

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Метод кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній

платформі

Назва теми

КВРАКІТР.2023186.01.20.ПЗ

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Шифр, назва

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Назва

Виконав:

студент II курсу, група АКІТРм-23-1

Підпис

Петро ПЕЛІХОВСЬКИЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

Підпис

Наталя МОРКУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
зав. кафедри АКІТтаР

Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 12 » грудня 2024 р.

Хмельницький 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТтаР

Валерій МАРТИНЮК

01 вересня 2024р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Пеліховському Петру Вячеславовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Метод кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі

Керівник роботи Моркун Наталія Володимирівна, доктор технічних наук, професор

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.12.2024р.





3 Вихідні дані до роботи Мета роботи: розробити методи кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі. Об'єктом дослідження є колаборативні роботи на мобільній платформі. Предметом дослідження є виявлення методів кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Дослідження предметної області та постановка задачі. Розробка методу моделювання планування руху кооперативного робота. Реалізація методу кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі. Дослідження методу кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКИТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКИТтаР		

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Вступ	10.09.2024р.	Виконано
2 Дослідження предметної області та постановка задачі	25.09.2024р.	Виконано
3 Розробка методу моделювання планування руху кооперативного робота	15.10.2024р.	Виконано
4 Реалізація методу кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі	30.10.2024р.	Виконано
5 Дослідження методу кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі	10.11.2024р.	Виконано
6 Висновки	15.11.2024р.	Виконано
7 Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2024р.	Виконано
8 Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2024р.	Виконано

Студент


Підпис

Пеліховський П.В.
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Моркун Н.В.
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: “Метод кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі”

Автор роботи: Пеліховський П.В.

Керівник роботи: Моркун Н.В.

Пояснювальна записка: 81 с., 31 рис., 8 таб., - дод., 70 джерел.

Графічна частина: 17 презентаційних слайдів

Ключові слова: ПАРАМЕТРИ ДЕНАВІТА-ХАРТЕНБЕРГА, КІНЕМАТИЧНЕ КАЛІБРУВАННЯ, РОБОТИ, ПОДВІЙНИЙ РОБОТ; КАЛІБРУВАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ; БАЗОВА КООРДИНАТА.

Мета роботи: розробити методи кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі. Представлено новий підхід до калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі. Запропонований підхід пропонує кілька помітних внесків, включаючи чисельний підхід до калібрування роботизованих систем та аналіз необхідного діапазону з'єднань у нульовому просторі, необхідного для ідентифікації.

ЗМІСТ

СКРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	4
ВСТУП.....	5
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	8
1.1 Кінематичне калібрування для колаборативних роботів на мобільній платформі з використанням системи захоплення руху	8
1.2 Кінематичний аналіз та моделювання планування руху кооперативного робота	10
1.3 Метод швидкого калібрування базових координат подвійного робота на основі методу калібрування триточкових вимірювань	17
1.4 Калібрування кінематичної моделі колаборативного резервного робота з використанням замкнутого кінематичного ланцюга.....	21
1.5 Висновки до першого розділу. Постановка задачі	24
2 РОЗРОБКА МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАНУВАННЯ РУХУ КООПЕРАТИВНОГО РОБОТА	25
2.1 Виявлення параметрів ДХ	26
2.2 Параметри кінематичної моделі.....	30
2.3 Імітаційний експеримент	32
2.4 Моделювання ROS	34
2.5 Висновки до другого розділу.....	36
3 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ КІНЕМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТІВ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ	38
3.1 Експериментальна ідентифікація параметра ДХ	38
3.2 Принципи калібрування робота	46
3.3 Аналіз симуляції.....	53
3.4 Висновки до третього розділу	58
4 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КІНЕМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТІВ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ	60
4.1 Моделювання помилок, процедури вимірювання та оптимізація параметрів	60

4.2 Експеримент з калібруванням	67
4.3 Результати калібрування робота	76
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	82
ВИСНОВКИ	84
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	86
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі.....	94

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ДХ – Параметри Денавіта-Хартенберга

SVD – Сингулярне розкладання значень

POE – Добуток моделі експонента

RRT – алгоритм швидкого дослідження випадкового дерева

LM – Ітераційне рішення Левенберга Марквардта

DOF – Оптичний пристрій

ROS – Robot Operating System

URDF – Unified Robotic Description Format

ВСТУП

Для сучасних роботизованих додатків, які виходять за рамки типового промислового середовища, абсолютна точність є однією з ключових властивостей, які роблять це можливим. У літературі існує кілька підходів до підвищення точності робота для типового промислового робота, встановленого на нерухомій рамі. На противагу цьому, не існує методу підвищення точності робота, коли робот встановлений на мобільній основі, що характерно для колаборативних роботів.

Тому в даній роботі буде проаналізовано два підходи до підвищення абсолютної точності робота, встановленого на мобільній платформі за допомогою оптичної системи вимірювання. Перший підхід заснований на геометричних операціях, які використовуються для розрахунку осей обертання кожного суглоба. Цей підхід ідентифікує всі осі обертання, що дозволяє розрахувати параметри і, таким чином, створити повну кінематичну модель, включаючи похибки положення та орієнтації кінцевого ефектора робота та основи робота.

Другий підхід до оцінки параметрів заснований на оптимізації з використанням набору спільних положень і поз кінцевого ефектора для знаходження оптимальних параметрів ДХ. Оскільки робот встановлений на мобільній основі, яка не закріплена, для динамічного та одночасного вимірювання положення основи робота та кінцевого ефектора використовувалася оптична вимірювальна система.

Ефективність двох запропонованих методів була проаналізована та підтверджена на роботі 7-DoF Franka Emika Panda, встановленому на мобільній платформі PAL Tiago-base. Результати свідчать про значне поліпшення абсолютної точності для обох запропонованих підходів.

Використовуючи запропонований підхід з оптичною системою вимірювання, можна легко автоматизувати оцінку кінематичних параметрів робота з метою підвищення абсолютної точності, особливо в додатках, які вимагають високої точності позиціонування.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка методів кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні задачі дослідження:

- дослідити наявні методи та засоби кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі;
- виконати оцінку наявних методів;
- провести експерименти з калібрування ;
- оцінити ефективність запропонованих методів;
- розібрати моделювання помилок, процедури вимірювання та оптимізація параметрів.

Об'єктом дослідження є колаборативні роботи на мобільній платформі

Предметом дослідження є виявлення методів кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі

Методи досліджень. Проведено серію експериментів з використанням робота Franka Emika Panda, щоб перевірити результати моделювання та отримати реальні вимірювання. Було виконано кілька повторень вимірювання для кожної точки (P1, P2 і P3), роблячи по п'ять повторень для кожної точки. Щоб самостійно перевірити результати та порівняти їх, було оснащено робота спеціально розробленим інструментом із маркерами на кінцевому ефекторі та сферичним з'єднанням для замикання кінематичного ланцюга.

Наукова новизна отриманих результатів: представлено новий підхід до калібрування колаборативних роботів за допомогою замкнутого кінематичного ланцюга над сферичним з'єднанням. Запропонований підхід пропонує кілька помітних внесків, включаючи чисельний підхід до калібрування роботизованих

систем та аналіз необхідного діапазону з'єднань у нульовому просторі, необхідного для ідентифікації.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Кінематичне калібрування для колаборативних роботів на мобільній платформі з використанням системи захоплення руху

В даний час роботи широко використовуються в промисловості для автоматизації виробничих процесів з метою підвищення ефективності та виробництва. Для великих обсягів виробничих процесів типова стратегія програмування полягає в переміщенні робота в потрібне положення, яке записується, а потім повторюється.

На противагу цьому, таке програмування не буде економічно вигідним для малосерійного виробництва, оскільки зазвичай воно забирає дуже багато часу. З іншого боку, стратегії автономного програмування можуть бути використані для подолання розриву, але вони вимагають абсолютної точності робота для виконання завдання на реальному роботі.

У цьому випадку необхідні знання кінематики роботів. Зазвичай виробники роботів надають номінальну кінематичну модель роботів у вигляді параметрів Денавіта-Хартенберга (ДХ), яка відрізняється від фактичної моделі через помилки при виготовленні, складанні роботів тощо. Часто номінальні параметри також не є загальнодоступними, оскільки вони використовуються внутрішньо контролером робота. Все це обмежує практичне використання роботів у багатьох малооб'ємних додатках.

Загалом кінематичне калібрування можна розділити на дві групи залежно від використовуваного методу вимірювання. Метод розімкнутого контуру, коли вимірюється абсолютне положення робота, і метод замкнутого циклу, коли вимірюється положення робота щодо системи відліку. Однак в цілому обидва методи вимагають еталонної системи вимірювання для визначення кінематичних параметрів.

Можуть використовуватися такі системи, як, лазерні трекеери [1], звичайні або оптичні координатно-вимірвальні машини [2], кулькові бруски [3] і т.д. Найбільш типові з них наведені в таблиці 1.1, де порівняно їх сильні і слабкі сторони.

Таблиця 1.1 – Порівняння різних систем вимірювання для кінематичної ідентифікації [4]

Пристрої Функції	Повторюваності	МС	Port.	EoU	Cost	Mo B	бDP
Теодоліт	5-10 мм	Статичні	Високий	Низький	Середнє	Ні	Статичні
Ультразвукове трейлатерування	1 мм	Динамічні	Високий	Середнє	Низький	Ні	Статичні
Машинний зір	0,8-1 мм	Динамічні	Високий	Середнє	Середнє	Так	Динамічні
Лазерний трекеер	10 μ m	Динамічні	Високий	Середнє	Високий	Ні	Статичні
Інфрачервона система захоплення руху	0.1 мм	Динамічні	Середнє	Середнє	Середнє	Так	Динамічні

Також, як правило, не існує встановлених інструкцій або процедур для визначення якості кінематичної ідентифікації з будь-якою з систем вимірювання. Зазвичай, калібрування параметрів ДХ за допомогою лазерного трекеера в розімкненому контурі призводить до більш високої точності, але це є дорогим і не гнучким [5].

Найдешевшою альтернативою є використання замкнутого підходу з точними вимірвальними пристроями, але він вимагає ручного керівництва роботом. Отже, такий підхід складно автоматизувати, що впливає на загальну точність калібрування [6]. Література, процедури та системи вимірювання для кінематичного калібрування роботів на мобільних платформах ще скупіші.

Як видно з таблиці 1.1, при приєднанні робота до мобільної бази можна використовувати тільки системи машинного зору або системи захоплення руху, оскільки тільки ці системи можуть одночасно вимірювати положення кінцевого ефектора і бази робота.

У зв'язку зі збільшенням кількості колаборативних роботів, кращою доступністю та впровадженням їх у нові сфери, починаючи від виробничих ліній і закінчуючи нашим повсякденним середовищем, підвищення абсолютної точності все ще залишається викликом для робототехніки.

1.2 Кінематичний аналіз та моделювання планування руху кооперативного робота

Технічні параметри кооперативного робота AUBO-i5 такі: він має шість ступенів свободи, корисне навантаження 5 кг, ефективний робочий радіус 886,5 мм, а діапазон руху всіх суглобів становить $\pm 175^\circ$, які є обертовими суглобами. Структура в основному складається зі світової ланки, а плечовий суглоб з передпліччя, зап'ястя 1, зап'ястя 2, зап'ястя 3 та шість суглобів.

Метод параметра ДХ є поширеним методом з'єднання роботів стрижнів. Оскільки стандартний метод ДХ [7], дозволяє встановити систему координат на продовженні осі, він може зіткнутися з такими проблемами, як неможливість моделювання всіх з'єднувальних ланок. При використанні цього методу також спостерігається невідповідність між моделлю робота і сутністю, а також нездатність аналізувати положення локальних з'єднань.

Таким чином, удосконалений метод параметрів Денавіта-Хартенберга використовується для аналізу прямої кінематики робота AUBO-i5. Встановлений метод для вдосконаленої моделі ДХ показаний на рисунку 1.1, тобто спочатку встановити кореляцію між системами координат вертикальних і суміжних швів, а потім встановити правила на основі моделі ДХ: спочатку нам потрібно визначити вісь Z_i , вісь X_i і Y_i в послідовності, щоб встановити систему координат, відповідну кожному суглобу.

Потім визначаються чотири параметри, що включають довжину загальної вертикальної лінії a_{i-1} , кут α_{i-1} між осями з'єднання, відстань між вами d_i і кут θ_i з'єднання робота. Потрібно побудувати сім систем координат за допомогою вдосконаленого методу параметрів ДХ, а система координат робота показана на рисунок 1.2.

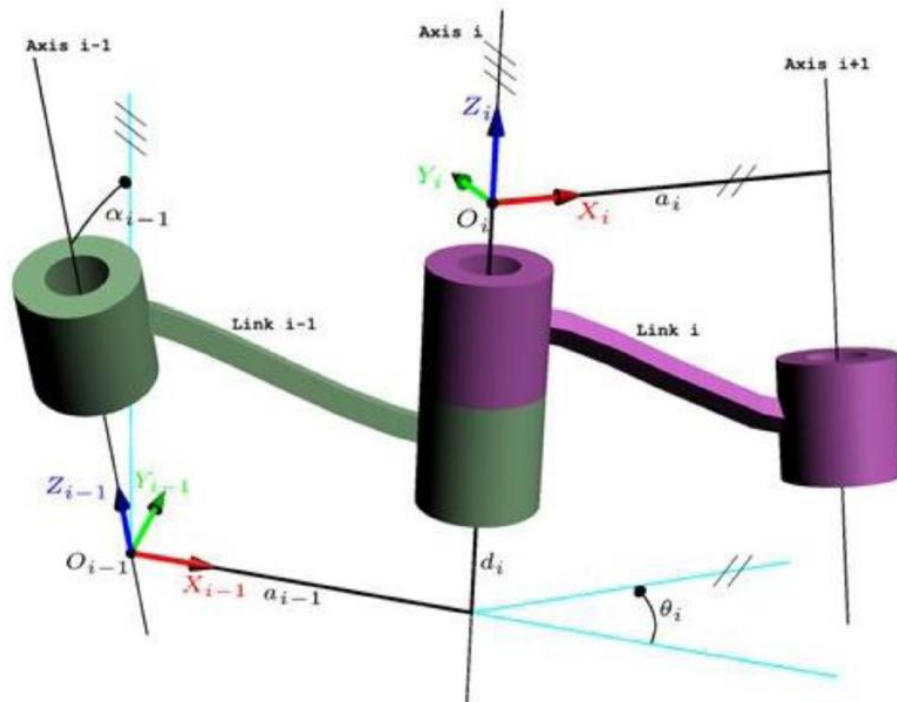


Рисунок 1.1 – Вдосконалений метод параметрів Денавіта і Хартенберга

a_{i-1} являє собою довжину спільної вертикальної лінії, α_{i-1} . Представляє кут між осями з'єднання, d_i представляє відстань з'єднання, θ_i представляє кут робота-з'єднання.

Параметри наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Параметри робота AUBO i5 [7]

Link(i)	a_{i-1} (мм)	α_{i-1} (°)	d_i (мм)	θ_i (°)
1	0	0	122	180
2	0	-90	121.5	-90
3	408	180	0	0
4	376	180	0	-90
5	0	-90	102.5	0
6	0	90	94	0

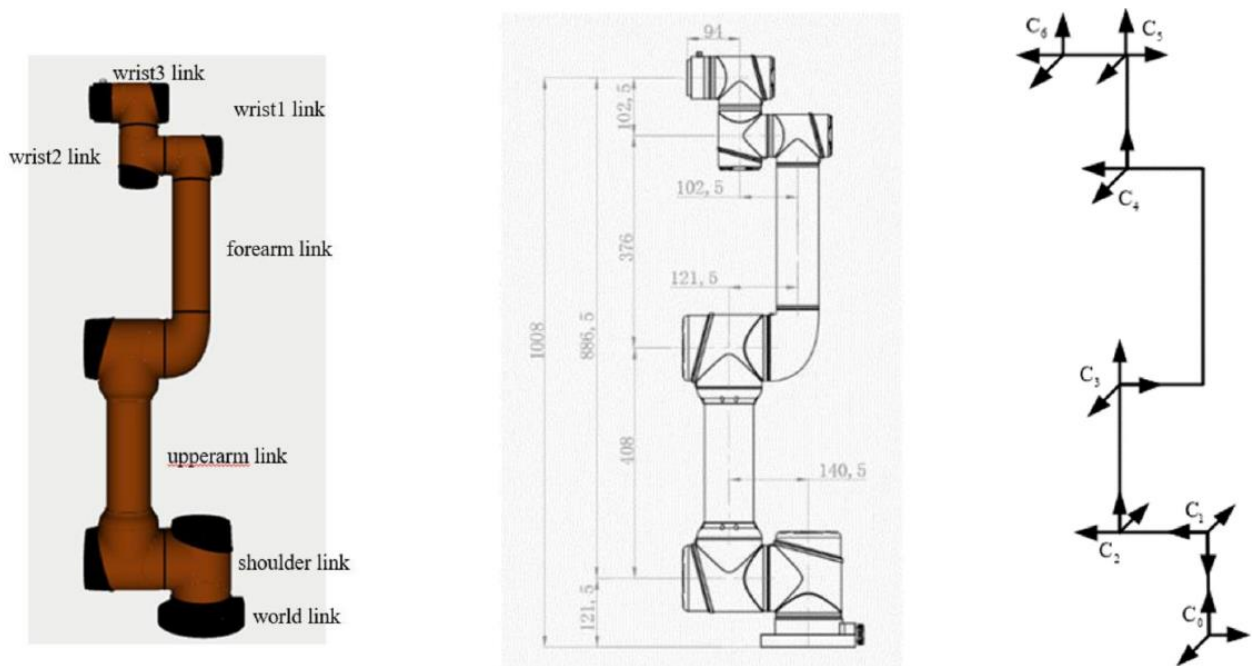


Рисунок 1.2 – 3D модель і система координат Денавіта і Хартенберга робота, надана компанією AUBO

Матриця трансформації ланки маніпулятора:

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos a_{i-1} & \cos \theta_i \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & d_i \sin a_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin a_{i-1} & \cos \theta_i \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & -d_i \cos a_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

З рівняння видно, що $c_1 = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$, ця матриця перетворення використовується для вираження співвідношення системи координат C_i і системи координат C_{i-1} [7].

Робот AUBO-I5 має шість ступенів свободи, три з яких визначають інформацію про положення терміналу. Базова позначка вибирається як орієнтир для перетворення координат. За допомогою системи координат ДХ, встановленої на рисунку 1.2, і параметрів в таблиці 1.1, буде використовуватись матриця для вираження відношення перетворення сусідньої ланки.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_2 \\ -s_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_3 \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ -s_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_6 \\ -s_6 & -c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Таким чином, можна отримати матрицю перетворення кінцевого ефектора щодо бази, помноживши шість матриць з рівняння (1.2) на рівняння (1.7).

$${}^0T = {}^0T(\theta_1) {}^1T(\theta_2) {}^2T(\theta_3) {}^3T(\theta_4) {}^4T(\theta_5) {}^5T(\theta_6) \quad (1.8)$$

Рівняння прямої кінематики маніпулятора виходить шляхом розкладання:

$${}^0T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

У рівнянні (1.9) n , o , a , представляють положення кінцевого виконавця відносно базової координати; p_x, p_y, p_z , представляє незалежні вузли. ROS підтримує кілька мов, є безкоштовним із відкритим кодом, і код легко розширити.

У цій роботі ROS-Melodic використовувався для створення симуляції планування руху платформи роботів на Ubuntu.

Зворотний кінематичний аналіз робота. Можливу позу робота можна розрахувати, визначивши положення та позу кінця робота, що може вирішити кут повороту θ_i кожного суглоба робота. У процесі розв'язання оберненого рішення поетапно обчислюється кут повороту суглоба за допомогою методу обернення матриць.

