньому оператору-людині. Команди оператора надсилаються назад через ЦП до робота.

У деяких роботах легший одноплатний комп'ютер (SBC) може бути встановлено як проміжне програмне забезпечення для обробки введення та надсилання команд. SBC збирає вхідні дані датчиків і може передавати їх на зовнішній ЦП для подальшої обробки. Потім центральний процесор надсилає команди назад до робота, які аналізуються SBC і надсилаються до певних частин робота.

З появою штучного інтелекту та периферійних обчислень нові SBC мають дизайн, зручний для штучного інтелекту, щоб підвищити ефективність і розширити додатки. Граничні обчислення дозволяють обробку даних і аналітику виконувати на межі мережі, забезпечуючи швидке розуміння в реальному часі та дозволяючи використовувати SBC в системах на основі

Інтернету речей з більшою легкістю та адаптивністю. Однією з найважливіших переваг SBC є гнучкість конфігурації платформи. Систему можна розробити з мінімальними вимогами, а потім масштабувати відповідно до застосування. Спеціально створені системи ПК не забезпечують такої гнучкості.

Сенсори являють собою датчики, що надають промисловим роботам зворотний зв'язок щодо їх робочого простору. Найпоширеніші типи датчиків включають систему зору та мікрофони, оскільки вони діють як очі так і вуха робота. Датчики не дозволяють роботам динамічно адаптуватися до робочого середовища, надсилаючи сигнали до ЦП роботи.

Поширені типи датчиків роботів:

- датчики зору: захоплюють візуальну інформацію, дозволяючи роботам розпізнавати об'єкти, орієнтуватися в просторі та виконувати складні завдання з точністю;
- датчики наближення: визначають присутність або відсутність об'єктів у певному діапазоні, забезпечуючи безпечну та ефективну роботу робота в динамічному середовищі;
- датчики сили/крутного моменту: вимірюють сили та крутні моменти під час взаємодії, дозволяючи роботам виконувати делікатні завдання, застосовувати постійний тиск або виправляти аномалії у своїх роботах;
- інерційні датчики: відстежують прискорення та орієнтацію, забезпечуючи зворотний зв'язок для підтримки стабільності та рівноваги під час рухів робота;
- датчики температури та середовища: забезпечують оптимальні умови роботи, відстежуючи температуру, вологість та інші фактори навколишнього середовища, які вночі впливають на продуктивність.

Датчики пасивні, тобто вони не дають роботу жодного типу напрямку.

Натомість інформація від датчиків робота зазвичай надсилається до центрального процесора (CPU), де вхідні дані перетворюються на дію.

Одна з найбільших тенденцій у датчиках робототехніки – все більше використання ультразвукових датчиків. Ультразвуковий датчик вимірює відстань до цільового об'єкта шляхом випромінювання ультразвукових хвиль і перетворює відбитий звук в електричний сигнал [5].

Ультразвукові датчики мають два основних компоненти: передавач (який випромінює звук за допомогою п'єзоелектричних кристалів) і приймач (який стикається зі звуком після того, як він пройде до цілі та від неї).

Інтегруючи ці датчики в роботизовану систему, галузі має змогу досягти вищого рівня автоматизації, точності та адаптивності у своїх виробничих процесах.

Двигуни та приводи (актуатори) - це механізми мобільності робота, подібні до м'язової та серцево-судинної систем людини, які забезпечують рух людини. Без двигунів і приводів робот не може виконувати завдання у фізичному світі.

Двигун здійснює обертальний рух і зазвичай призначений для безперервної роботи. Наприклад, двигун може рухати робота по місцевості, керувати внутрішнім вентилятором або обертати дріль.

Привід має лінійний рух і зазвичай призначений для більш точної роботи. Наприклад, привід може використовуватися для забезпечення гнучкого згинання ліктя робота або для обертання тулуба робота. Більшість приводів є електричними, гідравлічними або пневматичними.

Ступені свободи (DOF) - це важливе поняття в робототехніці, яке відноситься до осей, вздовж яких може рухатися механічний суглоб. DOF роботизованого суглоба обмежується апаратним забезпеченням, включаючи приводи, які забезпечують рух;

Кінцеві ефектори (іноді їх називають кінцевими інструментами або EOAT) - це механічні вузли, розташовані на кінці руки робота, які дозволяють йому маніпулювати об'єктами у фізичному середовищі.

Кінцеві ефектори по суті діють як руки робота, хоча їх функції відрізняються від функцій людських рук.

Інструментальні кінцеві ефектори можуть бути вузькоспеціалізованими для робіт, які виконують специфічні завдання. Можливості цих кінцевих ефекторів безмежні: від електроінструментів, таких як дріль або електрична шліфувальна машина, до мийки під тиском води, вакуумної присоски з електроприводом або інструментів для наукових досліджень.

Кінцеві ефектори типу захоплення можуть використовуватися для захоплення та утримання об'єктів і є більш універсальними, ніж насадки для інструментів. Захвати можуть мати різні форми, наприклад, затискачі, керовані приводами, електромагнітні системи або статичні елементи, такі як гачки або спеціально розроблені кріплення.

Деякі роботи мають комбінацію захватів і кінцевих ефекторів, орієнтованих на конкретний інструмент. Наприклад, робот, створений для зварювання труб, може мати зварювальний пальник на одній руці і захват для утримання труби на місці на іншій.

Завдяки змінним системам кріплення кінцевих ефекторів оператор може вибрати найкращий інструмент для виконання завдання - чи то спеціалізований електроінструмент, чи то більш універсальне кріплення типу захоплення. Деякі захвати можуть утримувати і працювати з інструментами, хоча вони можуть забезпечувати менш точний контроль для людини-оператора, ніж кінцеві ефектори, призначені для конкретних інструментів.

Сфера м'якої робототехніки розширює універсальність кінцевих ефекторів, замінюючи жорсткі компоненти м'якими і гнучкішими кінцевими ефекторами. М'яка робототехніка імітує біологічні властивості, що може покращити здатність робота маніпулювати крихкими або гнучкими об'єктами. Мінімізація жорстких поверхонь на роботах може також зменшити небезпеку для операторів робіт;

Живлення робота - є основною виробничою проблемою, особливо для мобільних робіт. Стаціонарні роботи можуть підключатися безпосередньо до промислового джерела живлення, тоді як мобільні роботи зазвичай живляться від літій-іонних акумуляторів. Батареї можуть потребувати

індивідуального проектування та виготовлення, виходячи з вимог до потужності робота, мобільності, вагових обмежень, джерела зарядки та факторів навколишнього середовища.

Для роботів, що працюють від акумулятора, важливим є джерело живлення, яке використовується для зарядки акумулятора. Може знадобитися розробка спеціального зарядного пристрою, який враховує вимоги до потужності акумулятора, обмеження джерела живлення та фактори навколишнього середовища. Зарядний пристрій може бути встановлений безпосередньо на самому роботі, або ж він може бути спроектований як окреме обладнання [6].

Деякі джерела живлення включають:

- стандартне промислове живлення від міської електростанції: для мобільної робототехніки стандартне джерело живлення зазвичай живить автономний зарядний пристрій, а не самого робота;
- сонячні батареї, встановлені на роботів або на окремій зарядній станції: сонячні панелі також можуть бути встановлені на робот для забезпечення резервного живлення під час віддаленої роботи;
- портативний генератор електроенергії, який часто працює на бензині, пропані або біодизелі: досягнення в технології генераторів підвищують їхню портативність і паливну ефективність, а також розширюють можливості джерел палива.

Ще одна особливість дизайну акумуляторних роботів - можливість гарячої заміни батареї під час роботи робота. Робот з можливістю гарячої заміни живиться від декількох батарей. Коли одна батарея розряджається, її можна замінити під час роботи робота.

Розряджений акумулятор потім заряджається для подальшого використання.

Система керування роботом надсилає команди, які керують діями робота, подібно до людської нервової системи, яка надсилає сигнали, що

спрямовують тіло людини до руху. Система управління роботом залежить від рівня його автономності.

У повністю автономних роботів система керування може являти собою замкнений контур зворотного зв'язку, в якому робот запрограмований на виконання певного завдання. Процесор використовує вхідні дані від датчиків, щоб повідомити, яку дію потрібно виконати, і може визначити, чи правильно вона була виконана.

У ручних роботах системою керування керує людина-оператор за допомогою зовнішньої консолі. Процесор передає команди від оператора до робота.

У напівавтономних роботів система управління є гібридом обох типів систем управління. Рівень автономності визначає, чи приймає людина-оператор всі рішення високого рівня за допомогою системи управління, чи робот запитує вхідні дані у людини в міру необхідності.

Апаратне забезпечення для системи керування роботом може мати різні форми, залежно від середовища, завдань, що виконуються, та виробничих можливостей.

Наприклад:

Ручним або напівавтономним роботом можна керувати за допомогою різних типів обладнання, таких як персональний комп'ютер, спеціальний ручний контролер, гарнітура, ножні педалі, мікрофон для голосових команд або навіть контролер на основі текстилю, наприклад, бодікостюм, схожий на VR.

Автономний робот може керуватися повністю за допомогою вбудованого процесора або за допомогою програмного забезпечення на зовнішньому сервері;

Інтерфейс зв'язку слугує сполучним мостом у промисловій робототехніці, сприяючи безперешкодній інтеграції у великі виробничі екосистеми. Цей апаратний компонент дозволяє роботам обмінюватися

даними і координувати дії з іншими машинами або системами управління.

Ключові аспекти комунікаційного інтерфейсу включають:

- підключення до мережі: роботи використовують мережеві протоколи для зв'язку з іншими пристроями на заводі, що дозволяє обмінюватися даними, оновлювати їх в режимі реального часу і координувати дії;
- передача даних: комунікаційний інтерфейс полегшує передачу важливих даних між роботом і зовнішніми системами, забезпечуючи синхронізовану роботу та ефективну співпрацю;
- інтеграція з виробничими системами: промислові роботи часто інтегруються з системами управління виробництвом (MES) або іншими системами центрального управління, що сприяє оптимізації виробничих процесів;
- інтерфейси програмування: користувачі можуть взаємодіяти з роботом за допомогою інтерфейсів програмування, що дозволяють вводити команди, налаштовувати і контролювати їх виконання.

Забезпечуючи надійний інтерфейс зв'язку, промислові роботи стають невід'ємними компонентами інтелектуальних заводів, сприяючи підвищенню ефективності, адаптивності та швидкості реагування в сучасних виробничих умовах.

Роботи мають багато застосувань, які розширюють людські можливості, а вимоги до апаратного забезпечення роботів варіюються залежно від завдань, для виконання яких вони призначені. Основними частинами робота є датчики, центральний процесор, двигуни, виконавчі механізми, кінцеві ефектори та роз'єми. Всі ці компоненти окремо і як частина системи становлять апаратну складову.

Крім робочих частин робота, існують й інші фактори, які ставлять перед виробниками роботів апаратні завдання. Нестача ресурсів може призвести до змін у дизайні та затримок у виробництві, а умови

навколишнього середовища обмежують матеріали та компоненти, що використовуються в роботах, і можуть вимагати програмних рішень.

Останні інновації в робототехніці включають збільшення обчислювальної потужності, передові програмні рішення, а також розвиток біомімікрії, наприклад, програмне забезпечення на основі мозку комах, "розумної" шкіри, нейроморфних обчислень та інших нових технологій. Ці інновації розширюють можливості роботів і розвивають сферу апаратного забезпечення робототехніки [7].

1.2.2 Сенсорна система

Сенсорна технологія є однією з основних технологій для промислових роботів, що дозволяє роботам вибирати шляхи, сприймати зміни в навколишньому середовищі та приймати правильні рішення в складних ситуаціях, як і люди. Особливо у сфері промислової автоматизації роботи потребують датчиків для надання необхідної інформації, щоб правильно виконувати відповідні складні операції.

Згідно з ринковими прогнозами, до 2021 року світовий ринок датчиків для промислових роботів буде стабільно зростати зі середньорічним темпом зростання (CAGR) близько 8%. В іншому звіті чітко зазначено, що до 2027 року ринок лише систем технічного зору досягне 5,7 млрд доларів США, а ринок датчиків сили перевищить 6,9 млрд доларів США.

Датчик робота - це пристрій, який вимірює певну характеристику навколишнього середовища і перетворює її на сигнал, який може бути прочитаний або інтерпретований роботизованою системою.

Існує дві основні категорії датчиків за їх функціональністю: пропріоцептивні та екстероцептивні датчики.

Пропріоцептивні датчики схожі на внутрішні органи чуття к.і.в. Вони надають інформацію про власний стан робота. Приклади включають

акселерометри (які вимірюють прискорення) і гіроскопи (які вимірюють орієнтацію);

Екстероцептивні датчики надають інформацію про оточення робота. Приклади включають камери (які фіксують візуальні дані), ультразвукові датчики (які вимірюють відстань за допомогою звукових хвиль) та інфрачервоні датчики (які виявляють тепло) [8].

Промислові роботи являють собою машинні пристрої з декількома ступенями свободи управління, які можуть автоматично виконувати роботу і реалізовувати різні функції відповідно до власної потужності і можливостей. Вони складаються з трьох основних частин: машини, датчиків та управління. Ці три основні частини поділяються на шість підсистем. До них відносяться:

а) система приводу розміщує передавальний пристрій для кожного суглоба, який для кожного ступеня свободи руху, щоб змусити роботу рухатися;

б) система механічної конструкції складається з трьох частин: корпус, рука і кінцевий маніпулятор. Кожна велика частина має кілька ступенів свободи, створюючи механічну систему з декількома ступенями свободи. Рука, як правило, складається з передпліччя, плеча та зап'ястя. Кінцевий маніпулятор є важливою частиною, яка одночасно кріпиться на зап'ясті. Це може бути дво- або багатопальцевий захват, фарборозпилювач, зварювальний пістолет тощо;

в) сенсорна система отримує значну інформацію про стан внутрішнього та зовнішнього середовища, підвищення маневреності, адаптивності та рівня інтелектуальної роботи;

г) система взаємодії роботи з навколишнім середовищем являє собою систему, яка дозволяє роботу взаємодіяти і координувати свої дії з пристроями зовнішнього середовища;

д) система взаємодії "людина-машина" – це пристрій, що дозволяє людям спілкуватися з роботом і брати участь в управлінні ним;

є) система управління відповідно до програми інструкцій роботи і сигналу, що надходить від датчика, керує виконавчим механізмом роботи для виконання передбачених дій і функцій.

Найбільш часто використовувані датчики для промислових роботів включають двовимірні візуальні датчики, тривимірні візуальні датчики, датчики сили/крутного моменту та датчики виявлення зіткнень.

Датчик двовимірного бачення – це камера, яка може виконувати різноманітні завдання від виявлення рухомих об'єктів до визначення місцезнаходження деталей на конвеєрі. Багато розумних камер можуть виявляти частини й допомагати роботу визначати положення частини, а робот може відповідним чином регулювати свій рух на основі отриманої інформації.

Датчик 3D-огляду – система 3D-огляду повинна мати дві камери або лазерні сканери під різними кутами для визначення третього виміру об'єкта. Наприклад, підбір і розміщення деталей передбачає використання технології 3D-видіння для виявлення об'єктів і створення 3D-зображень, аналізу та вибору найкращого методу відбору.

Датчик сили/крутного моменту – при умові, якщо візуальний датчик дає роботу очі, то датчик сили/крутного моменту дає роботу відчуття дотику. Робот використовує датчики сили/крутного моменту, щоб відчувати силу кінцевого ефектора. У більшості випадків датчик сили/крутного моменту розташовується між роботом і пристосуванням, так що всі сили, що передаються назад до пристосування, відстежуються роботом. За допомогою датчиків сили/крутного моменту можна реалізувати такі програми, як складання, ручне керування, навчання та обмеження зусиль.

Датчик виявлення зіткнень – цей датчик випускається в різних формах, і його основне застосування полягає в тому, щоб забезпечити безпечне робоче середовище для операторів, і вони найбільше потрібні колаборативним роботам.

Деякі датчики можуть бути певною системою тактильного розпізнавання, яка відчуває тиск через м'яку поверхню та надсилає сигнали роботу, щоб обмежити або зупинити рух робота. Деякі датчики вбудовані безпосередньо в робота. Деякі компанії використовують зворотний зв'язок акселерометра, а інші використовують зворотний зв'язок по струму. В обох випадках, коли робот відчуває аномальну силу, він запускає аварійну зупинку для забезпечення безпеки [9].

Окрім вже згаданих датчиків існують ще багато інших, які використовуються для різноманітних застосувань. Наприклад, датчики відстеження швів і тактильні датчики також стають все більш популярними. Цей тип датчика, як правило, встановлюється на захват, щоб виявляти та відчувати, що захоплено. Датчик зазвичай може визначити силу та отримати розподіл сили, щоб знати точне положення об'єкта, щоб ви могли контролювати позицію захоплення та силу захоплення кінцевого ефектора. Є також деякі тактильні датчики, які можуть виявляти зміни тепла.

Датчики зору та наближення подібні до тих, що необхідні для автономних транспортних засобів, включаючи камери, інфрачервоні датчики, ехолот, ультразвук, радар і LiDAR. У деяких випадках можна використовувати кілька камер, особливо стереобачення. Використовуючи ці датчики разом, робот може визначати розмір, ідентифікувати об'єкт і визначати відстань до нього.

Мікрофони (акустичні датчики) допомагають промисловим роботам отримувати голосові команди та розпізнавати незвичайні звуки у звичному середовищі. Якщо додати п'єзоелектричний датчик, він також може визначити та усунути шум, спричинений вібрацією, і уникнути неправильного розуміння роботом голосових команд. Розширені алгоритми можуть навіть дозволити роботу зрозуміти емоції мовця.

Датчик температури є частиною самодіагностики робота і може використовуватися для визначення навколишнього середовища, щоб уникнути потенційно шкідливих джерел тепла. Крім того, за допомогою

хімічних, оптичних і кольорових датчиків робот може оцінювати, коригувати та виявляти проблеми в навколишньому середовищі.

Для гуманоїдних роботів, які можуть ходити, бігати або навіть танцювати, стабільність є головною проблемою. Їм потрібен такий самий тип датчиків, як і смартфонам, щоб надавати точну інформацію про місцезнаходження робота. У цих програмах використовується датчик із 9 ступенями свободи (9DOF) або інерційний вимірювальний пристрій (IMU) із 3-осьовим акселерометром, 3-осьовим гіроскопом і 3-осьовим магнітометром.

Отже, інтеграція передових сенсорних систем є наріжним каменем в еволюції промислової робототехніки. Кульмінація датчиків положення, систем технічного зору, датчиків сили/крутного моменту та безлічі інших компонентів перетворює ці машини на сприйнятливі об'єкти, здатні точно орієнтуватися в складному середовищі. Симбіотичний зв'язок між роботами та їхніми сенсорними мережами не лише підвищує операційну ефективність, але й робить значний внесок у протоколи безпеки. У міру того, як промисловість переходить до автоматизації, постійне вдосконалення та інновації в сенсорних технологіях обіцяють вивести промислових роботів на нові рубежі можливостей. Перехід від традиційної механізації до інтелектуальної автоматизації позначений безперервним розвитком сенсорних систем, що виводить промислових роботів на передові рубежі сучасної технологічної досконалості [10].

1.3 Типи промислових роботів

Коли можливості електромеханічних систем, здавалося, досягли свого піку, прогрес в інформаційно-комунікаційних технологіях дозволив роботам розвиватися далі і пропонувати кращі функції, ніж будь-коли раніше. Роботи стали невід'ємною частиною нашого життя і сьогодні використовуються майже у всіх галузях промисловості.

Типовий промисловий робот складається з таких функціональних елементів:

- контролер: відповідає за обробку інструкцій, координацію рухів і внесення коригувань для виконання своїх завдань. Крім того, завдяки контролеру робот може підключатися та спілкуватися з іншими системами. Цей компонент забезпечує роботу пам'яттю та обчислювальною потужністю, необхідною для роботи. Контролер робота діє як мозок всієї системи управління;

- датчики: роботи використовують датчики для збору даних з навколишнього середовища. Датчики - це очі і вуха робота. У ньому є кодери та інші інструменти, які керують рукою робота та повідомляють контролеру, яке завдання чи коригування виконувати;

- привід і джерело живлення: робот може використовувати електричний, пневматичний, гідравлічний або будь-який інший привід для отримання і перетворення енергії, необхідної для його роботи;

- роботизована рука: призначені для імітації людської руки, роботизовані руки являють собою конструкції з декількох сегментів шарнірних сегментів, з'єднань, ланок, передач і одну або більше головок, з'єднаних суглобами/зв'язками. Суглоби можуть бути запрограмовані на рух у потрібному напрямку;

- кінцеве оснащення руки (ЕОАТ) / кінцеві ефектори: ЕОАТ: спеціальне обладнання/приводи, підключені на кінці роботизованої руки у вигляді лазерної головки та будь-яких інструментів чи пристроїв, які використовуються для виконання певних операцій, таких як зварювання, переміщення матеріалів, фарбування, складання тощо. Деякі промислові роботи підтримують заміну ЕОАТ, що дозволяє їм виконувати різні операції;

- системи зору: камери, фотоелементи та системи обробки зображень, розпізнавання обличчя та інші програми зору.

Промислові роботи відіграють важливу роль у сучасному виробництві, оптимізуючи процеси та підвищуючи ефективність. Вони бувають різних

типів, кожен з яких призначений для виконання певних завдань. До них відносяться декартові роботи, шарнірні роботи, циліндричні роботи, дельта-роботи, полярні роботи, роботи SCARA та колаборативні роботи [7].

Розуміння відмінностей між цими типами має вирішальне значення для оптимізації рішень з автоматизації в різних галузях промисловості.

Декартові роботи, також відомі як портальні роботи, - це тип промислових роботів, які виконують лінійні рухи в просторі. Вони рухаються вздовж осей x , y та z , які є ортогональними/перпендикулярними одна до одної. Декартові роботи формують кубічну робочу зону/оболонку.

Ці роботи отримали свою назву від декартової системи координат, яка представляє точки в просторі як функцію їх найкоротших відстаней від заданих осей. Декартова система координат була розроблена Рене Декартом, видатним французьким математиком, відомим тим, що у своїх роботах поєднав геометрію з алгеброю (які раніше вважалися окремими науками).

Ключові переваги декартових роботів:

- простота конструкції та експлуатації: декартовим роботам надають перевагу через їхню простоту. Оскільки вони рухаються лише вздовж осей x , y та z по прямій лінії, їх легко будувати, програмувати та експлуатувати;
- висока точність: завдяки простоті конструкції та експлуатації, декартовими роботами можна точно керувати. Їхні рухи надзвичайно точні, що робить їх ідеальними для високоточних застосувань;
- доступні за ціною: проста конструкція декартових роботів і можливість їх переналаштування для різних процесів робить їх економічно вигідними.

Основні недоліки декартових роботів:

- займають більше місця: з усіх промислових роботів декартові роботи потребують найбільше місця для роботи;

- обмежена швидкість і прискорення: рухи декартових роботів повільні, що робить їх непридатними для певних застосувань, які вимагають швидких операцій;

- відсутність гнучкості: декартові роботи придатні лише для певних рухів, для яких вони призначені. Їх важко пристосувати для чогось іншого.

Декартові роботи використовуються для операцій "взяти і розмістити", які часто зустрічаються в пакуванні та інспекції. Вони також використовуються для автоматизації процесів різання, креслення, 3D-друку та роботи з ЧПК.

Шарнірні роботи - це промислові роботи з поворотними з'єднаннями. Суглоби, як правило, приводяться в рух серводвигунами і називаються осями робота. Рухи простих шарнірних роботів нагадують рухи людської руки. У складних конструкціях кількість таких суглобів може досягати і навіть перевищувати 10. Шарнірних роботів також називають роботами з шарнірними руками.

Ключові переваги шарнірних роботів:

- більша гнучкість: шарнірні роботи мають кілька поворотних з'єднань, що робить їх придатними для різних видів рухів;
- висока швидкість: шарнірні роботи можуть працювати на високих швидкостях і є чудовим інструментом для підвищення продуктивності процесу, в якому вони беруть участь.

Основні недоліки шарнірних роботів:

- складність: роботи з поворотними зчленуваннями мають бути виготовлені за більш складним технологічним процесом, ніж ті, що виконують лінійні або бічні рухи. Поворотні суглоби вимагають більшої кількості деталей і ретельнішого підходу до створення;
- висока вартість: оскільки конструкція шарнірних роботів складна, їх складно виготовляти та експлуатувати, що робить їх дорогими у володінні та обслуговуванні.

Шарнірні роботи – це клас роботів, який включає кілька різних типів машин. Тому список додатків великий. Наприклад, ці роботи використовуються для фарбування, нанесення покриттів, зварювання та пакування.

Циліндричні роботи – це промислові роботи, що мають поворотний шарнір в основі, з'єднаний з валом за допомогою руки з призматичним шарніром. Робот має три осі руху, дві з яких лінійні, а одна кругова. Вал, з'єднаний з основою бота, може обертатися, а рука може рухатися вгору і вниз і навіть висуватися, утворюючи циліндричну робочу зону.

Основною перевагою циліндричних роботів є їх висока вантажопідйомність, завдяки якій вони можуть легко переносити важкі предмети за допомогою своїх потужних роботизованих рук.

Основні недоліки циліндричних роботів полягають у тому, що вони займають багато місця і не мають значних переваг, що робить їх менш бажаним варіантом у порівнянні з іншими промисловими роботами.

Циліндричні роботи можуть використовуватися для автоматизації зварювання, переміщення матеріалів, складальних операцій, фарбування та деяких інших застосувань, що вимагають роботи з круговою симетрією.

Дельта - роботи – це промислові роботи, виконані на жорсткій трикутній рамі. Рама встановлена безпосередньо над робочою зоною, на кожній руці розміщений серводвигун з високим крутним моментом. Вал двигуна з'єднаний з рукою, яка називається "біцепс", що витягується в напрямку, перпендикулярному до осі обертання двигуна. Інший кінець біцепса з'єднаний зі стрижнями, розташованими у формі паралелограма. Залежно від застосування, паралелограмні стрижні можуть бути з'єднані з різними маніпуляторами ЕОАТ (кінцевим оснащенням руки).

Більша частина ваги робота припадає на двигуни, з'єднані в основі установки, що робить рухомі частини легкими. Таким чином, рухомі частини мають низьку інерцію і можуть швидко прискорюватися і працювати на високих швидкостях [11].

Ключові переваги дельта-роботів полягають у їхній високій швидкості та прискоренні, оскільки рухомі частини мають низьку інерційність, що дозволяє їм швидко прискорюватися і працювати на високій швидкості.

Основними недоліками дельта - роботів є те, що вони не можуть переносити важкі вантажі, оскільки легкі рухомі частини не підходять для таких задач.

Дельта - роботи добре справляються зі швидким підбором і розміщенням товарів, необхідних у медичній та харчовій промисловості. Вони також використовуються в пакуванні та пайці.

Полярні роботи, або сферичні роботи - це промислові роботи з двома поворотними і одним лінійним шарнірами. Обертальний рух і вертикальний підйом робота можливі завдяки поворотним шарнірам. Лінійний шарнір полегшує витягування руки робота, що дозволяє йому розширювати робочий простір навколо себе, в результаті чого робоча зона стає сферичною.

Ці роботи отримали свою назву від полярної системи координат – системи координат, в якій кожна точка простору характеризується її відстанню від початку координат і кутом, який вона утворює з осями відносно початку координат.

Ключовою перевагою полярних роботів є їхня хороша вантажопідйомність, оскільки вони можуть легко піднімати важкі предмети завдяки потужним суглобам.

Основні недоліки полярних роботів:

- велика площа: конструкція полярних роботів не дозволяє повною мірою використовувати наявний робочий простір, що робить їх громіздкими;
- складна конструкція: через велику кількість з'єднань полярні роботи складні в конструкції;
- висока вартість: через складну конструкцію придбання та обслуговування дельта-роботів є дорогим.

Сьогодні полярні роботи здебільшого замінюються шарнірними роботами через їхню вищу продуктивність. Вони все ще використовуються

для лиття під тиском, переміщення матеріалів, зварювання та деяких інших загальних застосувань.

SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) – тип шарнірно-зчленованих роботів-маніпуляторів із селективною відповідністю. Серед роботів маніпуляторів роботи SCARA є одними з найшвидших та найстійкіших. Пов'язано це з тим, що чотири осі робота мають менше рухливих шарнірів і розташовані так, що перші дві осі J1 і J2 забезпечують обертання навколо осі Z і управляють переміщенням по осях X-Y, а J3 і J4 управляють як переміщенням, так і обертанням по осі Z. Роботи SCARA є найкращим рішенням для процесів, у яких важливим фактором є тривалість циклу.

Професор Хіроші Макіно розробив перший прототип робота SCARA в Університеті Яманаші, Японія, у 1978 році. Від інших роботів того часу його відрізняло те, що він виконував різні завдання з обмеженою рухливістю.[2] Роботи SCARA з'явилися на комерційних виробництвах у 1981 році і пропонували відмінну продуктивність за таку ціну.

Основні переваги роботів SCARA:

- повторюваність позицій: з усіх шарнірно - зчленованих роботів SCARA мають найкращу повторюваність позиціонування;
- легко монтуються і займають мало місця: роботи SCARA мають шарнірну основу, яку можна легко встановити на тверду поверхню за допомогою підлогового кріплення. Площа кріплення невелика, що не заважає розташованим поруч об'єктам;
- висока швидкість для помірних навантажень: замість того, щоб висіти над робочою зоною (як дельта-роботи), SCARA можуть бути міцно закріплені на поверхні, що робить їх більш стійкими до ударів. Це дозволяє їм працювати з важкими вантажами швидше порівняно з іншими типами роботів, такими як дельта-роботи та декартові роботи.

Основним недоліком роботів SCARA є те, що вони підходять для легких або помірно важких вантажів, оскільки зазвичай призначені для

переміщення вантажів вагою до 10 кг, що робить їх непридатними для роботи з важкими об'єктами.

Основними сферами застосування роботів SCARA є високошвидкісні завдання, що вимагають високої точності. Це дуже універсальні роботи, які можна використовувати для таких завдань, як гравірування, переміщення матеріалів тощо.

Колаборативні роботи або коботи – це промислові роботи, які ділять свій робочий простір з людиною. Ці роботи об'єднуються з людьми і працюють над завданнями, для яких вони призначені. Оскільки коботи повинні перебувати поруч з людьми, вони розроблені таким чином, щоб бути безпечними.

Роботи використовують різні датчики, щоб бути впевненими, що вони виявляють несподівану поведінку людини і працюють безпечно. Іноді коботів змушують працювати зі зниженою швидкістю та зусиллям, коли поруч знаходиться людина. Однак навіть у цьому випадку вони повинні зберігати свою продуктивність і ефективність, щоб їх дійсно варто було використовувати в промисловому просторі.

З такою кількістю обмежень і компонентів коботи стають дуже складними у розробці. Вони мають високу вартість, але гарантують, що підвищують загальну продуктивність людей, які з ними працюють.

Основні переваги коботів:

- безпечні для людей: робота з коботами абсолютно безпечна для людини. На відміну від типових промислових роботів, коботи мають м'яку зовнішність і різні датчики, що дозволяє людям працювати з ними без ризику отримати травму;
- зручні для користувача: роботи мають дуже зручний інтерфейс. Вони побудовані відповідно до людської поведінки, щоб взаємодія була максимально природною;
- адаптивні та гнучкі: роботів легко переналаштовувати для різних застосувань.

Основні недоліки коботів:

- обмежена швидкість: для забезпечення безпеки людей, які працюють поруч, коботи повинні працювати на обмеженій швидкості, навіть якщо вони здатні її підвищити;
- дорогий і великий: через додавання всіх датчиків, необхідних для забезпечення безпеки, коботи коштують дорожче і, як правило, мають більші розміри, ніж інші роботи, які не працюють поруч з людьми;
- вимагають різних дозволів: у різних країнах світу діють різні правила, які гарантують, що роботи, які співпрацюють з людьми, є абсолютно безпечними для роботи. Отримання всіх дозволів, необхідних для створення і введення в експлуатацію коботів, може бути тривалим процесом [12].

Крім вищевказаних типів робіт, існують та інші типи, які можуть бути використані в системах моделювання виробництва. Деякі з них включають:

- паралельні роботи: мають кілька суглобів, які працюють паралельно до одного. Вони можуть бути дуже швидкими і точними, що робить їх ідеальними для завдань, що вимагають швидкої реакції та точності, таких як маніпуляції з електронними компонентами;
- мобільні роботи: можуть переміщатися по виробничому простору та виконувати різні завдання, такі як транспортування матеріалів, сканування та інспектування. Вони зазвичай оснащені датчиками, які дозволяють їм визначити ваше розташування та уникнути перешкод;
- гнучкі роботи: мають гнучкі кінцівки, які можуть прогинатися та викривлятися, щоб досягти важкодоступних місць. Вони часто використовують у завданнях, пов'язаних з монтажем, обслуговуванням та ремонтом складних систем та обладнання;
- вибіральні роботи: оснащені системами штучного інтелекту і можуть навчатися виконанню конкретних завдань. Вони можуть бути використані для автоматизації процесів, які вимагають гнучкості та адаптивності, таких як сортування, пакування та монтаж.

Кожен тип роботи має свої унікальні особливості і може бути використаний у різних виробничих завданнях. Вибір конкретного типу роботи залежить від характеристик виробництва та вимог до виконання завдань.

Промислові роботи пройшли довгий шлях від простих механічних інструментів для виконання повторюваних дій до високоінтегрованих і надійних об'єктів, які можна запрограмувати практично на все, що завгодно. Стрімкі інновації в галузі штучного інтелекту в поєднанні з останніми розробками в мехатроніці продовжуватимуть формувати наступне покоління промислових роботів [13].

1.4 Механічна конструкція та кінематика

Механічна конструкція промислових роботів є складним інженерним вирішенням, що включає в себе використання різноманітних матеріалів та технологій. Конструкція робота повинна бути витонченою для забезпечення не лише міцності та стійкості, але й оптимальної ваги для ефективності руху.

У виробничих роботах часто використовуються легкі, але міцні матеріали, такі як алюміній або титан, щоб забезпечити необхідну міцність та маневреність. Основна конструкція може включати рухливі суглоби, що дозволяють роботам виконувати різні рухи, а також датчики для отримання інформації про оточуюче середовище.

З точки зору механічної структури промислові роботи зазвичай поділяються на послідовних і паралельних роботів. Характеристика серійного робота полягає в тому, що рух однієї осі змінить початок координат іншої осі, тоді як рух однієї осі паралельного робота не змінить початок координат іншої осі. Ранні промислові роботи використовували серійні механізми. Паралельний механізм визначається як замкнутий механізм, у якому рухома платформа та нерухома платформа з'єднані щонайменше двома незалежними кінематичними ланцюгами, механізм має

два або більше ступенів свободи та приводиться в рух паралельно. Паралельний механізм складається з двох компонентів: зап'ястя та руки. Активна зона руки має великий вплив на активний простір, а зап'ястя є сполучною частиною інструменту та основного корпусу. У порівнянні з серійними роботами, паралельні роботи мають такі переваги, як висока жорсткість, стабільна структура, велика вантажопідйомність, висока точність мікроруху та невелике рухове навантаження. З точки зору позиційного рішення, пряме рішення серійного робота легко, але зворотне рішення дуже складне; навпаки, пряме рішення паралельного робота складне, але зворотне рішення дуже просте [14].

Промислові роботи класифікуються на кілька категорій, таких як вертикальний шарнірний тип і горизонтальний шарнірний тип (Selective Compliance Assembly Robot Arm – SCARA), залежно від рухів суглобів і структури.

Вертикальний шарнірний робот – це промисловий робот із структурою послідовного зв'язку. Зазвичай він складається з шести суглобів (6 осей) (рис.1.3).

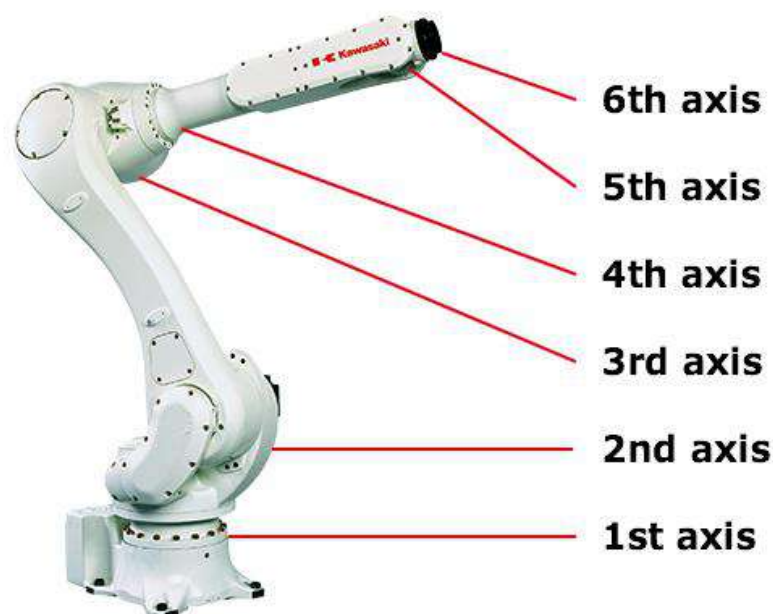


Рисунок 1.3 - Приклад вертикального шарнірного робота [15]

На наступному рисунку 1.4 показано порівняння руху робота та людини.

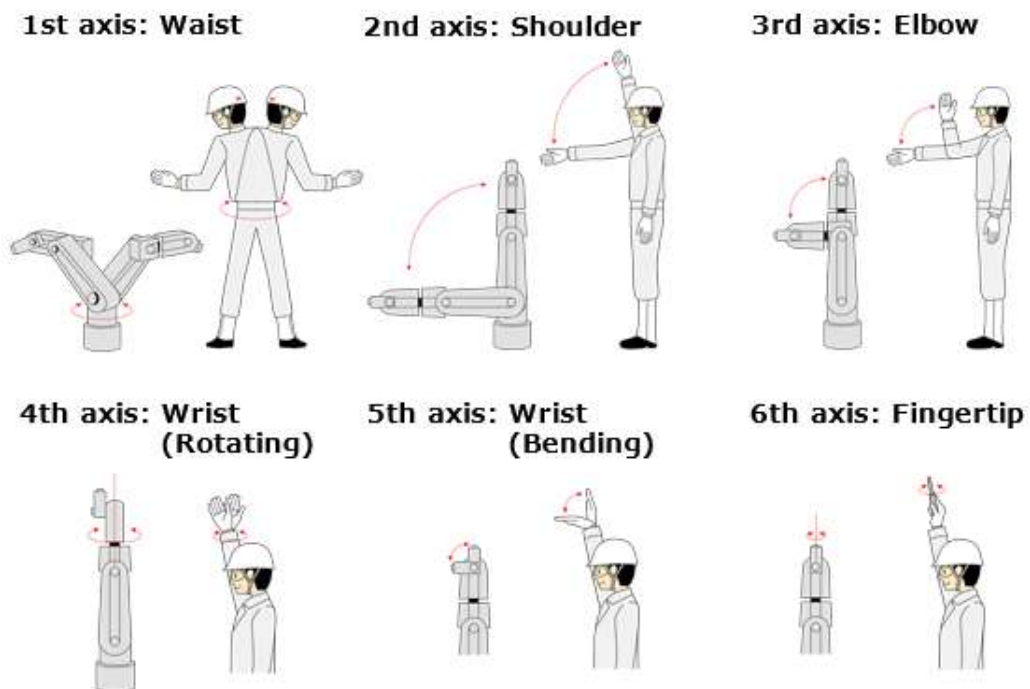


Рисунок 1.4 - Порівняння руху робота та людини [15]

Осі з 1 по 3 – це поперек і рука, а осі з 4 по 6 - від зап'ястя до кінчиків пальців. Перші три осі переміщують зап'ястя в певне положення, а наступні три осі вільно рухають зап'ястя. Ця 6-осьова конструкція дозволяє роботам вільно пересуватися, як люди.

На рисунку 1.5 показано структуру малого та середнього корисного навантаження універсального робота «серії R» від Kawasaki Heavy Industries або Kawasaki. Ця серія R працює в широкому діапазоні галузей, таких як складання електронних пристроїв і дугове зварювання. Оскільки кабелі та джгути можна вбудувати всередину руки, можна уникнути перешкод із периферійним обладнанням і робот може працювати в невеликому просторі. Його визначальною особливістю є швидкість роботи, яка може відповідати спритним рухам.

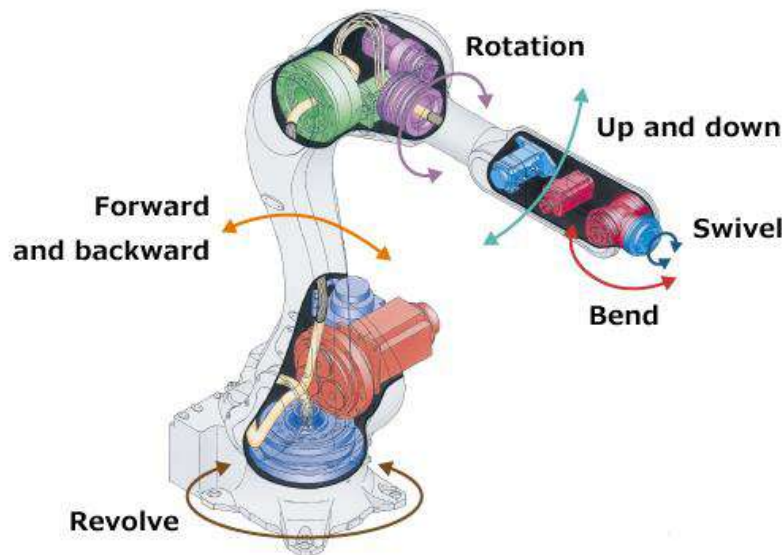


Рисунок 1.5 - Структура малого та середнього корисного навантаження універсального робота [15]

На цьому рисунку видно, що робот складається з багатьох різних частин. Серед цих частин є чотири особливо важливі: привід, редуктор, кодер і трансмісія.

Привід або актуатор – це компонент, який функціонує як шарнір робота, що дозволяє роботу рухати рукою вгору та вниз або обертати, і він перетворює енергію на механічні рухи.

Актуатори відповідають за створення певних рухів і керування рухами шарнірного робота. Роботи, як правило, мають кілька приводів, кількість яких відповідає кількості осей робота. Кожен привід функціонує як суглоб робота, керуючи певним рухом робота. Серводвигуни є найпоширенішими приводами, що використовуються в промислових роботах, оскільки вони мають розширену функціональність, яка дозволяє досягти надзвичайної точності. Роботизовані приводи зазвичай живляться від електромережі, але також можуть мати гідравлічне або пневматичне живлення.

Точки, позначені червоними кружечками на рис. 1.6, є положенням двигунів серії R.

Locations and roles of the motors

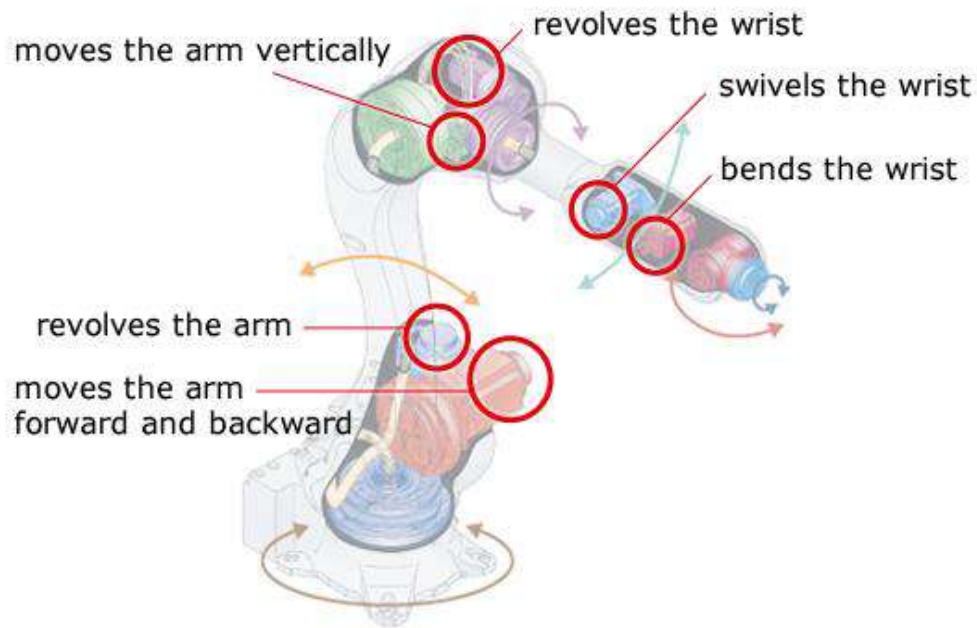


Рисунок 1.6 - Положення двигунів у ПР [15]

Однак, якщо це простий двигун, такий як ті, які використовуються в наборах пластикових моделей, точну роботу, яка потребує точних рухів і точності 0,01 мм, неможливо виконати, наприклад. Тому для промислових роботів використовується високофункціональний двигун, який називається сервомотором, який може контролювати положення та швидкість.

Найпоширенішим джерелом енергії для живлення приводів є електрика, але також можна використовувати гідравлічну та пневматичну енергію. Деякі приводи з гідравлічним приводом унікальні тим, що вони можуть генерувати велику потужність і стійкі до ударів.

Редуктор – це пристрій для збільшення потужності двигуна. Потужність одного двигуна обмежена. Щоб генерувати велику потужність, двигуни в основному використовуються в поєднанні з цим редуктором. Області, обведені синім кольором на рис. 1.7, є редукторами.

Locations and roles of the reduction gears

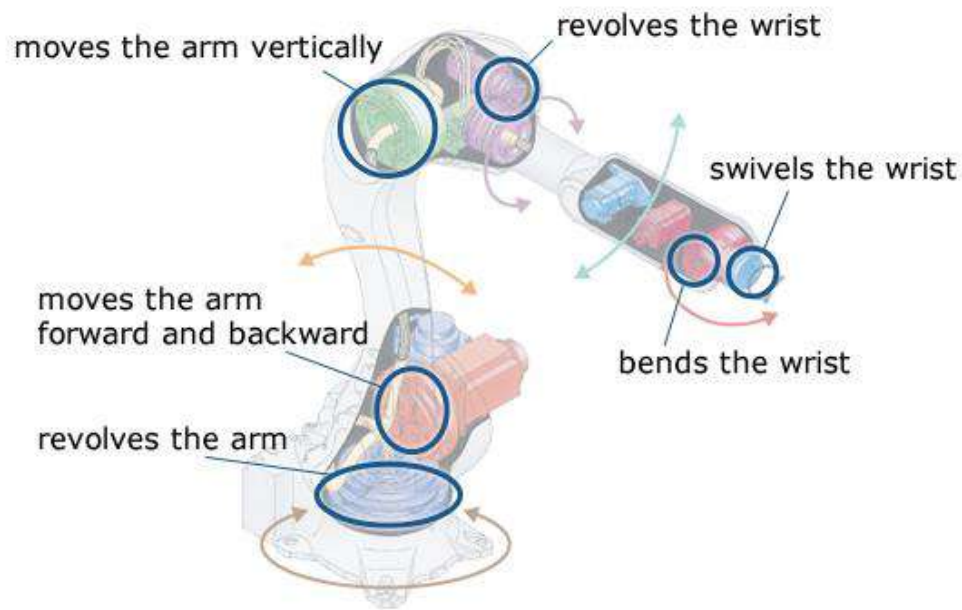


Рисунок 1.7 - Положення редукторів у ПР [15]

Редуктори використовуються для збільшення потужності кожного привода. Поєднання редукторів і приводів дає високу потужність, необхідну для роботи промислових роботів. Кожен привід має свій власний редуктор.

Кодувальник (енкодер) – це пристрій, який вказує положення (кут) обертового вала двигуна. Маючи кодер, він може надати відчутні дані про те, в якому напрямку і скільки рухається робот. Загальні оптичні кодери мають диск, прикріплений до обертового валу двигуна. Диск має щілини з регулярними інтервалами, щоб пропускати світло, а з обох боків диска розташовані світловипромінюючий діод (LED) і світлоприймальні елементи (фотодіоди) для розрізнення інтенсивності світла (світло і темно).

Коли двигун обертається, світло або проходить через щілини, або блокується, тому кут обертання та швидкість можна визначити, зчитуючи сигнали. Це дозволяє сервомоторам точно контролювати положення та швидкість [15].

Трансмісія – це компонент, який передає потужність, що створюється приводами та редукторами. Трансмісія також здатна змінювати напрямки і

величину потужності. Розглядаючи велосипед як приклад, як і раніше, ланцюг, який з'єднує кривошип із заднім колесом, є трансмісією. Велосипеди приводяться в рух, приймаючи обертальний рух від педалей і передаючи його на заднє колесо за допомогою трансмісії.

Ця ідея також застосована до структури робота. Двигун, який використовується в роботах, зазвичай розміщується поблизу з'єднань, але його також можна розмістити подалі від з'єднань за допомогою механізмів передачі, таких як ремені та шестерні. Наприклад, у зап'ясті роботів серії R, оскільки двигун можна встановити на ліктьовій частині руки за допомогою провідного механізму, компактне зап'ястя є можливим [16].

Щодо кінематики, вона вивчає рух та взаємодію різних частин робота. Це важливо для програмування точних рухів робота, щоб він міг виконувати завдання з високою точністю та ефективністю. Розуміння кінематики також допомагає уникати колізій та оптимізувати траєкторії руху.

У робототехніці кінематика роботів застосовує геометрію для вивчення руху кінематичних ланцюгів із кількома ступенями свободи, які утворюють структуру роботизованих систем. Акцент на геометрії означає, що ланки робота моделюються як тверді тіла, а його суглоби забезпечують чисте обертання або переміщення [17].

Кінематика робота вивчає взаємозв'язок між розмірами та зв'язністю кінематичних ланцюгів і положенням, швидкістю та прискоренням кожної з ланок робототехнічної системи, щоб планувати та контролювати рух, а також обчислювати сили та моменти приводу. Зв'язок між властивостями маси та інерції, рухом і пов'язаними силами та крутними моментами вивчається як частина динаміки роботів [18].

Фундаментальним інструментом кінематики робота є кінематичні рівняння кінематичних ланцюгів, які утворюють робота. Ці нелінійні рівняння використовуються для відображення параметрів з'єднань у конфігурації системи робота. Розрізняють два види кінематики: пряму та зворотню.

Пряма кінематика використовує кінематичні рівняння робота для обчислення положення кінцевого ефектора на основі заданих значень параметрів з'єднання. Пряма кінематика визначає параметри з'єднання та обчислює конфігурацію ланцюга. Для послідовних маніпуляторів це досягається шляхом прямої підстановки параметрів з'єднання в прямі кінематичні рівняння для послідовного ланцюга. Для паралельних маніпуляторів підстановка параметрів з'єднання в кінематичні рівняння вимагає вирішення набору поліноміальних обмежень для визначення набору можливих місць розташування кінцевого ефектора.

Зворотний процес, який обчислює спільні параметри, які досягають заданої позиції кінцевого ефектора, відомий як зворотна кінематика. Розміри робота та його кінематичні рівняння визначають об'єм простору, доступного роботіві, відомого як його робочий простір. Зворотня кінематика вказує розташування кінцевого ефектора та обчислює відповідні кути з'єднання. Для серійних маніпуляторів це вимагає вирішення набору поліномів, отриманих з кінематичних рівнянь, і дає кілька конфігурацій для ланцюга. Випадок загального послідовного маніпулятора 6R (послідовний ланцюг із шістьма поворотними шарнірами) дає 16 різних зворотних кінематичних рішень, які є рішеннями полінома шістнадцятого ступеня. Для паралельних маніпуляторів специфікація розташування кінцевого ефектора спрощує кінематичні рівняння, що дає формули для параметрів з'єднання [19].

Похідна за часом кінематичних рівнянь дає Якобіан робота, який пов'язує швидкість з'єднання з лінійною та кутовою швидкістю кінцевого ефектора. Принцип віртуальної роботи показує, що Якобіан також забезпечує взаємозв'язок між крутними моментами з'єднання та результуючою силою та крутним моментом, що прикладаються кінцевим ефектором. Особливі конфігурації робота визначаються шляхом вивчення його Якобіана.

Робот Якобіан призводить до набору лінійних рівнянь, які пов'язують швидкості з'єднання з шестивектором, утвореним із кутової та лінійної

швидкості кінцевого ефектора, відомого як скручування . Вказівка спільних коефіцієнтів безпосередньо дає скручування кінцевого ефектора.

Проблема зворотної швидкості шукає швидкості з'єднань, які забезпечують задане скручування кінцевого ефектора. Це вирішується інвертуванням матриці Якобі . Може статися, що робот знаходиться в конфігурації, де якобіан не має зворотного. Вони називаються сингулярними конфігураціями робота.

Принцип віртуальної роботи дає набір лінійних рівнянь, які пов'язують результуючий шестивектор сили крутного моменту, який називається гайковим ключем , який діє на кінцевий ефектор, із крутними моментами в з'єднанні робота. Якщо відомий кінцевий гайковий ключ , то прямий розрахунок дає крутний момент з'єднання.

Зворотна проблема статички шукає кінцевий гайковий ключ, пов'язаний із заданим набором крутних моментів з'єднання, і вимагає оберненої матриці Якобі. Як і у випадку аналізу оберненої швидкості, при сингулярних конфігураціях цю проблему вирішити неможливо. Однак малі крутні моменти приводу поблизу сингулярностей призводять до великого гайкового ключа. Таким чином, роботи в конфігураціях поблизу сингулярності мають велику механічну перевагу .

Кінематика роботів також має справу з плануванням руху , уникненням сингулярності, надлишковістю, уникненням зіткнень, а також кінематичним синтезом роботів [20].

Узагальнюючи, успішна механічна конструкція та розуміння кінематики є ключовими елементами для створення продуктивних та надійних промислових роботів.

Після викладення теоретичних основ промислових роботів у попередньому розділі, слід перейти до розгляду систем моделювання промислової робототехніки. Спираючись на створену теоретичну базу, у наступному розділі розглядатимуться аспекти, пов'язані з моделюванням

поведінки та функціонуванням промислових роботів у віртуальних середовищах.

Висновки до розділу 1

В першому розділі було досліджено поняття промислових роботів. Вони різноманітні за структурою та функціями, а їхня класифікація варіюється від шарнірно-зчленованих і декартових роботів до роботів SCARA, дельта-роботів і роботів для спільної роботи.

Центральним елементом їхньої роботи є складна апаратна система, що складається з маніпулятора, кінцевого ефектора, приводної системи, системи керування та джерела живлення. Крім того, ключову роль відіграють сенсорні системи, що охоплюють датчики положення, сили/крутного моменту, зору, наближення та безпеки, які забезпечують точну та адаптивну взаємодію з навколишнім середовищем.

Типи промислових роботів відповідають конкретним завданням і експлуатаційним вимогам, пропонуючи унікальні переваги в універсальності, точності і швидкості. Шарнірні роботи імітують рухи рук людини, декартові роботи працюють у тривимірній системі координат, роботи SCARA відмінно справляються з горизонтальними рухами, дельта-роботи спеціалізуються на завданнях, пов'язаних з підбором і переміщенням, а колаборативні роботи сприяють співпраці між людиною і роботом.

Крім того, механічна конструкція і кінематика промислових роботів є фундаментальними факторами в оптимізації продуктивності. Вантажопідйомність, досяжність, швидкість і точність нерозривно пов'язані з механічною конфігурацією робота, в той час як дослідження кінематики висвітлюють моделі руху і взаємозв'язок між кутами зчленування, довжиною ланок і положенням кінцевого ефекту.

За результатами проведеного аналізу зроблено висновки, що наукові дослідження та практичний досвід використання промислових роботів

свідчать про їх великий потенціал у поліпшенні ефективності та автоматизації виробничих процесів. Класифікація, апаратна база, сенсорна система, типи та механічний дизайн промислових роботів виявилися ключовими аспектами, які визначають їх можливості та функціональність. Розуміння цих аспектів дозволяє ефективно впроваджувати роботизовані системи у різноманітних галузях виробництва, забезпечуючи підвищення продуктивності, якості та безпеку праці.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ СИМУЛЯЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

2.1 Опис різних програмних платформ для симуляції промислових роботів

Системи симуляції виробництв є важливим інструментом для оптимізації виробничих процесів та підвищення ефективності роботи підприємств. У разі, коли реальне виробництво неможливо використовувати для оптимізації, симуляція виробництва може бути корисним інструментом для моделювання виробничих процесів та передбачення їхньої поведінки у різних умовах.

Високотехнологічні роботи потребують ефективних засобів тестування та розробки програмного забезпечення для їхнього оптимального функціонування. У цьому контексті ключовим елементом стає використання програмних платформ для симуляції промислових роботів. Ці платформи відкривають перед розробниками та дослідниками віртуальну лабораторію для вивчення та вдосконалення функціональних можливостей роботів, при цьому уникненням потенційних збитків реальним об'єктам.

Нижче був проведений аналіз різноманітних програмних платформ для симуляції промислових роботів. Кожна з обраної групи платформ володіє своєю власною унікальною архітектурою та функціоналом, розкриваючи нові можливості для подальшого розвитку робототехніки та підвищення її ефективності. Давайме зосередимось на деталях кожної з обраної програмної платформи, проаналізуємо їхні можливості та роль у сучасній галузі промислової робототехніки.

Існує багато програмних засобів для симуляції виробництв, які допомагають оцінити та оптимізувати різні аспекти виробничого процесу. Існує безліч систем симуляції виробництв, деякі з них є комерційними продуктами, інші знаходяться у відкритому доступі [24].

Одні з найбільш популярних комерційних систем симуляції виробництв включають: RoboDK, ABB Robot Studio, Fuzzy Studio, DELMIA, Vention, Visual Components, Wandelbots.

RoboDK – це програмне рішення для роботів і верстатів з ЧПК. Він дозволяє моделювати, програмувати та оптимізувати роботів і верстати з ЧПК у віртуальному середовищі. Це дозволяє користувачам скоротити час і витрати, пов'язані зі створенням прототипів і тестуванням, а також підвищити якість і точність своїх продуктів. RoboDK підтримує широкий спектр роботів і верстатів з ЧПК від різних виробників, включаючи ABB, Fanuc, KUKA, Motoman і Universal Robots. За допомогою RoboDK користувачі можуть програмувати роботів за допомогою інтерфейсу перетягування або за допомогою мов сценаріїв, таких як Python або C#.

Програмне забезпечення також дозволяє користувачам імпортувати 3D - моделі деталей та інструментів, а також імітувати весь виробничий процес у віртуальному середовищі. Крім того, RoboDK містить бібліотеку готових програм для роботів і постпроцесорів, що дозволяє користувачам легко програмувати роботів для конкретних завдань. Крім того, RoboDK надає хмарну платформу для співпраці, яка дозволяє користувачам ділитися та співпрацювати з іншими програмами та симуляціями своїх роботів [26]. Інтерфейс програмного забезпечення RoboDK представлений на рис. 2.1.

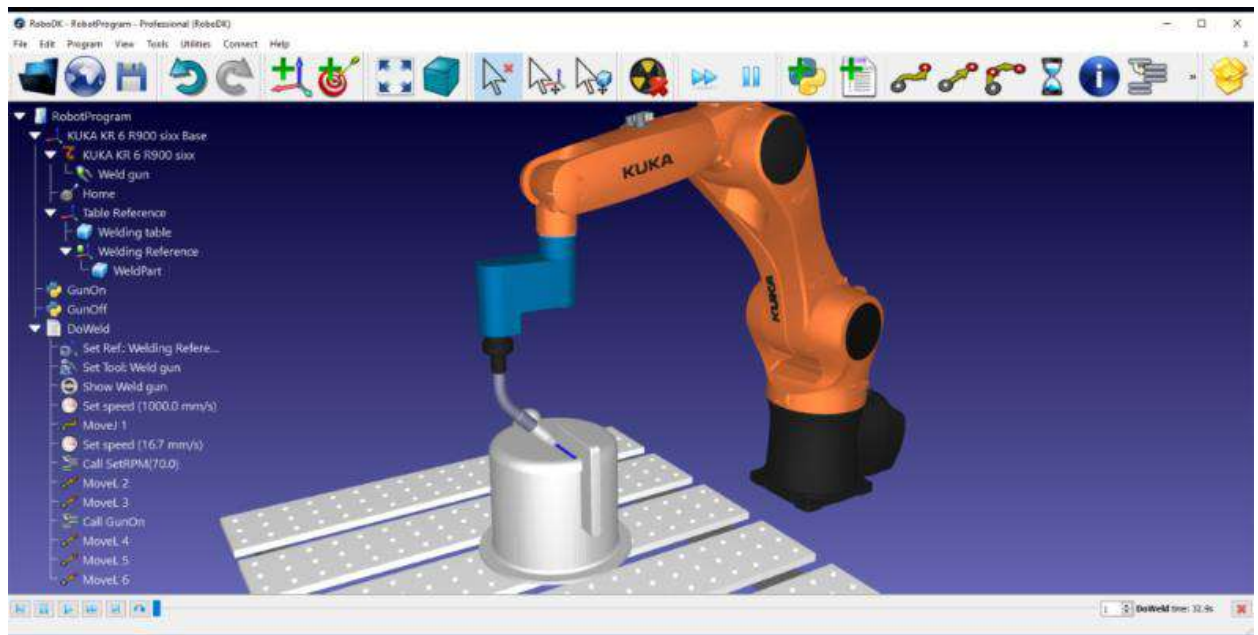


Рисунок 2.1 - Інтерфейс програмного забезпечення RoboDK [28]

RoboDK також надає комплексний API (інтерфейс прикладного програмування), який дозволяє користувачам програмно взаємодіяти з програмним забезпеченням. API дозволяє користувачам автоматизувати завдання, інтегрувати RoboDK з іншими програмними додатками та оптимізувати робочі процеси. Майте на увазі, що з того часу API міг бути оновлений або змінений, тому радимо переглянути офіційну документацію RoboDK або зв'язатися зі службою підтримки RoboDK, щоб отримати останню інформацію.

RoboDK API (інтерфейс прикладної програми) – це набір процедур і команд, які RoboDK надає через мову програмування. RoboDK API дозволяє програмувати будь-якого робота за допомогою однієї з підтримуваних мов програмування, наприклад C#, Python або C++. Також можете автоматизувати повторювані завдання за допомогою RoboDK API. Будь-яку з цих мов програмування можна використовувати для моделювання та програмування будь-якої руки робота [28].

RoboDK API можна використовувати для таких завдань:

- автоматизувати моделювання: створення макросів для автоматизації конкретних завдань у симуляторі RoboDK, таких як рухомі об'єкти, опорні системи або роботи;

- офлайн-програмування за допомогою універсальної мови програмування: RoboDK генеруватиме спеціальні програми для певного контролера робота, коли використовується API (наприклад, програму на Python або C#). Програма робота генерується відповідно до постпроцесора, обраного для конкретного робота [28].

Іншими словами, ту саму програму, яка використовується для моделювання, можна використовувати для створення програм робота (офлайн-програмування) і для переміщення робота в реальному часі (онлайн-програмування) [25].

Розглянемо загальні аспекти RoboDK API.

RoboDK API підтримує кілька мов програмування, включаючи Python, C# і C++. Ця гнучкість дозволяє користувачам вибрати мову, яка найкраще відповідає їхнім потребам і існуючій програмній інфраструктурі.

API надає функції для виконання різних завдань у RoboDK, наприклад:

- завантаження та збереження програм;
- зміна позицій і конфігурацій робота;
- визначення параметрів інструменту та об'єкта;
- контроль середовища моделювання;
- зв'язок із зовнішніми пристроями чи системами;
- автоматизація сценаріїв;
- інтеграція із зовнішнім програмним забезпеченням.

При інтеграції з системами CAD/CAM RoboDK підтримує ряд широко використовуваних форматів файлів, таких як:

а) STEP (STP) – відкритий стандарт для обміну CAD-даними.

б) IGES (IGS) – формат для обміну моделями між різними системами CAD.

в) STL (STereoLithography) – формат для представлення тривимірної геометрії поверхні.

RoboDK надає потужні інструменти для тривимірної (3D) симуляції промислових роботів, що забезпечує користувачам такі можливості:

- безліч підтримуваних роботів: RoboDK підтримує широкий спектр промислових роботів різних виробників, включаючи ABB, KUKA, Fanuc, Yaskawa, Universal Robots та багато інших;
- гнучкі засоби візуалізації: RoboDK надає деталізовані 3D-моделі промислових роботів в своєму віртуальному середовищі. Моделі відображають всі елементи робота, включаючи кожен ступінь свободи, з'єднання та інші важливі деталі. Усі важливі ефекти світла, такі як тіні, освітлення та відбиття, відтворюються в сцені. Реалістичне освітлення дозволяє відображати різні аспекти об'єктів та робота залежно від їх положення та орієнтації;
- точна кінематика і динаміка: RoboDK використовує точні математичні моделі для кінематики та динаміки роботів, щоб забезпечити максимальну достовірність в симуляціях та програмуванні промислових роботів [28].

RobotStudio – це один з найпопулярніших у світі офлайн-інструмент програмування та моделювання для робототехнічних програм. Основною перевагою офлайнового програмування є проблема потреби в наявності реального обладнання. Базований на найкращій у своєму класі технології віртуального контролера, пакет RobotStudio дає вам повну впевненість у тому, що те, що ви бачите на екрані, відповідає тому, як робот рухатиметься в реальному житті. Ця унікальна технологія, що дозволяє створювати, тестувати та покращувати установку робота у віртуальному середовищі, значно прискорює час введення в експлуатацію та продуктивність. Інтерфейс програмного забезпечення ABB Robot Studio представлений на рис. 2.2.

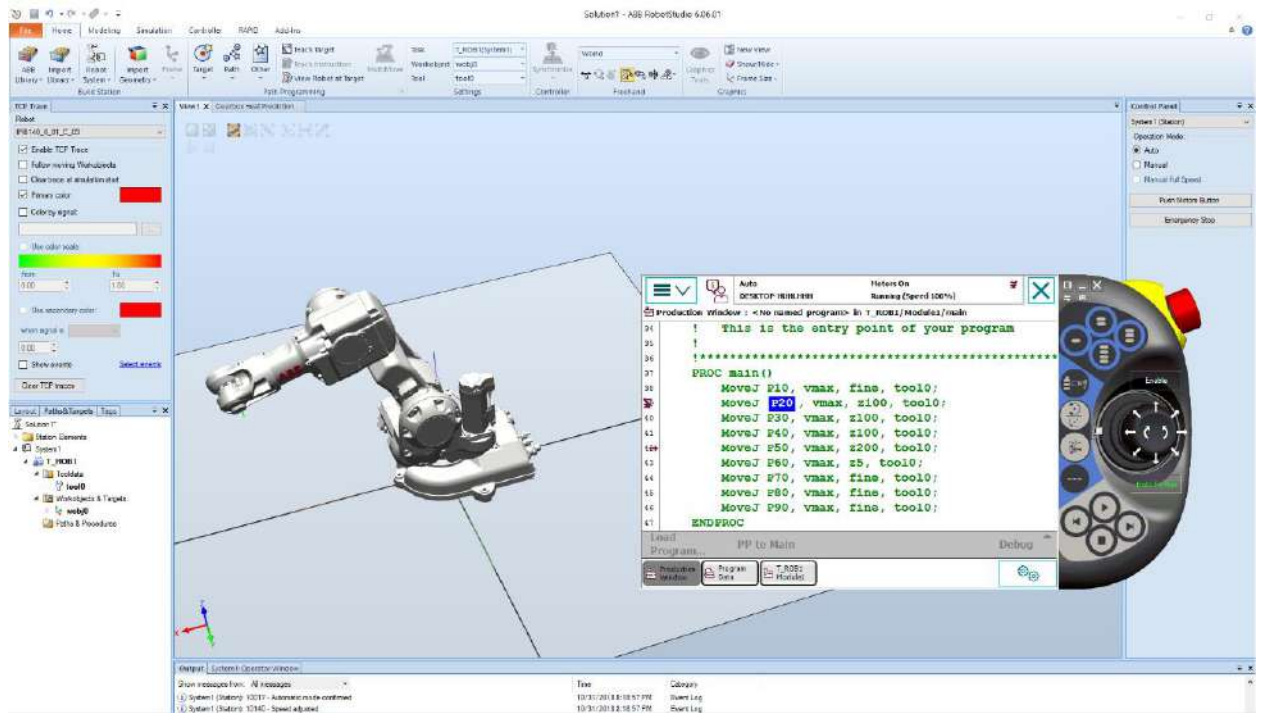


Рисунок 2.2 - Інтерфейс програмного забезпечення ABB Robot Studio [29]

RobotStudio дозволяє виконувати програмування та моделювання, не заважаючи поточному виробництву. RobotStudio Cloud дозволяє окремим особам і командам співпрацювати в режимі реального часу над проектуванням клітин роботів з будь-якої точки світу, на будь-якому пристрої. RobotStudio Augmented Reality Viewer дозволяє безкоштовно візуалізувати роботів і рішення в реальному середовищі або у віртуальній кімнаті на будь-якому мобільному пристрої. Як настільний, так і мобільний додаток дозволяють командам співпрацювати та швидше приймати рішення, прискорюючи етапи планування та проектування.