Зворотна кінематика робота AUBO I5 вирішується наступним чином:

- потрібно помножити обидві частини цього рівняння на 0T за матрицею ${}^0T(\theta_1)^{-1}$:

$${}^0T(\theta_1)^{-1} {}^0T = {}^1T(\theta_2) {}^2T(\theta_3) {}^3T(\theta_4) {}^4T(\theta_5) {}^5T(\theta_6) \quad (1.10)$$

- порівнюючи ліве і праве, рівняння для розв'язання θ_i має такий вигляд:

$$\theta_1 = \arctan2(A_1, B_1) - \arctan2(d_2, \pm R_1) \quad (1.11)$$

де,

$$A_1 = d_6 a_y - p_y, B_1 = d_6 a_x - p_x, R_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2 - d_2^2}$$

І так далі, можна розрахувати кут кожного стику, для всіх вісім рішень. Послідовність розрахунку з'єднувальних кутів показана на рисунку 1.3.

Прямий і обернений кінематичний аналіз дає теоретичну базу для подальшого планування руху.

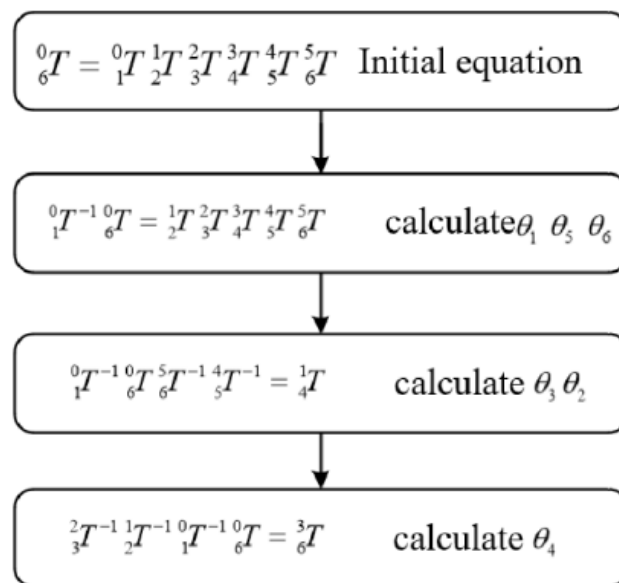


Рисунок 1.3 – Послідовність обчислення стикових кутів

Робот у системі ROS описується за допомогою формату URDF (Unified Robotic Description Format), що використовує XML-файл для точного визначення фізичних характеристик робота. Модель робота, створена в URDF, представляє точний опис його структури та властивостей, включаючи інформацію про з'єднання між різними частинами робота. Вона також містить деталі про колізії, інерціальні властивості, межі рухів, а також візуальні елементи. URDF файл визначає відносини між батьківськими та дочірніми елементами в структурі робота, що забезпечує коректне моделювання його поведінки в середовищі ROS.

Цей підхід дозволяє розробникам точно моделювати рухи робота, враховуючи всі необхідні фізичні характеристики для симуляцій і реального

управління. Використання URDF є важливим кроком для інтеграції роботів у середовище ROS, оскільки цей формат дозволяє створювати детальні і точні моделі для різноманітних застосувань, від виробничих ліній до дослідницьких робіт [9].

Співвідношення між стрижнем і суглобом показано на рисунку 1.4.

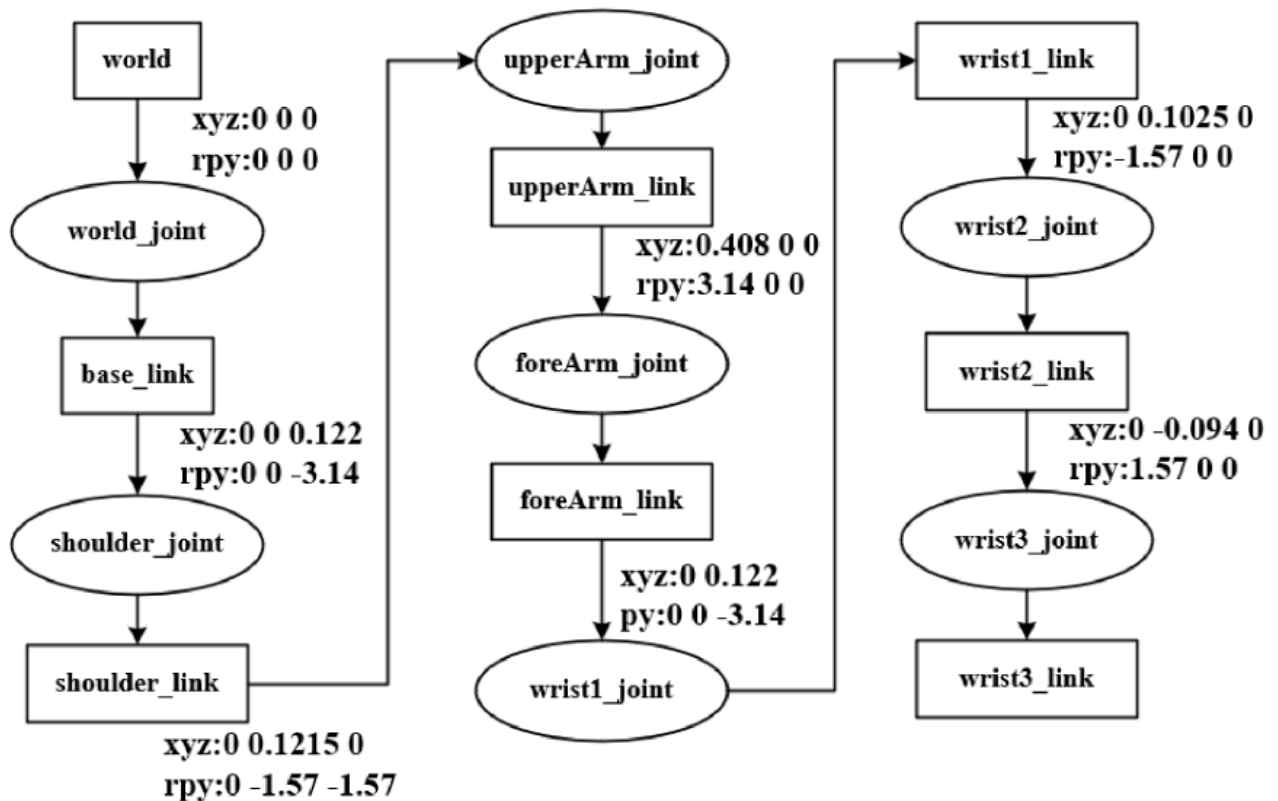


Рисунок 1.4 – Деревна діаграма з'єднання робота і шатуна

У процесі налаштування використовується помічник по установці MoveIt! від ROS. Асистент налаштування може допомогти розробникам налаштувати початкову конфігурацію системи планування руху робота, щоб спростити проектування та компіляцію.

Ці конфігурації включають матрицю самозіткнення, список віртуальних суглобів, визначення групи планування, позу маніпулятора, список кінцевих ефекторів і пасивних суглобів. Процес конфігурації показаний на рисунку 1.5.

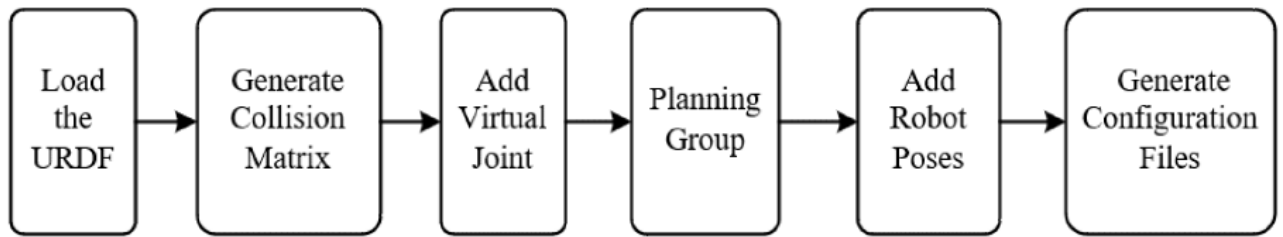


Рисунок 1.5 – Процедура конфігурації MoveIt!

Використовуючи The Setup Assistant для конфігурації MoveIt, можна отримати файл конфігурації про AUBO-i5. За допомогою цього файлу можна зрозуміти розв'язання прямої та зворотної кінематики робота, який є основою для планування лінійного руху.

1.3 Метод швидкого калібрування базових координат подвійного робота на основі методу калібрування триточкових вимірювань

Роботи продемонстрували надзвичайно високі можливості праці та виконання в галузі механічної обробки, виробництва та складання, а також добре пристосовані до суворих умов праці [10]. Незважаючи на те, що роботизована технологія досягла значного прогресу, в умовах все більш складних завдань вантажопідйомність і робочий простір одного робота обмежені, а деякі складні великомасштабні завдання з навантаженням не можуть бути виконані одним роботом. У цьому випадку потрібні колаборативні системи з кількома роботами. У порівнянні з одним роботом, кілька роботів мають ряд переваг, таких як краща гнучкість, спільна робота і надійність [11].

Мультироботизовані системи знайшли широке застосування в медичній галузі [12], аерокосмічній галузі [13], а також у промислових додатках, таких як зварювання та складання [14]. Наприклад, Guo et al. [15], запропонували схему неруйнівного контролю напівзакритих заготовок з системою двох роботів і використовували її для випробування композитних деталей зі складними криволінійними поверхнями.

Pelle-grinelli et al. [16], запропонували метод оптимізації загального дизайну комірки та планування руху для кількох роботів, щоб скоротити ручну роботу зі складання металевих панелей. Крім того, Talasaz et al. [17], використовували тактильну дистанційну операційну систему з двома руками «майстер-підлеглий» для вимірювання сили взаємодії між тканиною та інструментом і виявили, що прямий зворотний зв'язок із силою може мінімізувати пошкодження тканин.

Таким чином, система кількох роботів широко використовується для виконання високоточних, великовантажних і складних завдань, демонструючи високу ефективність і бажані ефекти. Калібрування системи з двома роботами в основному вирішує проблему співвідношення координатної матриці рука-око робота, базової координати-бази та інструмент-фланець [18].

Серед них калібрування єдиної роботизованої системи також включає калібрування «рука-око» робота та калібрування фланця інструменту [19]. Таким чином, калібрування базової системи координат двох роботів є основою, передумовою та необхідною умовою для реалізації спільної роботи двох роботів. Для базової системи координат подвійного робота в основному існують два методи калібрування, а саме: контактний і безконтактний.

Безконтактне калібрування зазвичай отримує співвідношення пози подвійних роботів за допомогою зовнішніх датчиків, таких як камери та лазерні трекери. Ren et al., запропонували метод калібрування для 3D-лазерного сенсора і пози робота, і тест показав, що точність калібрування досягла 0,062 мм. Нгуєн і Фам запропонували строгий метод виведення для вирішення коваріації X в задачі $AX = XB$, а A і B є випадковими матрицями збурень.

Результати експерименту показують, що цей метод має хорошу точність у прогнозуванні коваріації трансформації рука-очі. Zhuang et al., запропонували лінійне рішення. Враховуючи трансформацію з базової рами робота на фланцеву раму робота, матрицю перетворення зі світу роботів на базу робота та з координатних рамок робота-інструменту на координатні рамки фланця робота можна отримати, вимірявши позу кінцевого ефектора робота.

Tan et al., перетворили проблему калібрування роботизованої руки та м'якого пальця в проблему $AX = YB$ і порівняли три методи, засновані на нелінійній оптимізації та еволюційних обчисленнях. Крім того, Ruan et al. [20], використовували систему бінокулярного зору і метод теорії перетворення координат для отримання просторового співвідношення між базовою координатою і базовою координатою шліфувальних робіт.

Zhao et al. [21], запропонували метод кінематичного моделювання та калібрування базової рами для автоматичної системи свердління та клепки літальних апаратів. Результати експериментів показали, що точність позиціонування подвійного робота становила 0,1 мм і $0,07^\circ$ відповідно, а після компенсації точність калібрування базової рами після компенсації покращилася з 0,187 мм і $0,052^\circ$ до 0,053 мм та $0,022^\circ$ відповідно.

Fan et al. [22], використовували метод швидкого калібрування базової рами на основі зору, щоб отримати відносну позу координуючого робота шляхом маркування зображень для задоволення вимог калібрування в реальному часі. Результати експериментів показали, що точність цього методу калібрування досягала 2 мм і 0,1. Підводячи підсумок, можна сказати, що X , Y і Z в цих методах отримуються крок за кроком, і в процесі калібрування будуть кумулятивні похибки, що впливає на надійність результатів калібрування.

Для того, щоб зменшити похибки вищевказаних методів калібрування, Wang et al., запропонували ітеративний алгоритм лінійного наближення для вирішення матричного рівняння $AXB = YCZ$, досягаючи одночасного калібрування рука-око, інструмент-фланець і робот-робот для системи з двома роботами. Wu et al., і Ma et al. [23], використовували ітеративні та ймовірнісні методи для одночасного вирішення X , Y та Z у системі з кількома роботами відповідно.

Однак для розрахунку ітераційного методу потрібно багато часу, а ймовірнісний метод серйозно впливає на шумові перешкоди. Wang et al., запропонували новий метод калібрування двох роботів шляхом поєднання методу закритої форми, заснованого на продукті Кронекера, та ітераційного

методу задачі оптимізації опуклої функції. Цей метод підвищив ефективність і точність ітерацій.

Fu et al. [24], запропонували калібрувальну задачу, засновану на алгоритмі розкладання подвійного кватерніона і сингулярного значення, а моделювання і експеримент підтвердили більш високу точність калібрування цього методу. Qin et al., запропонували комбіноване рішення для вирішення невідомих параметрів у рівнянні $AXB = YCZ$ на основі рішення подвійного кватерніона замкнутої форми та ітераційного рішення Левенберга Марквардта (LM), реалізуючи калібрування системи подвійного робота в ортопедичній хірургії.

Хоча ці безконтактні методи калібрування можна автоматизувати, система з двома роботами, яка використовує цей метод, складна з високою вартістю, а похибки вимірювання датчика спричинять похибки калібрування. Ці проблеми обмежують його серійне застосування в промисловому виробництві. Контактне калібрування використовує спеціальні інструменти для допоміжного позиціонування і обчислює відносне позиційне співвідношення базової системи координат.

Gan et al., запропонували метод калібрування базових координат двох роботів тільки з використанням серії операцій «затискання рук» і відповідної спільної інформації. Методи множника Кватерніона і Лагранжа використовуються для проведення ітерації матриці обертання ортогональної нормалізації. Однак, коли використовуються ці методи, процес розрахунку ускладнюється, а ручна операція призведе до збільшення похибки калібрування.

Wang et al. [25], запропонували метод з використанням одиничного кватерніона для калібрування базової системи координат робота, який покращив ортогональність матриці обертання, і цей метод вимірював п'ять різних центральних точок інструменту (TCP), але операція TCP була трудомісткою і неточною.

1.4 Калібрування кінематичної моделі колаборативного резервного робота з використанням замкнутого кінематичного ланцюга

Роботи зробили революцію в обробній промисловості, пропонуючи численні переваги перед традиційними методами, включаючи більшу ефективність, точність і продуктивність. Вони особливо корисні в масовому виробництві, де повторювані завдання можна легко автоматизувати, записуючи та повторюючи певні рухи. Однак програмування роботів для малосерійного виробництва може бути складним і трудомістким, оскільки виробництво, як правило, менше і різноманітніше.

Щоб подолати цю перешкоду, були розроблені стратегії автономного програмування, в яких робот програмується без використання реальної машини. Такий підхід дозволяє значно скоротити час розробки та усунути потребу в програмуванні методом проб і помилок. Однак автономне програмування вимагає точної кінематики робота, щоб гарантувати, що запрограмовані рухи точно виконуються на реальному роботі.

Виробники роботів зазвичай надають номінальні кінематичні моделі своїх роботів з використанням параметрів Денавіта-Хартенберга (ДХ). Однак ці моделі можуть бути не зовсім точними через різні фактори, такі як помилки при виготовленні та складанні. На практиці відсутність точних знань про кінематику роботів і неточності в номінальних моделях можуть обмежити практичне використання роботів в малооб'ємних додатках.

Було розроблено безліч онлайн і офлайн методів, що дозволяють мінімізувати кінематичну похибку і забезпечити більш практичне використання роботів [26]. Спільним для всіх цих методів є те, що для них потрібна еталонна система вимірювань, від якої залежить якість калібрування, як видно з таблиці 1.3, де порівнюються плюси і мінуси найбільш типових систем вимірювання для калібрування.

Таблиця 1.3 – Порівняння різних систем вимірювання для кінематичної ідентифікації [33]

Пристрої	Rep/	МС	Port.	Cost
Теодоліт	5 мм	Статичний	Високий	Середній
Ультразвукові	1 мм	Динамічний	Високий	Низький
Машинний зір	1 мм	Динамічний	Високий	Середній
Лазерний трекер	10 μ m	Динамічний	Високий	Високий
ГЧ MoCap	0.1 мм	Динамічний	Середній	Середній
Штамп	0.1 мм	Динамічний	Високий	Низький

Нещодавні дослідження кінематичного калібрування промислових роботів досліджували різні підходи та технології. Одним з поширених підходів є ітеративна оптимізація, заснована на теорії найменших квадратів, спрямована на підвищення точності калібрування [27]. Інший метод поєднує геометричні принципи з двовекторною алгеброю, забезпечуючи уточнений підхід геометричної та двовекторної алгебри для уточнення кінематичних параметрів [28].

Крім того, була запропонована комбінація геометричних і параметричних методів для вдосконалення процесу калібрування [29]. Дослідники також досліджували альтернативні методи кінематичної ідентифікації параметрів, такі як використання монокулярних камер для оцінки параметрів шляхом аналізу руху робота та відповідних зображень. Індексовані вимірювальні платформи були використані для фіксації конкретних вимірювань рухів робота, допомагаючи ідентифікувати кінематичні параметри.

Крім того, спеціально для гнучких роботів були розроблені моделі помилок з урахуванням деформацій і невизначеностей в структурі робота [30]. Були навіть проведені дослідження щодо ідентифікації кінематичних параметрів для колаборативних роботів на мобільних платформах з використанням систем захоплення руху [31]. З точки зору нових підходів, дослідники представили систему калібрування на основі зору, яка використовує візуальну інформацію для

уточнення кінематичних параметрів у промислових роботизованих маніпуляторах [32].

Ними був запропонований метод, що поєднує геометричний і параметричний підходи для виявлення кінематичних параметрів в промисловому роботі. Крім того, було представлено рішення для точного калібрування завдяки використанню одного телескопічного кульового бруса для абсолютного калібрування робота [34]. Альтернативний підхід до калібрування був досліджений шляхом дослідження некінематичного калібрування шестиосьового послідовного робота з використанням планарних обмежень.

Крім того, був розроблений метрологічний прилад, спеціально для точної ідентифікації та калібрувальних вимірювань роботів. Незважаючи на різноманітний спектр підходів, варто відзначити, що багато хто з цих методів або спираються на дорогі вимірювальні прилади, або не підходять для резервних роботів.

Щоб усунути згадані вище обмеження, запропоновано підхід до кінематичного калібрування, спеціально розроблений для спільних резервних роботів. Методологія даного підходу ґрунтується на використанні кінематичного ланцюга із замкнутим контуром, якому сприяє сферичний з'єднання. У той час як область кінематичного калібрування широко вивчена, більшість переважаючих методів вимагають використання зовнішніх вимірювальних інструментів, таких як лазерні трекери або спеціалізовані механічні пристрої.

На противагу цьому, підхід обходить потребу в такому обладнанні, використовуючи властиві можливості кінематичного ланцюга із замкнутим контуром, поєднаного зі сферичним з'єднанням. Цей ключовий підхід значно пом'якшує фінансовий тягар, пов'язаний з придбанням складних інструментів, водночас гарантуючи, що точність калібрування переважно залежить від точності самого сферичного з'єднання. Примітно, що це не тільки підвищує доступність загального процесу калібрування, але й підвищує портативність системи, роблячи її більш адаптованою для різних робочих налаштувань.

У запропонованому підході кінематичне калібрування колаборативних резервних роботів досягається шляхом левітації кінематичного ланцюга замкнутого циклу. Така конфігурація обмежує рух кінцевого ефектора робота. Щоб зібрати необхідні дані для калібрування, я використовую два методи: ручну генерацію руху за допомогою кінестетичного наведення або заданий рух за допомогою контролера нульового простору. Примітно, що цей підхід дозволяє фіксувати дані з частотою дискретизації робота, що сприяє точному калібруванню.