Також слід зазначити, що переміщення проекту з RobotStudio в контролер роботи займає кілька хвилин. При правильному написанні автономної програми для запуску в режимі он-лайн знадобитися лише невелика корекція координат точок траєкторії роботи (наприклад – координата зварних швів).

Ключові функції ABB Robot Studio:

- моделювання та програмування: ABB RobotStudio дозволяє користувачам імітувати роботу промислових роботів ABB у віртуальному середовищі перед фактичним впровадженням. Ця можливість моделювання допомагає тестувати й оптимізувати програми роботів без потреби у фізичних прототипах;
- офлайн-програмування: платформа підтримує офлайн-програмування, що дозволяє користувачам створювати та оптимізувати програми роботів без потреби у фізичному роботі. Це може призвести до значної економії часу та коштів у процесі програмування;
- інтерфейс програмування: ABB RobotStudio зазвичай надає інтуїтивно зрозумілий інтерфейс програмування, який дозволяє користувачам створювати програми роботів через графічний інтерфейс користувача (GUI). Це може включати такі функції, як програмування перетягуванням, що робить його доступним для користувачів із різним рівнем досвіду програмування;
- бібліотеки моделей роботів: програмне забезпечення містить бібліотеки моделей роботів ABB, що дозволяє користувачам вибирати та імітувати конкретні моделі роботів відповідно до вимог додатків;
- інтеграція з системами CAD: ABB RobotStudio часто інтегрується з різними системами CAD (Computer-Aided Design), дозволяючи користувачам імпортувати свої існуючі моделі CAD і працювати з ними. Це полегшує плавний перехід від фази проектування до програмування та моделювання робота;
- емуляція контролера робота: платформа може надавати функцію емуляції контролера, що дозволяє користувачам тестувати та перевіряти програми робота в симульованому середовищі контролера перед розгортанням їх на фізичному роботі;
- симуляція кількох роботів: деякі версії ABB RobotStudio підтримують моделювання кількох роботів, що працюють разом, що

дозволяє користувачам моделювати та оптимізувати складні сценарії виробництва;

– навчання та навчання: ABB RobotStudio можна використовувати в освітніх цілях, забезпечуючи безпечне середовище для навчання та навчання програмуванню та експлуатації роботів [29].

Fuzzy Studio – це платформа, яка має інтуїтивно зрозуміле автоматизоване програмування та моделювання без використання коду. Він спроектований так, щоб бути зручним для користувача та усунути потребу в широких навиках робототехніки чи програмування.

Fuzzy Studio дозволяє фахівцям, не відриваючись від робототехніки, моделювати та програмувати промислових роботів. Він універсальний, сумісний з більшістю брендів-роботів, представлених на ринку, і дозволяє навіть тим, у кого немає досвіду в робототехніці або програмуванні, створенні, програмуванні та моделюванні своєї власної робототехніки. Інтерфейс програмного забезпечення Fuzzy Logic представлений на рис. 2.3.

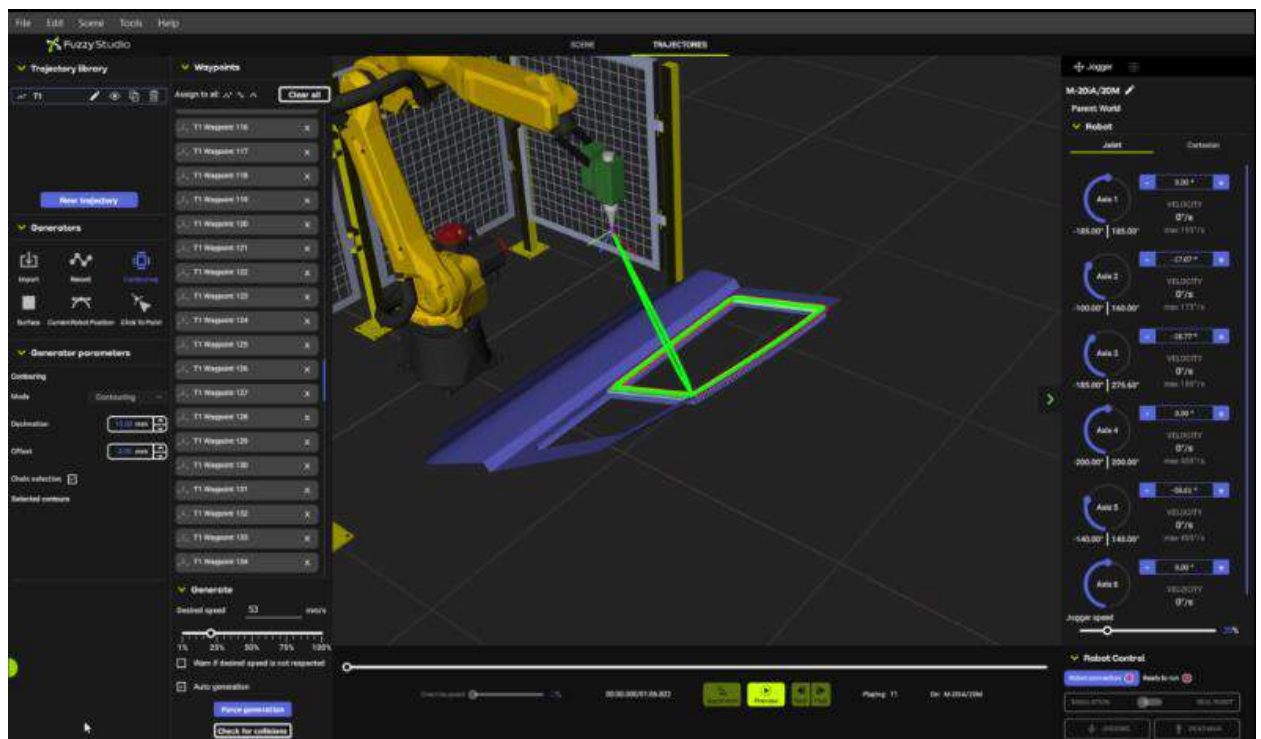


Рисунок 2.3 - Інтерфейс програмного забезпечення Fuzzy Logic [30]

Fuzzy Studio доступна в двох ліцензіях на веб-сайті Fuzzy Logic: ліцензія Fuzzy Studio Simulation дозволяє користувачам, які не є роботами, створювати та переглядати роботизований осередок в модельованому середовищі, а ліцензія Fuzzy Studio Production надає всі інструменти, необхідні для роботи підприємств і роботизованого середовища експлуатації [30].

DELMIA – це бренд програмних рішень, наданих Dassault Systèmes. Однією з ключових особливостей цифрових виробничих рішень Delmia є їх здатність моделювати та оптимізувати виробничі процеси у віртуальному середовищі до того, як вони будуть реалізовані в реальному світі. Також система дозволяє створювати віртуальні моделі виробничих процесів, оптимізувати їх та керувати ними на всіх рівнях. Це дозволяє компаніям виявляти потенційні проблеми та вносити зміни до того, як вони стануть дорогими проблемами. Інтерфейс програмного забезпечення DELMIA представлений на рис. 2.4.

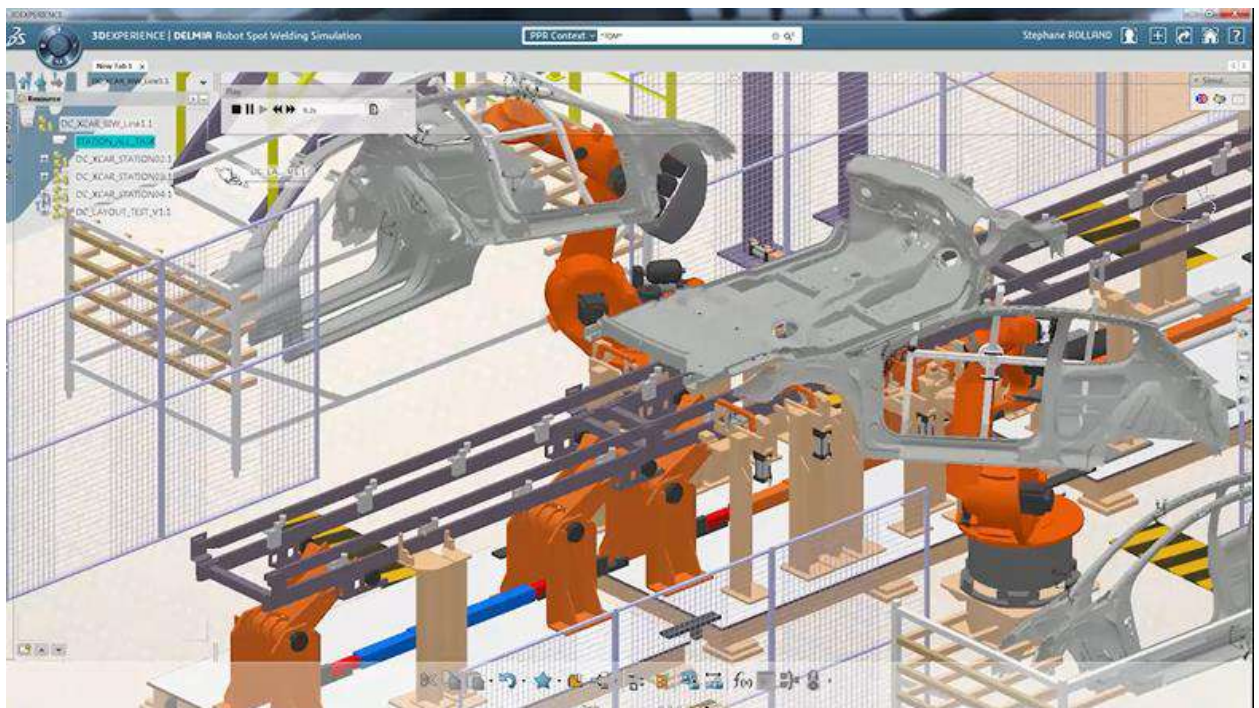


Рисунок 2.4 - Інтерфейс програмного забезпечення DELMIA [31]

DELMIA використовує різні парадигми симуляції, включаючи дискретно-подію симуляцію, системну динаміку та агентне моделювання, що дозволяє створювати більш точні та повні моделі виробничих процесів. DELMIA також надає інтегровані інструменти для планування та управління виробничими процесами, такі як планування виробництва, управління запасами, управління персоналом та інші.

Програмне забезпечення також дозволяє створювати цифрові двійники (Digital Twins), які є віртуальними представленнями фізичних активів, таких як машини та інструменти, які можна використовувати для навчання, тестування та моделювання продуктивності обладнання. Програмне забезпечення дозволяє програмувати, моделювати та тестувати роботів, допомагаючи компаніям оптимізувати використання робототехніки у своїй діяльності.

DELMIA також пропонує рішення для управління промисловими операціями, включаючи планування виробництва та управління ланцюгом поставок. Ці рішення дозволяють компаніям координувати та оптимізувати свою діяльність [31].

Vention – це платформа, яка дозволяє користувачам проектувати, замовляти та збирати індивідуальне промислове обладнання. Надане рішення містить інтерфейс, який дозволяє користувачам створювати індивідуальні проекти за допомогою готових модульних частин. Потім ці конструкції можна замовити та зібрати на місці, скорочуючи час виконання робіт і спрощуючи процес виробництва обладнання. Крім того, платформа пропонує такі функції, як моделювання та виявлення зіткнень, які допомагають користувачам створювати функціональні проекти. Vention також надає ресурси та варіанти підтримки, щоб допомогти користувачам. Це включає в себе бібліотеку готових частин, навчальні посібники та посібники з використання платформи, а також форум спільноти, де користувачі можуть ділитися своїми дизайном та звертатися за допомогою до інших

користувачів. Інтерфейс програмного забезпечення Vention представлений на рис. 2.5.

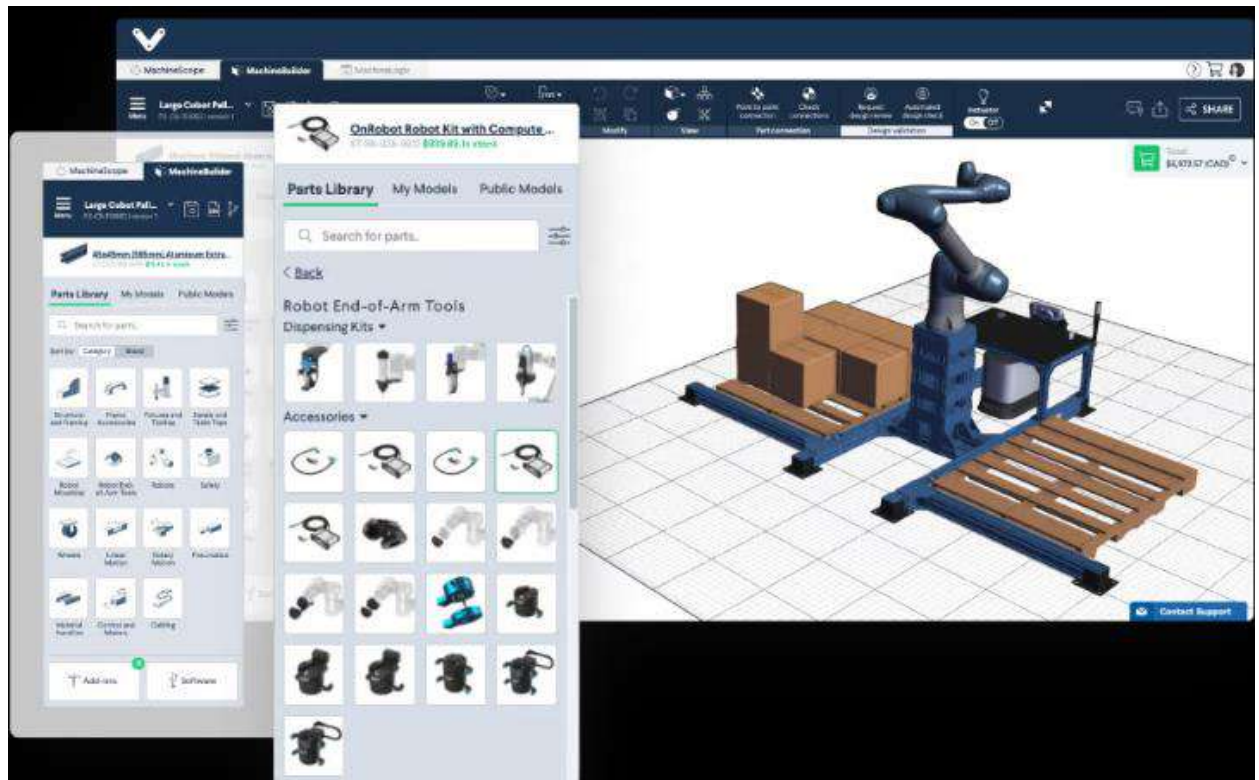


Рисунок 2.5 - Інтерфейс програмного забезпечення Vention [32]

Крім того, платформа пропонує різноманітні інтеграції з іншими інструментами, такими як програмне забезпечення CAD і системи управління запасами, що полегшує інтеграцію в існуючі робочі процеси. Крім того, платформа також дозволяє співпрацювати в режимі реального часу, коли кілька користувачів можуть працювати над одним дизайном одночасно [32].

Visual Components — компанія, що надає програмне забезпечення та рішення для 3D виробництва для різних галузей, таких як виробництво, освіта та дослідження. Їхнє програмне забезпечення дозволяє користувачам створювати реалістичні 3D-моделі обладнання, машин та заводів, а також моделювати їхню поведінку та продуктивність. Його можна використовувати для різних цілей, таких як проектування, планування, навчання та програми віртуальної реальності. Крім того, Visual Components пропонує ряд апаратних та програмних продуктів, таких як 3D-сканери, камери та гарнітури віртуальної реальності, для підтримки створення та використання 3D-

моделей. Visual Components надає послуги для підтримки своїх клієнтів, такі як навчання, консалтинг, технічна підтримка та розробка на індивідуальне замовлення.

Вони також мають онлайн-ринок, де користувачі можуть купувати і завантажувати готові 3D-моделі та компоненти. Вони також мають Центр спільноти — платформу, де користувачі можуть ділитися своїми знаннями, співпрацювати та спілкуватися з іншими професіоналами в цій галузі. Вони також пропонують ряд програмних інструментів для підтримки використання 3D-моделей у виробництві, таких як інструменти для вимірювання та аналізу продуктивності, а також інструменти для створення анімації та презентацій. Інтерфейс програмного забезпечення Visual Components представлений на рис. 2.6



Рисунок 2.6 - Інтерфейс програмного забезпечення Visual Components

[33]

Можливі функції можуть включати:

а) створення цифрових двійників (Digital Twins) - платформа дозволяє створювати віртуальні моделі виробничих систем, відбиваючи в реальному часі;

б) симуляція виробничих процесів - можливість проводити симуляції виробничих ліній та процесів, що допомагає в оптимізації роботи системи до її фізичної реалізації;

в) візуалізація та аналіз - платформа надає інструменти для візуалізації даних та аналізу виробничих метрик;

г) інтеграція з іншими системами - Visual Components надає засоби інтеграції з іншими системами управління виробництвом.

В цілому, платформа Visual Components покликана допомогти компаніям у оптимізації та плануванні своїх виробничих ліній, а також у прийнятті поінформованих рішень. Можливість інтеграції з іншими системами управління виробництвом робить Visual Components гнучким інструментом для індустріальної автоматизації. Користувачам з досвідом у галузі автоматизації та мехатроніки платформа може надати засоби для ефективного моделювання та аналізу виробничих процесів без необхідності фізичної реалізації [33].

Wandelbots спеціалізується на розробці програмного та апаратного забезпечення для промислових роботів та допомагає компаніям, які експлуатують промислових роботів на зразок Yaskawa або Universal Robot заощадити на програмістах, які займаються їх налаштуванням. Їх основним продуктом є програмна платформа Trace Pen, яка дозволяє користувачам програмувати та керувати промисловими роботами без потреби у спеціальних знаннях програмування. Платформа базується на інтерфейсі (рис. 2.7), який дозволяє користувачам створювати та редагувати програми роботів за допомогою функції перетягування. Платформа також містить бібліотеку готових функцій і модулів, які можна використовувати для створення складних програм роботів.



Рисунок 2.7 - Інтерфейс програмного забезпечення Wandelbots [34]

Однією з ключових особливостей програмного забезпечення Wandelbots є його здатність навчатися на прикладах людей. Це дозволяє користувачам показувати роботу, як виконувати завдання, а не програмувати його вручну. Потім програмне забезпечення може автоматично генерувати необхідний код для виконання завдання.

Усі зазначені системи, такі як RoboDK, ABB Robot Studio, Fuzzy Studio, DELMIA, Vention, Visual Components та Wandelbots мають спільні характеристики та особливості, які роблять їх придатними для симуляції та програмування промислових роботів. Основні спільні риси представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Порівняльна характеристика систем симуляції промислових роботів

Критерії	RoboDK	ABB Robot Studio	Fuzzy Studio	DELMIA	Vention	Visual Components	Wandelbots
Моделювання роботів	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так
Симуляція робочого середовища	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так
Наявність ліцензії	Платна	Платна	Платна	Платна	Безкоштовна	Платна	Платна
Графічний інтерфейс програмування	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так
Підтримка різних типів роботів	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так
Підтримка мов програмування	Python, C++	RobotScript, C#	Python, C++	VBA, Python	JavaScript, Python	C#, Python	Python
Інтеграція з іншими системами	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так
Доступність та зручність використання	Висока	Середня	Висока	Висока	Висока	Висока	Висока

Загалом, всі ці системи мають спільні цілі - надати інструменти для моделювання, симуляції, програмування та оптимізації промислових роботів, сприяючи вдосконаленню виробничих процесів.

Усі описані вище програмні забезпечення зазвичай використовуються в різних галузях, таких як автомобілебудування, електроніка, виробництво продуктів харчування та напоїв, і вони допомагають інженерам та технікам забезпечити ефективне програмування робототехніки для різноманітних виробничих завдань.

2.2 Дослідження інструментів, що використовуються в системах симуляції промислових роботів

Різні програмні платформи для симуляції промислових роботів, такі як RoboDK, ABB Robot Studio та інші, надають можливості моделювання та симуляції робочого середовища, використовуючи графічний інтерфейс програмування та підтримуючи різні типи роботів. Ці програмні засоби мають різноманітні інструменти, такі як створення віртуальних моделей роботів та робочих середовищ, аналіз фізичної динаміки та можливість інтеграції з іншими системами, спрямовані на полегшення процесу програмування та оптимізації промислових роботів.

Для промислових роботів ключове програмне забезпечення та інструменти моделювання включають ROS (операційну систему роботів) для керування, Gazebo для моделювання роботів, MoveIt для планування руху та Simulation-based Robot Verification Tool (SRVT) для перевірки роботів у середовищі програмування. Крім того, такі інструменти, як ANSYS, V-Rep і MATLAB/Simulink, широко використовуються для моделювання та аналізу в галузі мехатроніки та робототехніки. ANSYS використовується для числового аналізу та моделювання різних інженерних систем, включаючи механічні, термічні та електричні аспекти. V-Rep (Virtual Robotics Experimentation Platform) використовується для симуляції та віртуального тестування робототехнічних систем. MATLAB/Simulink застосовується для моделювання та симуляції систем керування та автоматизації.

Також важливим інструментом для моделювання промислових роботів є Webots. Webots – це сучасний симулятор роботів, який дозволяє розробникам моделювати фізичні характеристики роботів та їхнє оточення. Використовуючи Webots, можна тестувати та вдосконалювати алгоритми керування та взаємодію роботів у віртуальному середовищі, що прискорює процес розробки перед їхнім фізичним впровадженням. В поєднанні з ROS, Gazebo, та MoveIt, Webots розширює інструментарій для повноцінного проектування, тестування та оптимізації роботизованих систем в промисловому сегменті. Всі ці інструменти спільно створюють потужний арсенал для розробки та вдосконалення функціональності та продуктивності промислових роботів [35]. Розглянемо кожен з перелічених інструментів більш докладно: Robot Operation Systems (ROS), ANSYS, V-Rep (Virtual Robotics Experimentation Platform), MATLAB/Simulink та Webots.

Симуляція являє собою потужний і економічно ефективний спосіб перевірити можливості, продуктивність і надійність вашого робота перед його розгортанням у реальному світі. Симуляція також може допомогти вам налагодити та покращити код, розробити та оптимізувати апаратне та програмне забезпечення вашого робота, а також навчити й оцінити інтелект і поведінку вашого робота. ROS надає стандартний інтерфейс і багатий набір інструментів і пакетів для створення та запуску симуляцій для різних типів роботів і середовищ. Використовується ROS для моделювання датчиків, приводів, фізики, навігації, сприйняття, планування тощо.

ROS (Robot Operating System – операційна система для роботів) – це фреймворк для програмування роботів, що надає функціональність для розподіленої роботи.

ROS забезпечує стандартні служби операційної системи, такі як: апаратну абстракцію, контроль пристроїв на низьких рівнях, реалізацію часто використовуваних функцій, передачу повідомлень між процесами, і управління пакетами. ROS заснований на архітектурі графів, де обробка даних відбувається в вузлах, які можуть отримувати і передавати

повідомлення між собою. Бібліотека орієнтована на Unix-подібні системи (Ubuntu Linux включений в список «підтримуваних», в той час як інші варіанти, такі як Fedora і Mac OS X, вважаються «експериментальними»).

ROS має дві основні «сторони»: сторони операційної системи `ros`, як описано вище і `ros-pkg`, набір підтримуваних користувачами пакетів (організованих в набори, які називаються стеками), які реалізують різні функції робототехніки: SLAM, планування, сприйняття, моделювання та інші.

ROS випускається відповідно до умов BSD-ліцензії і з відкритим вихідним кодом. ROS безкоштовний для використання, як в дослідних, так і в комерційних цілях. Пакети з `ros-pkg` поширюються на умовах різних відкритих ліцензій.

Для роботи з роботизованими системами потрібно витратити значну кількість часу на розробку вбудованого програмного забезпечення для самого робота, а також для обладнання. Для цього потрібні навички машинобудування, електроніки та вбудованого програмування. Як правило, розроблені таким чином програми були б більш схожими на вбудовані програми, схожі на електроніку, ніж на робототехніку в прямому сенсі, адже здійснюється значне повторне використання програм, оскільки вони тісно пов'язані з базовим обладнанням.

Основна ідея ОС з робототехніки – уникати повторного написання однакових програм і пропонувати використовувати стандартизовані функції, що виконують апаратне абстрагування.

Ще одна перевага ROS полягає в поєднанні досвіду різних дисциплін. Насправді, проєктування та програмування робота означає: керування обладнанням, написання драйверів; управління пам'яттю та процесами; управління одночасністю, паралелізмом та об'єднанням даних; забезпечення абстрактних алгоритмів міркувань, велике використання штучного інтелекту.

Завдяки широким можливостям ROS можливо проводити моделювання управління роботом та його переміщення завдяки окремим інструментам.

Метою моделювання є створення максимально реалістичного віртуального середовища, в якому мобільні роботи-маніпулятори здатні виконувати транспортні завдання та координувати свої дії один з одним, щоб брати участь у виробничому процесі. Таким чином, розроблений 3D-симулятор представляє роботів, що працюють аналогічно до того, як працюють справжні роботи. Використовується парний симулятор ROS-3DS, де ROS (операційна система робота) забезпечує роботизовану основу як реального застосування, так моделювання, а 3D-симулятор отримує всю інформацію від ROS для моделювання бажаного цеху. На ринку існує безліч роботизованих симуляторів, але є три відомі з них, які чудово інтегруються з ROS: Gazebo, MoveIt та SRVT [36].

Gazebo – це відкрите програмне забезпечення для симуляції роботів, яке широко використовується в ROS (Robot Operating System). Основна його мета - надати реалістичне середовище для тестування та розробки робототехнічних систем.

Основні характеристики Gazebo включають:

- фізичний двигун: Gazebo використовує фізичний двигун ODE (Open Dynamics Engine) для моделювання динаміки руху об'єктів. ODE надає реалістичні обчислення фізичних властивостей, що дозволяє точне відтворення руху роботів;
- рендеринг та візуалізація: в Gazebo використовує OpenGL для створення візуально привабливих та реалістичних зображень середовища. Це включає в себе освітлення, тіні, та текстури для покращення реалізму;
- підтримка датчиків: Gazebo підтримує широкий спектр датчиків, таких як камери різного типу (включаючи ширококутні), лазерні далекоміри, сенсори у стилі Kinect та інші. Це дозволяє моделювати роботів з різними здатностями сприймання оточуючого середовища;
- можливості розширення: Gazebo є дуже гнучким і дозволяє розширювати його функціональність за допомогою різних плагінів. Це дозволяє користувачам адаптувати середовище симуляції під свої потреби.

Використання Gazebo може бути корисним для тестування та оптимізації робототехнічних систем у віртуальному середовищі перед їх впровадженням у реальному світі.

Gazebo може похвалитися широким набором функцій, які роблять його широко використовуваним середовищем для моделювання роботів з відкритим вихідним кодом. Однією з його ключових переваг є потужний фізичний рушій, який точно моделює динаміку роботів та їхню взаємодію в симульованому середовищі. Це включає реалістичну симуляцію сил, крутних моментів і зіткнень, забезпечуючи розробників надійним полігоном для тестування їхніх робототехнічних алгоритмів.

Акцент у програмному забезпеченні на високоякісній 3D-графіці покращує користувацький досвід, дозволяючи детально візуалізувати симульовані середовища та роботів. Таке реалістичне представлення допомагає вдосконалювати дизайн і поведінку роботів, надаючи цінну інформацію про їхню продуктивність.

Gazebo є найкращим у симуляції датчиків, підтримуючи різноманітні датчики, які зазвичай використовуються в робототехніці, такі як камери, лідари та датчики глибини. Ця можливість дозволяє розробникам ретельно тестувати та перевіряти алгоритми на основі датчиків у контрольованому симуляційному середовищі.

Gazebo – це 3D-симулятор, який може відтворити реалістичну і складну середу з фізикою, освітленням, тіннями і текстурами, використовувати Gazebo з ROS, щоб симулювати взаємодію вашої роботи з навколишнім середовищем, наприклад, столкнення, контакти, сили і моменти обертання. Ви також можете використовувати Gazebo для імітації різних датчиків, таких як камери, лазери, IMU, GPS і сонари тощо.

Тісна інтеграція з операційною системою роботів (ROS) через пакет `gazebo_ros_pkgs` забезпечує безперешкодний зв'язок між змодельованими роботами та зовнішніми алгоритмами управління, розробленими за допомогою ROS. Цей пакет надає підключений модуль Gazebo, який

забезпечує двосторонній зв'язок між Gazebo та ROS. Дійсно, змодельовані дані датчиків і фізичні дані можуть передаватися з Gazebo в ROS, а команда приводу може передаватися з ROS навпаки в Gazebo. Тому в цьому моделюванні було вирішено використовувати Gazebo. Загальна архітектура моделювання з ROS показана на рис. 2.8

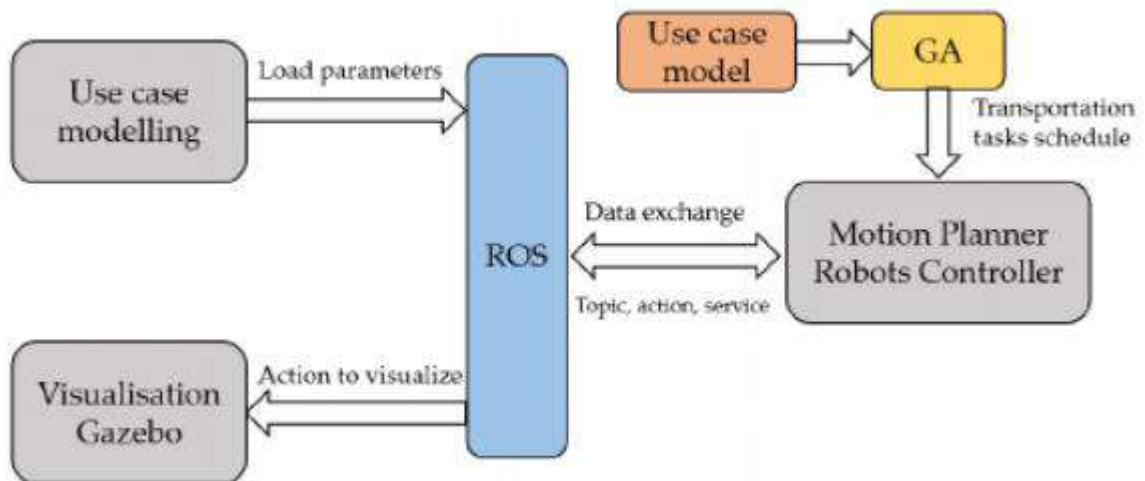


Рисунок 2.8 - Архітектура моделювання з ROS [36]

Ця ілюстрація складається з кількох модулів. Ці модулі центровані відносно ROS. Моделювання було виконано шляхом створення світу Gazebo, що складається зі статичних елементів, таких як машини, і мобільних елементів, таких як роботи.

Архітектура симуляції з використанням ROS включає в себе декілька ключових кроків для взаємодії з генетичним алгоритмом (GA) та візуалізації результатів в Gazebo.

Спочатку, параметри середовища завантажуються до ROS, визначаючи особливості симульованого середовища. Після цього розробляється модель використання, яка включає бажану поведінку системи. GA інтегрується в цю модель для оптимізації параметрів системи.

Результати GA використовуються для планування транспортних завдань. Планувальник рухів та контролер роботів у ROS перетворюють ці

рішення в команди для симульованих роботів. Комунікаційний інтерфейс забезпечує обмін даними між компонентами системи.

ROS використовується для визначення дій, які викликають візуалізацію результатів в Gazebo. Це дозволяє в реальному часі спостерігати за змінами в симульованому середовищі, спричиненими діями планувальника рухів та контролера роботів.

Загальна архітектура дозволяє інтегрувати генетичний алгоритм у симуляційне середовище, оптимізуючи робототехнічну систему, та спостерігати за її взаємодією з оточенням у Gazebo через ROS.

Крім того, Gazebo підтримує симуляцію декількох роботів, дозволяючи користувачам симулювати декілька роботів одночасно. Ця можливість необхідна для тестування складних сценаріїв за участю декількох взаємодіючих роботів або проведення експериментів з роями роботів.

Програмне забезпечення має гнучку систему плагінів, що дозволяє розробникам розширювати його функціональність. Це означає, що користувачі можуть додавати власні датчики, контролери або інші компоненти, щоб пристосувати середовище моделювання до своїх конкретних потреб, підвищуючи універсальність.

Адаптивність Gazebo поширюється і на хмарні середовища моделювання, дозволяючи користувачам запускати симуляції на потужних віддалених серверах. Ця можливість є особливо корисною для ресурсоємних симуляцій та спільних досліджень.

Завдяки інструментам параметричної генерації світу користувачі можуть створювати і змінювати віртуальні середовища, створюючи різноманітні сценарії для тестування поведінки роботів за різних умов.

Можливість моделювання в реальному часі дозволяє розробникам спостерігати та аналізувати поведінку змодельованих роботів так, ніби вони працюють у реальному світі. Ця функція допомагає вдосконалювати алгоритми та забезпечувати їхню надійність.

Нарешті, відкритість Gazebo сприяла створенню динамічної спільноти розробників, які активно долучаються до її вдосконалення. Ця спільна екосистема забезпечує постійні оновлення, виправлення помилок і багату колекцію моделей роботів і плагінів, що робить Gazebo цінним інструментом для дослідників, розробників і викладачів у галузі робототехніки.

Таким чином, використання Gazebo може бути корисним для тестування та оптимізації робототехнічних систем у віртуальному середовищі перед їх впровадженням у реальному світі [37].

MoveIt – це бібліотека для планування руху роботів з відкритим вихідним кодом, створена для систем роботів з багатозв'язковими маніпуляторами. Ця бібліотека надає набір інструментів для виконання завдань планування траєкторії, управління колізіями, обробки сенсорних даних та інших завдань, пов'язаних з рухом.

MoveIt широко використовується в системах роботів разом із Robot Operating Systems (ROS). Це відкрите програмне забезпечення, що надає продумане планування руху для робототехнічних систем.

MoveIt інтегрується через ROS пакет та вимагає детальної конфігурації робота, зазвичай вказується в URDF - файлі, який описує робота. Бібліотека надає компоненти для планування траєкторії, виявлення колізій та виконання рухів. Вона інтегрується з візуалізатором RViz для відображення моделі робота та планування траєкторії [38].