Збираючи ці вимірювання, можна застосувати метод оптимізації, для точного визначення параметрів Денавіта-Хартенберга (ДХ). На відміну від багатьох існуючих підходів, які зосереджені на корекції кінцевої пози ефектора, запропонований метод спеціально розроблений для резервних роботів, таких як типові колаборативні роботи з 7 ступенями свободи (DOF). Для таких роботів введення корекції в позу кінцевого ефектора стає недоцільним. Тому підхід пропонує відповідне рішення для ефективного калібрування цих роботів та оптимізації їхніх кінематичних параметрів.

1.5 Висновки до першого розділу. Постановка задачі

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає у розробці методу кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні задачі дослідження:

- дослідити наявні методи та засоби кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі;
- виконати оцінку наявних методів;
- провести експерименти з калібрування;
- оцінити ефективність запропонованих методів;
- розібрати моделювання помилок, процедури вимірювання та оптимізація параметрів.

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАНУВАННЯ РУХУ КООПЕРАТИВНОГО РОБОТА

З розвитком суспільства режим виробництва принципово змінився від простого і повторюваного режиму виробництва до режиму багатосортного і дрібносерійного виробництва. Іншими словами, потрібна велика кількість персоналізованих режимів виробництва.

Кооперативні роботи знайшли широке застосування в гнучкому виробництві завдяки своїй легкій рамі та високій гнучкості [35]. Моделювання роботів на виробництві стикається з багатьма проблемами, такими як резервування коду, погана портативність на операційній платформі [36], а також відсутність роботи та симуляції руху в реальному часі в операційній системі робота.

Крім того, процес розробки роботів відрізняється великим навантаженням, високою вартістю і так далі. Robot Operating System (ROS) з відкритим вихідним кодом має такі переваги, як кросплатформність, багатомовна підтримка та повторне використання коду, що забезпечує нам відповідну платформу моделювання.

Водночас із широким використанням роботів в сфері електричного зварювання [37], механічного виробництва та логістиці, симуляційні дослідження роботів можуть відображати їх траєкторію працювати та запобігати непотрібним проблемам, також можуть перевіряють ефективність роботизованого принципу, робочого простору і кінематика.

Є деякі дослідники, які зосереджуються на підвищення точності роботизованої системи керування рухом в промисловому застосуванні, серед яких кінематичне моделювання та розв'язання робота є важливою частиною для визначення руху точність [38].

Для побудови зазвичай використовують дві системи координат: робототехнічна, кінематична модель.

Одна - це система координат ДХ, запропонована Denavit і Hartenberg. Він грає важливу роль у кінематичному моделюванні та вирішенні маніпулятор, але у нього є недолік, тобто поворот системи ДХ між сусідніми стрижнями є розривним під час побудови маніпулятора, тому коли Z вісь двох суміжних систем паралельна, система ДХ має свою особливість.

Іншою системою координат є добуток моделі експонента (РОЕ) з нульовою системою відліку. Модель РОЕ уніфікувала вектори осі руху всіх суглобів в ту саму декартову систему координат. Це потім використовує форму експоненціальних координат для опису обертання твердого тіла та використовує гвинт для опису 6-DOF рух твердого тіла в тривимірному просторі.

2.1 Виявлення параметрів ДХ

Виробник робота зазвичай надає номінальні значення параметрів ДХ або якісь інші дані, які можуть бути використані для розрахунку параметрів ДХ. Однак фактичні параметри робота можуть відрізнитися від номінальних значень через помилки у виготовленні або складанні.

Тому, щоб зменшити похибки позиціонування кінцевого ефектора, необхідно визначити фактичні кінематичні параметри робота, в нашому випадку точні параметри ДХ.

Простим методом обчислення параметрів ДХ є геометричний підхід, заснований на відомих спільних осях і лінійній алгебрі. Якщо припустити, що осі з'єднання $z_i, i = 1, \dots, n$ відомі, параметри можуть мати геометричний підхід, який визначається в два етапи: визначення відносних рамок для кожного суглоба та обчислення параметрів ДХ за допомогою цих двох кадрів.

Процедура є рекурсивною, починається від основи робота і рухається до кінцевого ефектора. Позиція (положення і орієнтація) рамки F_i визначається перетином або найближчими точками прямих, визначених спільними осями z_{i-1} та z_i .

Знаючи рамку F_{i-1} і пряму, на якій лежить вісь наступного шва (z_i), спочатку обчислюємо перетини або найближчі точки прямих, що визначаються z_{i-1} і z_i . Тоді позу кадру F_i визначають наступним чином:

- за визначенням, z_{i-1} являє собою вісь i суглоба;
- початок рамки p' і p_i розташовані в найближчих точках на прямих, що визначаються відповідно z_{i-1} та z_i ;
- вісь x_i може бути визначена від загальної нормі до обох осей зчленування. Вона знаходиться в напрямку p' і p_i ;
- вісь y_i безпосередньо визначається, як тільки відомі z_i і x_i , $y_i = z_i \times x_i$. Після обчислення рамок координат F_{i-1} та F_i параметри ДХ, що використовуються для опису кожного перетворення ${}^{i-1}T_i$, обчислюються наступним чином:

- кут θ_i між осями x , x_{i-1} і навколо осі z , z_{i-1} ;

$$\theta_i = \text{atan2}((x_{i-1} \times x_i) \cdot z_{i-1}, x_{i-1} \cdot x_i) \quad (2.1)$$

- відстань d_i між початком p_{i-1} і p' (до загальної нормі);

$$d_i = (p_i - p_{i-1}) \cdot z_{i-1} = (p' - p_{i-1}) \quad (2.2)$$

- відстань a_i між початком координат p' і p_i (довжина спільної нормалі);

$$a_i = (p_i - p_{i-1}) \cdot x_i = (p_i - p') \quad (2.3)$$

- кут α_i між осями z , z_{i-1} та z_i навколо осі x , x_i (загальна нормаль);

$$\alpha_i = \text{atan2}((z_{i-1} \times z_i) \cdot x_i, (z_{i-1} \cdot z_i)) \quad (2.4)$$

Припускаючи, що положення кадру кінцевого ефектора F_E описуваний 0T_E також відомий і використовує матриці перетворення ${}^{i-1}T_i$ отримане раніше, тоді отримуємо:

$${}^{n-1}T_n(a_n, \alpha_n, d_n, \theta_n) = \left(\prod_{i=1}^n {}^{i-1}T_i(q_i) \right)^{-1} {}^0T_E ({}^nT_E)^{-1}. \quad (2.5)$$

Оскільки ${}^{n-1}T_n$ має форму, n -й набір параметрів ДХ може бути обчислений безпосередньо за формою ${}^{n-1}T_n$.

Вісь обертання для обертових з'єднань може бути легко визначена шляхом обертання тільки одного суглоба за раз [39,40]. Вимірявши 3D просторове положення точки, отримаємо множину 3D точок в просторі $p_i, i = 1, \dots, n$. Отриманий набір даних точок потім підганяють до кола, рисунок 2.1.

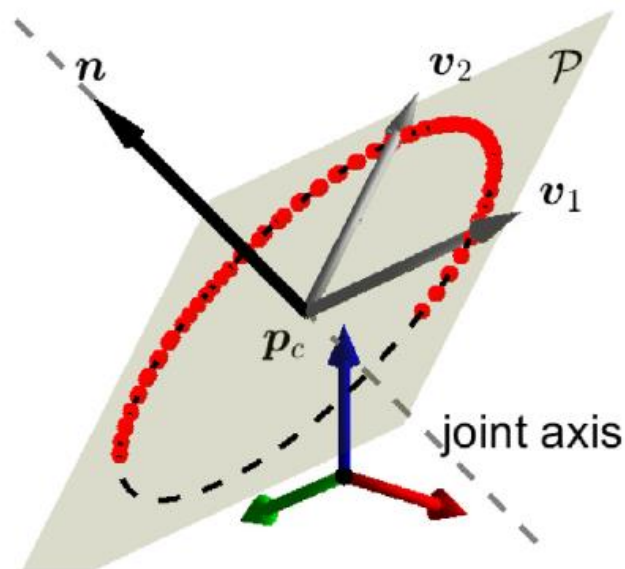


Рисунок 2.1 – Захоплені 3D точки (червоні точки), що визначають коло, центральну точку і нормаль

Використовуючи рівняння (2.6) – (2.9) можна обчислити лише набори параметрів ДХ $(a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i), i = 1, \dots, n - 1$. Останній набір параметрів $(a_n, \alpha_n,$

$dn, \theta n$) можна обчислити за допомогою (2.1). Дійсно, розумно припустити, що один знає ${}^n T_E$.

Серед різних доступних методів [39,41] було використано загальний підхід, заснований на сингулярному розкладанні значень (SVD). Нехай, площина h представлена нормаллю n і довільною точкою на площині p_p . Без втрати загальності, буде використовуватися в якості точки на площині центроїд всіх точок

$$p_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i . \quad (2.6)$$

Щоб знайти нормаль, треба мінімізувати ортогональну відстань між множиною точок і площиною P .

$$h_i = (p_i - p_p) \cdot n . \quad (2.7)$$

Використовуючи норму Фробеніуса, визначимо проблему як:

$$n = \arg \max_n \|Pn\|^2 , \quad (2.8)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_1 - p_p \\ \vdots \\ p_n - p_p \end{bmatrix} . \quad (2.9)$$

Використовуючи SVD, потрібно розкласти P на множники:

$$P = U \Sigma V^T , \quad (2.10)$$

де Σ – діагональна матриця з сингулярними значеннями σ_i , $i, \dots, 3$, за спаданням. Оскільки \mathbf{U} є унітарною матрицею, задача зводиться до

$$\mathbf{n} = \arg \max_{\mathbf{n}} \|\Sigma \mathbf{V}^T \mathbf{n}\|^2 = \arg \max_{\mathbf{n}} \sum_{i=1}^3 \sigma_i (\mathbf{V}^T \mathbf{n})_i. \quad (2.11)$$

Оскільки найменше сингулярне значення в Σ є останнім компонентом σ_3 , то рішення таке:

$$\mathbf{n} = \mathbf{V}[0, 0, 1]^T \quad (2.12)$$

2.2 Параметри кінематичної моделі

Серійний робот-маніпулятор складається з ланок, з'єднаних з'єднаннями. Суглоби можуть бути різних типів і мати одну або кілька ступенів свободи (DOF). Однак, оскільки більшість сучасних роботів використовують тільки поворотні з'єднання, припустимо, що робот має тільки поворотні з'єднання з однією глибиною DOF.

Для кінематичного аналізу до кожної ланки додається система координат. Зокрема, рамка F_i з координатами p_i та осями орієнтації (x_i, y_i, z_i) з'єднаний із ланкою i , а з'єднання i з'єднує кадри F_{i-1} та F_i . Зауважте, що F_0 представляє базову раму робота, а F_n підключений до кінцевого блоку робота.

Перетворення між фреймів F_{i-1} та F_i виражається однорідним перетворенням матриця ${}^{i-1}T_{i(q_i)}$, де q_i – загальна змінна (позиція). Таким чином, перетворення між базовим роботом і кінцевим ефектором подано як:

$${}^0T_E(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_E & p_E \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = {}^0T_n(\mathbf{q}) {}^nT_E = \left(\prod_{i=1}^n {}^{i-1}T_i(q_i) \right) {}^nT_E, \quad (2.13)$$

Де видно, що nT_E є фіксованою матрицею перетворення між фланцем робота і кадром кінцевого ефекту F_E . Оскільки поза кінцевого ефектора є положення та орієнтація рамки кінцевого ефектора F_E , наступне рівняння представляє пряму кінематику, що відображає спільні змінні q по кінцевого ефектора, а також може бути записана у формі:

$$f(q) = \{p_E(q), Q_E(q)\} \quad (2.14)$$

де p – позиція кінцевого ефектора, а Q – кватерніон що представляє орієнтацію кінцевого ефектора \mathbf{R} .

Для обчислення прямого кінематичного Eq були запропоновані різні моделі. Однак найбільш часто використовуваним підходом є конвенція Денавіта-Хартенберга (ДХ), яка забезпечує мінімальне представлення та інтуїтивний метод визначення її параметрів за допомогою лінійної алгебри.

Згідно з конвенцією ДХ, осі z дорівнюють рівнянні F_i з відповідними з'єднаннями, а осі x паралельні загальній нормалі послідовних осей з'єднань, як показано на рисунку 2.2.

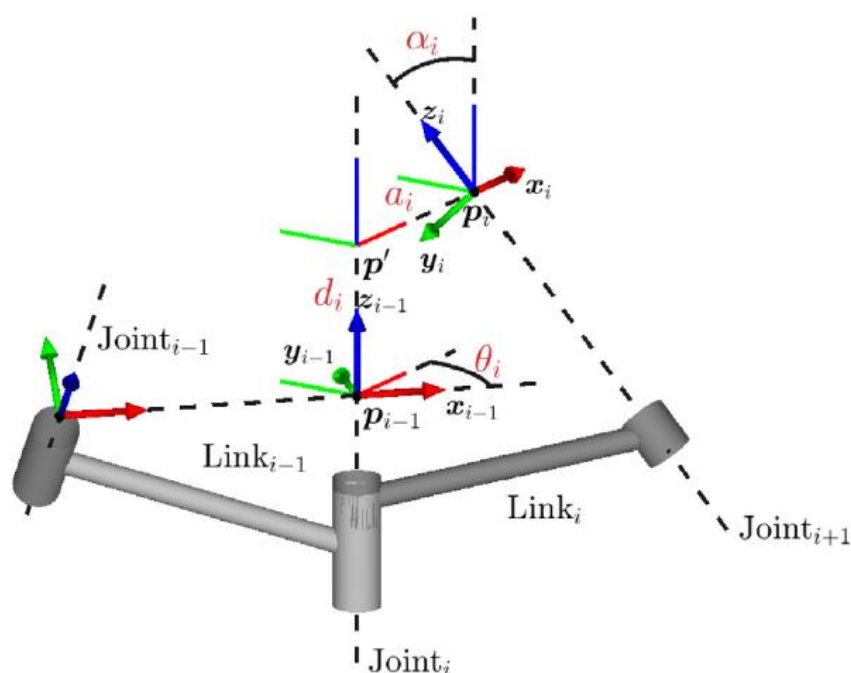


Рисунок 2.2 – Параметри ДГ для серійних роботів-маніпуляторів

Тоді для визначення перетворення використовується набір з чотирьох параметрів a, α, d та θ використовуються для визначення перетворення ${}^{i-1}T_i$.

$${}^{i-1}T_i(q_i) = \text{Rot}_{z_{i-1}}(\theta_i) \cdot \text{Trans}_{z_{i-1}}(d_i) \cdot \text{Trans}_{x_i}(a_i) \cdot \text{Rot}_{x_i}(\alpha_i), \quad (2.15)$$

де $\text{Trans}_a(\cdot)$ і $\text{Rot}_a(\cdot)$ представляють переклад і обертання вздовж вектора a , відповідно. Матриця перетворення ${}^{i-1}T_i$ є функцією спільної змінної q_i , для обертового суглоба q_i відповідає θ .

Отже, θ_i насправді є зміщенням спільної змінної q_i . Отже, отримуємо

$${}^{i-1}T_i(q_i) = \begin{bmatrix} \cos(\hat{q}_i) & -\cos(\alpha_i) \sin(\hat{q}_i) & \sin(\alpha_i) \sin(\hat{q}_i) & a_i \cos(\hat{q}_i) \\ \sin(\hat{q}_i) & \cos(\alpha_i) \cos(\hat{q}_i) & -\sin(\alpha_i) \cos(\hat{q}_i) & a_i \sin(\hat{q}_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

$$\hat{q}_i = q_i + \theta_i. \quad (2.17)$$

2.3 Імітаційний експеримент

Буде побудовано та відображено сцену, включаючи її частину за допомогою шурупів і столика у вільно доступній Альтанці. Альтанка передбачає найголовніше, це три об'єкти, сферу, циліндр і куб, і вибравши об'єкти, наданих у редакторі моделей, можна побудувати просту сцену.

У редакторі моделей було обрано стіл, кубоїд і шість циліндрів, та розмістив їх по черзі формуючи відносно просте середовище моделювання, як показано на рисунку 2.3(б) Ця сцена імітує процес складання руки робота та положення деталі точка за точкою. Розмір частин 600x500x500 мм. Є вісім позицій частини для руки робота імітації установки гвинта в послідовності (1) > (8) > (4) > (5) > (3) > (6) > (2) > (7), як показано на рисунку 2.3(а).

Планування траєкторії є метою проектування траєкторії. За умови забезпечення точності розподілу завдань кінцевий ефектор робота максимально працює за заданою траєкторією. У декартове планування космічної траєкторії зазвичай включається лінійне і кругове планування, тому необхідно розрахувати зміну положення робота з часом в кінці функції.

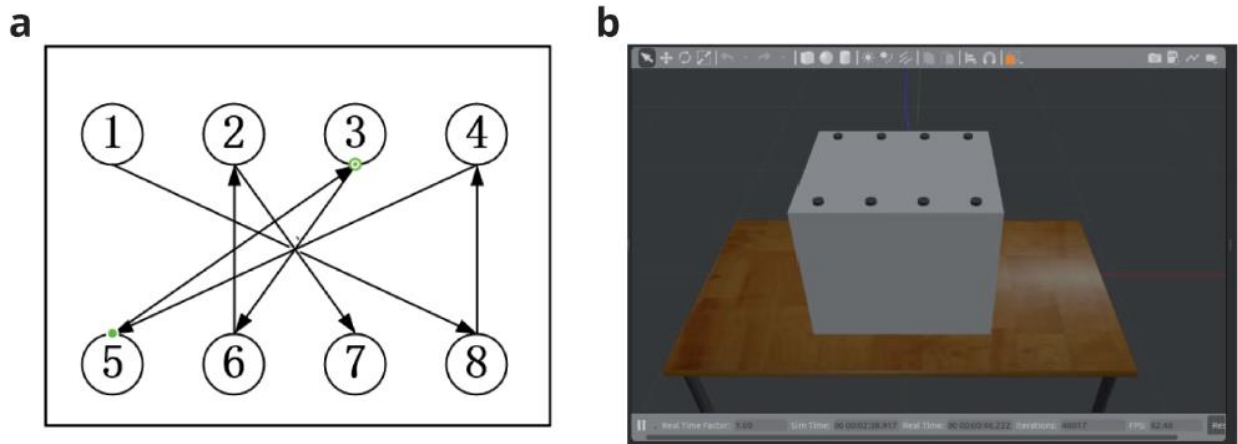


Рисунок 2.3 – Сценарій імітації та відображення шляху. а) шлях встановлення, б) компонентна модель

Крім того, в процесі обробки складних поверхонь роботу необхідно використовувати інтерполяцію алгоритму планування траєкторії при визначенні шляху обробки. У процесі роботи необхідно планувати траєкторію руху кінцевого ефектора маніпулятора. Оскільки траєкторія в процесі руху є лінійною, траєкторія інтерполюється для досягнення розумного планування.

Планування прямолінійної траєкторії. Взявши обидві кінцеві точки кожного контуру як початкову та кінцеву точки кінцевого ефектора. Для прикладу перший шлях (1)>(8). Початкова точка (1) $P_s = (x_1, y_1, z_1)$, кінцева точка (8) $P_g = (x_2, y_2, z_2)$, інтерполяція проводиться з інтервалом в 0,01 в процесі кроку. Відстань між початковими точками і кінцеві точки це $L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$, може обчислити час інтерполяції це $N = \frac{L}{0.01}$, тому інтерполяційні формули для кожного напрямку показані від рівняння (2.18) до рівняння (2.20) [42]:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{x_2 - x_1}{N} \times i \quad (0 < i < N) \quad (2.18)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{y_2 - y_1}{N} \times i \quad (2.19)$$

$$z_{i+1} = z_i + \frac{z_2 - z_1}{N} \times i \quad (2.20)$$

У процесі від початкової точки P_s до кінцевої точки P_g буде обчислена обернена кінематика кожної інтерполяції і кут інтерполяції кожного з'єднання.

Для того, щоб виконати завдання по збірці, потрібно знати положення кожної точки щодо основи робота. Вісім точок розташовані на одній горизонтальній площині в процесі складання на рисунку 2.3(б). Було взято для прикладу перший шлях з (1)>(8), позиція (1) дорівнює $P_1 = (0.3, -0.225, 20)$, а позиція (8) $P_2 = (0.3, -0.225, 20)$.

Положення кінцевого ефектора по відношенню до основи може бути представлено 0_6T за допомогою перетворення системи координат. Під час процесу кінцевий ефektor рівномірно перпендикулярний поверхні заготовки, тому n, o, a в 0_6T потрібно встановити заздалегідь і залишитися незмінним.

Тим часом, для того, щоб реалізувати інтерполяцію лінії, нам потрібно лише змінити значення параметрів p_x, p_y, p_z в 0_6T які отримані за допомогою рівнянь від (2.18) до (2.20).

2.4 Моделювання ROS

У ROS можна обчислити кут кожного суглоба з часом за допомогою аналізу зворотної кінематики та керування рухом роботів з MoveIt!. У той же час можна

писати кутові змінні шести суглобів робота, ввівши команду “Rqt_plot” у терміналі Ubuntu.

У симуляції було використано два методи керування рухом робота. Один – відкритий швидко вивчаючий алгоритм випадкового дерева (RRT) [43], це було передбачено для усунення перешкод і завершення планування шляху автоматично. Інший – прямолінійне планування траєкторії інтерполяції.

Зміна кут кожного з’єднання, коли робот послідовно встановлює гвинт $(1) > (8) > (4) > (5) > (3) > (6) > (2) > (7)$, показано на рисунку 2.4(a), траєкторія кінцевого ефектора з використанням алгоритму інтерполяції показана на рисунку 2.4(б).

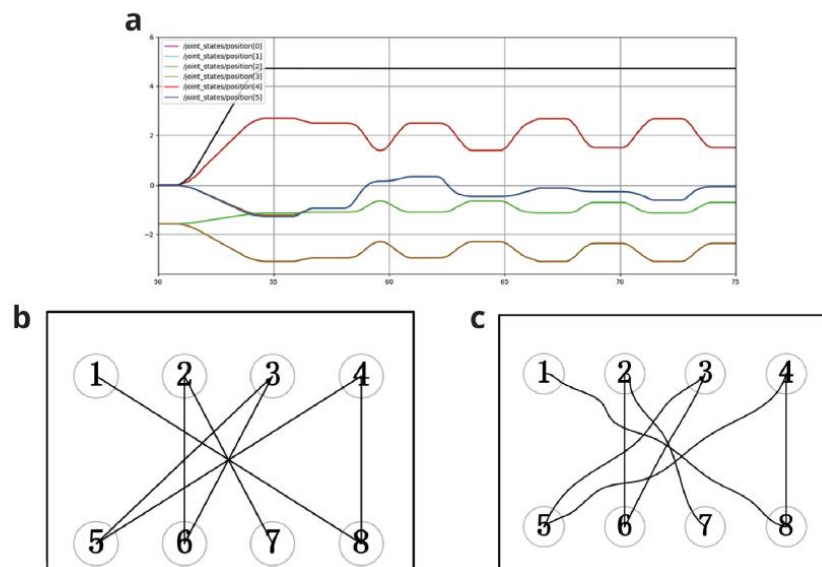


Рисунок 2.4 – Результат моделювання, де а) варіаційні криві з’єднаного кута з використанням алгоритму інтерполяції [44], б) траєкторію руху кінцевого ефектора з використанням алгоритму інтерполяції, (с) траєкторію кінцевого ефектора з використанням алгоритму швидкого дослідження випадкового дерева (RRT)

Порівнюючи рисунок 2.4(б) і рисунок 2.4(с), траєкторія кінцевого ефектора за допомогою алгоритму RRT, наданого MoveIt! може гарантувати, що кінцевий ефектор досягне ключових точок.

Але шлях випадковий і нестабільний, тому траєкторія кінцевого ефектора за допомогою алгоритму інтерполяції може рухатися по прямій лінії в більшій мірі між двома точками, зі стабільними результатами шляху та вищою точністю досягнення ключових точок.

2.5 Висновки до другого розділу

У промисловому застосуванні роботів, коли операція вимагає певного ступеня точності та керованості шляху, можна використовувати метод інтерполяції, запропонований у цій роботі, щоб задовольнити вимоги.

Дані варіаційних кривих суглобів свідчать про те, що вдосконалений метод ДХ ефективно покращує стабільність і точність траєкторії руху кожного суглоба. Результати моделювання дають основу для реалізації роботом більш гнучкого планування руху.

В цьому розділі було використано наступні базові дані (всі файли можна відкрити в ROS):

- базові дані кінематичного аналізу та моделювання планування руху кооперативних robot.xlsx (зміна шести кутів з'єднання з часом під час роботи кінцевого);
- aubo_description.rar (файл URDF та пов'язана з ним конфігурація моделі робота для імітаційного експерименту, яка в основному визначає зв'язок та з'єднання, включаючи інформацію про межі, інформацію про колізії, інформацію про інерцію, інформацію про візуальну залежність між Visual та Link);
- aubo_i5_moveit_config.rar (файл конфігурації, згенерований асистентом налаштування, що дозволяє керувати роботом у MoveIt!. Ці конфігураційні файли включають матрицю самозіткнення, список віртуальних суглобів, визначення групи планування, позу маніпулятора, список кінцевих ефекторів і пасивних суглобів);

- aubo_gazebo.rar (файл конфігурації, який включає робота, відображається в Альтанці);
- work_gazebo.rar (файл конфігурації, який включає деталь, відображається в Альтанці).

3 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ КІНЕМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТІВ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ

Мультироботизовані системи можуть виконувати більш складні завдання з високою точністю та великими навантаженнями, ніж системи з одним роботом. Калібрування базової системи координат є основою та передумовою для забезпечення спільної роботи між двома роботами.

У цьому дослідженні була створена система калібрування двох роботів, заснована на компонентах калібрувального інструменту, яка могла швидко і точно отримати взаємне положення між подвійними роботами. На основі трьох опорних точок вимірювання ортогонального розподілу в системі координат калібрувального інструменту було встановлено картографічну залежність між відстанню від контрольної точки вимірювання до кінцевої точки робота та параметрами базової системи робота, а також запропоновано метод швидкого рішення для калібрування параметрів базової системи двох роботів, заснований на «калібруванні триточкового вимірювання».

Результати експерименту показують, що цей метод дозволяє швидко і точно отримати відношення перетворення між подвійними базовими системами координат робота. Точність і ефективність калібрування були значно покращені. Він має велике значення для задоволення вимог високої ефективності, низької вартості та простоти експлуатації в процесі заводського застосування.

3.1 Експериментальна ідентифікація параметра ДХ

Мета полягала в тому, щоб перевірити, що параметри ДХ колаборативного робота Franka Emika Panda відповідають специфікаціям. Щоб оцінити параметри кінематичної моделі робота, необхідно виміряти положення суглобів і пози в робочому просторі.

Крім того, було показано, що можна відкалібрувати робота в його робочому середовищі. Тому використано робота, якого встановлено на мобільній

платформі. Хоча мобільна платформа не повинна була рухатися під час процесу калібрування, деякий рух мобільної платформи та монтажної пластини робота може відбуватися через механічну структуру всієї системи (наприклад, через підвіску коліс).

Було виміряно не тільки позу кінцевого ефектора робота, але й позу бази робота. Експериментальна установка складається з робота Franka Emika Panda, встановленого на пластині на мобільній платформі PAL Tiago-base. Щоб виміряти положення основи робота, блоуло встановлено на пластину шість маркерів. Робот був оснащений спеціально розробленим інструментом з маркерами, прикріпленими до кінцевого ефектора.

В якості зовнішньої системи вимірювання було використано оптичну систему захоплення руху (MoCap) [58], як показано на рисунку 3.1. Робот управляється системою управління на основі Matlab і ROS, що дозволяє легко програмувати рух і отримувати стани робота.

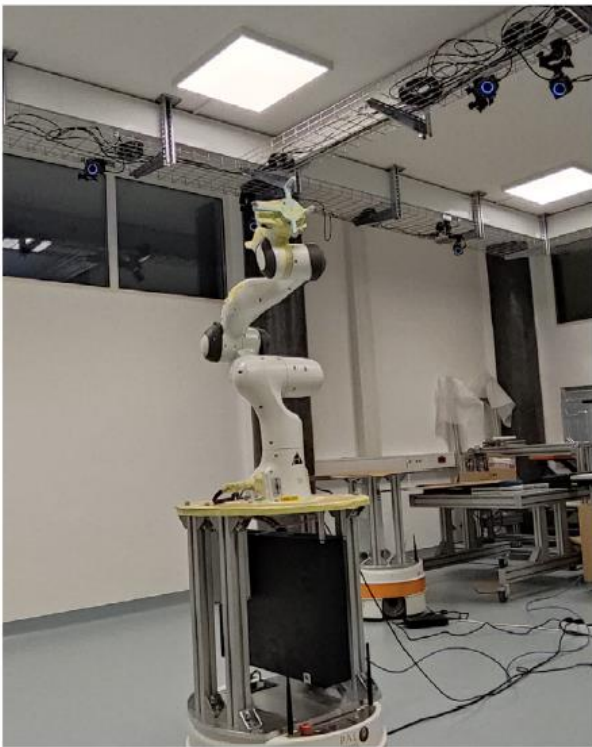


Рисунок 3.1 – Робот МоСар з маркерним інструментом (ліворуч), ПЧ-зображення, зняте камерою МоСар (праворуч) [58]

Фактичне положення інструменту в декартовому просторі було виміряно за допомогою системи MoCap. Зокрема, було використано пасивну систему OptiTrack на основі маркерів, яка може локалізувати положення маркерів і відстежувати їх рух у просторі в режимі реального часу. Впроваджена система MoCap складається з 16 ІЧ-камер Prime 13 Вт, які розташовані по всьому простору, щоб охопити діапазон вимірювань, що перевищує робочий діапазон робота.

В експерименті використовувалось десять маркерів діаметром 14 мм, які розміщуються на базі робота та на інструменті робота. При правильному калібруванні система OptiTrack має точність вимірювання положення маркера вище $\pm 0,3$ мм в об'ємі вимірювання [45]. Він може захоплювати положення маркерів з частотою до 240 Гц.

За допомогою системи OptiTrack жорстке тіло може бути визначене як скупчення трьох або більше фіксованих маркерів на об'єкті, з'єднаному один з одним, де відстань від маркера до маркера не виходить за межі допустимого допуску. При жорсткому тілі система може вимірювати позу (положення та орієнтацію) з кращою точністю (до $\pm 0,15$ мм).

Щоб оцінити кінематичну модель, нам потрібно визначити положення кінцевого елемента робота в рамі робота, яка загалом вирівняна з основою робота. Під час калібрування системи MoCap, було визначено оптичну рамку, яку можна використовувати як світову рамку без втрати загальності. Оскільки вона F_w не вирівняна з робота, нам потрібно визначити відображення між фреймом світу каркас робота.

Щоб визначити положення бази робота у світовому просторі було оснащено базу робота шістьма маркерами на певних позиціях, зображених на рисунку 3.2., і визначено віртуальне тверде тіло MoCap. Ці маркери використовувались для визначення положення основи робота (початок F_0). Використання позицій маркерів $M_1 M_2 M_5$ та M_6 як вхідних даних для рівнянь (3.11)–(3.17), потім отримуємо площину основи робота P_0 та її нормаль z_0 .

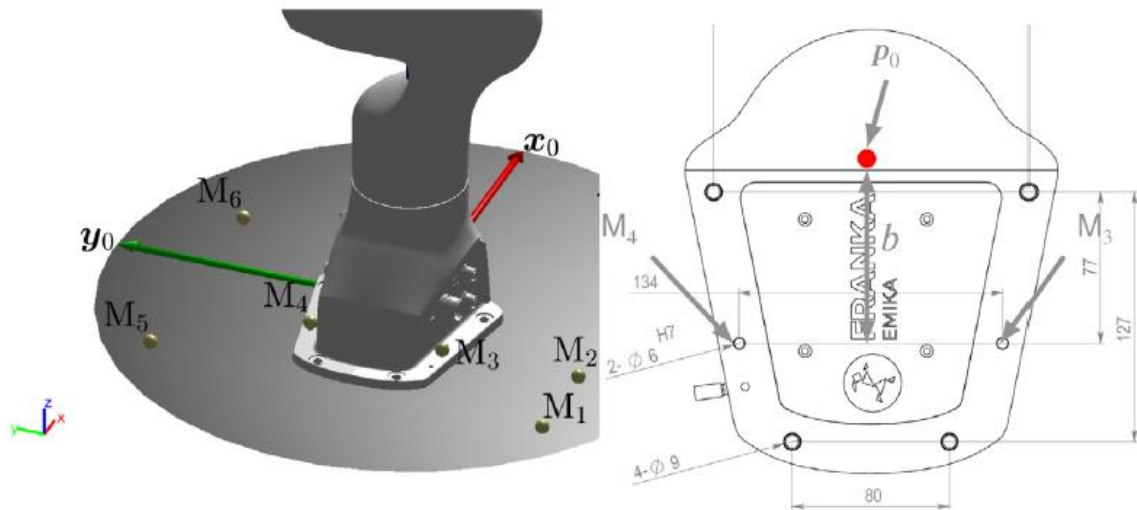


Рисунок 3.2 – Маркери та рама кузова на базі робота (ліворуч); Слід робота з розташуванням маркерів M_3 та M_4 локації та походженням бази робота p_0 (праворуч)

Маркери M_3 та M_4 , розміщені на двох прецизійних отворах кріпильної пластини робота (паралельно площині основи), визначають положення p_0 і обертання основи робота [45]:

$$y_0 = \frac{p_{M_4} - p_{M_3}}{\|p_{M_4} - p_{M_3}\|}$$

$$x_0 = y_0 \times z_0$$

$$p_0 = \frac{p_{M_3} + p_{M_4}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + b x_0 \quad (3.1)$$

де b — зсув початку рами робота від прецизійних отворів. Оскільки виробник робота не вказав цей зсув, мені довелося оцінити його самому.

Потім захоплені позиції ${}^w p$ можуть бути відображені на рамі робота за допомогою:

$${}^0p = {}^0T_W {}^Wp \quad (3.2)$$

В рівнянні (3.2) показана матриця перетворення, що представляє відображення від кадру світу F_W до базового кадру робота F_0 , визначається як:

$${}^0T_W = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & p_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.3)$$

Також, позиції маркерів, які використовуються для розрахунку 0T_W , визначені у світовій рамці.

Крім того, можна перевірити положення рами робота p_0 і орієнтацію осі z_0 за допомогою осі обертання першого суглоба a_1 і при необхідності виправити її. А саме, перетин осі обертання першого суглоба з площиною підстави P_0 є правильним початком базування роботи, а вісь обертання першого суглоба a_1 повинна бути суміщена з z осями рами F_0 . Якщо це не так, то матрицю трансформації 0T_W доводиться виправляти:

$${}^0T'_W = \begin{bmatrix} {}^0R'_0 & {}^0p'_0 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}^{-1} {}^0T_W \quad (3.4)$$

де ${}^0p'_0$ – точка перетину осі суглоба a_1 з площиною P_0 , виражений у кадрі F_0 і ${}^0R'_0$ — це матриця обертання, яка обертає вісь $z = [0,0,1]^T$ так, щоб вона була вирівняна з a_1 , яку можна обчислити використовуючи формулу обертання Родрігеса

$${}^0R'_0 = \mathbf{I} + [\mathbf{v}]_{\times} + (1 - \cos \varphi) \frac{[\mathbf{v}]_{\times}^2}{\|\mathbf{v}\|^2}, \quad \mathbf{v} = \mathbf{z}_0 \times \mathbf{a}_1, \quad \cos \varphi = \mathbf{z}_0 \cdot \mathbf{a}_1, \quad (3.5)$$

Де $[\cdot]_{\times}$ – кососиметричний оператор.

На практиці не завжди є можливість розмістити маркери на кріпленні пластини в такій конфігурації, що вони визначають позу робота рамка F_0 . Іноді навіть неможливо визначити базову площину P_0 . Без відомого положення F_0 , тоді потрібно оцінити параметри ДХ d_1 та θ_1 .

У цьому випадку було використано маркери, закріплені на основі робота щоб визначити допоміжний фрейм F_A і відповідне перетворення матриці ${}^A T_W$. Звичайно, це не правильна матриця перетворення світу у кадрі робота. Його потрібно доповнити трансформацією в базову раму робота:

$${}^0 T_W = \begin{bmatrix} {}^A R_0 & {}^A P_0 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}^{-1} {}^A T_W \quad (3.6)$$

Якщо припустити, що фактичні параметри d_1 та θ_1 дорівнюють номінальних параметрів, то потрібно визначити ${}^0 p_A$ з осей обертання перших двох суглобів a_1 та a_2 . Як уже пояснювалося, вісь обертання першого шарніра a_1 є віссю z рами F_0 . Припускаючи, що a_1 і a_2 не є паралельними, випливає, що ${}^0 p_A$ знаходиться на відстані d_1 від спільної нормалі між a_1 і a_2 .

Використовуючи рівняння отримуємо найближчі точки c_1 і c_2 на осях обертання a_1 і a_2 . Потім:

$${}^A p_0 = {}^A c_1 - d_1 {}^A a_1 \quad (3.7)$$

де d_1 - номінальне значення параметра ДХ. Орієнтацію F_0 можна визначити за допомогою рівняння (3.6) і номінального значення параметра ДХ θ_1 . Коли осі з'єднань a_1 і a_2 перпендикулярні, матриця обертання виглядає так:

$${}^A R_0 = [({}^A a_2 \times {}^A a_1), ({}^A a_1 \times ({}^A a_2 \times {}^A a_1)), {}^A a_1] \quad (3.8)$$

Мобільна платформа, на якій був встановлений робот, не повинна була рухатися під час вимірювань. Однак через механічну будову мобільної платформи все ж таки спостерігалось невелике переміщення бази робота щодо нерухомої рами світу. На рисунку 3.3 показані відхилення положення та орієнтації бази робота під час експерименту.