Інструмент RViz дозволяє в реальному часі візуалізувати на 3D - сцені всі компоненти робототехнічної системи - системи координат, частини, що рухаються, а також дозволяє аналізувати дані з датчиків, моделювати переміщення роботів і взаємодію з навколишнім середовищем. RViz забезпечує наочне представлення даних, що спрощує процес управління роботами та налагодження програмного забезпечення.

MoveIt взаємодіє з ROS через сервіси та дії, дозволяючи спілкуватися з іншими узлами ROS. Це також підтримує інтеграцію з ROS Control для взаємодії з апаратурою робота. Використання MoveIt спрощує розробку та

тестування програм управління роботами в різних сферах, включаючи наукові дослідження та промислові застосування. Також може суттєво спростити розробку та тестування програм управління роботами [39].

SRVT (Simulation - based Robot Verification Tool) являє собою комплексну систему інструментів, розроблену для тестування промислових роботів у віртуальному середовищі моделювання. Використовуючи операційну систему роботів (ROS) як базову інфраструктуру, SRVT інтегрує Gazebo для створення реалістичних середовищ моделювання. Він також включає MoveIt для планування траєкторії руху робота, забезпечуючи точно і ефективно виконання завдань.

Додатково, SRVT використовує бібліотеку ROS Smach як систему кінцевих автоматів, що дозволяє ефективно управляти поведінкою робота в різних сценаріях. Ця інтеграція дозволяє проводити комплексне тестування, оцінюючи як окремі компоненти, так і взаємодія між ними у віртуальному середовищі до реального застосування робота в промислових умовах [40].

ANSYS надає комплексні рішення для симуляції, включаючи інструменти для систем симуляції промислових робото технічних систем. Це дозволяє моделювати та аналізувати різні аспекти роботичних систем, такі як рух, структурна цілісність та теплова ефективність.

Використання ANSYS для симуляції може підвищити здатність оптимізувати дизайни роботів, підтверджувати продуктивність та виявляти потенційні проблеми перед впровадженням. Це цінний ресурс для забезпечення ефективності та надійності роботичних систем у промислових застосуваннях.

ANSYS пропонує широкий спектр інструментів, придатних для симуляції та оптимізації промислових робототехнічних систем:

- механічний аналіз: ANSYS Mechanical дозволяє інженерам аналізувати структурну цілісність робото технічних компонентів. Це допомагає оцінювати фактори, такі як напруження, деформація та вигин, щоб забезпечити, щоб робот витримав експлуатаційні навантаження та умови;

- аналіз руху: за допомогою інструментів, таких як ANSYS Motion, можна симулювати динамічну поведінку робото технічних систем. Це включає вивчення руху різних частин, валідацію алгоритмів управління та оптимізацію траєкторій для поліпшення продуктивності;
- термічний аналіз: інструменти термічного аналізу ANSYS дозволяють оцінювати, як генерується та розсіюється тепло в системі робототехніки. Це важливо для запобігання перегріву та забезпечення оптимального термічного управління;
- зчеплені фізичні симуляції: ANSYS надає можливості для зчеплених фізичних симуляцій, що дозволяють аналізувати взаємодії між різними фізичними явищами, такими як потік рідини, передача тепла та структурне деформування, що може бути важливим у деяких робото технічних застосуваннях;
- віртуальне прототипування: інженери мають змогу створювати віртуальні прототипи робототехнічних систем, що дозволяє інтерактивно вдосконалювати дизайн та зменшувати потребу в фізичних прототипах, що в кінцевому підсумку економить час та витрати;
- оптимізація: інструменти ANSYS підтримують оптимізацію дизайну допомагаючи знаходити найефективніші конфігурації для робототехнічних систем на основі визначених цілей та обмежень.

Загалом, інструменти симуляції ANSYS широко використовуються у різних галузях промисловості, надаючи надійну платформу для інженерів та дослідників для валідації та покращення продуктивності складних систем, таких як промислові робототехнічні системи [41].

Програмне забезпечення часто легко інтегрується з програмним забезпеченням для автоматизованого проектування (CAD), спрощуючи передачу геометричних моделей з CAD в Ansys для моделювання. Ця інтеграція покращує загальний робочий процес моделювання.

Ansys пропонує галузеві модулі та додатки, розроблені для таких секторів, як аерокосмічна, автомобільна, електронна промисловість тощо. Ці

спеціалізовані інструменти вирішують унікальні завдання і вимоги конкретних галузей [41].

V-Rep, або Virtual Robot Experimentation Platform, є потужним програмним забезпеченням для симуляції робототехнічних систем, розробленим компанією Coppelia Robotics. Воно слугує універсальним інструментом для моделювання та прототипування різноманітних робототехнічних систем, а також застосовується у промислових цілях. З акцентом на реалізм, V-Rep включає потужний фізичний рушій, що дозволяє симулювати механічні взаємодії, зіткнення та динаміку в віртуальному середовищі.

Це програмне забезпечення є найкращим у 3D-моделюванні, дозволяючи користувачам створювати детальні та реалістичні віртуальні середовища. Сюди входить проектування роботів, об'єктів і загального середовища симуляції

Однією з важливих особливостей є його підтримка широкого спектру робототехнічних платформ, сенсорів та приводів. Ця універсальність робить його придатним для симулювання різних сценаріїв, від промислових маніпуляторів до мобільних роботів. Програмне забезпечення надає інтерфейс для написання скриптів за допомогою мови Lua, що дозволяє користувачам розробляти складні поведінки та стратегії управління для симульованих роботів. Крім того, доступні API для інтеграції з зовнішніми мовами програмування, такими як Python чи C++.

Можливості V-Rep розширюються до симуляції сенсорів, включаючи камери, LiDAR та сенсори наближення, що сприяє тестуванню та валідації алгоритмів, що базуються на сенсорах, в віртуальному просторі. Воно може симулювати не лише окремі роботи, а й цілі системи з численними взаємодіючими компонентами, що робить його цінним для складних сценаріїв промислової автоматизації.

Через зручний інтерфейс та обширну документацію, V-Rep часто використовується в освітніх закладах для викладання концепцій

робототехніки. Воно підтримує симуляцію в реальному часі, надаючи миттєвий зворотний зв'язок щодо продуктивності робототехнічних систем, що є критичним для ітеративного розвитку та тестування.

Крім того, V-Rep може бути інтегрований із системою операційного робота (ROS), що покращує його сумісність з різноманітними робототехнічними платформами та інструментами.

CorreliaSim підтримує написання сценаріїв, що дозволяє користувачам програмувати і контролювати поведінку змодельованих роботів і об'єктів. Інтерфейс сценаріїв, часто заснований на таких мовах, як Lua або Python, пропонує користувачам гнучкість для реалізації власних алгоритмів і поведінки.

Користувачі можуть програмувати і моделювати поведінку роботизованих систем в CorreliaSim, визначаючи рух, стратегії управління і взаємодію сенсорів віртуальних роботів. Це робить платформу всеосяжним випробувальним полігоном для досліджень і розробок у галузі робототехніки.

Ще однією особливістю є підтримка симуляції різних датчиків, які зазвичай використовуються в робототехніці, таких як камери, лідари та датчики наближення. Це дозволяє користувачам тестувати та перевіряти алгоритми на основі датчиків у змодельованому середовищі.

Також V-Rep полегшує керування роботом і планування шляху, дозволяючи користувачам визначати і виконувати складні рухи. Це допомагає тестувати та оптимізувати алгоритми, пов'язані з плануванням та контролем руху.

CorreliaSim дозволяє користувачам симулювати декілька роботів одночасно, що є важливою функцією для тестування сценаріїв, які передбачають взаємодію між декількома роботами або проведення експериментів з роями роботів.

Симуляція в реальному часі є помітною особливістю, що забезпечує динамічну та інтерактивну середу для тестування та відладки алгоритмів

управління. Використання надійного фізичного руху забезпечує реалістичну взаємодію між компонентами роботи та навколишнього середовища.

Програмне забезпечення також має Remote API, що забезпечує зовнішній зв'язок із середнім моделюванням. Це робить V-Rep придатним для інтеграції з іншими програмними та апаратними компонентами.

V-Rep передбачає застосування в різних, включаючи промислову робототехніку, автономні транспортні засоби, розробку дронів і академічні дослідження. Програмне забезпечення має активне співтовариство користувачів, а Correlia Robotics надає широку документацію, форуми та навчальні посібники для підтримки користувачів.

Розгляд V-Rep для проектів у сфері робототехніки та мехатроніки потенційно може покращити процеси розробки, забезпечуючи ретельне моделювання та тестування перед фізичною реалізацією. Цей підхід спрямований на підвищення ефективності, зниження витрат і мінімізацію ризиків, пов'язаних з розвертанням в реальних умовах [42].

MATLAB – це програмна платформа, яка поєднує мову програмування, числове обчислювальне середовище та графічний інтерфейс користувача. MATLAB розшифровується як MATrix LABoratory, оскільки він призначений для роботи з матрицями та масивами даних. MATLAB можна використовувати для різних програм, таких як аналіз даних, моделювання, візуалізація, розробка алгоритмів і машинне навчання. MATLAB також підтримує багато наборів інструментів і доповнень, які розширюють його функціональність і забезпечують інтеграцію з іншим програмним і апаратним забезпеченням та містить наступні ключові моменти, пов'язані з симуляцією промислової робототехніки, а саме: Robotics Toolbox, Simulink для симуляції, інтеграцію ROS, проектування системи управління, візуалізацію та навчальні ресурси.

Matlab пропонує спеціальний Robotics Toolbox, який надає функції та інструменти для моделювання та імітації роботизованих систем. Цей

інструментарій містить алгоритми кінематики, динаміки, генерації траєкторії та керування роботами-маніпуляторами.

Simulink, частина Matlab, є графічним середовищем моделювання, яке дозволяє моделювати та імітувати складні системи, включаючи роботизовані системи. Ви можете створювати симуляції роботів-маніпуляторів і систем керування за допомогою Simulink, яка пропонує комплексне середовище для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем, включаючи робототехніку.

За своєю суттю, Simulink надає потужне середовище для моделювання та імітації динамічних систем. Користувачі можуть створювати складні моделі, що відображають поведінку компонентів та їх взаємодію в часі.

Використовуючи середовище блок-схем, Simulink дозволяє візуально представляти динаміку системи за допомогою блоків і ліній, спрощуючи процес моделювання і покращуючи розуміння системних взаємодій.

Платформа підтримує багатодоменне моделювання, що дозволяє моделювати та імітувати системи, які включають декілька фізичних доменів, таких як електричні, механічні та теплові компоненти. Це особливо корисно для систем з різноманітними взаємодіями.

Одне з основних застосувань Simulink - це проектування систем керування. Інженери використовують Simulink для моделювання та імітації систем керування, оцінки їх продуктивності та розробки контролерів для оптимальної реакції системи.

Matlab/Simulink широко використовується для обробки сигналів і дозволяє моделювати та імітувати алгоритми обробки сигналів. Це включає аналіз продуктивності та проектування фільтрів або систем обробки сигналів.

Simulink чудово підходить для моделювання динамічних систем, дозволяючи користувачам моделювати залежну від часу поведінку систем. Це має вирішальне значення для розуміння того, як системи розвиваються з часом і як вони реагують на різні вхідні дані.

Stateflow, компонент Simulink, використовується для моделювання та імітації логічних систем на основі станів. Це особливо корисно для представлення складної логіки керування та кінцевих автоматів у графічному вигляді.

Matlab/Simulink підтримує автоматизовану генерацію коду, що дозволяє користувачам генерувати виконуваний код зі своїх моделей. Ця функція полегшує плавний перехід від симуляції до реальної реалізації, підвищуючи ефективність розробки.

Крім того, Simulink широко використовується для моделювання Hardware-in-the-Loop (HIL), що дозволяє проводити всебічне тестування алгоритмів управління шляхом взаємодії з фізичними системами або апаратними компонентами.

Simulink Real-Time розширює можливості Simulink до додатків для моделювання в реальному часі, дозволяючи тестувати і перевіряти системи і алгоритми управління в сценаріях реального часу.

SimEvents, доповнення до Simulink, використовується для моделювання та імітації систем з дискретними подіями. Це актуально в сценаріях, де події відбуваються в різні моменти часу, наприклад, в системах масового обслуговування або мережевих протоколах [43].

Також Matlab підтримує інтеграцію з операційною системою роботів (ROS), яка широко використовується в спільноті робототехніки. Це дозволяє підключати Matlab до ROS-сумісних роботів, обмінюватися даними та керувати робототехнічними системами.

Matlab надає інструменти для проектування систем керування, що є вирішальним у сфері робототехніки. Для оптимізації продуктивності робототехнічних систем можна використовувати різні методи проектування керування.

Matlab дозволяє візуалізувати та аналізувати результати моделювання. Ви можете будувати траєкторії, вивчати поведінку системи та аналізувати продуктивність алгоритмів керування.

Matlab пропонує розширену документацію та навчальні посібники для Robotics Toolbox і пов'язаних функцій. Ці ресурси можуть допомогти вам покращити розуміння та навички використання Matlab для моделювання робототехніки.

MATLAB можна використовувати для програмування роботи в нових способах, залежно від ваших потреб і уподобань. Одним із варіантів є використання MATLAB як програмування автономного середовища, де ви можете писати код, тестувати, налагоджувати та розгортати свої програми-роботи. MATLAB підтримує різні мови програмування робіт, такі як C, C++, Python і ROS (операційна система для робіт). Ви також можете використовувати MATLAB для зв'язку з обладнанням вашої роботи, як контролери, датчики та виконавчі механізми, використовуючи послідовне з'єднання, USB, Ethernet або бездротове з'єднання.

Іншим варіантом є використання MATLAB як інструменту для симуляції та моделювання робіт, де ви можете створювати віртуальні представлення своєї роботи та його середовища, а також тестувати код перед запуском на реальну роботу. MATLAB пропонує кілька інструментів для симуляції та моделювання робіт, таких як Simulink, Robotics System Toolbox і Simscape Multibody. Ці інструменти не дозволяють проектувати, будувати та візуалізувати моделі ваших робіт, а також симулювати їх динаміку, кінематику, планування руху, керування та об'єднання датчиків [43].

Webots – це універсальне програмне забезпечення для моделювання роботів, яке широко використовується при розробці та тестуванні різних робототехнічних систем, включаючи промислові роботи. Він створює реалістичну тримерну середу для моделювання поведень і взаємодії робітників.

У промисловості Webots можна використовувати для моделювання процесів і завдань промислових роботів перед їх впровадженням у фізичне середовище. Це допомагає перевірити та відкоригувати програму роботи, знизити ризики помилок і підвищити ефективність реального застосування.

Основні особливості Webots:

- віртуальна середовище: надає віртуальну тримерну середу, в якій користувачі можуть моделювати поведінку промислових роботів. Це середовище дозволяє моделювати складні сценарії, включаючи фабрики та виробничі лінії;
- моделі роботів: програмне забезпечення підтримує широкий спектр уже існуючих моделей роботів, у тому числі тих, які зазвичай використовуються в промисловості. Користувачі також можуть створювати власні моделі роботів з урахуванням конкретних вимог;
- симуляція датчика: дозволяє моделювати різні датчики, які зазвичай зустрічаються в промислових роботах, такі як камери, лідари та датчики наближення. Це дозволяє розробникам тестувати й оптимізувати алгоритми керування на основі датчиків;
- підтримка програмування: користувачі можуть програмувати контролери роботів, використовуючи різні мови, такі як C, C++, Python і Java. Ця гнучкість робить його придатним для широкого кола розробників з різними перевагами в програмуванні;
- моделювання в реальному часі: підтримка моделювання в реальному часі, що дозволяючи розробникам спостерігати та аналізувати, як їх створені системи ведуть себе в різних умовах. Це допомагає в відладці і уточненні алгоритмів управління;
- інтеграція з ROS: веб - боти можуть бути інтегровані в операційну систему роботів (ROS), популярну середу проміжного програмного забезпечення в робототехніці. Ця інтеграція забезпечує безперебійну взаємодію між модельними роботами та іншими компонентами з підтримкою ROS.

Використовуючи Webots для моделювання промислових роботів, користувачі можуть розраховувати потужний інструмент для проектування, тестування та вдосконалення роботизованих систем перед їх розвертанням у реальних сценаріях. Це дозволяє прискорити цикли розробки, знизити

витрати, пов'язані з фізичним прототипуванням, і підвищити загальну надійність додатків промислових роботів [44].

Кожна система має свої унікальні переваги: реалістичне фізичне моделювання, спеціалізовані функції, такі як планування руху, можливості інженерного моделювання або симуляції в реальному часі. Інтеграція з ROS і підтримка симуляції з декількома роботами ще більше підвищують їхню корисність. Вибір системи залежить від конкретних вимог і цілей конкретного проекту в динамічній галузі робототехніки.

Огляд інструментів для моделювання та їх можливостей представлений у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Огляд програмного забезпечення для моделювання

Назва	Функціонал	Двигун фізичної моделі	Запуск без GUI	Відкритий вихідний код	Підтримка ROS2	Підтримка ML
Gazebo	Фізичне моделювання, сенсори, візуалізація	Bullet, DART, ODE, Simbody	Повний	Так	Так	Зовнішня
MoveIt	Інтерактивне планування траєкторій, колізії	Bullet, DART, ODE, Simbody	Повний	Так	Так	Інтегрована
SRVT	Перевірка працездатності, тестування алгоритмів	Bullet, ODE	Повний	Так	Так	Зовнішня
Ansys	Аналіз напруженості, теплопровідності, динаміки	Bullet, DART, ODE,	Частковий	Ні	Ні	Зовнішня

Продовження таблиці 2.2

V-Rep	Моделювання та симуляція роботів, сенсори	Bullet, Newton, ODE, Vortex Dynamics	Повний	Ні	Так	Зовнішня
Matlab/Simulink	Моделювання систем, аналіз та синтез контролерів	Simbody	Повний	Ні	Ні	Інтегрована
Webots	Моделювання, сенсори, візуалізація	ODE	Частковий	Так	Так	Зовнішня

З аналізу таблиці видно, що різні симулятори робототехніки мають різні характеристики, такі як використання різних двигунів фізичної моделі, наявність або відсутність відкритого вихідного коду, підтримка ROS2 та можливість використання машинного навчання. Кожен симулятор володіє унікальними особливостями, що роблять його відповідним для конкретних завдань у галузі робототехніки та інженерії. Ця різноманітність надає розробникам можливість обирати той інструмент, який найбільше відповідає їхнім потребам та цілям.

ROS стала фактичною комунікаційною платформою для сучасних робототехнічних систем. Вибір ROS2 обумовлений тим, що вона підтримує широкий спектр пристроїв (наприклад, мікроконтролерів), забезпечуючи інтеграцію з Інтернетом речей (IoT). Останнє є основною вимогою для розробки робочої цифрової системи-двійника.

ROS2 також можна використовувати для подолання розриву між роботами зі штучним інтелектом і реальним управлінням роботами [48].

Системи моделювання промислових роботів стали невід'ємною частиною сучасного виробничого ландшафту, представляючи собою складну взаємодію переваг і недоліків.

До основних переваг систем симуляції промислових роботів відносять:

- оптимізація ресурсів: перевага з точки зору економічної ефективності, оскільки дозволяють виробникам завчасно виявляти та усувати проблеми у віртуальному середовищі, мінімізуючи потребу в дорогому фізичному прототипуванні. Аспект економії часу також заслуговує на увагу, оскільки моделювання сприяє швидкому вдосконаленню роботизованих процесів без необхідності тривалого фізичного тестування;

- зменшення ризиків: моделювання допомагає на ранніх стадіях виявити загрози безпеці та потенційні ризики, пов'язані з роботизованими операціями. Такий проактивний підхід сприяє створенню більш безпечного робочого середовища, зменшуючи ймовірність нещасних випадків під час фактичного впровадження. Крім того, системи моделювання промислових роботів відіграють ключову роль в оптимізації процесів. Вони дозволяють інженерам точно налаштовувати роботизовані робочі процеси, що призводить до підвищення ефективності, скорочення тривалості циклів і поліпшення загальної продуктивності - критично важливих факторів для досягнення більш високих обсягів виробництва і дотримання стандартів якості;

- прототипування та тестування: моделювання полегшує створення прототипів нових роботизованих систем, дозволяючи інженерам тестувати різні конфігурації та функціональні можливості перед фізичною реалізацією. Цей ітеративний процес допомагає вдосконалити дизайн і досягти оптимальної продуктивності;

- автономне програмування: системи моделювання роботів часто підтримують автономне програмування, що дозволяє програмістам розробляти та вдосконалювати програми роботів без необхідності використання фізичного робота. Це може значно скоротити час простою у виробничому середовищі;

- аналіз сценаріїв: користувачі можуть моделювати різноманітні сценарії, включаючи найгірші, щоб оцінити, як робототехнічна система

працює в різних умовах. Це допомагає створювати надійні та адаптивні системи;

- кастомізація та гнучкість: завдяки моделюванню легше експериментувати з різними конфігураціями та налаштуваннями, що сприяє гнучкості в адаптації робототехнічних систем до мінливих виробничих вимог.

Однак ці переваги співіснують з певними проблемами. До основних недоліків систем симуляцій промислових роботів відносять:

- проблеми інтеграції: крива навчання створює перешкоди для широкого впровадження. Оволодіння цими системами вимагає спеціальних знань, а підготовка персоналу на початковому етапі може затягуватися. Крім того, точність результатів моделювання залежить від точності моделей, що використовуються. Варіативність реальних виробничих умов може бути не повністю врахована, що потенційно може призвести до розбіжностей між змодельованими і фактичними показниками;

- обмеження взаємодії між людиною і системою: системи можуть добре моделювати рухи і завдання робота, однак вони можуть не повністю відображати складність взаємодії між людиною і роботом, яка стає все більш актуальною в колаборативних робототехнічних системах;

- залежність від точності даних: точність моделювання сильно залежить від точності вхідних даних і моделей. Якщо використані дані не відповідають реальним умовам, результати моделювання можуть не збігатися з фактичною продуктивністю системи;

- відсутність фізичного зворотного зв'язку: у моделюванні відсутній фізичний зворотний зв'язок, який є у реальному світі, наприклад, відчуття сил або вібрацій. Ця відсутність може вплинути на точність оцінки того, як робот взаємодіє з навколишнім середовищем;

- постійне обслуговування: імітаційні моделі та програмне забезпечення потребують регулярного оновлення, щоб залишатися актуальними і точними. Зміни в роботизованій системі, виробничих процесах

або зовнішніх факторах можуть вимагати постійного обслуговування та адаптації симуляції [49].

Таким чином, системи моделювання промислових роботів пропонують ряд переваг, включаючи створення прототипів, аналіз сценаріїв та оптимізацію ресурсів. Однак при впровадженні цих систем слід враховувати такі проблеми, як труднощі інтеграції, обмеження у взаємодії між людиною і системою та потреба в точних даних. Вдумливий підхід до конкретних потреб виробничого процесу має вирішальне значення для максимізації переваг симуляції та пом'якшення потенційних недоліків.

2.3 Переваги та недоліки систем симуляції промислових роботів

3D - симулятори робототехніки відіграють ключову роль у розвитку галузі автоматизації, забезпечуючи віртуальну платформу для тестування та вдосконалення роботизованих систем. Оскільки попит на складні рішення робототехніки зростає, потреба в ефективних інструментах моделювання стає все більш важливою. Цей аналіз має на меті заглибитися в різні 3D-симулятори робототехніки, пропонуючи повне порівняння, щоб допомогти зрозуміти їхні унікальні функції, можливості та застосування. Досліджуючи ці симулятори, ми можемо отримати уявлення про їхню роль у формуванні майбутнього робототехніки, точності моделювання та різноманітних сценаріях, які вони обслуговують в умовах автоматизації, що постійно розвивається.

З появою технологій глибокого навчання сучасні дослідження зосереджені на навчанні роботів автономному виконанню різних завдань. Однак для збору та обробки величезної кількості даних, щоб ефективно навчити робота виконувати нездійсненне завдання на реальному робототехнічному стенді, потрібен підхід, заснований на даних, тобто підхід, що базується на моделюванні. Для цього програмне забезпечення для моделювання роботів було використано для подолання недоліків

підходів ШІ, що вимагають великих обсягів даних, і для того, щоб дозволити розробнику отримати постійне середовище [45]. У змодельованому середовищі можна керувати світом, включаючи аспекти, які були б непрактичними в реальності. Також відсутній ризик пошкодження робота або людини-оператора, а симуляції дозволяють контролювати час, збільшуючи швидкість збору даних. контролювати час, збільшуючи швидкість збору даних.

Моделювання є шляхом для цифрових двійників, високоточного представлення фізичного світу [46], і може дозволити виробництву збільшити обсяги виробництва та гнучкість ланцюгів поставок. Таким чином, цифровий двійник полягає у з'єднанні програмного забезпечення для моделювання з реальною автономною роботизованою системою, щоб скоротити час реалізації виробничого процесу при зміні виробничої лінії.. Однак програмне забезпечення для моделювання є недосконалим, оскільки його фізичні механізми неточно відображають реальний світ. Крім того, симуляції дозволяють ідеально збирати дані без шуму, що стимулює дослідження підходів до глибокого навчання для робототехніки [47].

Системи моделювання промислових роботів імітують різні аспекти роботизованих операцій, включаючи планування руху, виявлення зіткнень, оптимізацію траєкторії та планування завдань. Вони дозволяють імітувати різні аспекти роботизованих операцій, що включають планування руху, виявлення зіткнень, оптимізацію траєкторії та планування завдань. Основні функціональні можливості таких систем включають:

- 3D - моделювання та візуалізація: більшість систем моделювання пропонують надійні інструменти для створення детальних 3D-моделей робочих місць, роботів та обладнання. Ці моделі точно відображають фізичне середовище і полегшують візуалізацію роботизованих завдань і взаємодій;

- планування та моделювання руху: платформи моделювання дозволяють користувачам генерувати траєкторії руху роботів для виконання конкретних завдань. За допомогою кінематичного та динамічного

моделювання користувачі можуть перевірити ці траєкторії, забезпечуючи безперебійну роботу без зіткнень;

- програмування та керування: користувачі можуть програмувати поведінку робота за допомогою інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, мов сценаріїв або методів автономного програмування. Системи моделювання імітують виконання цих програм, дозволяючи користувачам налагоджувати та оптимізувати логіку керування роботом;

- інтеграція з програмним забезпеченням CAD/CAM: системи моделювання легко інтегруються з програмним забезпеченням для автоматизованого проектування (CAD) і автоматизованого виробництва (CAM), що дозволяє ефективно обмінюватися даними і забезпечувати сумісність між робочими процесами проектування і моделювання;

- віртуальне введення в експлуатацію: платформи імітаційного моделювання підтримують віртуальне введення в експлуатацію, дозволяючи користувачам перевіряти системи управління і процеси автоматизації у віртуальному середовищі перед розгортанням в цеху.

Таким чином, системи допомагають підвищити продуктивність, знизити витрати та підвищити безпеку у виробничих середовищах, що робить їх важливим інструментом для промисловості.

Переваги використання систем моделювання промислових роботів є важливими для розвитку та оптимізації виробничих процесів. Зниження ризиків досягається шляхом виявлення та вирішення потенційних проблем у віртуальному середовищі, що зменшує час простою, запобігає пошкодженню обладнання та підвищує безпеку працівників. Економія коштів відбувається завдяки оптимізації на основі моделювання, що мінімізує необхідність у фізичних прототипах і тестуванні на місці, приводячи до значної економії матеріалів, робочої сили і часу. Гнучкість та ітерації дозволяють експериментувати з різними конфігураціями, макетами та сценаріями роботи, що дозволяє швидко створювати прототипи і допрацьовувати роботизовані процеси відповідно до мінливих виробничих вимог. Навчання та розвиток

навичок операторів, інженерів та обслуговуючого персоналу можливе у середовищах моделювання, де вони можуть ознайомитися з роботизованими системами та вдосконалити свої навички без ризику для реальних активів. Оптимізація продуктивності досягається через аналіз даних моделювання, що дозволяє виявляти вузькі місця, оптимізувати час циклу і підвищувати загальну продуктивність системи, приводячи до збільшення пропускної здатності і продуктивності.

Системи моделювання промислових роботів не лише допомагають знизити ризики та витрати, але й сприяють підвищенню продуктивності та розвитку навичок персоналу, що робить їх незамінним інструментом для сучасних виробничих підприємств.

Незважаючи на переваги, системи моделювання промислових роботів також мають низку недоліків. Точність моделей може бути недостатньою через розбіжності між віртуальними моделями та реальними середовищами, що призводить до неточностей у результатах моделювання. Складність і крива навчання цих систем вимагають значного часу і зусиль для освоєння через їхню складність і різноманітні набори функцій, що може створювати труднощі при навігації по інтерфейсах, налаштуванні параметрів і усуненні помилок. Крім того, високоточні симуляції є ресурсоємними, потребуючи значних обчислювальних ресурсів, що може обмежувати апаратну інфраструктуру і збільшувати час моделювання для складних сценаріїв. Проблеми інтеграції з існуючими програмними інструментами, апаратними компонентами і системами управління можуть викликати труднощі сумісності, вимагаючи додаткових зусиль з налаштування і розробки. Обмежений реалізм симуляцій також є недоліком, оскільки певні фактори, такі як властивості матеріалів, умови навколишнього середовища і зворотний зв'язок з датчиками, можуть бути не повністю враховані, що обмежує реалістичність моделювань. Нижче приведена порівняльна таблиця (табл. 2.3), що підсумовує функціональність, переваги та недоліки систем моделювання промислових роботів:

Таблиця 2.3 - Порівняльна таблиця функціональності, переваг та недоліків систем моделювання промислових роботів

Аспект	Функціональність	Переваги	Недоліки
3D-моделювання та візуалізація	Детальні 3D-моделі робочих місць, роботів та обладнання	Полегшення візуалізації завдань і взаємодій	Розбіжності між віртуальними моделями та реальним середовищем
Планування та моделювання руху	Генерація та перевірка траєкторії руху роботів	Зниження ризиків, зменшення витрат, підвищення продуктивності	Складна, висока крива навчання
Програмування та керування	Програмування поведінки робота, імітування виконання	Гнучкість, ітерації, навчання, оптимізація продуктивності	Ресурсомісткість, проблеми з інтеграцією
Інтеграція з програмним забезпеченням CAD/CAM	Безшовна інтеграція для обміну даними	Економія коштів, ефективні робочі процеси	Обмежений реалізм, проблеми інтеграції. Віртуальне введення в експлуатацію
Віртуальне введення в експлуатацію	Перевірка систем керування та процесів	Зниження ризиків, навчання, оптимізація продуктивності	Висока крива навчання, обмежений реалізм

Таким чином, системи моделювання промислових роботів пропонують потужний інструментарій для оптимізації та перевірки роботизованих процесів у віртуальному середовищі без ризиків. Незважаючи на їх переваги в зниженні ризиків, скороченні витрат і підвищенні продуктивності, користувачі повинні ретельно враховувати складності та обмеження, пов'язані з цими системами.

Висновки до розділу 2

У сучасному світі існує розмаїття програмних платформ для симуляції промислових роботів. Вони можуть варіюватися від відкритих джерел до комерційних рішень. Найпопулярніші серед них - Gazebo, Webots, V-REP, ROS (Robot Operating System), CoppeliaSim, MATLAB/Simulink, RoboDK, імітаційна система Fanuc, інші відомі універсальні інструменти та

спеціалізовані платформи, спрямовані на конкретні завдання та індустріальні потреби.

У процесі дослідження було з'ясовано, що системи симуляції промислових роботів використовують широкий спектр інструментів. Це включає в себе редактори моделей, інтерфейси програмування, візуалізаційні інструменти, підтримку сенсорів та модулів управління, а також інструменти для аналізу даних та відлагодження програмного забезпечення.

При порівнянні функціональності систем симуляції промислових роботів виявлено, що кожна з них має свої переваги та недоліки. Наприклад, деякі системи можуть бути більш потужними у візуалізації та фізичній моделюванні, тоді як інші спеціалізуються на реалістичному моделюванні динаміки роботів або мають більшу підтримку для взаємодії з ROS. Варто відзначити, що деякі програмні платформи можуть мати обмеження у доступності або вартості ліцензій.

Загалом, дослідження різних систем симуляції промислових роботів свідчить про їхню важливу роль у вдосконаленні процесів розробки та тестування роботизованих систем. Вибір конкретної платформи повинен ґрунтуватися на конкретних потребах проекту, доступних ресурсах та функціональних вимогах.

З ПРОВЕДЕННЯ СИМУЛЯЦІЇ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА В СИСТЕМІ ROBODK

У наш час більшість галузей промисловості перейшли на автоматизацію процесів за допомогою робототехніки. Більшість підприємств використовують роботизовані маніпулятори для таких процесів, як підбір та розміщення, пакування. Для роботи робота нам потрібно розташувати кінцевий ефект у точній точці. Дослідники робототехніки повинні розрахувати маніпулятор і керувати ним дуже ефективно. Перш ніж реалізувати свій алгоритм, вони повинні протестувати його в безпечному середовищі, інакше це може створити непередбачувані ситуації і завдати шкоди майну та людському життю. Симулятор - це найбезпечніше середовище для тестування результатів роботи нового алгоритму. Хороший симулятор може дати нам максимально практичний результат. Наразі найкращим симулятором є програма RoboDK, якій найбільше довіряють. Його 3D модель є максимально природною. Пряма (FK) і зворотна кінематика (IK) дуже ефективні. Він також може інтегруватися з реальним роботом. Він має багато стандартних 3D-моделей роботів, які ми просто завантажуюмо і експериментуємо на них. На практиці, реальний робот настільки дорогий, що не кожен може собі дозволити робота різних виробників. Однак у симуляторі ми можемо легко імітувати реальних роботів з безліччю варіантів.

У цьому розділі було проведено моделювання промислового робота в середовищі RoboDK.

Однією з головних причин вибору RoboDK є його повна інтеграція з декількома брендами роботів, такими як ABB, Fanuc, KUKA та Universal Robots, серед інших. Ця гнучкість дозволяє моделювати та програмувати широкий спектр роботизованих додатків без прив'язки до власного програмного забезпечення конкретного виробника роботів.

Крім того, RoboDK підтримує кілька мов програмування, включаючи Python і мову програмування роботів (RPL), що дозволяє користувачам автоматизувати та ефективно налаштовувати свої роботизовані процеси. Для цієї демонстрації ми в основному використовуватимемо Python через його універсальність, читабельність і великі бібліотеки для робототехніки та автоматизації.

Використання можливостей RoboDK демонструє потужність і ефективність офлайн-програмування роботів, дозволяючи користувачам оптимізувати свої виробничі процеси, мінімізувати час простою та прискорити час виходу своїх продуктів на ринок.