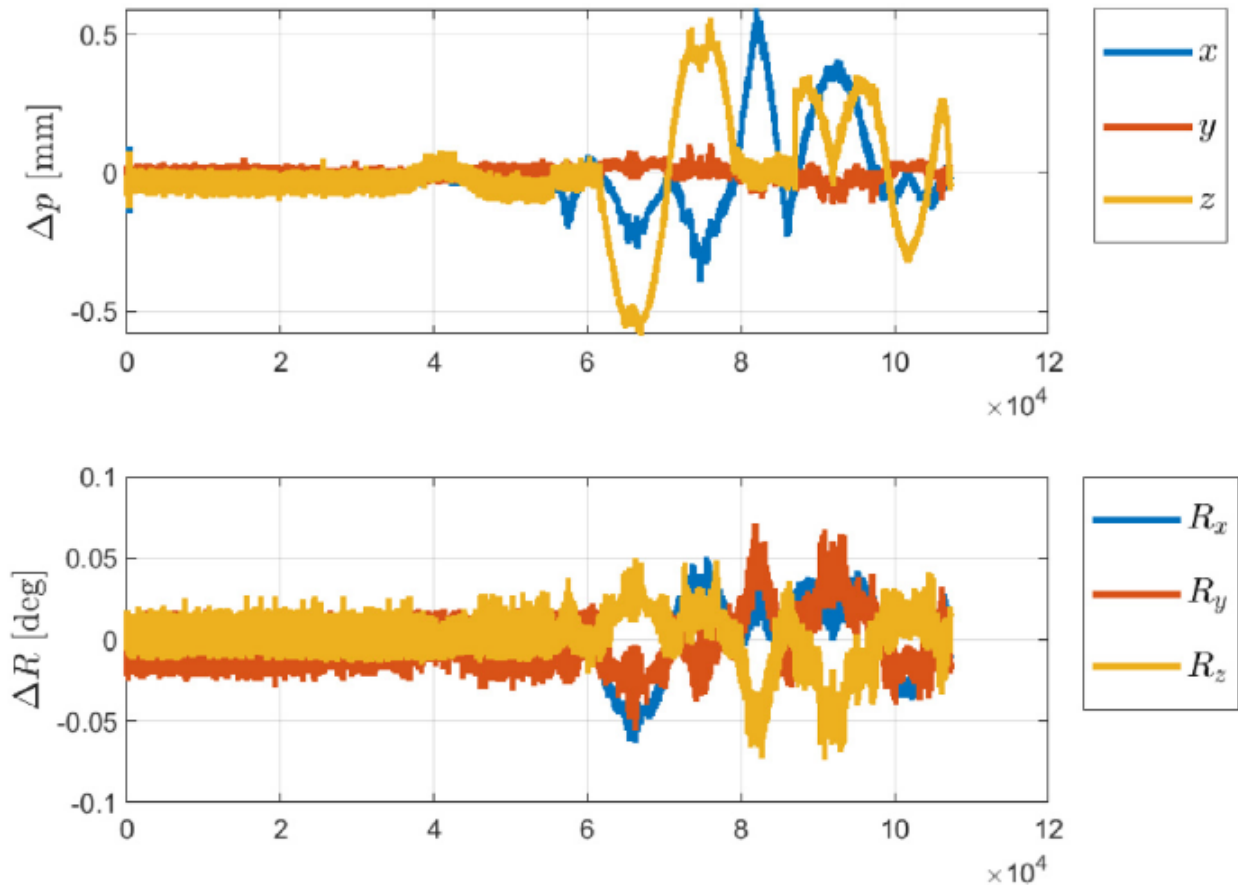


Рисунок 3.3 – Відхилення положення та орієнтації бази робота під час вимірювання

Під час вимірювання можуть спостерігатися невеликі відхилення, так як платформа не дуже жорстка. Відхилення були більшими, коли нижчі (більш важкі) ланки переміщуються. Щоб компенсувати ці відхилення, було розраховано матрицю трансформації 0T_w для кожного зразка.

На рисунку 3.3 показано, що шум вимірювання системи OptiTrack нижче 0,1. Це відповідає результатам [46], де повідомляється, що система OptiTrack забезпечує точність вимірювань нерухомих маркерів нижче 0,1 мм і середнє

стандартне відхилення нижче 0,05 мм. Також, на рисунку 3.3 показано переміщення майже нерухомі маркери (принаймні перші 50 000 зразків).

Було використано три схеми руху для оцінки параметрів ДХ на досвіді, а потім перевірено виявлені параметри ДХ. Для геометричної оцінки параметрів створено траєкторії, в яких одночасно рухався лише один суглоб, що призвело до кругової траєкторії відстежуваної точки (так званої С-траєкторії). Було використано стратегію спільного контролю позицій.

Рух суглоба відбувався на низькій швидкості (~10% від максимальної швидкості робота), а амплітуда рухів включала майже весь доступний діапазон суглобів. Під час цього руху інші суглоби знаходилися в фіксованих положеннях в оптимальній конфігурації по відношенню до зовнішніх впливів на точність вимірювань.

На рисунку 3.4(a) показані положення суглобів для траєкторії С. У зв'язку з тимчасовим масштабом і більш швидкими рухами до оптимальної конфігурації перед кожною послідовністю, ця частина руху може виглядати на рисунку 3.4(a) як стрибок у позиціях.

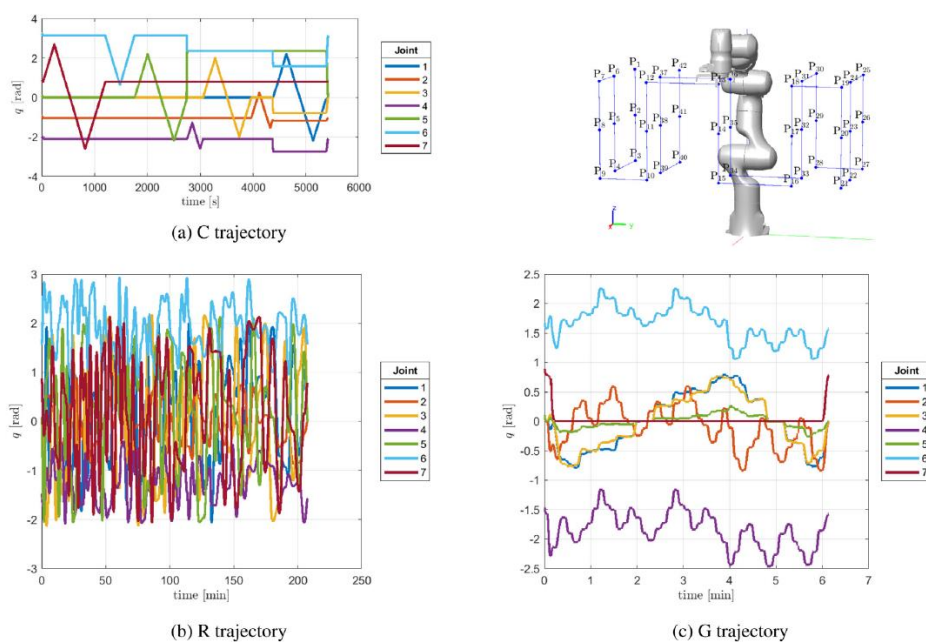


Рисунок 3.4 – Три схеми руху, (a) спільна траєкторія, що призводить до кругового руху кінцевого ефектора робота; (b) спільна траєкторія через випадкові точки та (c) траєкторія простору завдань через сітку точок

Другий тип руху використовувався для перевірки, а також для оцінки параметрів ДХ шляхом оптимізації. Робот переміщався між 80 випадковими конфігураціями по всьому робочому простору робота (так звана R-траєкторія). Рисунок 3.4(б) показані положення суглобів для R-траєкторії.

Нарешті, визначено сітку з 42 декартових точок простору з відстанню між точками 0,2 м або 0,3 м, розподіленими в робочій області робота. Траєкторія була визначена таким чином, що шлях проходив через всі ці точки (так звана G-траєкторія), як показано на рисунку 3.4(с).

3.2 Принципи калібрування робота

На платформі для спільної роботи з кількома роботами, роботи мають працювати спільно. Тому необхідно отримати позиційні відносини між роботами. При будівництві платформи для спільної роботи через велику вагу та розмір робота, траси робота та інших компонентів будуть відхилення від запроєктованого розміру установки, тому необхідно калібрувати робота після завершення встановлення.

Спільна платформа з кількома роботами, використана в цьому розділі, в основному складається з двох промислових роботів, двох робото-гусениць і поворотного столу для заготовок, рисунок 3.5. Замінюючи кінцевий інструмент робота, спільна платформа може реалізувати такі функції, як фрезерування роботом, зварювання, вимірювання та складання.

Калібрування системи координат робота-інструменту безпосередньо пов'язане з позицією інструменту, що може вплинути на точність обробки або складання деталей роботом. Функція калібрування TCF полягає в навчанні робота до вершини калібрувального стрижня та отриманні матриці перетворення пози з системи координат інструменту до кінця тіла робота за відомою системою координат інструменту Ейлера, кутом положення та кутами з'єднання робота, а також іншою інформацією.

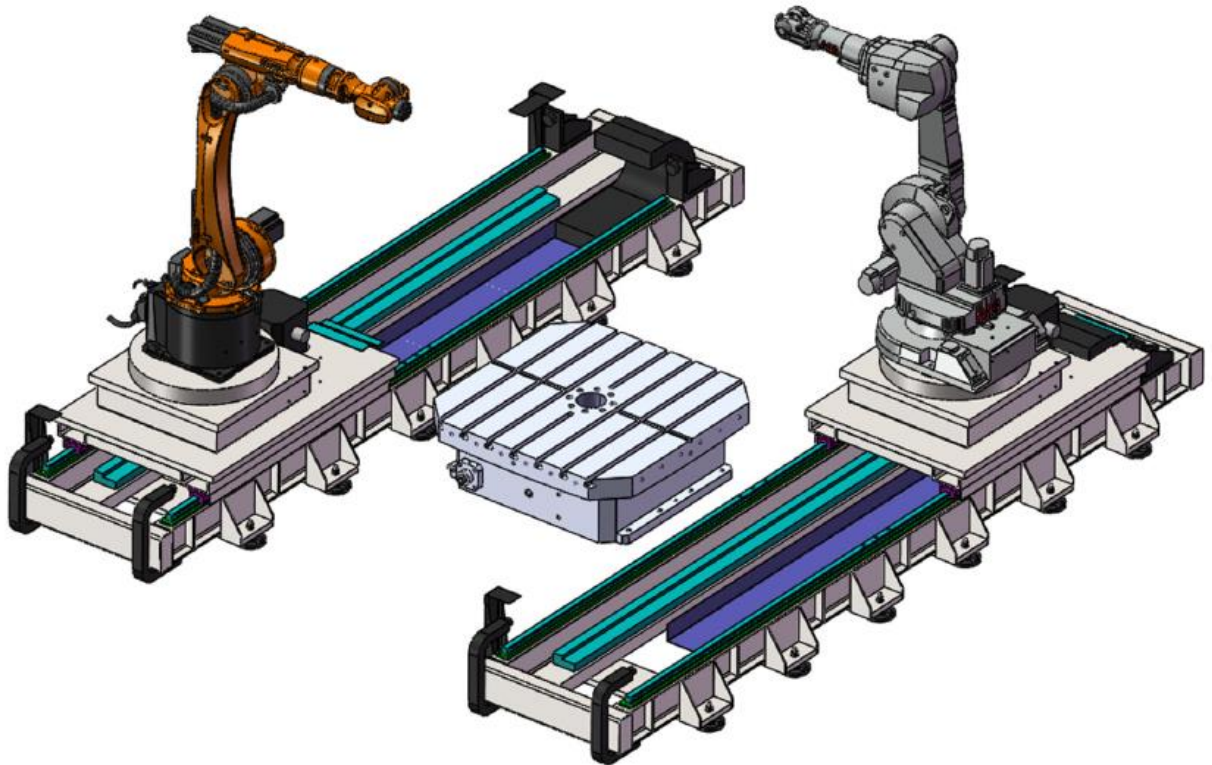


Рисунок 3.5 – Принципова схема спільної роботи двох роботів

Як показано на рисунку 3.5, що визначає систему координат інструменту робота як $\{T\}$, система координат кінця фланця корпусу як $\{E\}$, а базова система координат як $\{B\}$.

Залежність перетворення системи координат виглядає наступним чином:

$$H_E^T = \left(H_B^E \right)^{-1} H_B^T \quad (3.9)$$

У формулі H_B^T є матрицею перетворення інструментальної системи координат $\{T\}$ відносно базової системи координат робота $\{B\}$ H_B^E — це матриця перетворення кінцевої системи координат фланця робота $\{E\}$ відносно базової системи координат $\{B\}$, а H_E^T — це матриця перетворення системи координат інструменту робота $\{T\}$, яку потрібно отримати відносно до системи координат кінця фланця $\{E\}$.

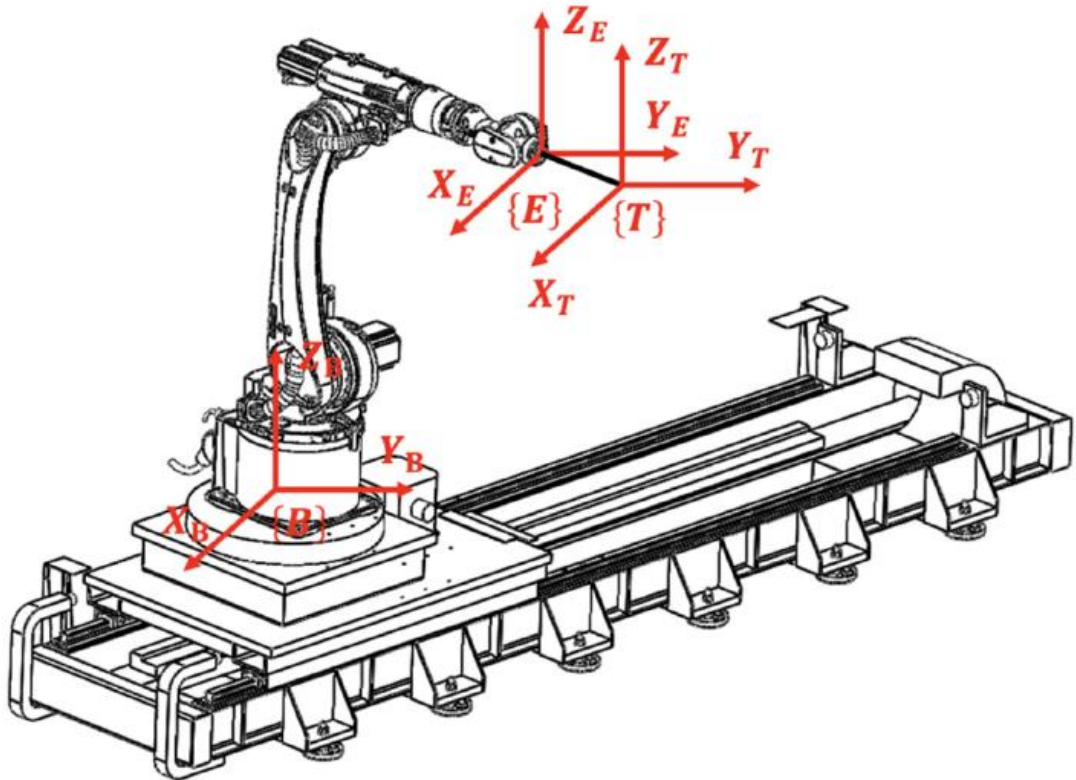


Рисунок 3.5 – Схема калібрувальної системи координат TCF

Коли навчальний робот знаходиться на вершині калібрувального стрижня, H_E^T можна обчислити з позитивної кінематики шляхом зміни кута кожного суглоба. Читаючи і записуючи Ейлера, кути α, β, γ та їх посадки пікселів p_x, p_y, p_z підвіски навчання, матриці перетворення системи координат інструменту $\{T\}$ щодо базової системи координат робота $\{B\}$ може виражатися у вигляді:

$$H_B^T = Rot_z(\alpha)Rot_y(\beta)Rot_x(\gamma)Trans(p_x, p_y, p_z) = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & p_x \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & p_y \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

В рівнянні (3.10), $n_{11} = \cos \alpha \cos \beta$, $n_{12} = \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \beta$, $n_{13} = \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma$, $n_{21} = \sin \alpha \cos \beta$, $n_{22} = \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma$, $n_{23} = \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma$, $n_{31} = -\sin \beta$, $n_{32} = \cos \beta \sin \gamma$, $n_{33} = \cos \beta \cos \gamma$.

Оскільки спільна робота повинна визначати позиційні відносини між роботами, два роботи або навіть кілька роботів можуть виконувати різні процеси на одній частині, щоб досягти впорядкованого та швидкого процесу обробки. Для калібрування базових координат подвійного робота пропонується метод триточкового вимірювання та маркування, який має характеристики швидкості, низької вартості, високої точності та простоти виконання.

Калібрувальний інструмент закріплений на основі сталевій пластини між двома роботами. Інструмент, направляюча штанга може бути виконана в двох різних напрямках (може бути вертикальним або горизонтальним) шляхом регулювання верхня ручка інструменту. Після регулювання положення датчика дроту фіксуючий гвинт повинен бути заблокований.

На рисунку 3.6, зображена базовою системою координат робота $\{B_i\}$, ($i = 1,2$ робот 1,2), $\{T_{ij}\}$ — система координат інструменту робота ($i = 1,2,3$ - це три точки, що викладаються роботом-інструментом), $\{G\}$ - база калібрувального інструменту системи координат, $\{P_k\}$ – це система координат калібрувальних точок ($k = 1,2,3$; де p_1, p_2 — дві неспівпадаючі точки вздовж напрямку осі Z базової координати калібрувального інструменту $\{G\}$, а p_3 — точка вздовж напрямку осі X $\{G\}$), яка задовольняє, що p_1, p_2, p_3 є компланарними.

Метою калібрування двох роботів є визначення матриці перетворення $H_{B_2}^{B_1}$ базової системи координат робота $\{B_1\}$ щодо координати бази робота $\{B_2\}$.

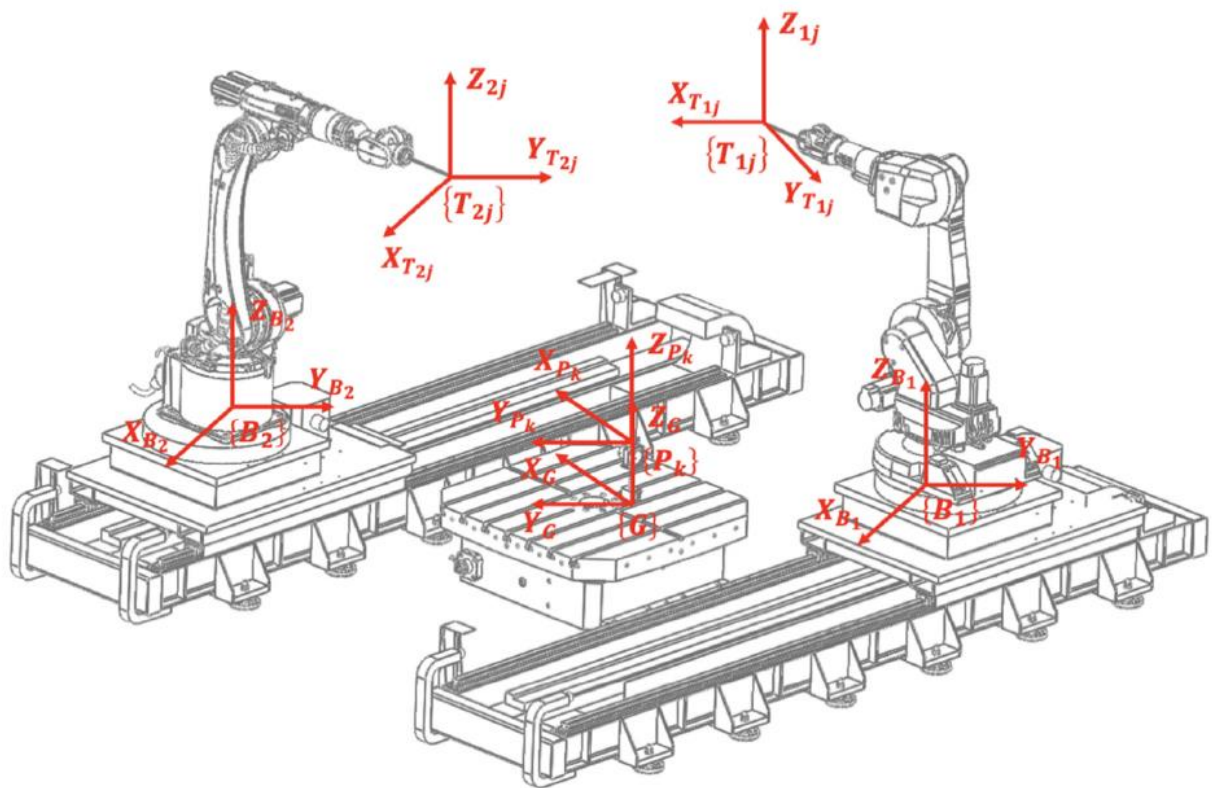
Вимоги до $H_{B_i}^G$ полягають у наступному:

$$\left[p_{k(B_i)}, 1 \right]^T = H_{B_i}^G \left[p_{k(G)}, 1 \right]^T \quad (3.11)$$

$$H_{B_2}^{B_1} = H_{B_2}^G \left(H_{B_1}^G \right)^{-1} \quad (3.12)$$

У формулі (3.11) $p_{k(B_i)}$ — це положення калібрувальної точки p_k щодо базової системи координат $\{B_i\}$, а $p_{k(G)}$ — положення калібрувальної точки p_k щодо базової системи координат $\{G\}$ калібрувального приладу.