У середовищі RoboDK є змога програмувати роботи за допомогою різних інструментів: Графічний інтерфейс (GUI), написання скриптів з використанням Python, Підтримка ROS (Robot Operating System), Конвертери мов програмування, Симуляція та візуалізація. Розглянемо кожен інструмент програмування роботів у середовищі RoboDK більш детально:

Графічний інтерфейс (GUI) - це інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дозволяє користувачам створювати програми для роботів безпосередньо за допомогою миші та клавіатури. Ви можете редагувати робочі області, встановлювати траєкторії, задавати параметри руху та багато іншого, все це в інтуїтивно зрозумілому візуальному середовищі.

Написання скриптів з використанням Python - RoboDK має вбудований інтерпретатор Python, що дозволяє вам писати скрипти для автоматизації різних завдань. Ви можете використовувати Python для створення складних програм роботів, обробки даних, взаємодії з іншими системами тощо.

Підтримка ROS (Robot Operating System) - RoboDK інтегрується з ROS, що дозволяє вам використовувати всі функції ROS для програмування та керування роботами. Це дає можливість взаємодіяти з ROS через Python або інші мови програмування, щоб виконати різноманітні завдання, такі як навігація, планування маршрутів, обробка зображень тощо.

Конвертери мов програмування - RoboDK підтримує конвертацію програм між різними мовами програмування, такими як ABB RAPID, Fanuc Karel, Stäubli VAL3, KUKA KRL та інші. Це дозволяє легко переконвертувати ваші існуючі програми між різними мовами програмування без необхідності переписування коду з нуля.

Симуляція та візуалізація - RoboDK надає потужні інструменти для симуляції та візуалізації роботів. Ви можете переглядати та тестувати ваші програми роботів в симульованому середовищі перед їх виконанням на реальному обладнанні. Це дозволяє вам виявити та виправити будь-які помилки до того, як ви виконаєте програму на реальному роботі.

Ці інструменти роблять RoboDK потужним середовищем для програмування та керування роботами, надаючи широкі можливості для автоматизації різних завдань у сфері робототехніки [50].

3.1 API RoboDK

RoboDK API дозволяє програмувати будь-яку руку промислового робота за допомогою мови програмування, якій ви віддаєте перевагу.

RoboDK API доступний такими мовами програмування:

- Python;
- C#;
- Matlab;
- C++;
- Visual Basic.

API RoboDK дозволяє створювати симуляції для промислових роботів, конкретних механізмів і генерувати програми для роботів, що відповідають виробникам. За допомогою RoboDK API можна симулювати та програмувати будь-якого промислового робота, використовуючи мову програмування, яку ви бажаєте. RoboDK API надає альтернативу використанню мов програмування від виробника.

Python – це мова програмування, яка дозволяє працювати швидше та ефективніше інтегрувати системи. Синтаксис Python дозволяє програмістам виражати концепції у меншій кількості рядків коду порівняно з іншими мовами, що робить її дружньою та легкою для вивчення. API RoboDK для Python складається з наступних модулів:

а) пакет `robodk` є розподіленою точкою входу до API Python і є спільним джерелом для всіх підпакетів та модулів;

б) субмодуль `robolink` (`robolink.py`) є інтерфейсом між RoboDK та Python;

в) підмодуль `robomath` (`robomath.py`) є інструментарієм робототехніки для Python, який дозволяє оперувати з трансформаціями положення та отримувати кути Ейлера для різних виробників роботів;

г) підмодуль `robodialogs` (`robodialogs.py`) є інструментарієм для роботи з діалогами, наприклад: діалоги відкриття та збереження файлів, вікна повідомлень тощо;

д) підмодуль `robofileio` (`robofileio.py`) є набором інструментів для роботи з файлами. Властивості файлів, CSV, FTP тощо.;

є) підмодуль `roboapps` (`roboapps.py`) являє собою панель інструментів для роботи з додатками RoboDK.

У наведеному нижче сценарії показано приклад використання `robodk` пакета для симуляції робота та програмування в режимі офлайн.

```
from robodk.robolink import *    # RoboDK's API
from robodk.robomath import *   # Math toolbox for robots

# Start the RoboDK API:
RDK = Robolink()

# Get the robot item by name:
robot = RDK.Item('Fanuc LR Mate 200iD', ITEM_TYPE_ROBOT)
```

```

# Get the reference target by name:
target = RDKit.Item('Target 1')
target_pose = target.Pose()
xyz_ref = target_pose.Pos()

# Move the robot to the reference point:
robot.MoveJ(target)

# Draw a hexagon around the reference target:
for i in range(7):
    ang = i*2*pi/6 #ang = 0, 60, 120, ..., 360

    # Calculate the new position around the reference:
    x = xyz_ref[0] + R*cos(ang) # new X coordinate
    y = xyz_ref[1] + R*sin(ang) # new Y coordinate
    z = xyz_ref[2]             # new Z coordinate
    target_pos.setPos([x,y,z])

# Move to the new target:
robot.MoveL(target_pos)

# Trigger a program call at the end of the movement
robot.RunCode('Program_Done')

# Move back to the reference target:
robot.MoveL(target)

```

Той самий сценарій, що використовується для моделювання, можна використовувати для програмування робота в автономному режимі. Це означає, що для контролера робота буде автоматично створено програму для відтворення рухів робота. RoboDK підтримує велику кількість контролерів

роботів і легко включити сумісність для нових контролерів роботів за допомогою постпроцесорів.

Python Simulation у RoboDK – це можливість використовувати мову програмування Python для симуляції та контролю роботів у середовищі RoboDK. Ця функція дозволяє розробникам та інженерам створювати скрипти на Python для моделювання робочих процесів, аналізування даних та взаємодії з роботами в середовищі RoboDK. За допомогою Python Simulation у RoboDK можна виконувати наступні завдання, розглянемо їх.

За допомогою Python можна створювати скрипти, що автоматично запускають симуляцію робота з певними параметрами та умовами. Це дозволяє ефективно тестувати роботизовані процеси, виконувати варіації параметрів та аналізувати результати.

Python Simulation дає можливість аналізувати дані, отримані під час симуляції робота, та виконувати оптимізацію робочих процесів. Можна аналізувати шляхи рухів робота, швидкість виконання завдань, оптимальні розташування робочих станцій тощо.

Python Simulation дає змогу розробляти та тестувати алгоритми керування роботами в симульованому середовищі. Можна створювати складні логіки рухів, встановлювати умови завдань та взаємодії, аналізувати реакцію робота на різні сценарії.

Python є популярною мовою програмування з багатим екосистемою інструментів. Python Simulation дозволяє інтегрувати функціональність RoboDK з іншими системами або бібліотеками Python для забезпечення зручної роботи з даними та результатами симуляцій.

В цілому, Python Simulation у RoboDK надає розробникам та інженерам більшу гнучкість та контроль над симуляцією та управлінням роботами, дозволяючи автоматизувати процеси, аналізувати дані та розробляти складні алгоритми.

Python OLP (Offline Programming) у RoboDK – це можливість використовувати мову програмування Python для офлайн програмування

роботів у середовищі RoboDK. Офлайн програмування дозволяє створювати, тестувати та оптимізувати роботизовані процеси без прямого з'єднання з фізичним роботом. За допомогою Python OLP у RoboDK можна виконувати наступні завдання:

- створення скриптів для офлайн програмування;
- валідація та симуляція робочих процесів;
- інтеграція з іншими інструментами та бібліотеками Python;
- автоматизація процесу програмування.

Python OLP у RoboDK дозволяє ефективно використовувати мову програмування Python для створення, тестування та оптимізації програм роботів, що розширює можливості середовища RoboDK та полегшує процес розробки та впровадження роботизованих систем.

Python Online Programming у RoboDK використовує можливості мови програмування Python для онлайн програмування роботів у реальному часі. Це означає, що програми можуть бути виконані безпосередньо на фізичному роботі або у симуляційному середовищі RoboDK. За допомогою Python OLP у RoboDK можна виконувати наступні завдання:

- пряме управління роботом;
- збір та обробка даних з робота;
- розширені функції програмування;
- розробка інтерактивних застосунків.

Python OLP у RoboDK дозволяє розширити можливості програмування роботів та забезпечити гнучкість, ефективність та розширюваність управління робототехнічними системами.

C# API у RoboDK – це набір функцій та методів, які дозволяють програмістам використовувати мову програмування C# для взаємодії з функціоналом RoboDK. Це дозволяє автоматизувати роботу з робототехнічними системами, використовуючи потужні можливості RoboDK. Нижче наведені деякі основні можливості та функції C# API у RoboDK:

а) за допомогою C# API можна керувати рухами робота, надсилати команди на переміщення, виконання операцій, зміну інструментів та інші дії, що дозволяє автоматизувати процеси робототехніки та інтегрувати їх у власні додатки чи роботизовані системи;

б) C# API дозволяє отримувати дані з робота, такі як позиція, орієнтація, стан сенсорів, датчиків тощо, можна отримувати ці дані для подальшої обробки, аналізу та використання у власних програмах;

в) C# API дозволяє взаємодіяти з симуляційною системою RoboDK, що дозволяє тестувати та валідувати програми перед їх виконанням на реальному роботі, можна симулювати рухи робота, перевірити колізії, аналізувати траєкторії та інше;

г) за допомогою C# API можна створювати програми робота, використовуючи мову програмування C# та генерувати траєкторії руху, створювати складні програми з умовами, циклами, функціями тощо;

д) C# API дозволяє керувати файлами та проектами RoboDK.

Використання C# API у RoboDK дозволяє максимально автоматизувати та налаштовувати процеси робототехніки, забезпечувати інтеграцію з іншими системами та розширювати можливості RoboDK відповідно до ваших потреб.

C# Simulation у RoboDK – це можливість використовувати мову програмування C# для створення симуляційних моделей та сценаріїв у середовищі RoboDK. Це дозволяє програмістам створювати та тестувати різноманітні сценарії безпосередньо у середовищі RoboDK, що спрощує розробку та налагодження робототехнічних додатків. Основні можливості C# Simulation у RoboDK:

а) за допомогою C# API можна програмно створювати симуляційні моделі роботів та об'єктів у середовищі RoboDK та визначати геометрію об'єктів, їх кінематику, датчики, фізичні властивості, що дозволяє точно відтворити реальні умови та параметри робототехнічних систем для проведення симуляцій;

б) можна використовувати мову програмування C# для створення скриптів та сценаріїв, які керують поведінкою роботів у симуляції та програмувати рухи роботів;

в) C# Simulation у RoboDK дозволяє взаємодіяти з іншими бібліотеками та компонентами мови C#;

г) C# Simulation у RoboDK дозволяє візуалізувати симуляційні моделі та аналізувати результати симуляцій.

C# OLP (Offline Programming) у RoboDK використовує мову програмування C# для розробки програм роботів безпосередньо в офлайн-режимі. Це означає, що можна програмувати рухи та операції робота без його фізичної присутності, спираючись на симуляційну модель робота у середовищі RoboDK. Основні можливості C# OLP у RoboDK:

а) розробка програм робота: можна використовувати мову програмування C# для створення програм, які визначають рухи, операції та взаємодію робота з оточуючими об'єктами. Можна програмувати робота для виконання різних завдань, таких як збирання деталей, зварювання, фрезерування та інші операції;

б) офлайн-програмування: Використовуючи C# OLP у RoboDK, можна програмувати робота в офлайн-режимі, що дозволяє економити час та ресурси, оскільки не потрібно мати фізичний доступ до робота для розробки та тестування програм. Також можна використовувати симуляційну модель робота у середовищі RoboDK для програмування його рухів та операцій;

в) інтеграція з іншими компонентами: C# OLP у RoboDK дозволяє взаємодіяти з іншими компонентами мови C# та використовувати різноманітні бібліотеки та розширення, щоб розширити функціональність програм робота та зручність їх розробки;

г) валідація та оптимізація програм: Завдяки C# OLP у RoboDK, можна виконувати валідацію та оптимізацію програм робота ще до їх виконання на фізичному роботі та аналізувати траєкторії руху, перевіряти перешкоди,

оцінювати шляхи руху та виконувати інші операції, щоб забезпечити безпеку та оптимальність робототехнічних програм.

У цілому, C# OLP у RoboDK дозволяє програмістам використовувати мову програмування C# для ефективного розробки програм роботів, валідації та оптимізації їх перед виконанням на фізичних роботах. Це дозволяє прискорити процес розробки та впровадження робототехнічних систем [34].

C# Online Programming у RoboDK дозволяє використовувати мову програмування C# для програмування та керування роботами в реальному часі. Можна створювати програми, які керують роботом наживо, без необхідності перезапуску або перекомпіляції коду. Основні можливості C# Online Programming у RoboDK:

а) користувач може використовувати C# Online Programming для створення програм, які керують роботом у режимі реального часу, що надає можливість динамічно контролювати рухи робота, взаємодіяти з навколишнім середовищем та виконувати різноманітні завдання в реальному часі;

б) C# Online Programming дозволяє взаємодіяти з симуляційною моделлю робота у середовищі RoboDK;

в) C# Online Programming у RoboDK надає гнучкість та можливості розширення завдяки використанню мови програмування C#, тобто є можливість використовувати різноманітні бібліотеки, розширення та інші компоненти C# для розширення функціональності програм робота та взаємодії з іншими системами;

г) є можливість використовувати C# Online Programming для інтеграції з іншими компонентами або системами.

C# Online Programming у RoboDK дозволяє програмістам використовувати потужні можливості мови програмування C# для створення складних та гнучких програм робота. Ви можете контролювати робота у реальному часі, взаємодіяти з симуляцією та інтегрувати програму робота з іншими системами для досягнення бажаних результатів.

RoboDK надає API для інтеграції з MATLAB, що дозволяє використовувати функціональність MATLAB для програмування та керування роботами. За допомогою MATLAB API у RoboDK можна:

- створювати програми робота;
- керувати роботом в реальному часі;
- взаємодіяти з симуляцією;
- передавати дані між MATLAB і RoboDK;
- проводити інтеграцію з іншими інструментами MATLAB.

Загальною ідеєю MATLAB API у RoboDK є забезпечення зручного та потужного інструменту для програмування та керування роботами, використовуючи математичні та обчислювальні можливості MATLAB [52].

C++ є високорівневою мовою програмування загального призначення з можливостями низькорівневого програмування.

Вона має багато функцій, таких як об'єктно-орієнтоване програмування, шаблони, управління пам'яттю та інші та використовується в різних областях, включаючи розробку операційних систем, додатків, вбудованого програмування.

Синтаксис мови C++ базується на мові C, але має додаткові можливості, такі як класи, успадкування, перевантаження операторів тощо.

Підтримується широкий набір стандартних бібліотек, таких як STL (Standard Template Library), що надає різноманітні структури даних та алгоритми.

В RoboDK API використовувати C++ для розробки власних програм або скриптів, які використовують API RoboDK.

Розробка додатків на C++ дозволяє ефективно інтегрувати функціональність RoboDK у програми, забезпечуючи високу швидкодію та ефективність.

Порівняльна таблиця мов програмування, які зазвичай використовуються в контексті використання RoboDK API представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняльна таблиця мов програмування в контексті використання RoboDK API:

Мова програмування	Рівень складності	Надійність	Популярність	Підтримка API RoboDK	Простота інтеграції
Python	Низький	Висока	Дуже висока	Повна	Дуже легко
C#	Середній	Висока	Висока	Повна	Помірно
Matlab	Низький	Середня	Середня	Часткова	Легко
C++	Високий	Дуже висока	Висока	Часткова	Помірно
Visual Basic	Низький	Низька	Низька	Обмежена	Легко

Виходячи з наведеної таблиці, Python є найбільш підходящою мовою програмування для використання RoboDK API. Вона пропонує поєднання низької складності, високої надійності, дуже високої популярності, відмінної підтримки API RoboDK і дуже простої інтеграції. Хоча інші мови, такі як C# та C++, також пропонують потужну підтримку та надійність, простота використання та широке розповсюдження Python робить її кращим вибором для розробників, які працюють з RoboDK API.

3.2 Створення віртуального середовища

Вибір робота бренду KUKA обумовлений високотехнологічними рішеннями та широким спектром застосувань у різних галузях. Модель KR 6 R900 sixx: має 6 осей, що забезпечує більшу гнучкість і точність у виконанні завдань. Крім того, її компактні розміри і невелика вага роблять її ідеальним вибором для обмежених просторів і легких додатків. Радіус дії 901 мм дає змогу використовувати робот для багатьох типів завдань, включно з монтажем, складанням, зварюванням і обробкою. Так само робот має вантажопідйомність 6 кг, що є значною вантажопідйомністю для робота таких компактних розмірів. Це дає змогу виконувати широкий спектр завдань, включно з маніпуляцією з важкими предметами, а також точність повторюваності 0,030 мм, що вказує на високу точність і надійність робота

під час виконання завдань. Це особливо важливо для завдань, що вимагають високої точності, наприклад, при роботі з деталями в автомобільній або аерокосмічній промисловості.

Загалом, робот KR 6 R900 sixx від KUKA є чудовим вибором для симуляції в середовищі RoboDK, завдяки своїй надійності, точності та гнучкості, що дає змогу ефективно моделювати різноманітні промислові завдання.

Для того, щоб додати робота у середовище, вибираємо необхідний варіант з бібліотеки RoboDK та розміщуємо його у відповідному місці в середовищі (рис 3.1).

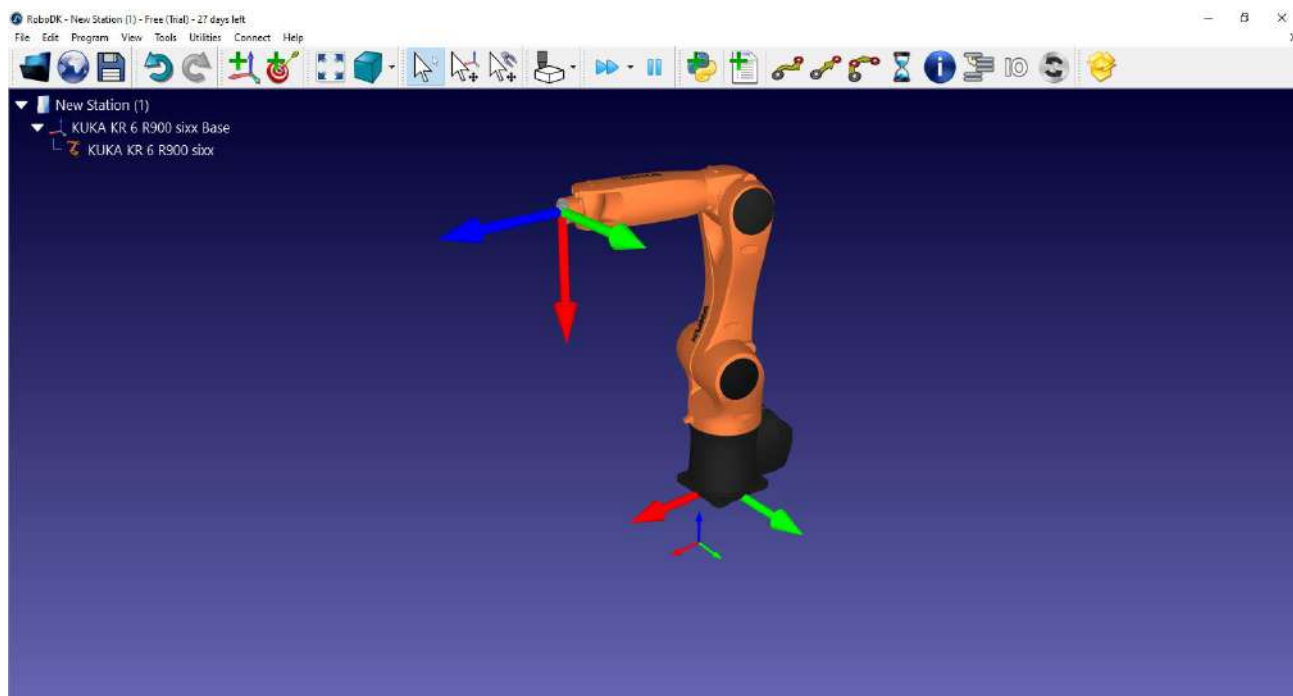


Рисунок 3.1 - Доданий робот у середовищі RoboDK

Після цього додаємо у середовище для робота шпіндель, котрий буде допомагати роботу KUKA обробляти металеві деталі (рис.3.2).. Також виставляємо параметри для робота згідно кутів Ейлера.

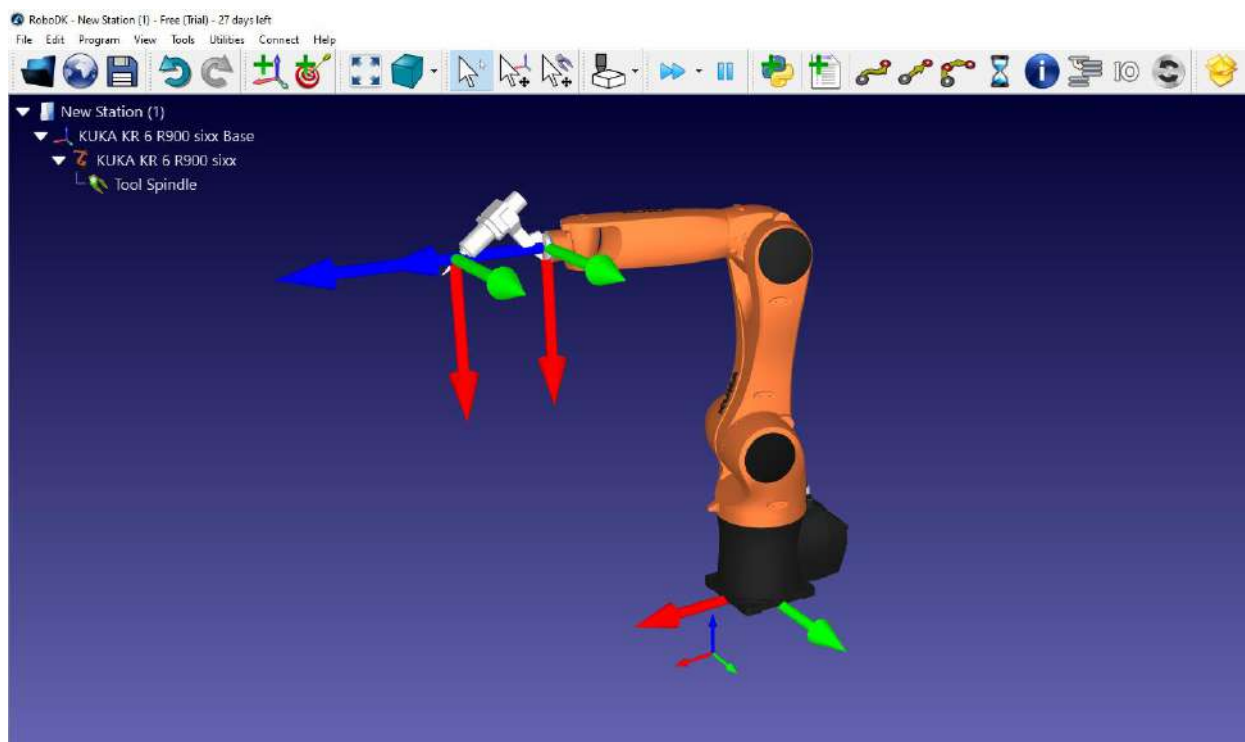


Рисунок 3.2 - Робот KUKA з доданим інструментом для обробки деталей

Далі створюємо робочу поверхню та розміщуємо на ній деталь, яку робот KUKA буде обробляти (рис.3.3).

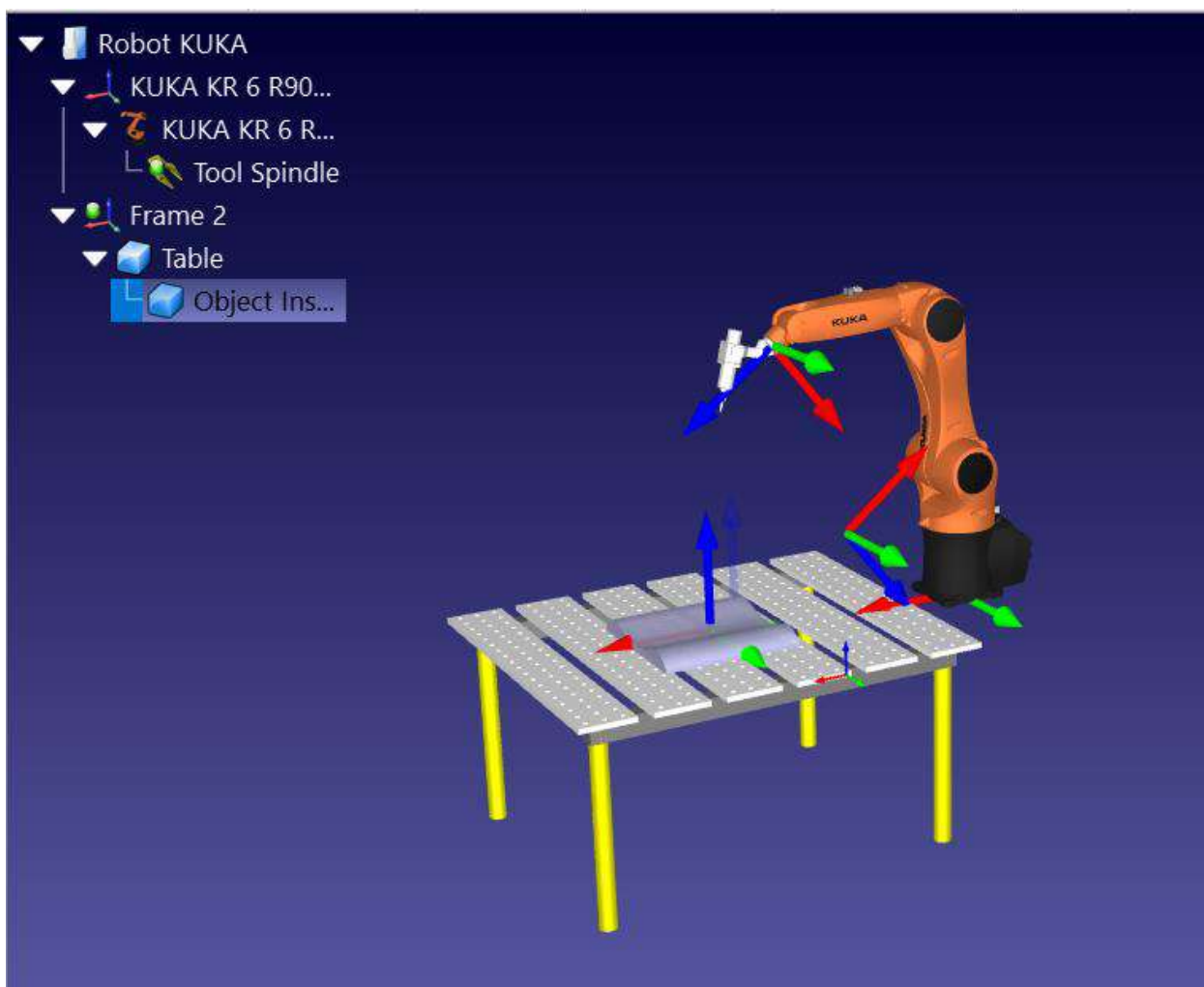


Рисунок 3.3 - Створення робочої поверхні для робота KUKA

3.3 Моделювання руху інструменту та програмування робота

З бібліотеки RoboDK завантажуюємо NC - файли, такі як APT для роботизованої обробки та додаємо його у середовище. Після цього навчаємо робота та симулюємо його рухи. Як видно, на рисунку 3.4, роботу достатньо близько 40 секунд на те, щоб обробити деталь.

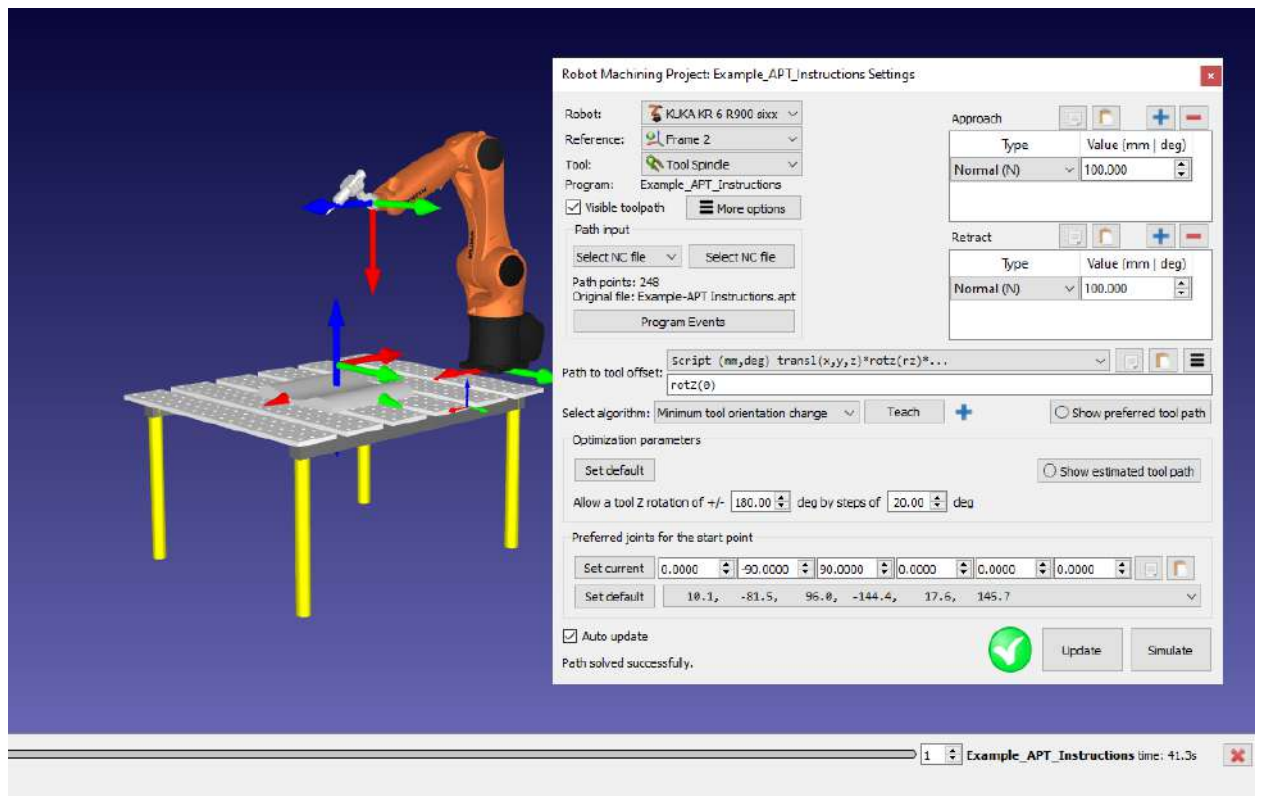


Рисунок 3.4 - Моделювання руху інструменту

Далі генеруємо код Python для керування роботом KUKA та додаємо усі рухи робота у середовище RoboDK (рис.3.5).

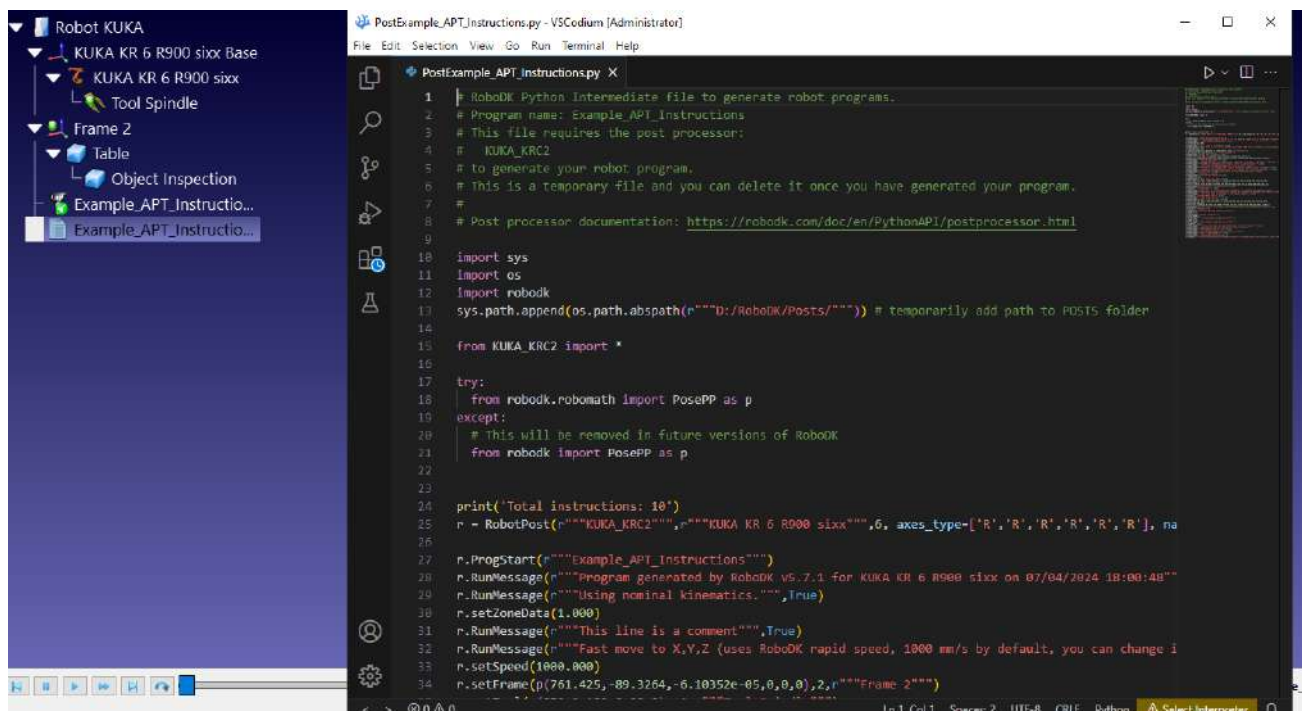


Рисунок 3.5 - Генерування програми для керування роботом KUKA

Як видно на рисунку 3.6, після цього у програмі з'явилися усі рухи робота, згенеровані раніше у VSCodium.