У формулі (3.12) $H_{B_1}^G$ є матрицею перетворення системи координат основи калібрувального інструменту $\{G\}$ відносно роботи $i = 1$ бази системи координат $\{B_1\}$ і $H_{B_2}^G$ є матрицею перетворення калібрувального інструментального базису системи координат $\{G\}$ щодо робота $i = 2$ базової системи координат $\{B_2\}$.



Рисунку 3.6 – Принцип калібрування двох роботів

Метод вимірювання та маркування з трьома точками визначає положення точки калібрування. Як показано на рисунку 3.7, вихідний кінець кабелю датчика позиціонує дроту – точка калібрування p_k який з'єднує кінцевий адаптер робота-інструменту через мотузку. Кінцевий адаптер робота навчається на трьох точках $\{T_{ij}\} (j = 1,2,3)$ (власне, має бути більше трьох пунктів в експерименті).

Вимірювання довжини $\{T_{ij}\}$ до $\{P_k\}$ як L_{ij_k} , і зчитування положення системи координат $\{T_{ij}\}$ з підвіски «Вчити» як t_{ij} , положення точки калібрування $p_{k(B_i)}$ можна розрахувати за такою формулою:

$$\|t_{ij} - p_{k(B_i)}\| = L_{ij_k} \quad (3.13)$$

У формулі (3.13) $\|\blacksquare\|$ є евклідовою нормою на евклідовому просторі R^3 .

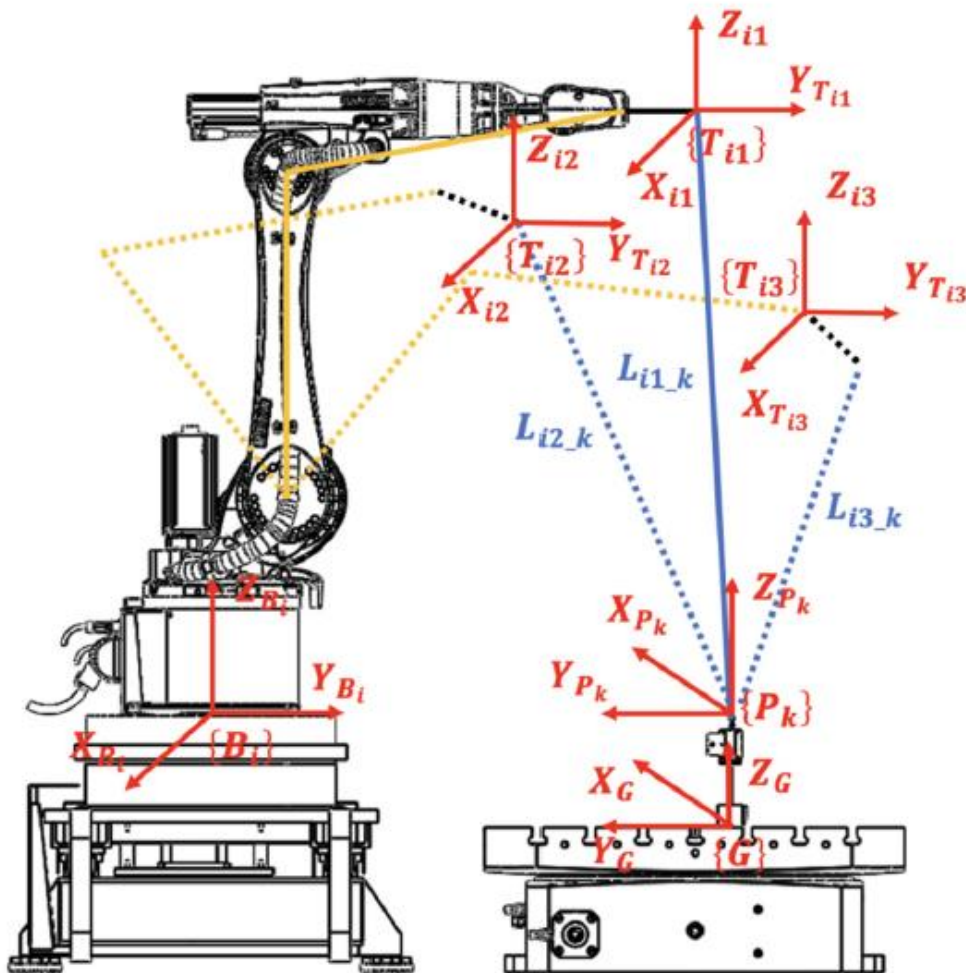
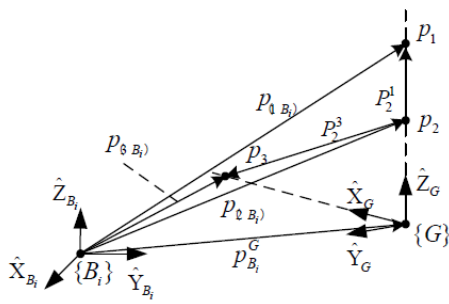


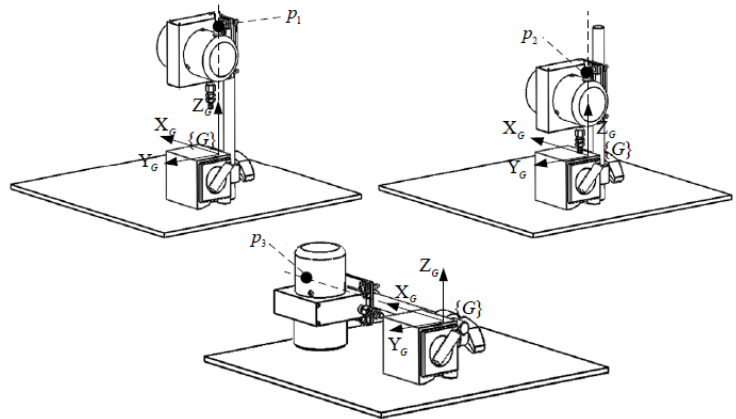
Рисунок 3.7 – Принципова схема трьохточкового вимірювання

Як показано на рисунку 3.8(a), вектор одиниці напрямку $\widehat{X}_G, \widehat{Y}_G, \widehat{Z}_G$, системи координат основи калібрувального інструменту $\{G\}$ проектується на систему координат основи робота як $\widehat{X}_{G(B_i)}, \widehat{Y}_{G(B_i)}, \widehat{Z}_{G(B_i)}$.

$$\begin{cases} \hat{Z}_{G(B_i)} = \frac{p_2^1}{\|p_2^1\|} = \frac{p_{1(B_i)} - p_{2(B_i)}}{\|p_{1(B_i)} - p_{2(B_i)}\|} \\ \hat{Y}_{G(B_i)} = \frac{\hat{Z}_{G(B_i)} \times p_2^3}{\|p_2^3\|} = \frac{\hat{Z}_{G(B_i)} \times (p_{3(B_i)} - p_{2(B_i)})}{\|p_{3(B_i)} - p_{2(B_i)}\|} \\ \hat{X}_{G(B_i)} = \hat{Y}_{G(B_i)} \times \hat{Z}_{G(B_i)} \end{cases} \quad (3.14)$$



(a)



(b)

Рисунку 3.8 – Діаграма співвідношення поз: (а) $\{G\}$ відносно $\{B_i\}$; б) Точки калібрування p_1, p_2, p_3 відносно $\{G\}$

У формулі (3.14) положення точок калібрування p_1, p_2, p_3 , показані на малюнку 3.5б. З p_1, p_2 - це будь-які дві точки в напрямку Z_G , p_3 - точка в напрямку X_G , формулу можна визначити:

$$\begin{cases} p_{1(G)} = (0, 0, z_1) \\ p_{2(G)} = (0, 0, z_2) \\ p_{3(G)} = (x_3, 0, 0) \end{cases} \quad (3.15)$$

У формулі (3.15) z_1, z_2 і z_3 є змінними, які $z_1 \neq z_2; z_1 \neq 0; z_2 \neq 0; z_3 \neq 0$. $p_{1(G)}, p_{2(G)}$ і $p_{3(G)}$ - це положення калібрувальних точок p_1, p_2 і p_3 щодо основи інструменту система координат $\{G\}$, $H_{B_i}^G$ можна позначити як:

$$H_{B_i}^G = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & p_{G(B_iX)} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & p_{G(B_iY)} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & p_{G(B_iZ)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_{G(B_i)} & p_{G(B_iX)} \\ \hat{Y}_{G(B_i)} & p_{G(B_iY)} \\ \hat{Z}_{G(B_i)} & p_{G(B_iZ)} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

У формулі (3.16) $P_{G(B_iM)} (M = X, Y, Z)$ — це значення початку координатної системи координат калібрувального приладу P_G , спроектоване на напрямок M базової системи координат робота $\{B_i\}$.

З формул (3.11), (3.13), (3.15) і (3.16) можна отримати:

$$\begin{cases} p_{G(B_iX)} = \frac{Q}{W} \\ p_{G(B_iY)} = p_{3(B_iY)} - \frac{(p_{3(B_iX)} - p_{G(B_iX)})r_{21}}{r_{11}} \\ p_{G(B_iZ)} = p_{3(B_iZ)} - \frac{(p_{3(B_iX)} - p_{G(B_iX)})r_{31}}{r_{11}} \end{cases} \quad (3.17)$$

У формулі (3.17), $W = r_{13}r_{21} - r_{11}r_{23}$, $Q = (p_{1(B_iY)} - p_{3(B_iY)})r_{11}r_{13} - p_{1(B_iX)}r_{11}r_{23} + p_{3(B_iX)}r_{13}r_{21}$

$H_{B_i}^G$ можна отримати, а формулу (3.12) можна об'єднати для отримання перетворення матриця $H_{B_2}^{B_1}$ базової координати $\{B_1\}$ робота 1 відносно базової координати $\{B_2\}$ Робот 2.

3.3 Аналіз симуляції

Щоб оцінити процес калібрування, було використано середовище моделювання. Симуляційне середовище включає універсальний фізичний

движок MuJoCo [47], що дозволило створити модель робота Franka Emika Panda. Це передбачало представлення робота у вигляді послідовності взаємопов'язаних ланок і з'єднань, використовуючи доступні параметри ДХ. Також розроблено систему управління за допомогою Matlab для контролю рухів робота та збору даних про його стан.

Використання Matlab дозволило з легкістю програмувати рухи робота та відстежувати його прогрес, роблячи весь процес більш впорядкованим та ефективним. У симуляції було згенеровано саморух робота для автоматичного збору даних. Для цього контролер робота-кінемата був налаштований таким чином, щоб використовувати резервні DOFs.

Надлишкові DOFs є результатом внутрішнього резервування та функціонального резервування. Робот має 7 DOFs, тобто у нього одна власна резервна DOFs. Оскільки контролюється тільки положення кінцевого ефектора, система має три додаткові резервні DOFs. Так, для самостійного пересування можна використовувати чотири роботи. Щоб запобігти порушенню обмежень, було дозволено лише власний рух робота, тобто задані швидкості з'єднання були обрані як:

$$\dot{q}_d = JK_p(p_B - p) + N\dot{q}_r = N\dot{q}_r, \quad (3.18)$$

де p_B — фіксоване положення сферичного суглоба, N — нульовий простір позиційної частини якобіанської $J = J_p$ і \dot{q}_r — випадкові з'єднання.

Зауважу, що кінцевий ефектор обмежений фіксованим положенням. Отже, похибка в рівнянні завжди дорівнює 0. Також, що q_r не впливає на положення кінцевого ефектора. За допомогою такого керування рухом, згенеровано послідовності рухів, де робот рухався навколо фіксованого положення кінцевого ефектора.

Отримавши добре обумовлений набір даних, було максимально використано доступний рух нульового простору. Отже, в запропонованій

валідації випадкові швидкості \dot{q}_r були змінені на дві секунди. Вони збільшили можливість максимально використовувати нульовий простір.

Щоб перевірити вірність запропонованого методу калібрування, було згенеровано в симуляторі кілька різних наборів рухів для кожної з трьох точок (P1, P2 і P3), показаних на рисунку 3.9. Використовуючи згенеровані дані, було підготовлено 10 мушн-сетів, і для кожного набору відібрав випадковим чином 500 конфігурацій. Параметри робота були виставлені на номінальні значення, а процес оптимізації був ініційований з використанням неправильних параметрів ДХ.

Такий підхід був прийнятий для підтвердження ефективності процедури калібрування. Статистичні результати ідентифікації параметрів ДХ для кожної точки і кожного суглоба наведені на рисунок 3.9. Результати свідчать про те, що процес ідентифікації пройшов успішно, і метод забезпечив збіжність розрахованих параметрів ДХ до правильних номінальних значень цього ж параметра для всіх трьох точок.

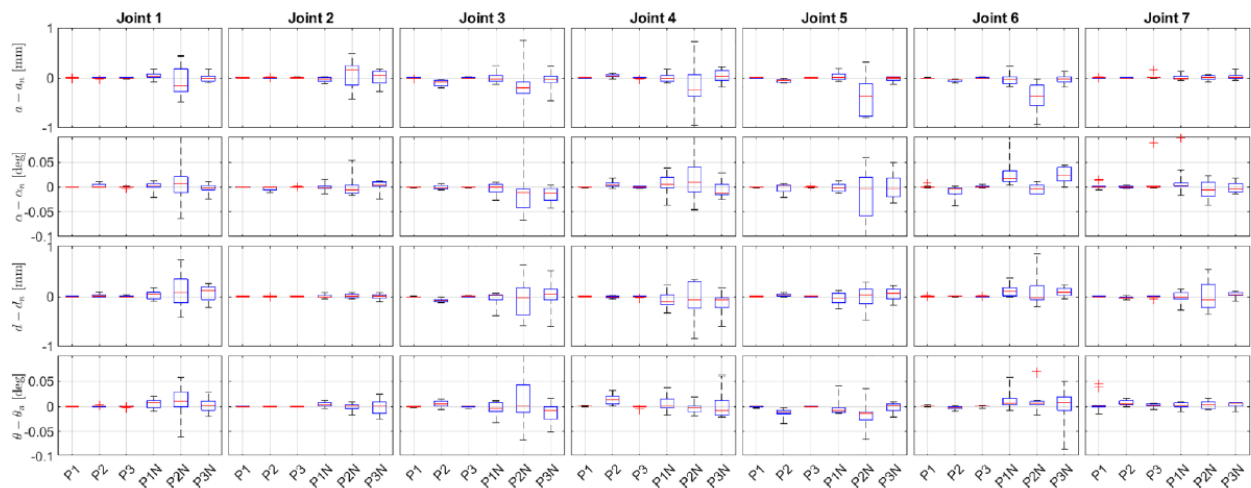


Рисунок 3.9 – Статистика оцінки параметрів ДХ — відхилення параметрів \widehat{P}_{DH} від їх номінальних значень P_{DH} для всіх трьох точок: без шуму вимірювання (P1, P2 і P3) і з додаванням шуму вимірювання (P1N, P2N і P3N)

Це можна додатково підтвердити, проаналізувавши статистику розрахункових параметрів ДХ, яка показує, що відхилення від номінальних

значень практично незначне. Також було розраховано похибку між положеннями кінцевого ефектора за допомогою параметрів \widehat{P}_{DH} і номінальних параметрів P_{DH} для великого випадкового набору спільних конфігурацій, розподілених по робочій області робота, рисунок 3.10., та таблиця 3.1.

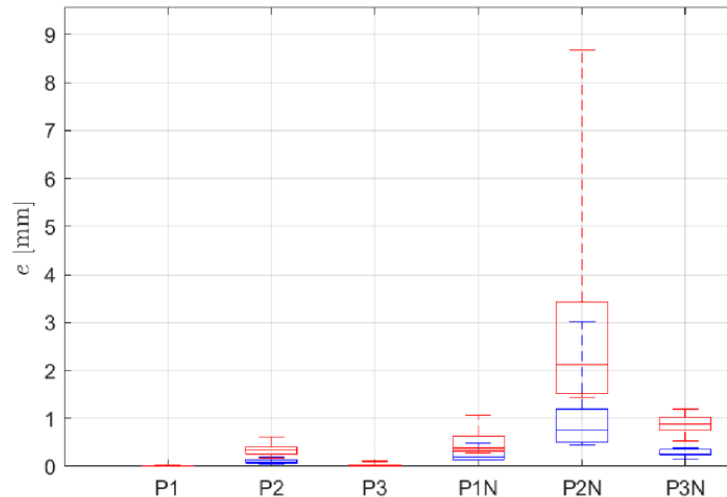


Рисунок 3.10 – Статистика похибки позиції кінцевого ефектора: середня статистика помилок позиції (синій колір) та максимальна статистика помилок позиції (червоний)

Таблиця 3.1 – Статистика похибки положення кінцевого ефектора

Вста-новлен-ня	Середня позиція \bar{e}_p (мм)			Максимальна похибка положення макс (e_p) (мм)		
	Середнє значення	Стандартне значення	Максимальне значення	Середнє значення	Стандартне значення	Максимальне значення
P1	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03
P2	0.10	0.04	0.19	0.13	0.13	0.62
P3	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.10
P1N	0.24	0.12	0.49	0.26	0.26	1.07
P2N	0.99	0.78	3.02	2.20	2.20	8.67
P3N	0.27	0.08	0.38	0.22	0.22	1.19

Середня похибка обчислювалася шляхом обчислення середнього значення помилок, отриманих з усіх тестованих конфігурацій. Виявлено, що середня і

максимальна похибки дуже малі. Результати моделювання демонструють, що похибка положення кінцевого ефектора є незначною для всіх протестованих конфігурацій, що забезпечує додаткову підтримку ефективності запропонованого підходу до калібрування.

Для ефективної компенсації похибок, пов'язаних з конкретними джерелами, їх внесок в похибку положення повинен бути значним в порівнянні з внеском вимірювального шуму. Ці фактори можуть бути зручно визначені та оцінені в середовищі моделювання. У цьому розділі було припущено, що точність кінцевого ефектора подібна до точності вимірювання системи захоплення руху.

Для імітації зашумлених даних було додано нормально розподілений випадковий шум із середнім значенням 0 мм і стандартним відхиленням 0,3 мм до положення кінцевого ефектора робота. Цей рівень шуму був обраний на основі точності системи захоплення руху [48]. Таким чином, моделювання було розроблено таким чином, щоб відобразити рівень шуму, який зазвичай зустрічається в практичному застосуванні.

Вибір цього рівня шуму забезпечив мінімальним вплив вимірювального шуму на результати калібрування і можливість точно оцінити ефективність запропонованого підходу до калібрування.

Середня похибка і максимальна похибка, отримані від запропонованого підходу до калібрування, можна порівняти з вимірюваннями, опублікованими в [49], що вказує на те, що запропонований підхід може ефективно калібрувати кінематичні параметри робота навіть за наявності шуму і неточностей.

Ці результати підкреслюють надійність запропонованого підходу і свідчать про те, що він може бути застосований до широкого спектру практичних застосувань з різним ступенем складності та рівнем шуму. В цілому, ці результати надають переконливу підтримку ефективності запропонованого підходу в точному визначенні кінематичних параметрів робота.

Запропонований підхід до калібрування забезпечив точні результати для більшості конфігурацій, причому єдине помітне відхилення відбулося у випадку

P2N, як видно на малюнку 3.10 Подальший аналіз показав, що це відхилення, ймовірно, було пов'язане з недостатнім охопленням даних у деяких суглобах. Варто зазначити, що представлення конфігурацій у кожній точці не було однорідним, насамперед через резервування робота та його здатність досягати довільних конфігурацій, а також через використання генератора випадкового руху.

Такий нерівномірний розподіл даних підкреслює важливість вибору відповідного набору конфігурацій для калібрування та забезпечення належного покриття суглобового простору. В цілому, ці результати підкреслюють важливість ретельного відбору та аналізу даних при калібруванні кінематичних параметрів робота і підкреслюють потребу в даних, які максимально добре представлені по всьому діапазону руху.

3.4 Висновки до третього розділу

Проведено оцінку параметрів ДХ як у моделюванні, так і в реальних сценаріях роботів, що продемонструвало високу точність та надійність запропонованого методу. Результати цього дослідження показують, що запропонований підхід може забезпечити економічно ефективний і практичний метод калібрування, що має перспективні наслідки для майбутнього розвитку колаборативних роботів. Щоб розширити сферу застосування даного підходу, потенційна майбутня робота може включати адаптацію запропонованого методу до різних типів з'єднань, таких як призматичні або обертові з'єднання.