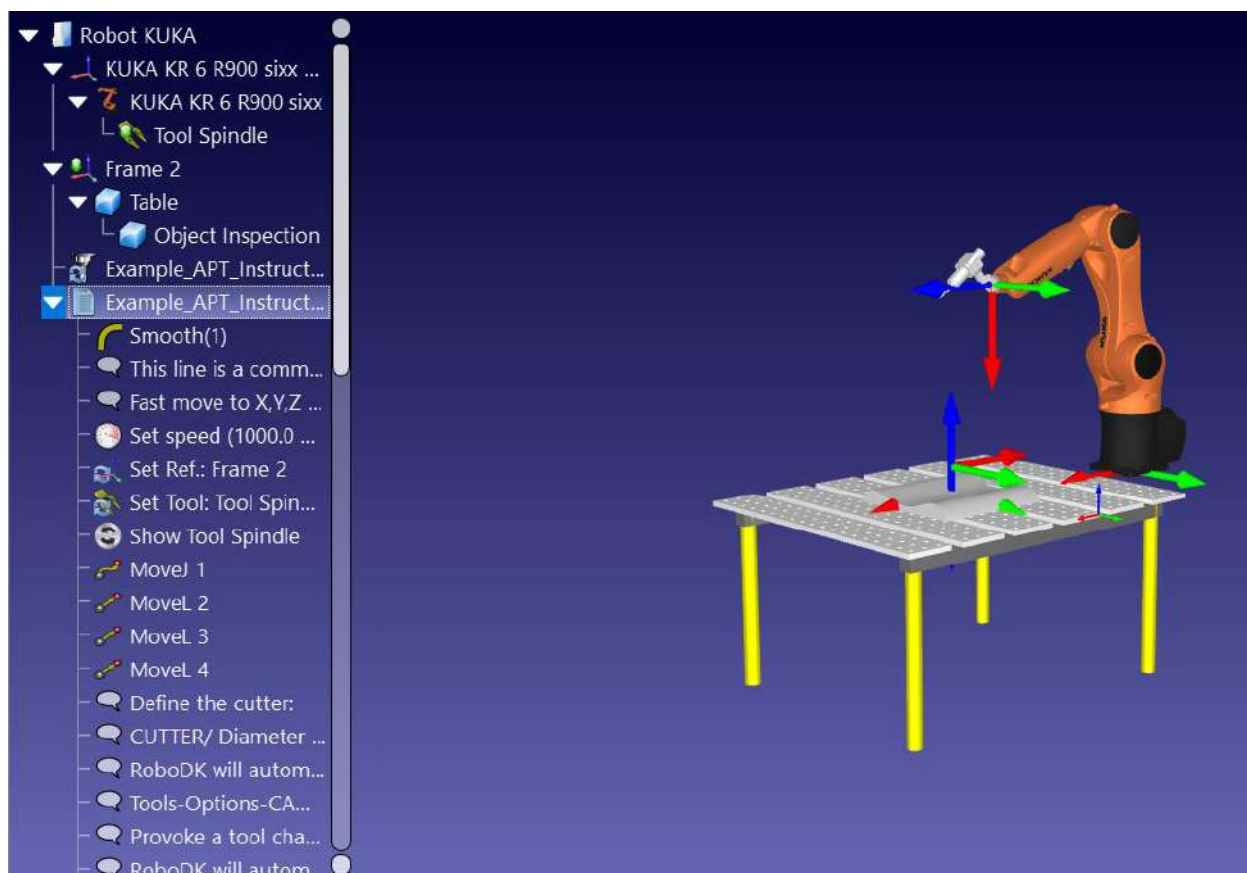


Рисунок 3.6 - Згенеровані рухи робота

3.4 Мови програмування. Offline Програмування

Під Offline або автономним програмуванням мається на увазі створення керуючих програм для роботів поза виробничим середовищем. Даний вид створення програм, що управляють, виключає прості виробництва, викликані необхідністю програмування в цеху. Моделювання та автономне програмування дозволяють досліджувати кілька сценаріїв роботи роботизованого осередку перед налаштуванням реального виробничого осередку. RoboDK дозволяє вчасно передбачити помилки, які зазвичай допускаються при проектуванні робочого осередку.

Автономне програмування – це найкращий спосіб максимізувати повернення інвестицій у робототехнічні системи, що потребує відповідних

інструментів моделювання. При цьому час на освоєння нових програм може бути скорочений з кількох тижнів до одного дня, що дозволяє роботизувати навіть короткострокове виробництво.

З RoboDK можна запрограмувати будь-якого робота будь-якої марки, використовуючи мову Python. У моєму випадку робот марки KUKA рухається шестикутним контуром, імітуючи процес зварювання. Траєкторія зварювання прорахована з опорною на конкретну точку. Щоб подивитися на зміну коду Python, клацаємо правою кнопкою миші та вибираємо "Edit Python Code". З API для RoboDK немає обмежень (рис. 3.7).

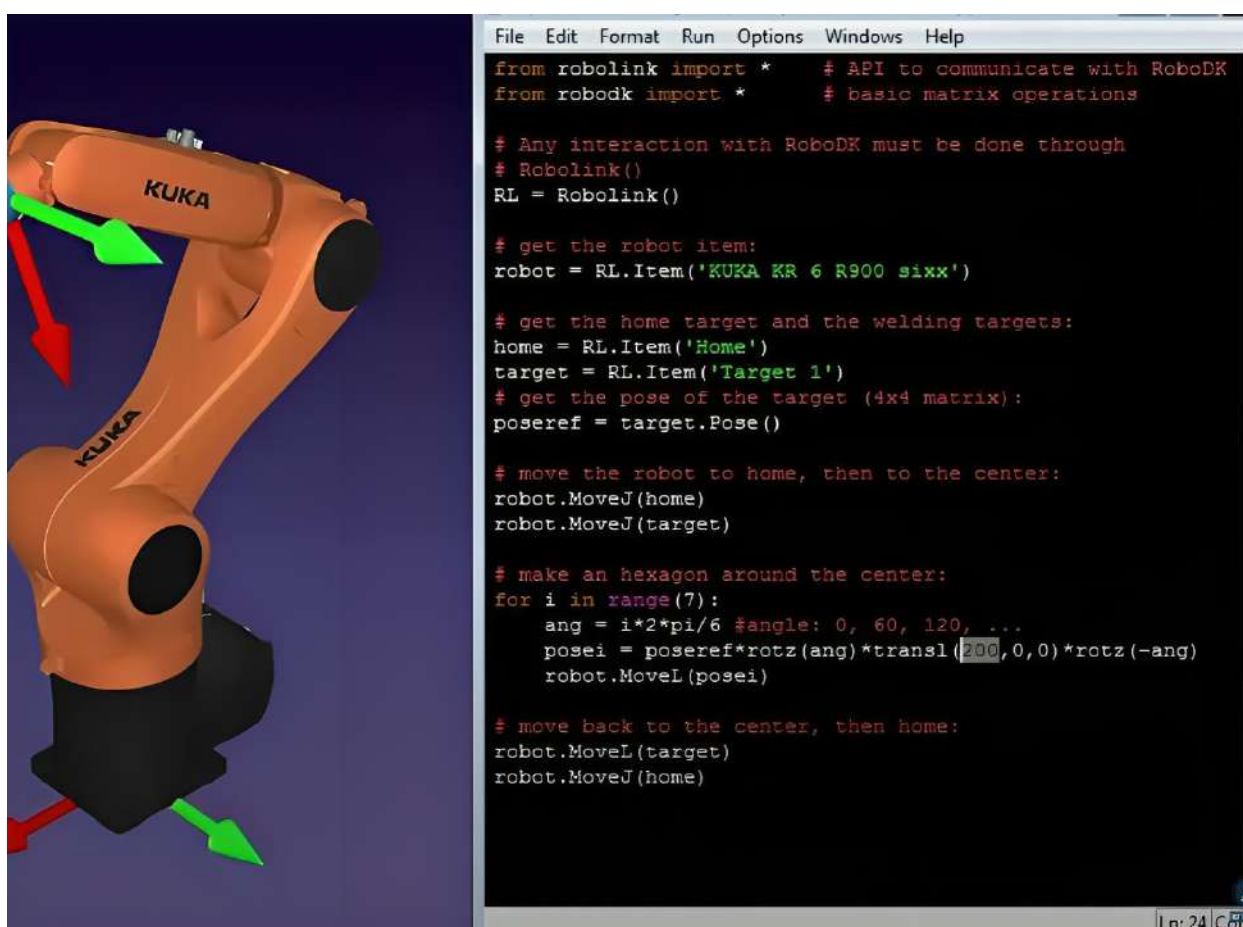


Рисунок 3.7 - Текст програми робота на мові Python

У вікні можна створити свій власний макрос імітації та відображення. У цьому випадку робот переміщається за допомогою команди MoveJ. Використовуючи однорідне матричне перемноження, можна легко обчислити циклічний шестикутний контур. Також після введення необхідного числа

вершин удосконалюється програма коду Python (рис 3.8). Також є можливість вказати скільки вершин потрібно для цієї геометрії.

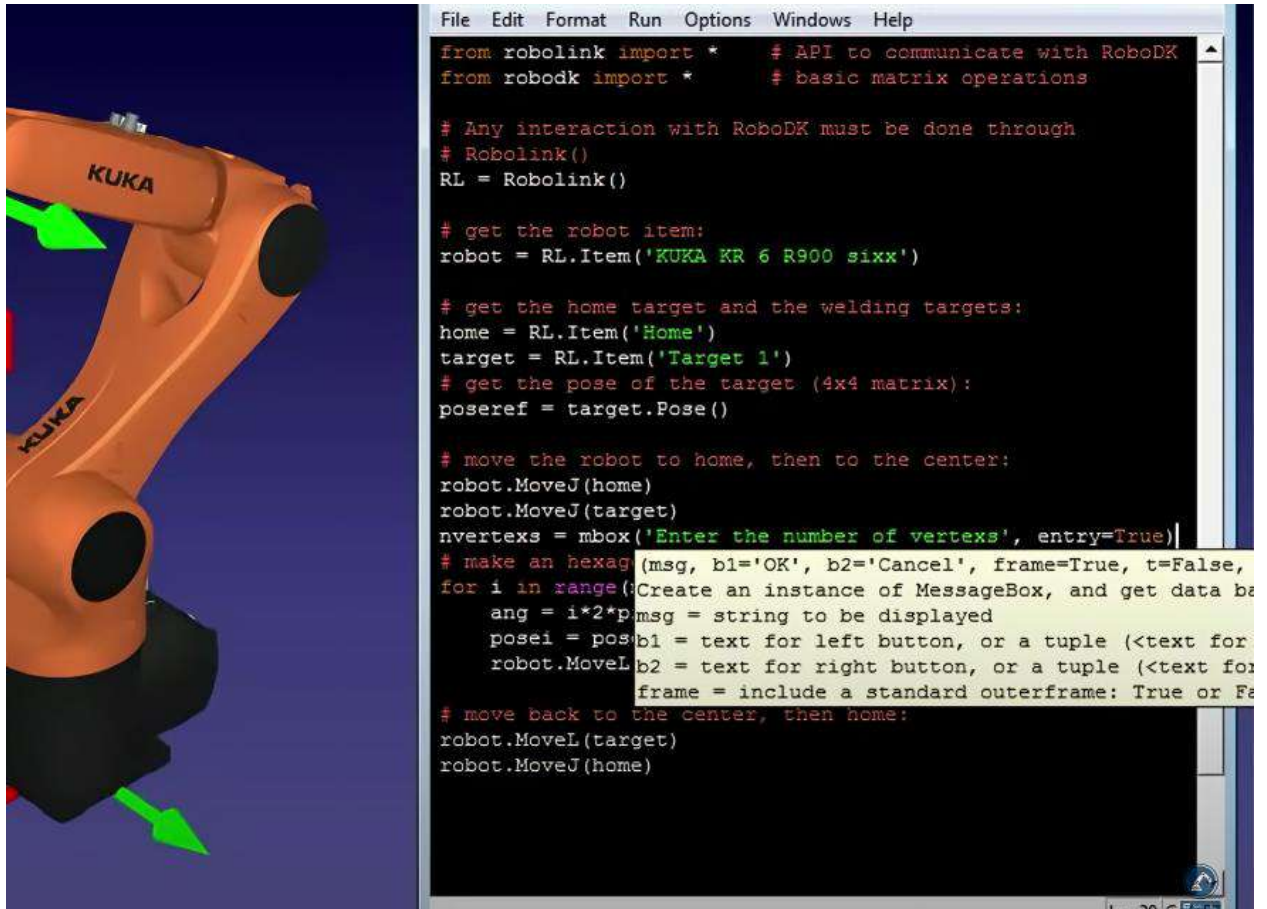


Рисунок 3.8 - Удосконалення програми коду Python введенням необхідного числа вершин

Також є можливість вивести програму для робота. У цій ситуації генерується SRC - файл для робота KUKA (рис.3.9).

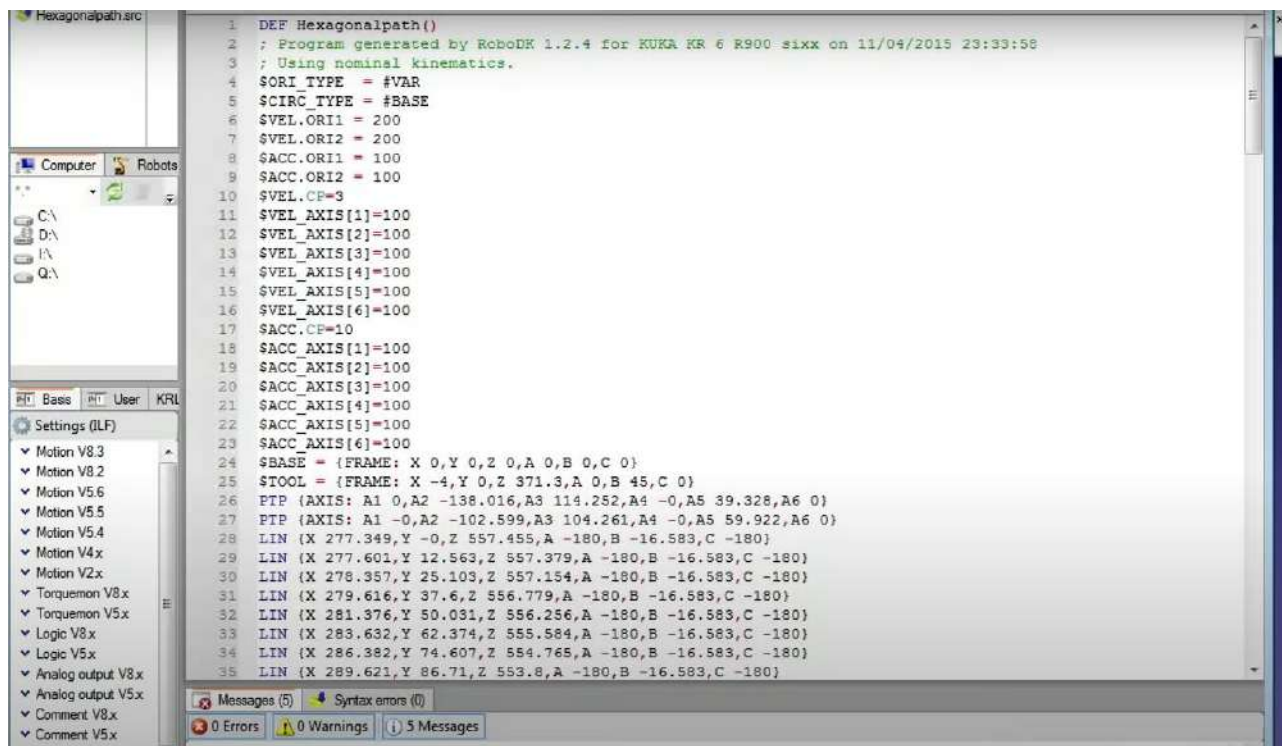


Рисунок 3.9 - SRC - файл для роботи KUKA

З проведеної симуляції можна побачити, що ідентифікувалися ключові аспекти, які потребують уваги та вдосконалення у виробничих процесах, а саме стало видно, які області виробництва мають найбільше затримок або де виникають конфлікти між роботами. Також було виявлено, які операції можна оптимізувати для підвищення швидкості або якості виробництва. Крім того, можна побачити, які конкретні зміни у параметрах роботів чи траєкторіях можуть призвести до поліпшення загальної продуктивності. Таким чином, проведена симуляція надає можливість точно визначити проблемні сфери та розробити стратегії вдосконалення виробничих процесів.

Результати симуляції підтвердили, що застосування оптимальних траєкторій руху для роботів та встановлення оптимальних параметрів роботи дозволяє оптимізувати робочі процеси, зменшуючи час виробництва та мінімізуючи можливість виникнення помилок.

Крім того, аналіз результатів симуляції також підтвердив, що впровадження покращень, запропонованих на основі даних з симуляції,

сприятиме підвищенню якості виробів та зниженню відхилень від стандартів якості.

Висновки до розділу 3

Для більш точної симуляції роботи промислового робота, потрібно: оптимізувати траєкторію руху роботів та розташування обладнання і робочих зон, а також покращити параметри роботів, таких як швидкість, прискорення та точність тощо.

Оптимізація траєкторії руху роботів включає дослідження різних методів управління рухом, вибір оптимальних траєкторій руху, уникнення колізій та конфліктів між роботами, а також планування оптимальних маршрутів для досягнення поставлених цілей. Оптимізація може бути досягнута за допомогою різних методів, таких як алгоритми штучного інтелекту, методи машинного навчання, та інші. Головні принципи включають мінімізацію відстаней, уникнення перешкод, керування конфліктами, урахування обмежень та динамічне планування. Такі принципи реалізуються через різноманітні технології та методи, що дозволяють роботам ефективно переміщатися та уникати конфліктів у робочому середовищі.

Оптимізація розташування обладнання та робочих зон - важлива складова планування робочого простору для підвищення ефективності використання простору та скорочення часу переміщення роботів. Це включає аналіз потоків роботів, групування обладнання, мінімізацію перешкод, використання технологій маршрутизації та постійну оптимізацію. Оптимізоване розташування обладнання сприяє покращенню продуктивності та зниженню витрат.

Для покращення параметрів роботів, таких як швидкість, прискорення та точність, можна використовувати симуляцію для налаштування оптимальних значень цих параметрів. Цей процес включає в себе визначення

цілей, створення сценаріїв, налаштування параметрів, аналіз результатів, вибір оптимальних параметрів та їх перевірку на реальних роботах. Такий підхід дозволяє знаходити найкращі значення параметрів для досягнення максимальної продуктивності та якості виробництва.

Отже, симуляція у середовищі RoboDK не лише виявила проблеми, а й надала конкретні рекомендації щодо їх вирішення, що сприятиме покращенню всіх аспектів виробничого процесу.

4 ЕКСПЛУАТАЦІЯ, ТЕСТУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМИ

4.1 Дослідження стандартів промислової автоматизації

Системи симуляції виробництв є важливим інструментом для оптимізації виробничих процесів та підвищення ефективності роботи підприємств. У разі, коли реальне виробництво неможливо використовувати для оптимізації, симуляція виробництва може бути корисним інструментом для моделювання виробничих процесів та передбачення їхньої поведінки у різних умовах.

Робототехніка охоплює сфери розробки, дослідження, проектування та використання роботів. Вона поєднує в собі знання з декількох наукових дисциплін - від математики, електротехніки, машинобудування, економіки до біології. В останні десятиліття були розроблені різноманітні матеріали та нові технології. З цим тісно пов'язане розгортання все нових робототехнічних застосувань, в яких вимоги до продуктивності роботів часто змінюються. Виробники постійно прагнуть вдосконалити виробничі процеси, щоб зменшити кількість помилок і витрати. Ці вимоги враховуються при розгортанні роботизованих додатків [53].

Найважливішими факторами при виборі правильного робота є його точність і повторюваність.

Вибір робота, придатного для виконання передбачуваного завдання, вимагає врахування всіх робочих властивостей робота, що охоплюють весь діапазон його застосування. Наступним питанням є економічний аспект використання робота. Невеликим фірмам не вистачає капіталу для придбання нового, повністю функціонуючого робота, який можна безпечно використовувати в робототехнічному додатку. Саме тому часто трапляється так, що малі підприємства опосередковано змушені купувати вже розгорнутого робота, що вимагає його попередньої повної реструктуризації [53].

Загальний стан робота можна визначити шляхом вимірювання його робочих властивостей, які потім слід оцінити з огляду на придатність передислокації робота. Результати такої оцінки повинні сприяти прийняттю рішення про придатність робота до передислокації, про те, чи є у нього обмеження швидкості, чи потрібно вводити такі обмеження, чи потрібно зменшити робоче навантаження на кінцевий елемент робота [54]. Ці вимірювання підлягають стандартизації, наприклад, за міжнародним стандартом ISO 9283. Стандарт представляє окремі робочі властивості промислових роботів і процедури їх правильного вимірювання. Ці стандарти були розроблені у відповідь на вимоги виробників робототехнічних систем, які повинні відповідати чинним директивам.

До стандартів, що стосуються роботизованих систем та загальних властивостей, відносяться: ISO 10218, ISO 13482 ISO 9787 та ISO 9283. Розглянемо кожен з цих стандартів більш детально.

ISO 10218 – це міжнародний стандарт, який містить вимоги до безпеки промислових роботів та систем інтеграції роботів у виробничі процеси. Загальна мета ISO 10218 полягає в створенні стандартів безпеки для промислових роботів та систем їх інтеграції в виробничі процеси з метою забезпечення безпечного взаємодії роботів із людьми і оточуючими просторами. Основні моменти, що враховуються в цьому стандарті, включають:

- вимоги до безпеки: встановлення загальних принципів безпеки для промислових роботів та їх інтеграції, які повинні бути дотримані при їх роботі та установці;
- інтеграція з людьми: у другій частині стандарту визначені специфічні вимоги безпеки для роботів, які призначені для роботи поряд з людьми без використання огорожень чи інших заходів безпеки;
- управління ризиком: визначення процедур і методів для оцінки та управління ризиком, пов'язаним з експлуатацією промислових роботів;

- технічні вимоги: встановлення технічних вимог до роботів та їх компонентів, що стосуються безпеки;
- навчання та інформування: рекомендації щодо навчання персоналу та надання необхідної інформації про безпеку щодо експлуатації роботів.

В цілому, ISO 10218 спрямований на зменшення ризику травматизму для працівників та створення безпечного середовища для спільної роботи людей із промисловими роботами.

ISO 13482 – це міжнародний стандарт, який встановлює вимоги до безпеки роботів для особистої гігієни та побутового використання. Основна мета цього стандарту полягає в забезпеченні безпеки користувачів, які використовують роботів у домашніх та особистих умовах.

Насамперед, ISO 13482 встановлює вимоги до безпеки для роботів, які можуть взаємодіяти з людьми в домашньому середовищі. Це може включати роботів для підтримки людей з обмеженими можливостями, догляду за людьми, а також роботів для виконання побутових завдань, таких як прибирання та господарювання.

Основні аспекти, що регулюються цим стандартом, включають:

- безпека дизайну: вимоги до конструкції роботів з урахуванням можливих ризиків для користувачів, включаючи механічні, електричні та програмні аспекти;
- загальні вимоги до безпеки: встановлення загальних принципів та вимог безпеки для роботів у домашньому середовищі;
- безпека використання: рекомендації щодо безпечного використання роботів користувачами, включаючи інструкції з безпеки та навчання;
- управління ризиком: методи оцінки та управління ризиками для забезпечення безпеки використання роботів у домашніх умовах.

ISO 13482 спрямований на створення безпечних та надійних роботів, які можуть взаємодіяти з людьми в особистому середовищі, зменшуючи тим самим ризики травм та нещасних випадків.

ISO 9787 – це стандарт, який визначає систему координат та номенклатуру руху для використання в механічних системах. В основі цього стандарту лежить потреба уніфікації та стандартизації способів опису руху об'єктів у механічних системах, що є важливим для розробки, виробництва та обслуговування пристроїв, що мають рухомі компоненти.

Система координат, визначена за цим стандартом, дозволяє описати рух об'єкту в просторі або на площині за допомогою координат і векторів. Номенклатура руху визначає різні типи руху, такі як трансляція, обертання, а також комбінації цих рухів.

Важливо враховувати, що ISO 9787 є одним із стандартів, які визначають базові концепції та термінологію, необхідні для розуміння та спілкування в області мехатроніки, автоматизації та інших галузях, де використовуються механічні системи.

У сфері промислової автоматизації ISO 9283 відіграє фундаментальну роль у пошуку якості та ефективності процесів. Цей стандарт встановлює вимоги та настанови щодо планування, проектування, встановлення та експлуатації систем промислової автоматизації з метою підвищення продуктивності та забезпечення безпеки працівників.

ISO 9283 – це стандарт, опублікований Міжнародною організацією зі стандартизації, який містить протоколи випробувань для визначення характеристик продуктивності, зокрема, взаємозамінності маніпуляторів промислових роботів. Він надає широкий спектр тестів, які можуть проводити оператори, включаючи точність і повторюваність пози; точність і повторюваність відстеження траєкторії; відхилення на поворотах; статичну відповідність; і багато іншого. Хоча тести ISO 9283, безперечно, недосконалі, стандарт залишається єдиним загальновизнаним методом визначення характеристик промислових роботів, доступним на сьогоднішній день, і був широко прийнятий як в робототехнічній, так і в метрологічній галузях.

Стандарт описує конкретні методи випробувань і критерії для оцінки продуктивності промислових роботів, забезпечуючи узгодженість і

надійність для різних виробників і сфер застосування. Дотримання стандарту ISO 9283 допомагає гарантувати, що промислові роботи відповідають певним стандартам якості та продуктивності, що має важливе значення для галузей, які покладаються на автоматизацію виробничих та інших процесів.

ISO 9283 відіграє важливу роль у забезпеченні сумісності, надійності та безпеки в галузі промислової робототехніки, сприяючи підвищенню загальної ефективності та результативності автоматизованих виробничих систем.

ISO 9283 має також важливе значення для промислової автоматизації, оскільки він забезпечує систематичний і структурований підхід до проектування та впровадження автоматизованих систем. Це дозволяє компаніям покращити якість своєї продукції, підвищити ефективність процесів та зменшити виробничі витрати.

Застосування стандарту сприяє таким перевагам:

- підвищення якості продукції: завдяки встановленню чітких вимог до планування, проектування та експлуатації автоматизованих систем, стандарт допомагає поліпшити якість продукції та знизити ймовірність помилок і збоїв;
- підвищення ефективності виробничих процесів: Впровадження принципів ISO 9283 дає змогу оптимізувати виробничі процеси, скоротити час циклу і збільшити загальну продуктивність підприємства;
- зниження виробничих витрат: Завдяки підвищенню якості та ефективності, стандарт допомагає скоротити виробничі витрати, мінімізуючи відходи та оптимізуючи використання ресурсів;
- забезпечення безпеки працівників: ISO 9283 встановлює керівні принципи для забезпечення безпеки працівників в автоматизованих процесах, що знижує ризик нещасних випадків і травм.

ISO 9283 – це міжнародний стандарт, який сприяє підвищенню якості та ефективності промислової автоматизації. Його впровадження стає ключовим кроком для компаній, які прагнуть до сучасних і ефективних

методів промислової автоматизації, що в підсумку сприяє підвищенню їхньої конкурентоспроможності на ринку та забезпечує численні переваги для компаній, покращуючи якість продукції, підвищуючи ефективність процесів і знижуючи виробничі витрати. Він також допомагає забезпечити безпеку працівників в автоматизованому середовищі.

Таблиця 4.1 - Огляд ISO 9283:

Характеристики	Завантаження (% номінального значення)		Швидкість (% номінального значення)			Кількість циклів	Позиції (на вимірювальній площині)
	50%	100%	10%	50%	100%		
1. Точність пози						30	P1-P2-P3-P4-P5
2. Повторюваність пози						30	P1-P2-P3-P4-P5
3. Точність та повторюваність відстані						30	P1-P2-P4
4. Точність відстані						30	P2-P4
5. Повторюваність відстані						30	P2-P4
6. Час стабілізації положення						3	P1-P2-P3-P4-P5
7. Перетримання позиції						3	P1-P2-P3-P4-P5
8. Точність позиціонування дрейфу						*	P1
9. Позиція дрейфу багаторазово повторюється						*	P1

Продовження таблиці 4.1

10. Точність траєкторії						10	**
11. Повторюваний шлях						10	**
12. Помилка при поворотах						3	E1-E2-E3-E4
13. Перетримання на поворотах						3	E1-E2-E3-E4
14. Похибка при плетінні						3	E1-E2-E3-E4
15. Точність швидкості руху по траєкторії						10	**
16. Повторюваність швидкості руху по траєкторії						10	**
17. Коливання траєкторної швидкості						10	**
18. Мінімальний час позування						3	***
19. Статична відповідність	*****					3	P1

де:

* - безперервна робота (8 годин);

** - лінійний шлях E1-E3 та E3-E1;

*** - більше інформації на стенді;

**** - 10% збільшення навантаження з 10% до 100%;



- не обов'язково;



- за бажанням;



- необхідний.

4.2 Методика калібрації промислових роботів

Калібрування робота – це процес, за допомогою якого точність позиціонування робота може бути покращена шляхом модифікації програмного керування позиціонуванням робота замість того, щоб змінювати конструкцію робота чи його системи керування. Процедура передбачає розробку моделі, параметри якої точно відображають реального робота. Далі точно вимірюються спеціально підібрані характеристики робота. Наступним кроком слідує процедура ідентифікації для обчислення тих значень параметрів, які при введенні в модель робота точно відтворюють виконані вимірювання [55 - 58].

У наш час калібрування роботів відіграє все більш важливу роль у виробництві, а також у впровадженні та експлуатації роботів у комп'ютерноінтегрованих виробничих або складальних системах. Виробництво, впровадження та експлуатація роботів – це області, де результати калібрування робота можуть призвести до значного підвищення точності [56].

Калібрування робота робить можливим реалізацію автономних комп'ютерних інтегрованих систем. Можлива значна економія часу та уникнення похибок, якщо завдання робота можна спланувати та моделювати в автономному режимі. Щоб система керування успішно виконувала автономну програму, створену в системі планування та моделювання, розміри моделей, які використовуються для розробки програми, повинні бути близькими до розмірів реального робота та робочого місця. Відмінності в розмірах стануть наслідком похибок позиціонування робота, коли програма виконується в цеху.

Калібрування на найвищому рівні можна розділити на два типи: калібрування на основі кінематичної моделі та некінематичне калібрування моделі. Більшість робіт з параметричного калібрування зосереджено на

калібруванні на основі кінематичної моделі або так званого кінематичного калібрування.

При калібруванні на основі кінематичної моделі для визначення параметрів моделі застосовуються геометричні коефіцієнти, однак також інколи враховують негеометричні фактори. Відносний внесок геометричних і негеометричних похибок у точність робота різниться від одного робота до іншого [59].

Загалом калібрування на основі кінематичної моделі розглядається як глобальний метод калібрування, який покращує точність робіт у всіх сферах застосування. Кінематичне калібрування складається з чотирьох послідовних етапів [60]:

Першим кроком є створення моделі, яка пов'язує положення з'єднань в тривимірній декартовій системі координат з усіма іншими кінематичними параметрами [61].

Даний метод є найбільш популярним методом розробки кінематичної моделі робота-маніпулятора, який базується на основі однорідних матриць перетворення.

Процедура полягає у встановленні систем координат на кожній осі суглоба. Кожна система координат пов'язана з наступною через певний набір коефіцієнтів у однорідних матрицях перетворення.

Наступним кроком є виконання зовнішнього точного вимірювання пози в декартовій системі координат, що відповідає кожному набору положень з'єднань.

Фаза вимірювання включає в робочому просторі визначення положення інструмента робота. Фактичні виміряні положення кінцевого інструмента порівнюються з положеннями, передбаченими теоретичною моделлю, щоб отримати дані про неточності робочого простору [62].

Як правило, необхідно шість параметрів (але не обов'язково достатньо), щоб повністю визначити положення твердого тіла. Вимоги

достатності залежать від точної природи шести умов, які використовуються для визначення положення тіла.

Вимірювання є найскладнішим і найбільш трудомістким етапом калібрування робота. Процедура вимірювання повинна певним чином відображати окремі параметри моделі, а система вимірювань повинна бути достатньо точною, щоб виміряти вплив цих параметрів. Хороша модель марна без процедури вимірювань і відповідної системи.

Для калібрування робота використовуються різні методи вимірювання та різні вимірювальні пристрої. До них відноситься використання акустичних, візуальних датчиків, координатно-вимірювальних машин тощо. Вимірювальні методи та пристрої, що додаються до них, значно відрізняються за точністю, простотою використання та вартістю, але всі вони мають такі недоліки:

- для правильної експлуатації вимірювальних приладів потрібен навчений персонал;
- збір даних стомлює, займає багато часу і складно автоматизується;
- вимірювальні методи в основному призначені для калібрування роботи в лабораторних умовах, за винятком дуже малої кількості;
- процедури налаштування та вимірювання вимагають значного втручання людини, що робить їх непридатними для калібрування робота на місці в промисловому середовищі.

Розглянемо системи, які здатні забезпечити точні вимірювання, придатні для застосування в процесі калібрування.

Перша система є інструментом, який використовувався для вимірювання декартового положення кінцевої ланки маніпулятора щодо базової рамки робота, є лазерна система відстеження. Отримані похибки відстеження від керування сканерами використовуються для обчислення тривимірного положення цілі.

Одночасно з вимірюванням позиції цілі, кутові положення перших трьох ланок були виміряні шляхом отримання відповідних сигналів кодера з контролера робота.

Налаштування системи займає дуже багато часу, що робить її використання для промислових застосувань набагато менш ефективним, ніж існуючі сьогодні промислові рішення.

Друга вимірювальна система – це рішення KUKA KR 6 R900 сіхх. Основною частиною вимірювальної системи є система камер, що складається з трьох лінійних камер. Система камер заснована на активних інфрачервоних світлодіодах. Коли світлодіод фіксується трьома лінійними камерами, комп'ютер обчислює його точне положення у тривимірному просторі.

Розрахунок виконується шляхом порівняння зображення із трьох лінійних камер з урахуванням впливу трьох площин, що перетинаються, на положення світлодіода, яке потім розраховується відносно попередньо відкаліброваної камери.

Згідно з даними виробника, система здатна одночасно відслідковувати до 256 світлодіодів. Це одночасне відстеження кількох точок дозволяє вимірювати положення та орієнтацію об'єктів, приєднуючи до них 3 або більше світлодіодів та одночасно вимірюючи їх положення.

Ця вимірювальна система є фундаментальною частиною метрології, яку можна використовувати для калібрування роботів та інших додатків, таких як аналіз руху тощо.

Ця система діє для будь - якої процедури калібрування, заснованій на вимірюванні положення робочого органу маніпулятора Все, що потрібно, це точно зафіксувати світлодіоди на кінцевій ланці і почати вимірювання.

Калібрування робота з його низькою вартістю та виключенням великих зовнішніх вимірювальних пристроїв робить його вимогливим до застосування на місці. Однак процес вимірювання вимагає інтенсивного людського втручання.

Третім етапом є ідентифікація параметрів, які включають у собі чисельні методи.