Калібрування базової системи координат подвійного робота має вирішальне значення для реалізації координованої роботи подвійного робота в обробці, виробництві та складанні. У цьому дослідженні створена система калібрування двох роботів на основі каліброваних компонентів інструменту, і ця система проста в експлуатації.

Регулюючи вертикальний або горизонтальний напрямок направляючого стрижня інструменту та положення датчика дроту, можна отримати матрицю

перетворення між базовими системами координат двох роботів. Запропоновано ефективний метод калібрування базової системи координат контактного подвійного робота на основі «методу калібрування триточкових вимірювань».

Метод швидкого рішення для калібрування параметрів базової системи координат двох роботів отримано шляхом калібрування співвідношення відображення між відстанню від трьох опорних точок вимірювання ортогонального розподілу на компонентах інструменту до кінцевої точки робота та базової системи координат робота.

Цей метод також може бути застосований для калібрування трьох або більше базових систем координат робота, які надають цінні довідники та вказівки для роботизованої обробки, виробництва та складання.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КІНЕМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТІВ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ

У цьому розділі буде запропоновано новий підхід до кінематичного калібрування колаборативних роботів з надлишком, зосереджуючись на підвищенні їх точності за допомогою економічно вигідного та ефективного методу. Буде використано резервування кінематичного ланцюга із замкнутим контуром, використовуючи сферичний шарнір, що дозволяє точно визначити положення кінцевого ефектора робота, зберігаючи при цьому вільний рух суглоба в нульовому просторі.

Використовуючи доступність датчиків крутного моменту в більшості колаборативних роботів, було застосовано кінестетичний підхід для отримання обмеженого руху суглоба для калібрування. Для визначення оптимальних кінематичних параметрів використовується оптимізаційний підхід на основі вимірних положень суглобів і обмеженого положення кінцевого ефектора, визначеного сферичним з'єднанням.

Ефективність запропонованого методу продемонстрована та підтверджена на роботі Franka Emika Panda – роботі 7-DoF. Результати вказують на значне підвищення абсолютної точності, при порівнянних характеристиках з більш ніж дорогих сенсорних системах, такі як оптичні вимірювальні системи. Мій підхід пропонує практичне та економічно ефективне рішення для підвищення точності колаборативних роботів.

4.1 Моделювання помилок, процедури вимірювання та оптимізація параметрів

Як правило, процес калібрування роботів за допомогою моделей включає в себе наступні етапи, як показано на рисунку 4.1, моделювання, вимірювання, виявлення та корекція.

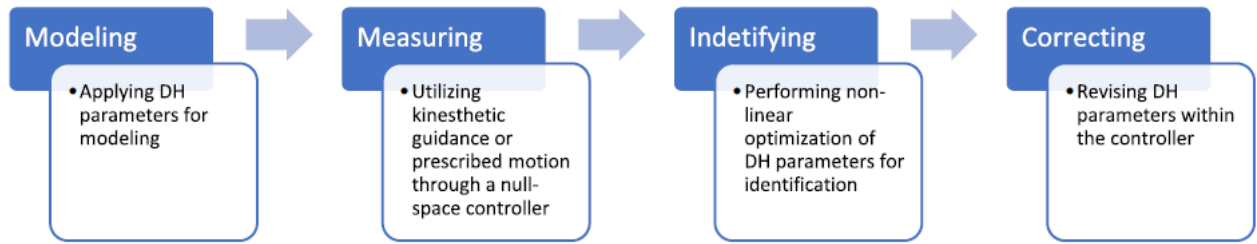


Рисунок 4.1 – Блок-схема, що ілюструє послідовні етапи запропонованого процесу калібрування для колаборативних роботів з використанням кінематичних ланцюгів із замкнутим контуром та сферичних з'єднань

Конвенція Денавіта-Хартенберга (ДХ) [7] зазвичай використовується для аналізу руху робота-маніпулятора. Ця угода використовує набір з чотирьох параметрів, що позначаються $P_{DHi} = (a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i)$, для визначення однорідної матриці перетворень ${}^{i-1}T_i$. Ця матриця описує перетворення між двома сусідніми системами відліку, приєднаними до ланки $i - 1$ і i з'єднані спільним i .

Припускаючи, що суглоб i є обертовим з'єднанням, що означає, що він обертається навколо однієї осі, змінна q_i представляє його положення. Тоді матриця ${}^{i-1}T_{i(q_i)}$ обчислюється на основі значень параметри ДХ і положення суглоба q_i . Ця матриця описує перетворення системи координат ланки i щодо ланки $(i - 1)$ за рахунок руху спільної q_i .

Для обертових суглобів його подають так:

$${}^{i-1}T_i(q_i, P_{DHi}) = R_{z_{i-1}}(\theta_i + q_i) \cdot L_{z_{i-1}}(d_i) \cdot L_{x_i}(r_i) \cdot R_{x_i}(\alpha_i) \quad (4.1)$$

де $L_a(\cdot)$ і $R_a(\cdot)$ представляють переклад і обертання уздовж вектора a , відповідно. Зауважимо, що параметри ДХ мають і фізичне значення: a_i являє собою відстань між осями z_{i-1} і z_i , виміряне по осі x_i ; α_i — кут між осями z_{i-1} і z_i , виміряний навколо осі x_i ; d_i являє собою відстань між осями x_{i-1} і x_i , виміряну вздовж осі z_{i-1} ; θ_i являє собою кут між осями x_{i-1} і x_i , виміряний навколо осі z_{i-1} .

Використовуючи конвенцію ДХ і обчислюючи відповідні матриці перетворень для кожного суглоба а робота, отримуємо повну кінематичну модель робота:

$${}^0T_E(\mathbf{q}, P_{DH}) = \left(\prod_{i=1}^n {}^{i-1}T_i(q_i, P_{DHi}) \right) {}^nT_E = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

В рівнянні (4.2) під n мається на увазі кількість суглобів у робота-маніпуляторі. Матриця nT_E являє собою фіксовану трансформацію між фланцем робота та кінцевим ефектором, який є частиною робота, що взаємодіє з навколишнім середовищем. Змінні \mathbf{p} і \mathbf{R} позначають положення і орієнтацію кінцевого ефектора відповідно.

Помилки в кінематичних параметрах можуть призвести до розбіжностей між фактичним і очікуваним положенням і орієнтацією кінцевого ефектора робота. Припустимо, що виробник робота надає номінальні параметри ДХ, що позначаються як $P_{DHi} = (a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i)$, які використовуються для моделювання кінематики робота. Однак через різні джерела похибки, такі як допуски на виробництво або знос, фактичні параметри ДХ можуть відрізнятися від номінальних, вони позначаються як $\hat{P}_{DHi} = (\hat{a}_i, \hat{\alpha}_i, \hat{d}_i, \hat{\theta}_i)$.

В результаті положення і орієнтація кінцевого ефектора буде відхилятися від очікуваних значень через ці кінематичні похибки. Щоб кількісно оцінити величину цих похибок, потрібно обчислити різницю між фактичними та номінальними позами кінцевого ефектора за допомогою формул:

$$\mathbf{e}_p = \mathbf{p}(\mathbf{q}, \widehat{P_{DH}}) - \mathbf{p}(\mathbf{q}, P_{DH}), \quad (4.3)$$

$$\mathbf{e}_R = \log(\mathbf{R}(\mathbf{q}, \widehat{P_{DH}})\mathbf{R}(\mathbf{q}, P_{DH})^T). \quad (4.4)$$

Таким чином, помилки в кінематичних параметрах можуть призвести до значних розбіжностей між фактичним і номінальним положеннями кінцевого ефектора, і важливо кількісно визначити та мінімізувати ці помилки, щоб забезпечити точну та надійну роботизовану роботу.

В подальшому для калібрування за допомогою запропонованого методу розглядається лише положення p кінцевого ефектора робота.

Для того, щоб підвищити точність положення кінцевого ефектора, необхідно визначити фактичні кінематичні параметри робота. Для цього потрібно збирати дані, які пов'язують вхідні дані робота з його виходами. Поширеним методом калібрування є переміщення робота до кількох відомих конфігурацій, де вимірюються положення суглоба та положення кінцевого ефектора.

Підбір конфігурацій з'єднань залежить від методу, який використовується для розрахунку параметрів. Наприклад, геометричний підхід, заснований на відомих осях з'єднань і лінійній алгебрі, вимагає незалежного переміщення кожного суглоба для визначення осей з'єднань і відносних рамок для кожного суглоба, які необхідні для обчислення параметрів ДХ [50,51,52]. Однак такий підхід підходить тільки в тому випадку, якщо кінцевий ефектор робота може вільно переміщатися в просторі.

Альтернативою є вимірювання достатньої кількості конфігурацій з'єднань, які визначають добре кондиційний набір для оцінки параметрів [53]. Існують різні пропозиції щодо підбору конфігурацій з'єднань [54,55]. Як запропоновано в [51], однією з можливостей є використання випадкових конфігурацій по всьому робочому простору робота або в деякому підпросторі, коли є обмеження руху.

Враховуючи, що вищезазначені методології часто передбачають використання дорогого вимірювального обладнання або передбачають повільний процес збору даних, у відповідь на ці обмеження та в гонитві за вдосконаленням поточної парадигми, запропонований метод калібрування використовує сферичний шарнір для обмеження руху кінцевого ефектора робота.

У той час як сферичний суглоб лише обмежує положення, орієнтація кінцевого ефектора не обмежена. Визначаючи тривимірне положення кінцевого ефектора як основне завдання, робот отримує три додаткові функціональні надлишкові ступені свободи (DOF). Таке резервування дозволяє переміщати робота в різні конфігурації для калібрування. Важливо вибрати сферичні місця з'єднань, де результуючий саморух робота дозволяє здійснювати великий діапазон рухів суглобів, щоб отриманий набір вимірювань був добре кондиційованим.

Якщо робот за своєю суттю є резервним, тобто має більше 6 DOFs, а нульовий простір набагато більший, ситуація набагато краща. Якщо це все ще необхідно, можна зібрати дані для більш ніж одного місця розташування сферичного з'єднання. Зауважу, що для запропонованого методу положення кінцевого ефектора робота зберігається під час вимірювань.

Процес визначення цього положення вибраних точок виглядає наступним чином: У сценаріях, де оптимізація виконувалася лише з однією точкою, було отримано позицію кінцевого ефектора, взявши середнє арифметичне всіх виміряних точок, отриманих шляхом обчислень з використанням номінальних параметрів ДХ.

Такий підхід дозволив отримати репрезентативну оцінку позиції. Однак у випадках, коли було включено кілька точок, наприклад, для Pall, де всі три визначені точки (P1, P2 і P3) були використані для оптимізації, було введено додатковий рівень точності. Тут було враховано точне знання відносних відстаней між цими точками. Включивши цю інформацію, можна було би ще більше уточнити визначення положення кінцевого ефектора для калібрування, забезпечуючи більш точне представлення розташування кінцевого ефектора робота.

Точність вимірювань є критичним фактором у калібруванні. У запропонованому методі обмеження сферичного суглоба положення кінцевого ефектора робота безпосередньо не вимірюється, оскільки передбачається, що з'єднання має бути фіксованим.

Однак під час вимірювань можна помітити, що кінцевий ефектор все ще рухається.

Це може бути пов'язано з механічними властивостями сферичного з'єднання, такими як люфт, або прогинами кріплення сферичного з'єднання через сили між роботом і з'єднанням. Ці ефекти можна розглядати як шум вимірювання.

Якщо кінцевий ефектор робота обмежений, для ідентифікації параметрів Денавіта-Хартенберга (ДХ) [56] може бути використаний тільки підхід, заснований на оптимізації. Це пов'язано з тим, що параметри ДХ описують кінематичні властивості ланок і з'єднань робота, а їх значення безпосередньо впливають на положення і орієнтацію кінцевого ефектора. Одним з можливих методів, які були використані в цьому розділі, є оптимізація рою частинок (PSO) [57].

Однак важливо зазначити, що хоча і було обрано PSO для дослідження, для ідентифікації параметрів ДХ також можуть бути застосовані інші методи оптимізації. Цільова функція, що підлягає мінімізації, зазвичай визначається як похибка між виміряними положеннями кінцевого ефектора і розрахованими положеннями з використанням прямої кінематики робота.

Для оптимізації потрібно кілька зразків конфігурації робота, де кількість зразків позначається m . У випадку обмеження сферичного суглоба положення $P_{M,k}$ є сталим для всіх k в даній позиції. Зауважу, що в нашому випадку було використано різні фіксовані положення, як показано на рисунку 4.2.

Тоді задача оптимізації може бути виражена у вигляді:

$$\{P_{DH}\} = \arg \min_{P_{DH}} \sum_{k=1}^m (\|p(q_k, P_{DH}) - P_{M,k}\|), \quad (4.5)$$

де m — кількість вимірних зразків, $P_{M,k}$ — виміряні положення кінцевого ефектора і положення суглоба для зразка k відповідно. P_{DH} являє собою параметри ДХ робота.

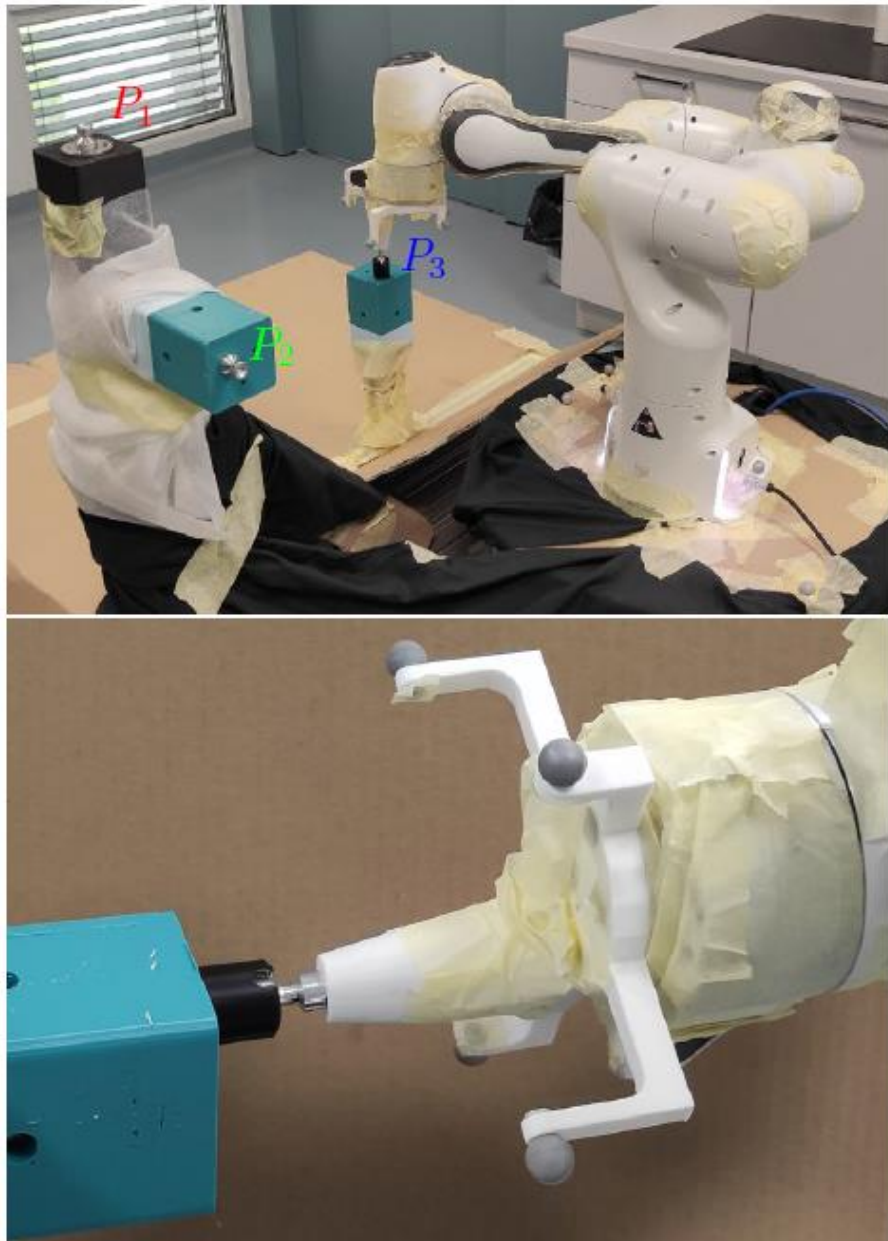


Рисунок 4.2 – Експериментальна установка з трьома сферичними точками кріплення на верхньому зображенні та збільшенні за допомогою робота, прикріпленого до P2 на нижньому зображенні

Останній етап процесу калібрування – корекція. Якщо контролер робота дозволяє пряму зміну кінематичних параметрів моделі, крок корекції простий. Однак у конкретному сценарії довелося використовувати нові методи прямої та оберненої кінематики в контролері, які були засновані на оновленій кінематичній моделі.

4.2 Експеримент з калібруванням

В експерименті використовується робот 1600 АВВ для проведення повторного калібрувального експерименту базових координат одного робота ($i = 1$). Нижній комп'ютер зв'язується з дротовим датчиком по протоколу MODBUS через однокристальний мікрокомп'ютер (чіп STM32F103ZET6).

Як показано на рисунку 4.3, робот управляється в різних положеннях за допомогою підвіски для навчання (щоб не втрачати загальності, є 14 груп вимірювання точки навчання, $j = 1, 2, \dots, 14$), довжина мотузки, яка виводиться датчиком, і положення кінцевого адаптера інструменту, показане на підвісці для навчання, рисунок 4.4.

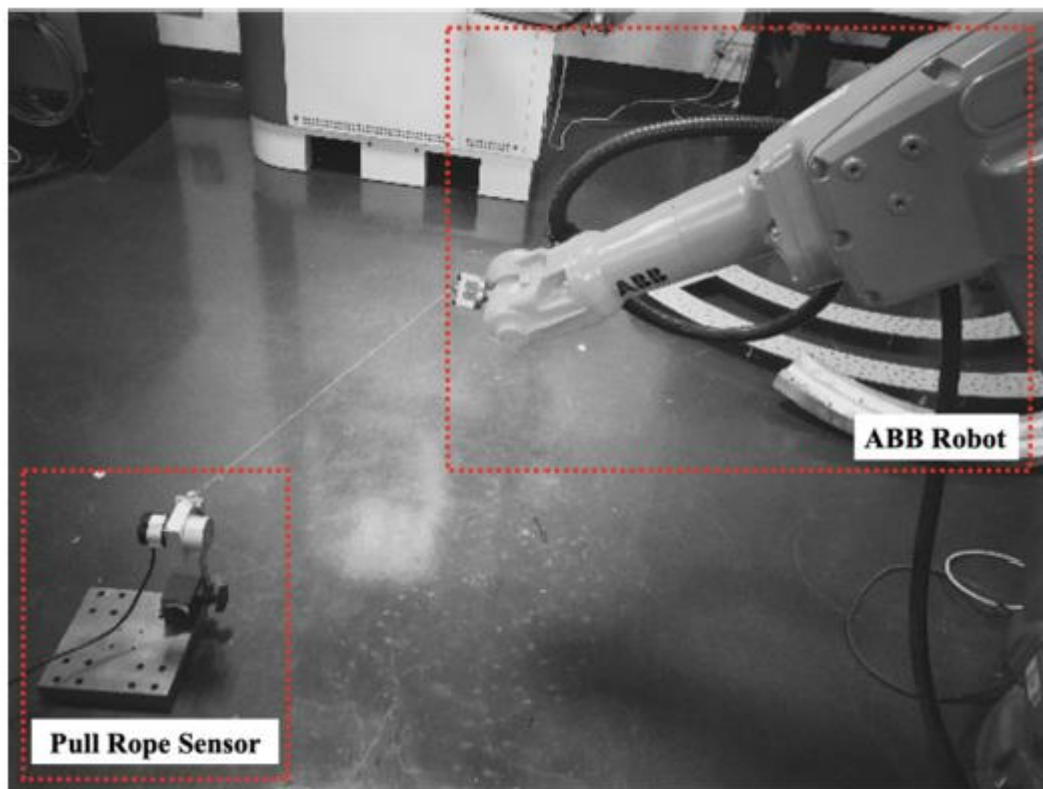


Рисунок 4.3 – Режим вимірювання калібрування одного робота

Після цього відрегулюємо калібрувальний інструмент для продовження вимірювання, а записані дані наведені в таблиці 4.1.