Методи повинні бути достатньо надійними, щоб можна було досягти рішення, зберігаючи при цьому достатній рівень впевненості в отриманих значеннях ідентифікованих параметрів.

Етап ідентифікації вибирається відповідно до моделі та того, як проводилися вимірювання. Використовуючи встановлені положення та відповідні кути з'єднання, оцінюють справжні кінематичні значення за допомогою процесу ідентифікації [58].

На цьому етапі визначаються похибки кінематичних параметрів шляхом мінімізації зібраної неточності робочого простору, використовуючи параметр середньої квадратичної похибки.

Відомо, що кінематична ідентифікація є стандартною нелінійною або лінійною процедурою оптимізації найменших квадратів. При застосуванні лінійних алгоритмів найменших квадратів вони вимагають меншого часу обчислень для збіжності, але страждають від проблем чисельних методів.

Останній і вирішальний крок у кінематичному калібруванні робота, який є впровадженням нової моделі в програмне забезпечення для заміни номінальних параметрів кінематичної моделі новими розрахованими «істинними» значеннями у програмному забезпеченні керування положенням робота, є компенсація. Іноді цей етап називають кроком корекції. Через складність безпосередньої модифікації кінематичних параметрів у контролері робота компенсації застосовуються до виконання енкадера робота, і отримуються шляхом зворотної кінематики каліброваного робота. Однак ця операція не проста і не завжди можлива і зазвичай її виконує виробник роботів.

Іншим варіантом є автономна компенсація всіх точок програм із використанням встановленої коректної кінематичної моделі. Тривимірні декартові положення використовуються зі оберненою кінематичною моделлю для розрахунку значень з'єднань для реального робота. Ці значення

потім використовуються в прямій кінематичній моделі для розрахунку нових тривимірних компенсованих положень робочого органу.

Ці компенсовані положення потім завантажуються в контролер робота з номінальною кінематичною моделлю та при виконанні досягають реальних бажаних положень. У цьому процесі робот отримує команду змістити позу від передбачуваної, і через похибки моделі він досягає правильного положення.

Оскільки зворотна кінематика каліброваного робота, як правило, не розв'язується аналітично, для цього застосовуються чисельні алгоритми, щоб знайти спільні зміни, необхідні для компенсації декартових похибок. Для окремих алгоритмів онлайн-компенсація є проблемою через витрати на обчислення, також алгоритм може виходити з ладу поблизу сингулярних конфігурацій робота.

Розраховані нові параметри, які відхиляються від їх номінальних значень (тобто повинні скомпенсувати похибку), повинні підвищити точність маніпуляторів при реалізації в контролері. Слід зазначити, що у випадку встановлення негеометричних джерел похибок та оцінки їх наслідків необхідно дотримуватися аналогічного підходу та послідовності кроків.

Під час кінематичного калібрування моделі формується припущення, що ланки робота ідеально жорсткі, з'єднання не допускають небажаного руху своїх осей і робот не знаходиться під динамічним керуванням. Якщо припущення невірні або робот знаходиться під динамічним керуванням, необхідно розглянути некінематичне калібрування. Крім геометричних похибок, на роботів впливають інші джерела похибок, присутні в їхніх структурах. Вони називаються джерелами негеометричних похибок. Серед цих джерел, які мають найбільший вплив на точність роботи, є гнучкість суглобів, гнучкість зв'язків, похибка передачі, люфт в передачі і температурний ефект.

З наведених вище джерел похибок можна сказати, що при некінематичному калібруванні можна забезпечити необхідну для виконання

певного процесу точність позиціонування робота-маніпулятора. Щоб врахувати вплив факторів на точність позиціонування роботів-маніпуляторів, сигнал, що йде від контролера робота, має бути змінено.

4.3 Методика оцінки точності позиціонування промислових роботів згідно стандарту ISO 9283

Стандарт ISO «ISO9283: Маніпулювання промисловими роботами - Критерії ефективності та відповідні методи випробувань» описує випробування для оцінки ефективності промислових роботів. Серед іншого, він надає процедури для належного вимірювання точності позиціонування робота, повторюваності та точності траєкторії.

Згідно з нормою ISO9283, всі випробування повинні проводитися в так званому тестовому кубі ISO. Передбачається, що тестовий куб ISO повинен бути найбільшим кубом, який може поміститися в робочому просторі робота. Крім того, точність і повторюваність позиціонування повинні бути виміряні в п'яти різних конфігураціях 30 разів. Добре відомо, що 5 конфігурацій недостатньо для забезпечення належного вимірювання точності для сучасних роботів.

Більшість виробників роботів надають дані про точність позиціонування тільки після калібрування робота, крім того, вони використовують щонайменше 100 різних конфігурацій, щоб надати відповідну статистику точності позиціонування. Промислові роботи мають високу повторюваність, але не точність; тому точність промислового робота можна підвищити за допомогою калібрування.

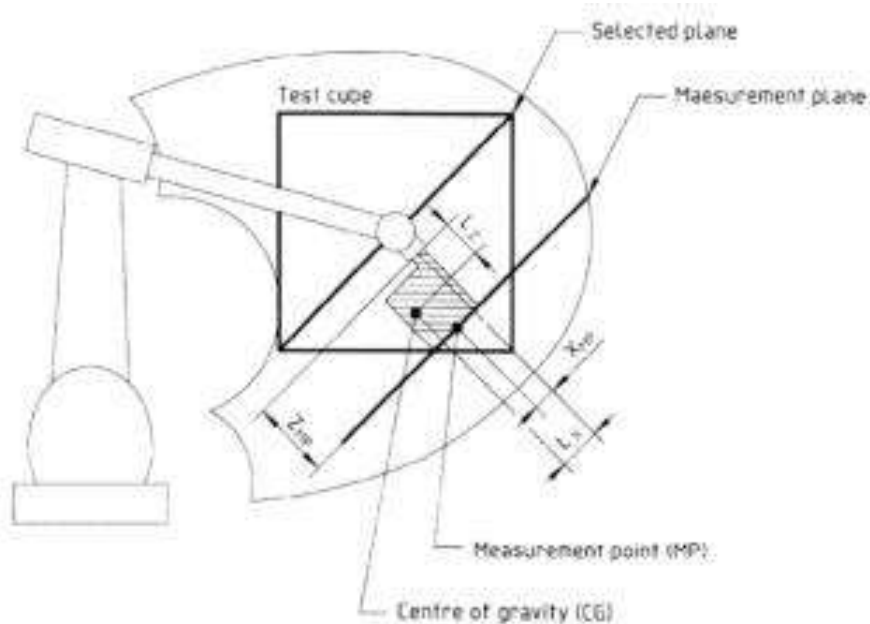


Рисунок 4.1 - Типовий робочий простір робота у 80-х роках

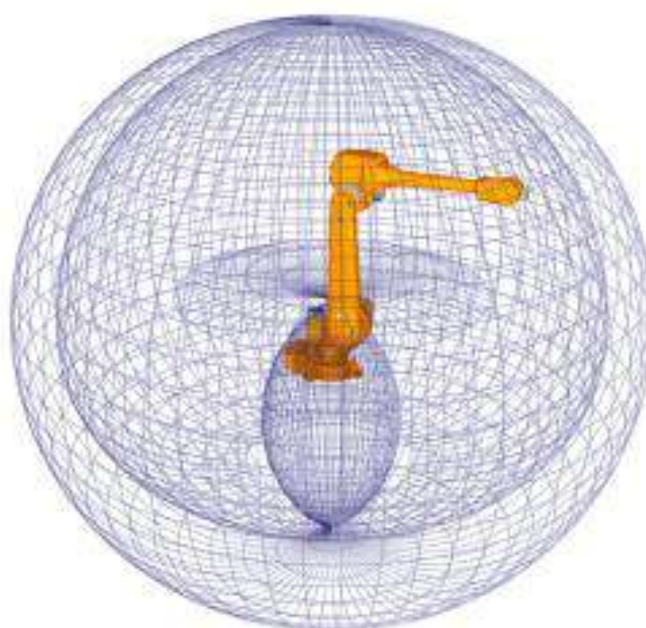


Рисунок 4.2 - Типовий робочий простір сучасного робота

Однак стандарт ISO9283 часто використовується для тестування повторюваності та точності траєкторії, навіть якщо робот не був відкалібрований.

Середовище RoboDK також можна використовувати для калібрування роботів, а також для тестування їх продуктивності до і після калібрування.

Нарешті, RoboDK також можна використовувати для тестування точності робота до і після калібрування за допомогою ballbar - тестування.

4.4 Проведення тестування промислового робота в системі RoboDK

Для початку рекомендується створити віртуальне середовище реального налаштування в RoboDK (офлайн - налаштування), щоб підготувати шлях і позиції для тестування. Це можна зробити до того, як буде встановлено робот і трежер, використовуючи лише комп'ютер зі встановленим RoboDK.

Середовище RoboDK має утиліту для генерації конфігурацій і рекомендованого шляху відповідно до стандарту ISO 9283 (рис.4.3)

Щоб скористатися цією утилітою, слід обрати функцію "Створити куб ISO 9283 (цілі та шлях)" в меню утиліт. Після цього необхідно ввести опорні суглоби, що представляють положення робота, коли інструмент звернений до трекера. Далі налаштовуються положення і розмір куба, після чого підтверджується вибір (рис.4.4).

Ця операція створить п'ять мішеней, описаних у стандарті ISO, а також рекомендований шлях для тестування точності траєкторії. Ці мішені і шлях залишаються всередині куба, розташованого перед роботом. Можна налаштувати розміри куба, а також перемістити центр (мішень "ISO p1") і опорні шарніри, що визначатимуть орієнтацію траєкторії. Також є можливість максимізувати розмір куба, щоб знайти найбільший, який поміститься в робочому просторі робота.

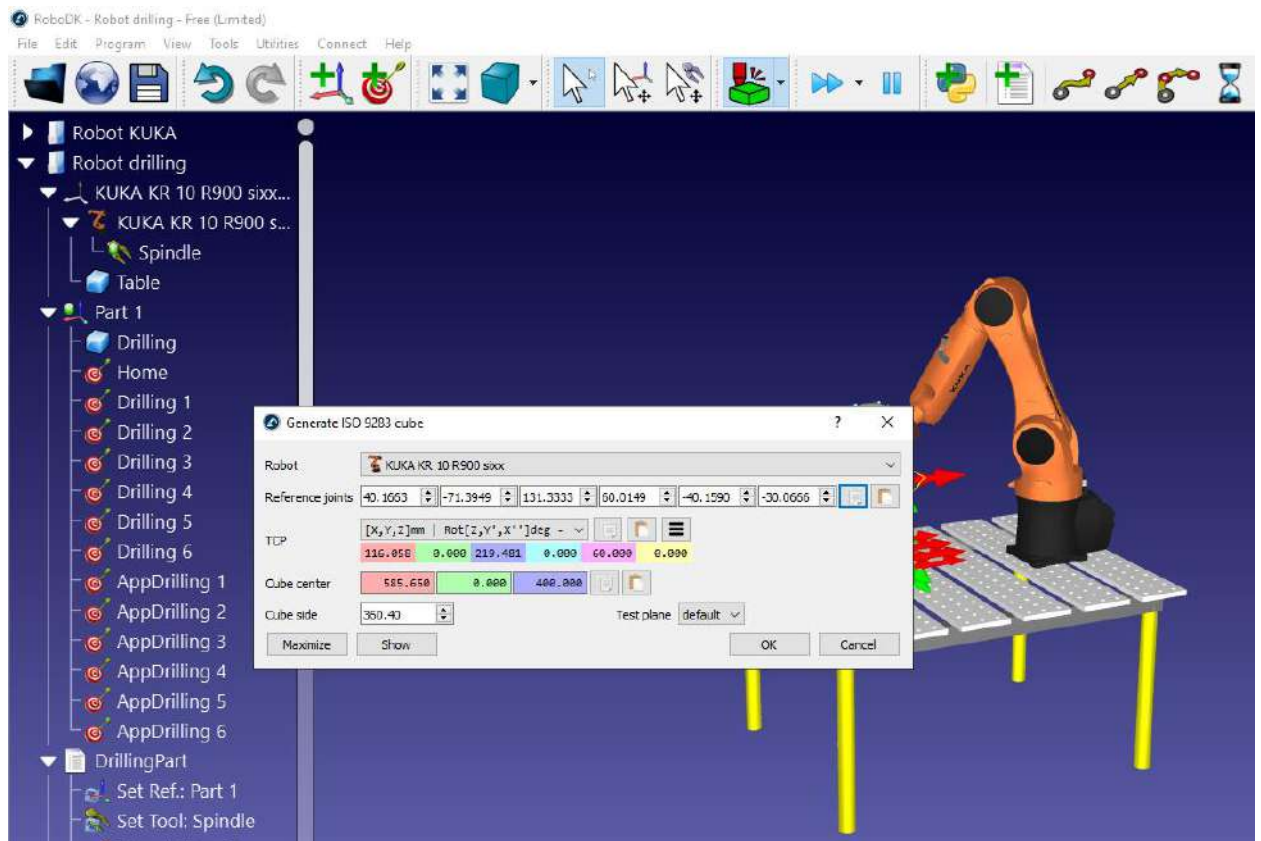


Рисунок 4.3 - Утиліта генерації конфігурацій і рекомендованого шляху відповідно до стандарту ISO 9283

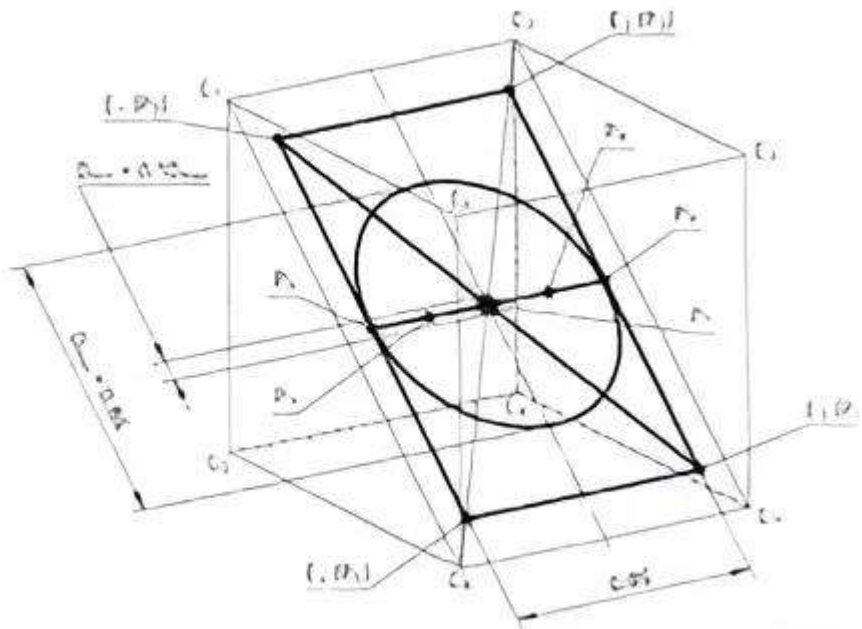


Рисунок 4.4 - Налаштування положення і розмірів куба

Станція з опціями калібрування та валідації робота показаний на наступному рисунку (рис. 4.5).

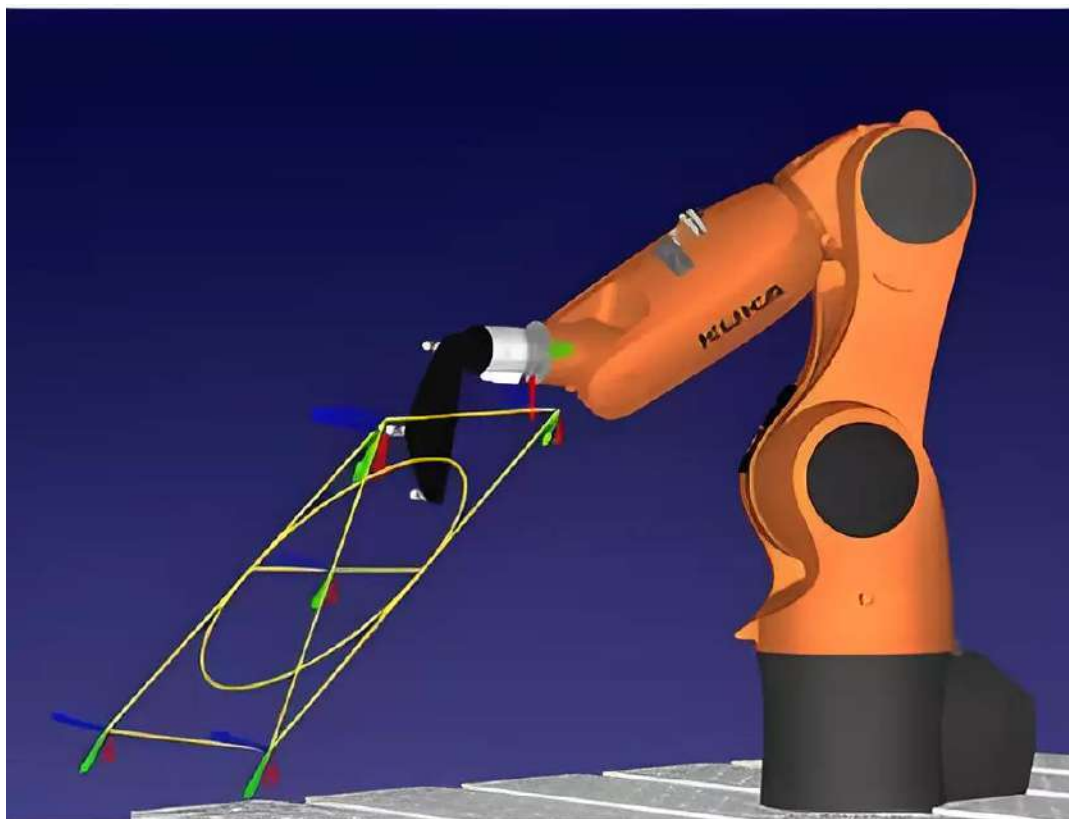


Рисунок 4.5 - Станція з опціями калібрування та валідації робота

Точність і повторюваність позиціонування можуть бути перевірені за допомогою тієї ж процедури, що використовується для калібрування робота. Статистика повторюваності також може бути отримана, якщо вимірювання проводяться послідовно через одну і ту ж групу точок. Основна різниця між валідацією і калібруванням полягає в тому, що для першого варіанту не потрібна ліцензія на калібрування робота. Для виконання таких перевірок слід обрати в меню:

Утиліти → Перевірка точності та повторюваності позиціонування (ISO 9283) (рис.4.6).

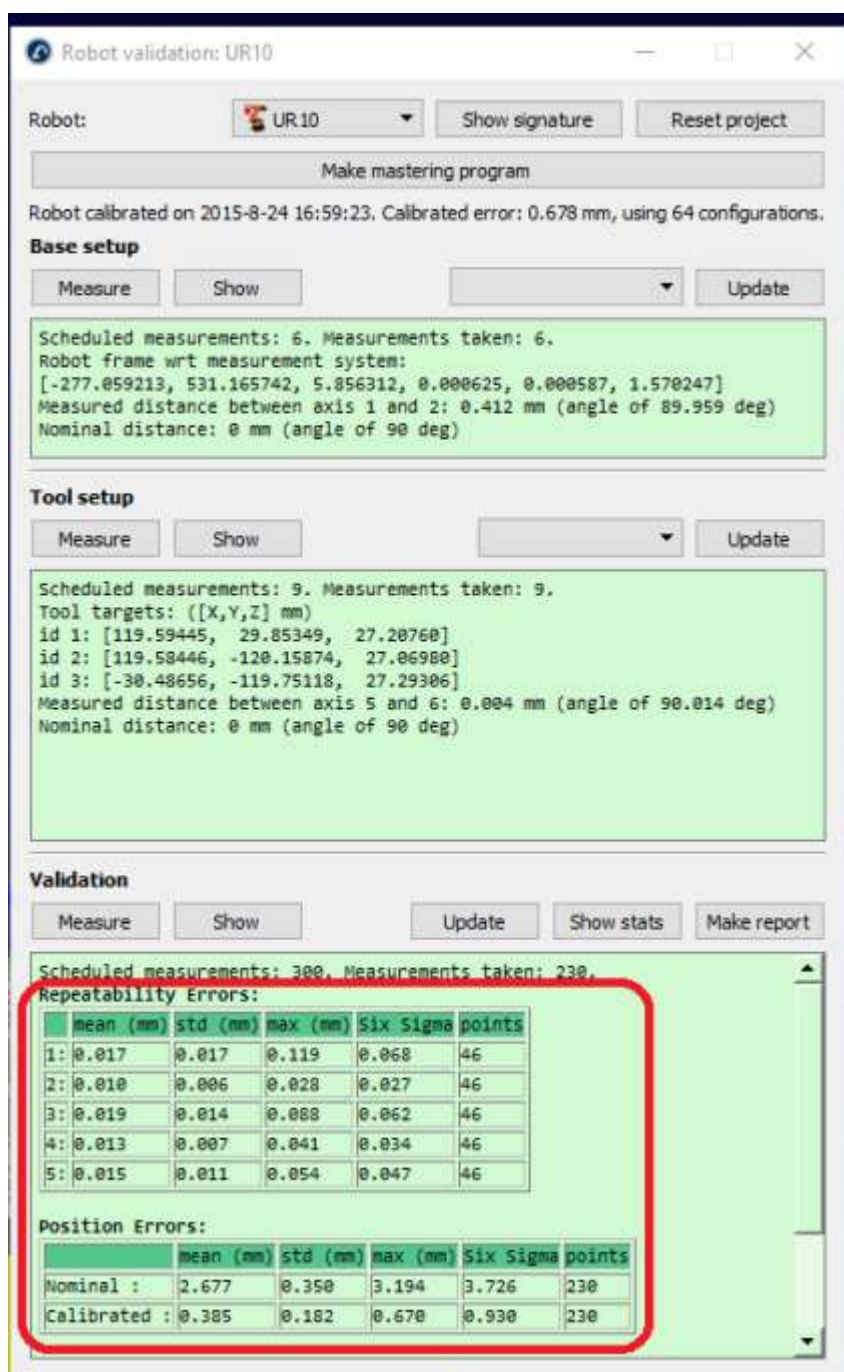


Рисунок 4.6 - Перевірка точності та повторюваності позиціонування (ISO 9283)

Цей тест вимагає ідентифікацію базової рами робота відносно опорної рами вимірювань (базове налаштування), а також рами інструменту відносно фланця робота (налаштування інструменту).

Для виконання тестів на точність траєкторії потрібно мати програму робота, створену за допомогою RoboDK, наприклад, програму ISO9283,

створену за допомогою утиліти Create ISO cube. Завдяки цьому можна згенерувати програму робота для конкретного виробника. Крім того, можна використовувати будь-яку іншу програму, створену в RoboDK (наприклад, пряму лінію, коло або квадрат).

Також необхідно мати вимірювальну систему, яка може відстежувати положення кінцевого ефектора і забезпечувати вимірювання положення відносно системи відліку. Необхідно використовувати процедури налаштування основи та налаштування інструменту в RoboDK (необхідні для виконання калібрування або тестів на точність позиціонування) для ідентифікації базової рами робота та рами інструменту.

Дані вимірювань повинні бути отримані під час переміщення робота за програмою. Вимірювання слід записувати безперервно, використовуючи програмне забезпечення за замовчуванням, надане виробником вимірювальної системи. Вимірювання необхідно експортувати у вигляді файлу CSV або TXT. Ці файли повинні містити дані про позицію XYZ, а також позначку часу для кожного вимірювання. За бажанням, ці вимірювання можуть містити орієнтацію інструменту по відношенню до бази робота. Ці вимірювання рекомендується проводити якомога швидше і без будь-якої фільтрації.

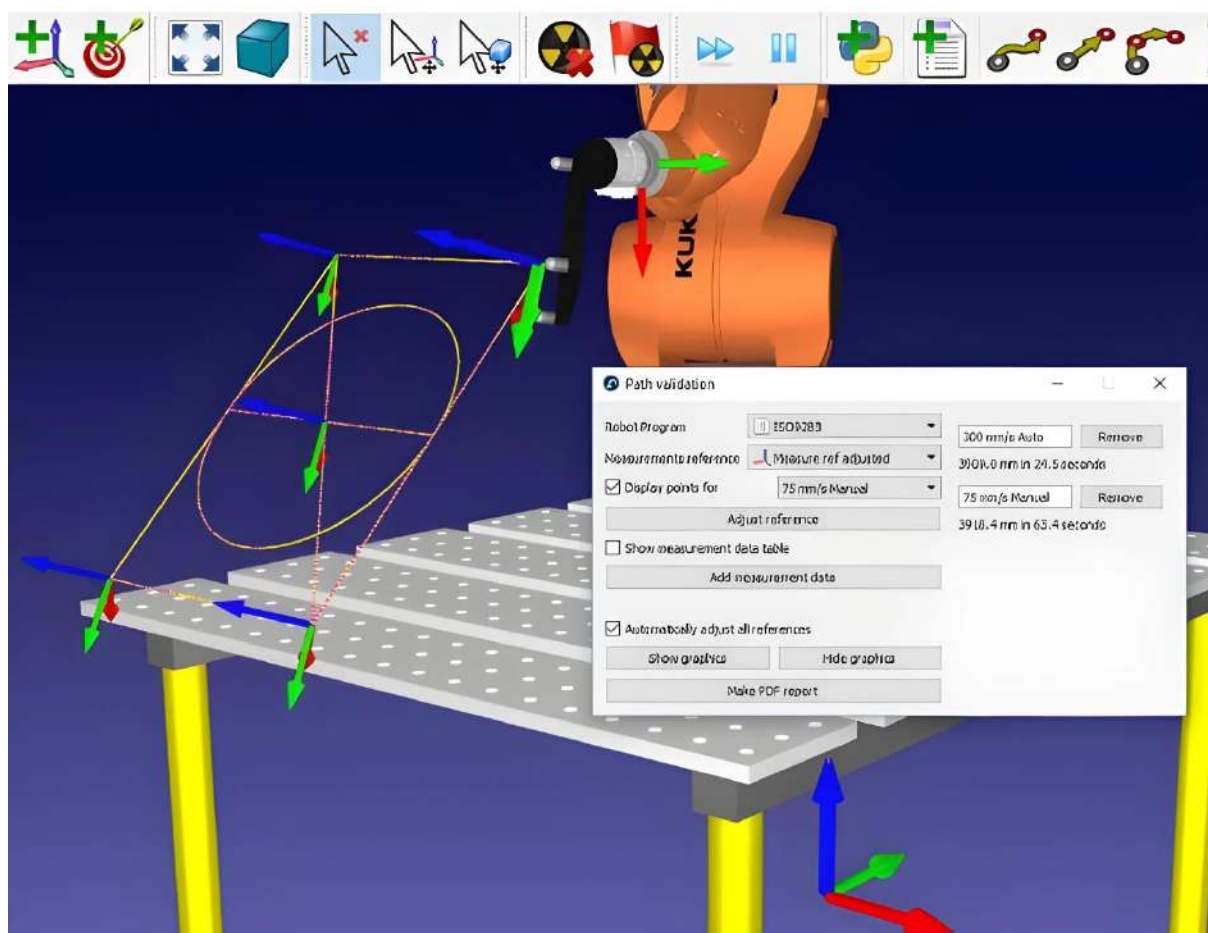


Рисунок 4.7 - Тестування точності роботи

Точки вимірювань можуть відображатися фіолетовим кольором. Ці вимірювання повинні збігатися з жовтим шляхом який описує ідеальний шлях, яким повинен рухатися робот. Статистика, яку надає RoboDK, є різницею між цими двома шляхами.

Якщо система відліку не була визначена належним чином, точки вимірювання не збігаються з жовтою лінією. Це може статися з кількох причин, наприклад, погане визначення системи відліку або інше визначення інструменту. У цьому випадку при виборі опції Налаштувати референс буде зроблена спроба найкращим чином поєднати два шляхи так, щоб надана статистика ізолювала ці розбіжності.

Результати тесту, описаного вище, показано на наступних зображеннях. У цьому випадку програма ISO9283 була запущена в двох різних режимах:

- ручний режим зі швидкістю 75 мм/с;
- автоматичний режим зі швидкістю 300 мм/с.

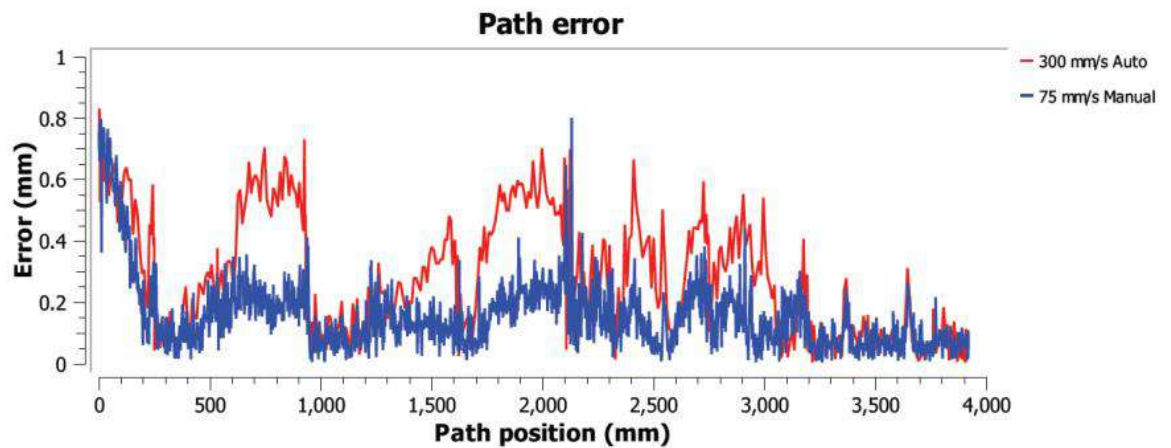


Рисунок 4.8 - Результати тестування помилки шляху робота

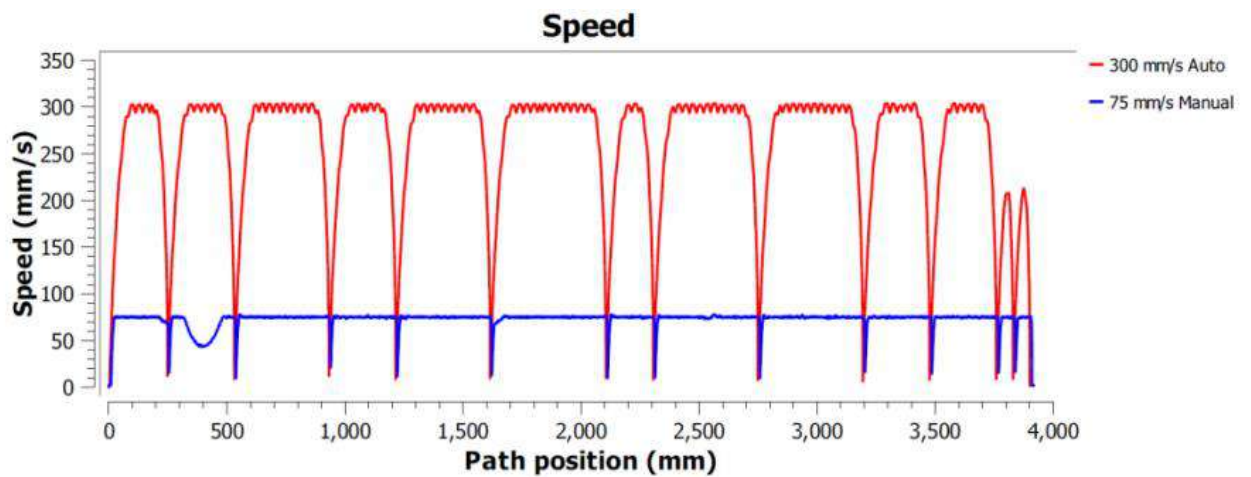


Рисунок 4.9 - Результати тестування швидкості робота

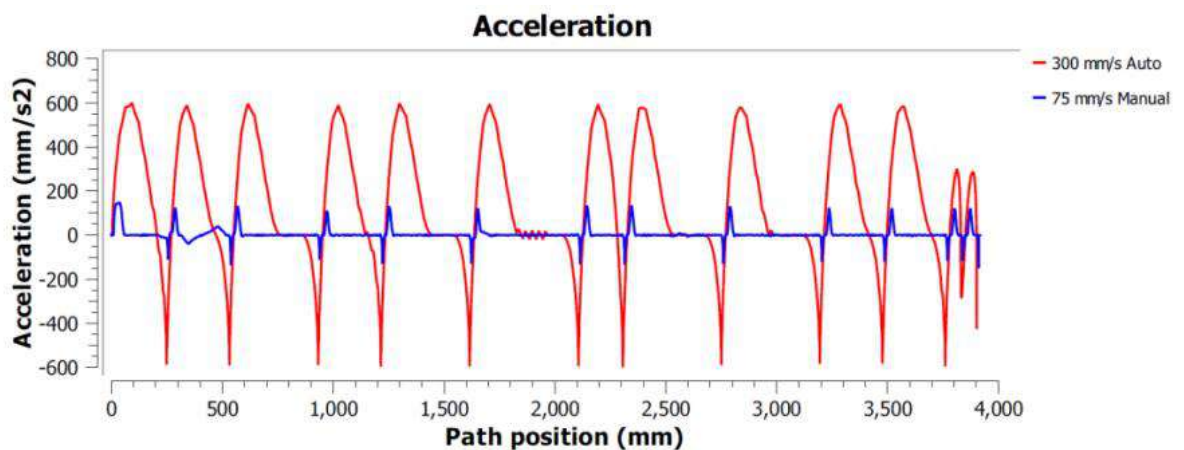


Рисунок 4.10 - Результати тестування прискорення робота

У цьому тесті робота програма була згенерована з використанням опції Точна точність. Це означає, що робот буде зупинятися у кожній точці, щоб зробити шлях максимально точним. У цьому випадку типово слідкувати високі прискорення і уповільнення вздовж шляху, оскільки швидкість повинна бути нульовою в кінці кожної лінії або рух по колу (куті).

Більшість брендів роботів пропонують опції заокруглення, щоб уникнути цього ефекту шляхом згладжування країв. Наприклад, ABB називає це ZoneData і дозволяє вказати зону точності, де контролеру можна згладжувати краї, Fanuc називає це CNT і дозволяє вказати відсоток згладжування, пропорційний швидкості, KUKA пропонує інструкцію \$ADVANCE з прапором C_DIS, а Universal Robots дозволяє вказати радіус змішування .

На наведених графіках представлені результати тестування двох режимів роботи за стандартом ISO 9283. Перший режим – автоматичний зі швидкістю 300 мм/с, другий – ручний зі швидкістю 75 мм/с. Аналіз даних можна поділити на дві частини: помилки траєкторії та швидкість.

На графіку "Помилка шляху" (Помилка траєкторії) по осі X представлена позиція по траєкторії, а по осі Y – помилка в міліметрах. Порівняння двох режимів показує наступне:

а) 300 мм/с Автоматичний (червона лінія):

- середня помилка в діапазоні 0,3 – 0,5 мм;
- на деяких ділянках спостерігаються піки до 0,8 мм;
- в цілому, амплітуда помилок вища, ніж у ручному режимі, особливо на початкових та середніх ділянках траєкторії.

У ручному режимі (75 мм/с) досягається більш висока точність і стабільність, що виявляється в менших і менших частинах траєкторії.

б) 75 мм/с Ручний (синя лінія):

- середня помилка в діапазоні 0,1 – 0,4 мм;
- більш стабільна траєкторія з меншими піками, максимум до 0,6 мм;

– менші відхилення по всій довжині траєкторії в порівнянні з автоматичним режимом.

В автоматичному режимі (300 мм/с) помилок траєкторії більше, особливо на початкових та середніх ділянках, що може бути пов'язане з більш високою швидкістю і, можливо, з динамічними змінами траєкторії.

На графіку "Speed" (Швидкість) по осі X представлена позиція щодо траєкторії, а по осі Y – швидкість у мм/с.

а) 300 мм/с Автоматичний (червона лінія):

– робот рухається зі змінною швидкістю, досягаючи піків майже 300 мм/с і сповільнюючись до 0 мм/с;

– чіткі цикли прискорення та гальмування, ймовірно пов'язані зі зміною напрямків або складними ділянками траєкторії;

– автоматичний режим дозволяє досягти більш високої швидкості, що може бути перевагою в виробничих процесах, що потребують високої продуктивності.

б) 75 мм/с Ручний (синя лінія):

– постійна швидкість близько 75 мм/с з невеликими коліваннями;

– більш стабільний рух без різких прискорень та уповільнень.

У ручному режимі швидкість більш стабільна і низька, що, можливо, більше підходить для завдань, що вимагають високої точності та контрольованого руху.

Графік "Прискорення" показує, як точно робот відповідає заданій траєкторії в двох режимах: 300 мм/с з автоматичної (червона лінія) та 75 мм/с з ручної (синя лінія).

а) 300 мм/с Автоматичний (червона лінія):

– робот переміщується по траєкторії з високим коліванням положення;

– на початкових ділянках шляху (до приблизно 1000 мм) колівання особливо виражені;

- періодично виникають відхилення, що може викликати ускладнення у підтримці стабільного положення на високій швидкості.

У ручному режимі зі швидкістю 75 мм/с робот показує більш стабільне і точне слідування траєкторії, що видно за меншими відхиленнями та коліваннями.

б) 75 мм/с Ручна (синя лінія):

- положення роботи більш стабільне і точне по всій довжині траєкторії;

- на всьому протязі траєкторії колівання менше, що свідчить про кращу контрольованість і точність руху при меншій швидкості.

В автоматичному режимі зі швидкістю 300 мм/с більше відхилення від заданої траєкторії, що може бути пов'язане з динамічними навантаженнями на високій швидкості.

Таким чином, вибір між режимами залежить від конкретних вимог: для задач, де важливою є точність, кращий ручний режим, а для задач, де важливою є продуктивність, краще використовувати автоматичний режим, при цьому необхідно враховувати можливе збільшення помилок траєкторії.

Висновок до розділу 4

Проведені дослідження у сфері промислової автоматизації охопили декілька ключових аспектів, що мають важливе значення для підвищення ефективності та точності роботи промислових роботів.

По-перше, дослідження стандартів промислової автоматизації дозволило зрозуміти сучасні вимоги та найкращі практики, які забезпечують високу якість та безпеку автоматизованих систем. Стандарти відіграють ключову роль у формуванні основних принципів та вимог до розробки та експлуатації робототехнічних систем.

По-друге, розроблена методика калібрації промислових роботів дозволяє значно підвищити точність їх роботи. Калібрація є важливим

процесом для мінімізації похибок та забезпечення високої повторюваності виконання завдань роботами. Це сприяє оптимізації виробничих процесів та підвищенню загальної ефективності.

По-третє, методика оцінки точності позиціонування промислових роботів згідно зі стандартом ISO 9283 забезпечує об'єктивну оцінку продуктивності та точності роботів. Використання цього стандарту дозволяє порівнювати різні моделі роботів та вибирати найбільш відповідні для конкретних виробничих задач. Це сприяє підвищенню якості виробничих процесів та зменшенню витрат.

Нарешті, проведення тестування промислового робота в системі RoboDK продемонструвало високу ефективність використання віртуальних інструментів для моделювання та симуляції робототехнічних процесів. Платформа RoboDK дозволяє ефективно тестувати та оптимізувати програмування роботів перед їх впровадженням у реальне виробництво, що знижує ризики та забезпечує високу точність виконання завдань.

Загалом, проведені дослідження та розроблені методики сприяють значному покращенню якості програмного забезпечення для промислових роботів, підвищенню їх продуктивності та точності роботи. Використання стандартів та сучасних інструментів моделювання дозволяє досягти високих показників ефективності в автоматизованих системах, що є критично важливим для сучасної промисловості.

ВИСНОВКИ

В першому розділі було досліджено поняття промислових роботів. Вони різноманітні за структурою та функціями, а їхня класифікація варіюється від шарнірно-зчленованих і декартових роботів до роботів SCARA, дельта-роботів і роботів для спільної роботи.

Центральним елементом їхньої роботи є складна апаратна система, що складається з маніпулятора, кінцевого ефектора, приводної системи, системи керування та джерела живлення. Крім того, ключову роль відіграють сенсорні системи, що охоплюють датчики положення, сили/крутного моменту, зору, наближення та безпеки, які забезпечують точну та адаптивну взаємодію з навколишнім середовищем.

Типи промислових роботів відповідають конкретним завданням і експлуатаційним вимогам, пропонуючи унікальні переваги в універсальності, точності і швидкості. Шарнірні роботи імітують рухи рук людини, декартові роботи працюють у тривимірній системі координат, роботи SCARA відмінно справляються з горизонтальними рухами, дельта-роботи спеціалізуються на завданнях, пов'язаних з підбором і переміщенням, а колаборативні роботи сприяють співпраці між людиною і роботом.

Крім того, механічна конструкція і кінематика промислових роботів є фундаментальними факторами в оптимізації продуктивності. Вантажопідйомність, досяжність, швидкість і точність нерозривно пов'язані з механічною конфігурацією робота, в той час як дослідження кінематики висвітлюють моделі руху і взаємозв'язок між кутами зчленування, довжиною ланок і положенням кінцевого ефекту.

За результатами проведеного аналізу зроблено висновки, що наукові дослідження та практичний досвід використання промислових роботів свідчать про їх великий потенціал у поліпшенні ефективності та автоматизації виробничих процесів. Класифікація, апаратна база, сенсорна система, типи та механічний дизайн промислових роботів виявилися

ключовими аспектами, які визначають їх можливості та функціональність. Розуміння цих аспектів дозволяє ефективно впроваджувати роботизовані системи у різноманітних галузях виробництва, забезпечуючи підвищення продуктивності, якості та безпеки праці.

У сучасному світі існує розмаїття програмних платформ для симуляції промислових роботів. Вони можуть варіюватися від відкритих джерел до комерційних рішень. Найпопулярніші серед них - Gazebo, Webots, V-REP, ROS (Robot Operating System), CoppeliaSim, MATLAB/Simulink, RoboDK, імітаційна система Fanuc, інші відомі універсальні інструменти та спеціалізовані платформи, спрямовані на конкретні завдання та індустріальні потреби.

У процесі дослідження було з'ясовано, що системи симуляції промислових роботів використовують широкий спектр інструментів. Це включає в себе редактори моделей, інтерфейси програмування, візуалізаційні інструменти, підтримку сенсорів та модулів управління, а також інструменти для аналізу даних та відлагодження програмного забезпечення.

При порівнянні функціональності систем симуляції промислових роботів виявлено, що кожна з них має свої переваги та недоліки. Наприклад, деякі системи можуть бути більш потужними у візуалізації та фізичній моделюванні, тоді як інші спеціалізуються на реалістичному моделюванні динаміки роботів або мають більшу підтримку для взаємодії з ROS. Варто відзначити, що деякі програмні платформи можуть мати обмеження у доступності або вартості ліцензій.

Загалом, дослідження різних систем симуляції промислових роботів свідчить про їхню важливу роль у вдосконаленні процесів розробки та тестування роботизованих систем. Вибір конкретної платформи повинен ґрунтуватися на конкретних потребах проекту, доступних ресурсах та функціональних вимогах.

Для більш точної симуляції роботи промислового робота, потрібно: оптимізувати траєкторію руху роботів та розташування обладнання і робочих

зон, а також покращити параметри роботів, таких як швидкість, прискорення та точність тощо.

Оптимізація траєкторії руху роботів включає дослідження різних методів управління рухом, вибір оптимальних траєкторій руху, уникнення колізій та конфліктів між роботами, а також планування оптимальних маршрутів для досягнення поставлених цілей. Оптимізація може бути досягнута за допомогою різних методів, таких як алгоритми штучного інтелекту, методи машинного навчання, та інші. Головні принципи включають мінімізацію відстаней, уникнення перешкод, керування конфліктами, урахування обмежень та динамічне планування. Такі принципи реалізуються через різноманітні технології та методи, що дозволяють роботам ефективно переміщатися та уникати конфліктів у робочому середовищі.

Оптимізація розташування обладнання та робочих зон - важлива складова планування робочого простору для підвищення ефективності використання простору та скорочення часу переміщення роботів. Це включає аналіз потоків роботів, групування обладнання, мінімізацію перешкод, використання технологій маршрутизації та постійну оптимізацію. Оптимізоване розташування обладнання сприяє покращенню продуктивності та зниженню витрат.

Для покращення параметрів роботів, таких як швидкість, прискорення та точність, можна використовувати симуляцію для налаштування оптимальних значень цих параметрів. Цей процес включає в себе визначення цілей, створення сценаріїв, налаштування параметрів, аналіз результатів, вибір оптимальних параметрів та їх перевірку на реальних роботах. Такий підхід дозволяє знаходити найкращі значення параметрів для досягнення максимальної продуктивності та якості виробництва.

Отже, симуляція у середовищі RoboDK не лише виявила проблеми, а й надала конкретні рекомендації щодо їх вирішення, що сприятиме покращенню всіх аспектів виробничого процесу.

У розділі було розглянуто ключові аспекти, які впливають на ефективність і точність промислових роботів.

По- перше, проведено детальне дослідження стандартів автоматизації, що дозволило визначити базові вимоги до якості та безпеки робо технічних систем.

По друге, розроблено методику калібрації промислових роботів, яка сприяє підвищенню їхньої точності та надійності в умовах реального виробництва.

Третім етапом стало впровадження методики оцінки точності позиціонування промислових роботів згідно стандарту ISO 9283, що дозволило забезпечити об'єктивну оцінку їхніх характеристик та відповідність міжнародним вимогам.

Нарешті, проведено тестування промислового робота в системі RoboDK, що дозволило моделювати та аналізувати роботу роботів у віртуальному середовищі, забезпечуючи тим самим високий рівень підготовки до реального застосування.

Таким чином, результати дослідження та тестування свідчать про доцільність застосування запропонованих методик для підвищення ефективності та точності роботи промислових роботів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. М. М. Поліщук, М. М. Ткач Робототехнічні системи: проєктування і моделювання : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра, за освітньою програмою «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». Київ. Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
2. Rigatos, Geras., Busawon, Kr, *Robotic Manipulators and Vehicles*, Springer International Publishing, 2018.
3. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник./ Я. І. Проць — Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. — 232 с.
4. Middleton J. Structured hardware and software for robots. *Industrial Robot: An International Journal*. 1982. Т. 9, № 2. С. 92–96. URL: <https://doi.org/10.1108/eb004514> (дата звернення: 21.01.2024).
5. Kozlowski K. Robot hardware and programming software description. *Advances in Industrial Control*. London, 1998. С. 13–46. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0429-2_2 (дата звернення: 21.01.2024).
6. Nehmzow U. Robot Hardware. *Mobile Robotics: A Practical Introduction*. London, 2000. С. 23–42. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3392-6_3 (дата звернення: 21.01.2024).
7. Робототехніка. Підручник / [В. І. Костюк, Г. О. Спину, Л. С. Ямпольський, М. М. Ткач.] - К.: Вища школа. - 1994. - 447 с.
8. Павленко І. І. Загальна методика розрахунку та проєктування конструкцій захватних пристроїв промислових роботів / І. І. Павленко, М. О. Годунко, І. Д. Кіріченко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - 2013. - Вип. 26. - С. 67-70. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2013_26_14.

9. Хавина И. П., Маяндза К. Мультиагентная система управления группой роботов : thesis. 2017. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/48202> (дата звернення: 21.01.2024).
10. Association I. R. M. Robotic Systems: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. IGI Global, 2020.
11. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. Основи творення машин / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. — Харків: Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. ISBN 978-966-2989-39-7
12. Костюк В. І., Гавриш А. П., Ямпольський Л. С., Карлов А. Г. Промислові роботи: конструювання, управління, експлуатація— К.:Вища шк. Головне вид-во, 1985. — 359 с.
13. Спину Г. А. Промислові роботи. Конструювання і застосування: Навч. посібник. - 2-е вид., перероб. і доп. - К.: Вища шк., 1991. - 311 с.: іл.
14. Conference R. Robots, 9: Advancing Applications; Current Issues, Future Concerns. Society of Manufacturing, 1985..
15. Павленко І. І., Попруга П. В. Автоматизована побудова кінематичних схем промислових роботів : thesis. 2016. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/4853> (дата звернення: 21.01.2024).
16. Cumbers D. Mechanical transmissions. Robot Technology Workbook. London, 1993. С. 10–11. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-349-12688-0_6 (дата звернення: 21.01.2024).
17. Paul, Richard (1981). Robot manipulators: mathematics, programming, and control : the computer control of robot manipulators. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. ISBN 978-0-262-16082-7.
18. . М. McCarthy, 1990, Introduction to Theoretical Kinematics, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

19. John J. Craig, 2004, Introduction to Robotics: Mechanics and Control (3rd Edition), Prentice-Hall.
20. J. M. McCarthy and G. S. Soh, Geometric Design of Linkages, 2nd Edition, Springer 2010.
21. Kleeman D. Robots in industry. Electronic Systems News. 1983. Т. 1983, № 3. С. 6. URL: <https://doi.org/10.1049/esn.1983.0038> (дата звернення: 21.01.2024).
22. Soska G. V. Industrial robots in the plastics and electronics industries. Industrial Robot: An International Journal. 2004. Т. 31, № 4. URL: <https://doi.org/10.1108/ir.2004.04931daa.002> (дата звернення: 21.01.2024).
23. Wilson M. Robots in the Aerospace Industry. Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 1994. Т. 66, № 3. С. 2–3. URL: <https://doi.org/10.1108/eb037487> (дата звернення: 21.01.2024).
24. Basteris A., Contu S. Software platforms for integrating robots and virtual environments. Rehabilitation Robotics. 2018. Р. 159–173. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811995-2.00012-6> (дата звернення: 01.01.2024).
25. Simulation software for robotics / ed. by L. J. D. Oxford : Pergamon Press, 1989. 380 p.
26. Mihai, Dan. "RoboDK: An Offline Programming and 3D Simulation Software for Industrial Robots". Smashing Robotics. Retrieved 5 January 2017
27. Bonev, Ilian. "When you need someone from Canada to calibrate your robot in New Zealand". Control and Robotics Laboratory. Retrieved 23 January 2017
28. Офіційний сайт компанії RoboDK [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://robodk.com/offline-programming>
29. Офіційний сайт компанії ABB Robot Studio [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>
30. Офіційний сайт компанії Fuzzy Logic [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://flr.io/products/fuzzy-studio/>

31. Офіційний сайт компанії DELMIA [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.3ds.com/products/delmia>
32. Офіційний сайт компанії Vention [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://vention.io>
33. Офіційний сайт компанії Visual Components [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.visualcomponents.com>
34. Офіційний сайт компанії Wandelbots [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.visualcomponents.com>
35. Shibata T. Rapid Prototyping of Robot Systems using Software Tools. Journal of the Robotics Society of Japan. 2012. Т. 30, № 9. С. 857–859. URL: <https://doi.org/10.7210/jrsj.30.857> (дата звернення: 07.01.2024).
36. Robot Operating System (ROS) / ред. А. Koubaa. Cham : Springer International Publishing, 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75472-3> (дата звернення: 07.01.2024).
37. Simulation environment for mobile robots testing using ROS and Gazebo / К. Takaya та ін. 2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), м. Sinaia, 13–15 жовт. 2016 р. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/icstcc.2016.7790647> (дата звернення: 07.01.2024).
38. Chitta S., Sucan I., Cousins S. MoveIt! [ROS Topics]. IEEE Robotics & Automation Magazine. 2012. Т. 19, № 1. С. 18–19. URL: <https://doi.org/10.1109/mra.2011.2181749> (дата звернення: 12.01.2024).
39. MoveIt!: Autonomous Underwater Free-Floating Manipulation / D. Youakim та ін. IEEE Robotics & Automation Magazine. 2017. Т. 24, № 3. С. 41–51. URL: <https://doi.org/10.1109/mra.2016.2636369> (дата звернення: 12.01.2024).
40. Celledoni E., Eidnes S., Schmeding A. Shape Analysis on Homogeneous Spaces: A Generalised SRVT Framework. Computation and Combinatorics in Dynamics, Stochastics and Control. Cham, 2018. С. 187–220. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01593-0_7 (дата звернення: 12.01.2024).

41. The Dynamic Simulation of Robotic Tool Changer Based on ADAMS and ANSYS / N. Li та ін. 2016 International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC), м. Hong Kong, Hong Kong, 19–21 серп. 2016 р. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/crc.2016.013> (дата звернення: 12.01.2024).
42. Rohmer E., Singh S. P. N., Freese M. V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013), м. Tokyo, 3–7 листоп. 2013 р. 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/iros.2013.6696520> (дата звернення: 14.01.2024).
43. Віктор Русаков. Аналіз систем імітаційного моделювання // Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: Proceedings of VIst International Conference, Kharkiv, October 21-22, 2022: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] - Kharkiv .: [electronic version], 2022. - 136 p. with. P. 127-129. (дата звернення: 7.11.2022). Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2021. Т. 3, № 1. С. 17–20. URL: <https://doi.org/10.23939/cds2021.01.017> (дата звернення: 14.01.2024).
44. Michel O. Cyberbotics Ltd. Webots™: Professional Mobile Robot Simulation. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2004. Т. 1, № 1. С. 5. URL: <https://doi.org/10.5772/5618> (дата звернення: 20.01.2024).
45. Serena Ivaldi, Vincent Padua, and Francesco Nori. Tools for modeling robot dynamics: a review based on user feedback. arXiv:1402.7050 [cs], February 2014. arXiv: 1402.7050.
46. Yuqian Lu, Chao Liu, Kevin Yi-Kai Wang, Huiyue Huang, and Xun Xu. Smart manufacturing driven by digital twins: Essence, reference model, applications and research challenges. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 61:101837, February 2020.
47. Pedro Tavares, João Silva, Pedro Costa, Germano Veiga. Flexible work cell simulator using digital twin methodology for highly Flexible work cell simulator using digital twin methodology for highly complex systems in Industry 4.0. pages 541-552, November 2018.

48. Schönberger J. An Overview of Simulation Tools. *Advances in Industrial Control*. London, 2012. С. 391–416. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2885-4_13 (дата звернення: 20.01.2024).
49. Ionescu F., Borangiu T. *Robot Modelling & Simulation*. Editura Academiei Romane, 2002. 436 с.
50. Semjon J., Kocan M., Demko R. CREATION OF A 3D MODEL OF ROBOT ACTIVITY ASSEMBLY IN THE ROBODK ENVIRONMENT. *TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES*. 2021. № 2(24). С. 43–48. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2\(24\)-43-48](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-43-48) (дата звернення: 16.04.2024).
51. RoboDK: RoboDK API [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://robodk.com/doc/en/RoboDK-API.html#RoboDKAPI>.
52. Кайола, Ю.О. «Дослідження інструментальних засобів системи симуляції промислових роботів RoboDK»/ Ю.О. Кайола. – Запоріжжя:НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 94 с.
53. Semjon, J.; Sukop, M.; Vagaš, M.; Jánoš, R.; Tuleja, P.; Koukolova, L.; Marcinko, P.; Juruš, O.; Varga, J. Comparison of the delta robot ABB IRB 360 properties after collisions. *Commun. Sci. Lett. Univ. Zilina*, 2018, 20, p. 42 – 46. <https://doi.org/10.26552/com.C.2018.1.42-46>
54. Svetlík, J., Demeč, P. Methods of Identifying the Workspace of Modular Serial Kinematic Structures. 2013. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 309, p. 75-79.
55. Andrjejev Y. M. Implementation and use of the Levenberg-Marquard algorithm in the problems of calibration of robotic manipulators. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: Dynamics and Strength of Machines*. 2021. No. 2. P.86–93. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2021.2.249537> (дата звернення: 10.06.2022).
56. Конох І. С., Базишин М. Ю. БАГАТОКОНТРОЛЕРНИЙ ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ - МАНІПУЛЯТОРОМ З ЕЛЕКТРИЧНИМИ СЕРВОПРИВОДАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА

ІНКРЕМЕНТАЛЬНИМИ ЕНКОДЕРАМИ. Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах. 2013. Т. (2), № 2/2013. С. 90–102. URL: http://eetecs.kdu.edu.ua/2013_02/EETECs2013_0206.pdf (дата звернення: 10.06.2022).

57. Мазуренко Д. О. Тестування промислових виробів за точністю, повторюваністю та надійністю : бакалаврський дипломний проєкт за спеціальністю 131 Прикладна механіка / Д. О. Мазуренко ; наук. кер. Л. М. Березін ; рец. Ю. А. Ковальов. – Київ : КНУТД, 2021. – 50 с. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/18838> (дата звернення: 10.06.2022).

58. Testa, G. (2018). Experimental identification of the joints stiffness of the UR5 robot arm. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-identification-ofthe-joints-stiffness-Testa/563b40a956156ad22d81577a2912adb6b59e616d> (дата звернення: 10.06.2022).

59. Positioning error compensation of an industrial robot using neural networks and experimental study / B. LI et al. Chinese Journal of Aeronautics. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.03.027> (дата звернення: 10.06.2022).

60. An Overview of Robot Calibration / A. Y. Elatta et al. Information Technology Journal. 2003. Vol. 3, no. 1. P. 74–78. URL: <https://doi.org/10.3923/itj.2004.74.78> (дата звернення: 10.06.2022).

61. Jelačić Z., Dedić R., Dindo H. Prosthetic modelling and simulation. Active Above-Knee Prosthesis. 2020. P. 109–154. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818683-1.00004-4> (дата звернення: 10.06.2022).

62. Тема 7. Застосування роботів і робототехнічних систем. Головна | Elib LNTU. URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/ЕП_Гулієва/page22.html (дата звернення: 10.06.2022).

63. Мельніков О.В. Дослідження інструментів моделювання та розробки, що використовуються в системах симуляції промислових роботів / О.В. Мельніков, Н.О. Миронова // Тиждень науки-2024. Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій: щоріч. наук.-практ. конф., 15-19 квітня 2024 р.: тези доп. / Редкол.: Вадим ШАЛОМЄЄВ (відпов.ред.) Електрон.дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. (в друці)

64. Мельніков О.В. Аналіз системи Smart Parking та її аналогів / О.В. Мельніков, Н.О. Миронова, М.Ю. Тягунова // Тиждень науки-2023. Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій: щоріч. наук.-практ. конф., 24-28 квітня 2023 р.: тези доп. / Редкол.: Вадим ШАЛОМЄЄВ (відпов.ред.) Електрон.дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – С.73-74. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM). – Назва з тит. Екрана

65. Мельніков О.В. Вплив використання промислових роботів на ефективність та точність систем симуляції виробництва / О.В. Мельніков, Н.О. Миронова, Т.І. Куляба-Харитонova // Тиждень науки-2023. Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій: щоріч. наук.-практ. конф., 24-28 квітня 2023 р.: тези доп. / Редкол.: Вадим ШАЛОМЄЄВ (відпов.ред.) Електрон.дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – С.72-73. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM). – Назва з тит. Екрана.

ДОДАТОК А

Використання промислових роботів у виробництві

Роботи на виробництві допомагають створювати робочі місця, відновлюючи більше виробничої роботи. Вони захищають працівників від повторюваних, рутинних і небезпечних завдань, а також створюють більш бажані робочі місця, такі як інженерія, програмування, управління та обслуговування обладнання.

Роботи стали невід'ємною частиною сучасних виробничих процесів у різних галузях промисловості. Автоматизуючи повторювані завдання і підвищуючи загальну ефективність, роботи суттєво вплинули на спосіб виробництва і складання продукції. Робототехніка застосовується в таких ключових галузях промисловості, як машинобудування, виробництво електроніки, аерокосмічна промисловість, виробництво металу та пластмас.

1) Машинобудування

Автомобільна промисловість знаходиться в авангарді впровадження робототехніки у виробничі процеси. Від зварювання та фарбування до складання та контролю, роботи відіграють вирішальну роль у виробництві транспортних засобів з точністю, акуратністю та швидкістю.

У зварювальному процесі роботи використовуються завдяки їх здатності витримувати високі температури і точності, необхідній для з'єднання металевих компонентів. Ці роботи оснащені сучасними датчиками та системами керування, що забезпечують стабільну якість зварювання та мінімізують дефекти. Наприклад, середній час зварювального циклу для кузова автомобіля за допомогою роботів скорочується до 85 секунд, що призводить до значного підвищення продуктивності.

Роботи також використовуються в процесі фарбування, де вони надають ряд переваг, включаючи зменшення відходів фарби та покращення якості покриття. Завдяки точним рухам і вдосконаленим алгоритмам управління роботизовані фарбувальні системи можуть досягати рівномірного

покриття з мінімальним розбризкуванням. Типовий фарбувальний цех може досягти до 50% скорочення відходів фарби за допомогою роботів, що значно зменшує витрати на матеріали та вплив на навколишнє середовище.

У процесі складання роботів використовують для виконання таких завдань, як встановлення двигунів, прикріплення коліс і монтаж дверей. Ці завдання вимагають високого ступеня точності та повторюваності, які можуть забезпечити роботи. Крім того, роботи можуть працювати з важкими компонентами, знижуючи ризик травм і втоми серед людей. Ще одна сфера застосування роботів в автомобілебудуванні - це контроль якості. Роботи із системою технічного зору, оснащені камерами з високою роздільною здатністю, можуть перевіряти компоненти і вузли на наявність дефектів, забезпечуючи високу якість і мінімізуючи ризик відкликання продукції. Ці роботи можуть виконувати перевірку зі швидкістю і точністю, які перевершують людські можливості, що призводить до поліпшення загальної якості продукції [21].

2) Виробництво електроніки

Виробництво електроніки - ще одна галузь, де робототехніка відіграє важливу роль у підвищенні продуктивності, якості та ефективності. Зі зростанням попиту на електронні пристрої виробники звернулися до робототехніки для виконання різних завдань, таких як розміщення компонентів, пайка і збірка.

Одним з основних застосувань робототехніки у виробництві електроніки є розміщення компонентів. Високошвидкісні роботи використовуються для точного розміщення крихтих електронних компонентів, таких як резистори, конденсатори та інтегральні схеми, на друкованих платах (PCB) на високих швидкостях. Ці роботи можуть обробляти тисячі компонентів на годину, що значно перевершує можливості людей. Наприклад, типовий робот може розміщувати до 30 000 компонентів на годину з точністю ± 50 мікрметрів, забезпечуючи високу пропускну здатність і точність виробничого процесу.

Пайка - ще один важливий процес у виробництві електроніки, де широко використовуються роботи. Роботизовані паяльні системи мають низку переваг над ручним паянням, зокрема, кращу консистенцію, меншу кількість дефектів і вищу продуктивність. Ці роботи використовують передові системи управління і датчики для підтримки постійної температури пайки і нанесення відповідної кількості припою на кожне з'єднання, в результаті чого виходять більш якісні і надійні електронні пристрої.

У процесі складання роботів використовують для роботи з делікатними компонентами і виконання точних завдань, таких як закручування гвинтів і нанесення клею. Ці завдання часто вимагають високого ступеня точності і повторюваності, які можуть забезпечити роботи. Крім того, роботи можуть працювати цілодобово, не втомлюючись, що забезпечує безперервність виробництва і скорочує час виконання замовлень. Наприклад, дослідження показало, що використання роботів в електронному складанні може підвищити продуктивність на 25% порівняно з ручним складанням.

Роботи також використовуються в процесах контролю якості та інспекції у виробництві електроніки. Роботи із системою технічного зору можуть перевіряти друковані плати та електронні компоненти на наявність дефектів і перекосів, забезпечуючи високу якість продукції та зменшуючи ризик виходу пристрою з ладу. Ці інспекційні роботи можуть обробляти великі обсяги компонентів набагато швидше, ніж люди, що призводить до підвищення загальної ефективності виробництва [22].

3) Аерокосмічна промисловість

Аерокосмічна промисловість включає в себе виробництво літаків, космічних апаратів і супутніх компонентів. Суворі вимоги до якості та безпеки в галузі призвели до впровадження робототехніки для забезпечення точності, повторюваності та надійності виробничих процесів.

Одним з основних застосувань робототехніки в аерокосмічному виробництві є свердління та кріплення. Свердління отворів і встановлення кріплень в авіаційних конструкціях вимагає високого рівня точності, щоб

забезпечити цілісність конструкції і правильне вирівнювання. Роботизовані системи свердління, такі як автоматизовані свердлильні верстати, можуть забезпечити точне розміщення отворів з допуском $\pm 0,001$ дюйма, що має вирішальне значення для підтримання безпеки та продуктивності літаків. Автоматизувавши цей процес, виробники можуть значно скоротити виробничий час і витрати, зберігаючи при цьому високу якість, необхідну в аерокосмічній галузі.

Укладання композитних матеріалів - ще одна сфера, де робототехніка застосовується в аерокосмічному виробництві. Композитні матеріали, такі як полімери, армовані вуглецевим волокном, все частіше використовуються у виробництві літаків завдяки їх високому співвідношенню міцності до ваги та корозійній стійкості. Роботизовані системи можуть точно наносити шари композитного матеріалу на форми або оправки, забезпечуючи рівномірну товщину і оптимальне використання матеріалу. Наприклад, машини з автоматизованим розміщенням волокон (AFP) можуть розміщувати шари композитної стрічки з точністю позиціонування $\pm 0,010$ дюйма, що дозволяє виробляти складні, високоефективні композитні конструкції.

Фарбування та обробка поверхні - це додаткові процеси в аерокосмічному виробництві, де роботи відіграють значну роль. Ці завдання вимагають послідовної, високоякісної обробки для збереження зовнішнього вигляду і корозійної стійкості поверхонь літаків. Роботизовані фарбувальні системи можуть наносити фарбу і покриття рівномірно і ефективно, мінімізуючи відходи і зменшуючи вплив на навколишнє середовище. Наприклад, роботизована фарбувальна система може покрити до 95% площі поверхні літака з допуском по товщині покриття ± 10 мікрметрів, забезпечуючи рівномірне і довговічне покриття [23].

4) Виробництво металу та пластмас

Виробництво металів і пластмас має вирішальне значення для багатьох галузей промисловості, а робототехніка відіграє важливу роль в оптимізації

виробничих процесів, підвищенні точності та зниженні витрат на робочу силу.

У металургії робототехніка широко використовується для зварювання. Високоякісні зварні шви мають вирішальне значення для структурної цілісності різних компонентів, особливо в галузях із суворими вимогами до безпеки, таких як автомобілебудування та аерокосмічна промисловість. Роботизовані зварювальні системи можуть підтримувати стабільну якість зварного шва, контролюючи такі параметри, як швидкість зварювання, тепловкладення та розміщення електрода. Наприклад, роботизовані системи для газо-металевого дугового зварювання (GMAW) можуть досягати швидкості зварювання до 100 дюймів за хвилину з точністю позиціонування $\pm 0,005$ дюйма, забезпечуючи високу якість зварного шва та скорочуючи час виробництва.

Роботизовані системи також застосовуються в процесах різання та механічної обробки металу, де точність і повторюваність мають вирішальне значення. Приклади включають лазерне різання, гідроабразивне різання та фрезерування. Роботизовані системи лазерного різання можуть досягати швидкості різання до 1000 дюймів на хвилину з точністю позиціонування $\pm 0,001$ дюйма, що забезпечує точне і стабільне виробництво деталей. Крім того, робототехніка може використовуватися в складних фрезерних операціях, де потрібен 5-осьовий або 6-осьовий рух, що дозволяє виробникам виготовляти складні деталі з жорсткими допусками.

У виробництві пластмас робототехніка широко використовується в процесах лиття під тиском. Лиття під тиском - широко використовуваний метод виробництва пластикових компонентів, а точність і повторюваність роботизованих систем життєво важливі для забезпечення стабільної якості. Роботизовані системи можуть виконувати такі завдання, як вилучення деталей, завантаження прес-форми, а також операції після формування, такі як обрізка та складання. Наприклад, роботизована система вилучення деталей може досягати тривалості циклу всього 6 секунд з точністю позиціонування $\pm 0,010$

дюйма, забезпечуючи ефективну і точну обробку відформованих компонентів.

Ще одне застосування робототехніки у виробництві пластмас - це процеси видувного формування, де виробляються пластикові контейнери та пляшки. Роботизовані системи обрізки можуть видаляти надлишки пластику і забезпечувати чисту, рівномірну обробку кінцевого продукту. Наприклад, роботизована система обрізки може досягти тривалості циклу менше 10 секунд з точністю різання $\pm 0,005$ дюйма, що дозволяє отримати високоякісний готовий продукт з мінімальними відходами [22].

Загалом, робототехніка у виробництві металів і пластмас підвищує ефективність, точність і якість, роблячи значний внесок у продуктивність і конкурентоспроможність різних галузей промисловості.

Роботи стали незамінними інструментами в різних галузях промисловості завдяки їхній здатності оптимізувати процеси, підвищити ефективність і забезпечити стабільні високоякісні результати. Їхнє застосування дуже широке: від декартових і полярних роботів до роботів для спільної роботи (коботів) і мобільних роботів. Кожен з цих різних типів роботів має унікальні переваги в конкретних сферах застосування та середовищах. Роботи були успішно інтегровані в такі ключові галузі, як автомобілебудування, електроніка, аерокосмічна промисловість, виробництво металів і пластмас, демонструючи їхню цінність у сучасних виробничих процесах.