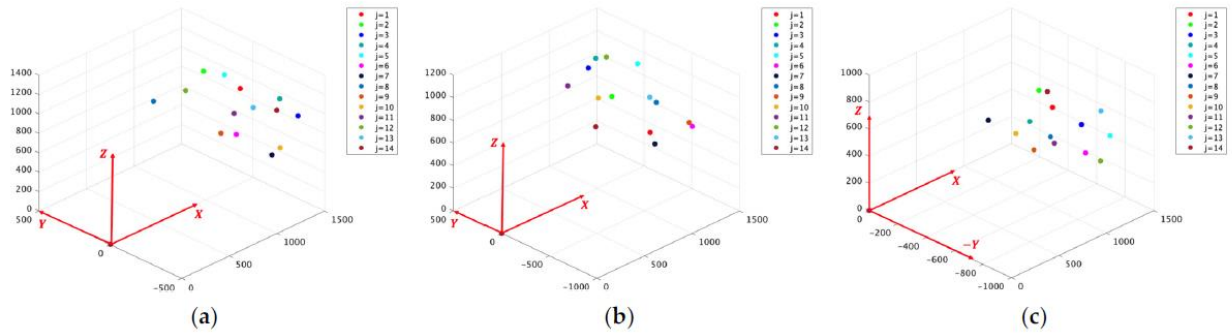


Рисунок 4.4 – Схема розташування кінцевого адаптера інструменту одного робота: (а) точка калібрування $k = 1$; б) точка калібрування $k = 2$; с) точка калібрування $k = 3$

Таблиця 4.1 – Запис даних експерименту з одним роботом

Точка калібрування k	Точка викладання j	Довжина мотузки $L_{1,j}L_{\{1,j\}}L_{1,j}$ (мм)	Положення кінцевого адаптера $tk_{jt}_{\{kj\}}tk_j$ (мм)
1	1	804.29199	[1295.78, -46.49, 1042.74]
	2	881.30255	[1295.80, 209.68, 1042.73]
	3	841.0332	[1295.84, -452.11, 1042.68]
	4	826.1182	[1188.90, -393.30, 1226.34]
	5	995.62207	[1189.90, -5.61, 1203.27]
	6	955.6239	[1083.19, -160.56, 748.53]
	7	524.83978	[1185.55, -344.85, 617.74]
	8	811.83495	[1183.51, 486.36, 592.35]
	9	511.13655	[1183.51, 12.84, 592.32]
	10	612.17269	[1183.52, -399.40, 726.54]
	11	684.66007	[1183.53, -79.43, 860.12]
	12	804.26715	[1183.53, 261.18, 860.11]
	13	811.26715	[1183.54, -213.55, 1013.35]
	14	909.52759	[1183.55, -378.61, 1098.11]

14 елементів даних у таблиці 4.1, розділені на дві групи (по 7 елементів даних у кожній групі), а цільова функція побудована для обчислення оптимального значення $p_{k(B_i)}$ у формулі (4.6). L_{1j_k} — довжина мотузки, що виводиться дротяним датчиком, а t_{1j} — це положення кінцевий адаптер робота.

$$\begin{cases} S_{k_1} = \sum_{j=1}^7 \left(\|t_{1j} - p_{k_1(B_1)}\| - L_{1j_k} \right)^2 \\ S_{k_2} = \sum_{j=8}^{14} \left(\|t_{1j} - p_{k_2(B_1)}\| - L_{1j_k} \right)^2 \end{cases} \quad (4.6)$$

У формулі (4.6), S_{k_1} та S_{k_2} є цільовими функціями перших семи груп і останніх семи груп даних, що відповідають точці калібрування p_k . $p_{k_1(B_1)}$ та $p_{k_2(B_1)}$ — це значення $p_{k(B_1)}$, обчислене, що відповідає двом групам даних.

Цільова функція була реалізована в MATLAB 2022b, і оптимальне значення знаходиться за допомогою генетичного алгоритму. Для виконання розрахунків задається кількість змінних оптимізації рівною трьом, а початкова популяція складається з 50 елементів.

Домен визначення параметрів функції встановлюється у межах:

- Перша змінна: від 1400 до 1600,
- Друга змінна: від -400 до -50,
- Третя змінна: від 50 до 350.

Інші параметри алгоритму залишаються за замовчуванням. Результат оптимізації округлюється до трьох десяткових знаків.

$$p_{1_1(B_1)} = [1557.915, -172.479, 293.644]$$

$$p_{2_1(B_1)} = [1549.650, -176.344, 186.724]$$

$$p_{3_1(B_1)} = [1553.236, -356.504, 83.975]$$

$$p_{1_2(B_1)} = [1554.390, -172.439, 293.414]$$

$$p_{1_2(B_1)} = [1548.649, -175.940, 185.964]$$

$$p_{1_2(B_1)} = [1553.048, -355.722, 83.659]$$

Було написано програму MATLAB для розрахунку $H_{B_i}^G$, що відповідає двом вищезазначеним групам за допомогою формул нижче, іменовані $H_{B_1}^G$ та $H_{B_2}^G$.

$$H_{B_1}^G = \begin{bmatrix} 0.058 & -0.85 & 0.026 & 1564.579 \\ 0.848 & 0.055 & -0.068 & -189.606 \\ 0.077 & 0.036 & 0.996 & 99.142 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_{B_2}^G = \begin{bmatrix} 0.049 & -0.853 & 0.025 & 1562.684 \\ 0.852 & 0.047 & -0.047 & -187.948 \\ 0.053 & 0.032 & 0.998 & 94.137 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Для того, щоб краще оцінити похибку даного калібрувального експерименту, похибка Δ визначається як:

$$\Delta = [\Delta_p, \Delta_a] \quad (4.7)$$

У формулі (4.7) Δ_p - похибка калібрування в положенні, а Δ_a - похибка калібрування в куті.

З цього впливають визначення похибки положення Δ_p і похибки кута Δ_a :

$$\Delta_p = \sqrt{(p_{x_1} - p_{x_2})^2 + (p_{y_1} - p_{y_2})^2 + (p_{z_1} - p_{z_2})^2} \quad (4.8)$$

$$\Delta_a = \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + (\beta_1 - \beta_2)^2 + (\gamma_1 - \gamma_2)^2} \quad (4.9)$$

У формулі (4.8) p_{x_1} і p_{x_2} є відстанями на осі X даних двох груп. p_{y_1}, p_{y_2} і p_{z_1}, p_{z_2} - відстані на осях Y і Z. У формулі (4.9) $\alpha_{1,2}, \beta_{1,2}$ та $\gamma_{1,2}$ є кутами Ейлера даних двох груп.

Далі можна отримати формули розрахунку кутів Ейлера α, β, γ :

$$\alpha = \tan^{-1}(n_{21}/n_{11}) \quad (4.10)$$

$$\beta = \sin^{-1}(-n_{31}) \quad (4.11)$$

$$\gamma = \tan^{-1}(n_{32}/n_{33}) \quad (4.12)$$

Виходячи з формул, дані про кути Ейлера двох груп можна отримати за формулою $H_{B_1^1}^G$ та $H_{B_1^2}^G$.

$$[\alpha_1, \beta_1, \gamma_1] = [86.087^\circ, -4.416^\circ, 2.070^\circ]$$

$$[\alpha_2, \beta_2, \gamma_2] = [86.708^\circ, -3.038^\circ, 1.837^\circ]$$

За допомогою формул похибка даного калібрувального експерименту Δ може бути отримана:

$$\Delta = [5.603 \text{ mm}, 1.529^\circ]$$

Як показано на рисунку 4.4, права сторона - робот АВВ ($i = 1$), а його базова система координат має вигляд $\{B_1\}$, ліва сторона - робот КУКА ($i = 2$), а його базова система координат має вигляд $\{B_2\}$, а дані вимірювань наведені в таблиці 4.2.

За даними таблиці 4.2 та таблиці 4.3 побудовано цільову функцію, та обчислено положення p_1, p_2, p_3 відносно базисної системи координат $\{B_1\}$ і $\{B_2\}$ та $H_{B_1}^G$ та $H_{B_2}^G$. Тоді, основна координата розрахована відношенням трансформації $H_{B_2}^G$ робота АВВ щодо робота КУКА.

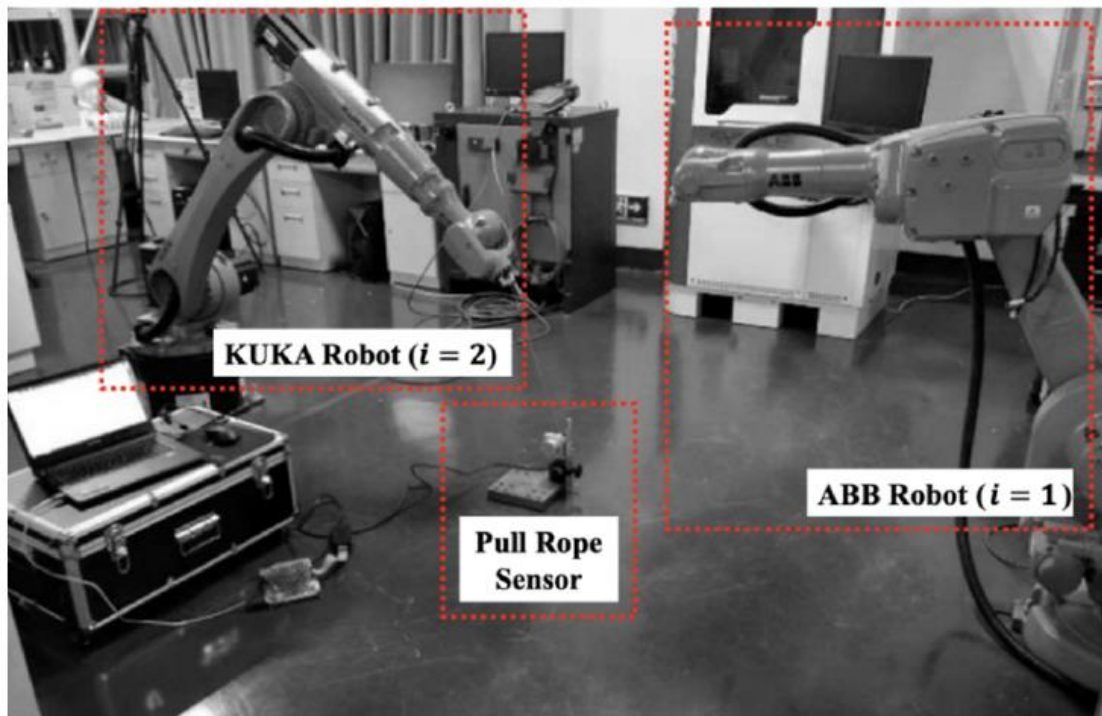


Рисунок 4.4 – Режим вимірювання калібрування подвійного робота

На рисунку 4.5 та рисунку 4.6 є відповідність положенню робота $i = 1$ і роботу $i = 2$ кінцевих перехідника.

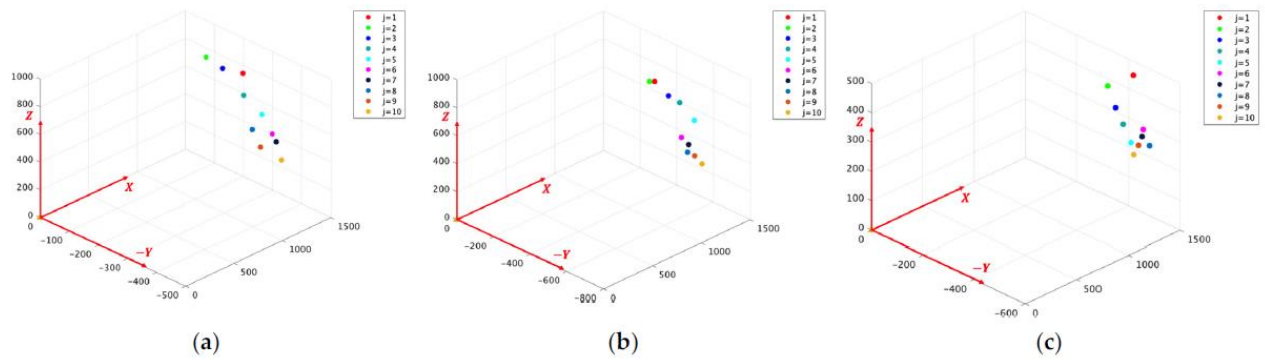


Рисунок 4.5 – Схема розташування кінцевого адаптера інструменту $i = 1$: (а) точка калібрування $k = 1$; б) точка калібрування $k = 2$; в) точка калібрування $k = 3$

Таблиця 4.2 – Дані запису експерименту з подвійним роботом для робота $i = 1$

Точка калібрування k	Точка викладання j	Довжина мотузки, $L_{ij,k}$ (мм)	Положення кінцевого адаптера t_{kj} (мм)
1	1	603.26971	[1384.59, -236.38, 819.10]
1	2	552.45648	[1421.48, -97.68, 788.31]
1	3	567.33954	[1380.72, -166.95, 788.28]
1	4	552.86206	[1307.30, -265.06, 715.18]
1	5	571.84094	[1256.81, -344.70, 670.12]
1	6	605.784	[1186.12, -404.16, 614.38]
1	7	654.08289	[1131.13, -435.67, 605.88]
1	8	611.13702	[1140.43, -350.05, 605.81]
1	9	643.98511	[1083.60, -398.44, 545.23]
1	10	603.83746	[1137.74, -451.52, 488.08]

Таблиця 4.3 – Дані запису експерименту з подвійним роботом для робота
 $i = 1$

Точка калібрування k	Точка викладання j	Довжина мотузки, $L_{ij,k}$ (мм)	Положення кінцевого адаптера t_{kj} (мм)
2	1	808.75287	[1229.18, -423.74, 845.20]
2	2	742.69165	[1264.41, -376.20, 804.28]
2	3	718.60303	[1293.55, -463.75, 745.99]
2	4	702.50343	[1327.68, -507.81, 713.20]
2	5	668.68207	[1351.13, -574.71, 617.97]
2	6	573.62531	[1308.20, -526.70, 480.69]
2	7	574.88245	[1324.42, -559.91, 447.93]
2	8	656.67828	[1229.56, -603.47, 450.41]
2	9	659.8009	[1251.96, -631.34, 433.26]
2	10	678.8609	[1251.95, -670.43, 398.73]

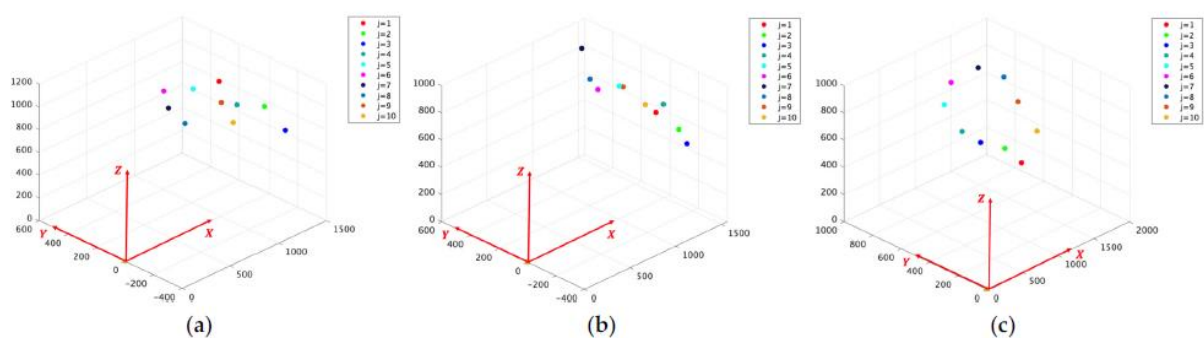


Рисунок 4.6 – Схема розташування кінцевого адаптера інструменту робота $i = 2$: (а) точка калібрування $k = 1$; б) точка калібрування $k = 2$; в) точка калібрування $k = 3$

$$\begin{aligned}
 H_{B_1}^G &= \begin{bmatrix} 0.030 & -0.858 & -0.037 & 1601.866 \\ 0.858 & 0.031 & -0.019 & -122.710 \\ 0.023 & -0.042 & 0.999 & 94.0803 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 H_{B_2}^G &= \begin{bmatrix} -0.103 & 0.848 & -0.016 & 1545.780 \\ -0.848 & -0.103 & 0.003 & 78.066 \\ 0.001 & 0.019 & 0.999 & 131.368 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 H_{B_2}^{B_1} &= \begin{bmatrix} -0.989 & -0.084 & -0.054 & 3124.378 \\ 0.085 & -0.991 & -0.013 & -178.282 \\ -0.072 & -0.023 & 0.997 & 149.727 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 3124 \\ 0 & -1 & 0 & -178 \\ 0 & 0 & 1 & 145 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

За допомогою відношення перетворення базових координат $H_{B_2}^{B_1}$ можна отримати співвідношення базових координат двох роботів на цій платформі з двома роботами. Вісь X базових координат двох роботів паралельна і перевернута, а відстань становить $p_x = 3124$ мм; вісь Y паралельна і зворотна, а відстань $p_y = 178$ мм; вісь Z паралельна і в тому ж напрямку, а відстань $p_z = 145$ мм.

Цей результат узгоджується з цінністю дизайну платформи. Похибка між експериментальними результатами та конструктивною вартістю платформи для спільної роботи виникає внаслідок:

- точність обробки кінцевого адаптера робота та калібрувального інструменту;
- для того, щоб зробити калібрування простим і швидким, в експериментальному обладнанні використовується регульована магнітна основа і легко знімається кінцевий адаптер. Тому на точність калібрування впливатиме похибка його обробки при калібруванні;
- повторювана похибка позиціонування роботів і точність вимірювання дротового датчика;
- метод швидкого калібрування базових координат подвійного робота обмежений точністю дротового датчика, який використовується для вимірювання, а похибка також походить від повторюваної точності позиціонування робота, який потрібно відкалібрувати;

- фактична помилка встановлення спільної платформи з двома роботами;
- буде певне відхилення між фактичним значенням і розрахунковим значенням спільної платформи з двома роботами через такі фактори, як місце встановлення, інструменти для встановлення та монтажники.

4.3 Результати калібрування робота

Було проведено серію експериментів з використанням робота Franka Emika Panda, щоб перевірити результати моделювання та отримати реальні вимірювання. Виконано кілька повторень вимірювання для кожної точки (P1, P2 і P3), роблячи по п'ять повторень для кожної точки. Щоб самостійно перевірити результати та порівняти їх з [51], було оснащено робота спеціально розробленим інструментом із маркерами на кінцевому ефекторі та сферичним з'єднанням для замикання кінематичного ланцюга.

Розроблена система захоплення руху (MoCap) включає 16 ІЧ-камер Prime 13 Вт, стратегічно розташованих у просторі, що гарантує покриття більшим, ніж робочий діапазон робота. Коли відповідним чином відкалібрований, то повинен мати точність вимірювання положення маркера краще $\pm 0,3$ мм в обсязі [51].

Установку експерименту можна побачити на рисунку 4.7. Управління роботом здійснювалося за допомогою системи управління, заснованої на Matlab і ROS, які дозволили легко програмувати рухи, кінестетичне наведення та отримання стану. Це дозволило ефективно збирати та аналізувати дані, гарантуючи отримання точних результатів.

Щоб забезпечити всебічне охоплення суглобового простору, запропоновано використовувати кінестетичне наведення для захоплення даних при виконанні калібрування на реальному роботі. За допомогою цього підходу оператор вручну переміщує робота, щоб досягти всіх можливих і досяжних конфігурацій, що дозволяє отримати більш повне представлення даних у всьому діапазоні рухів.

Це має вирішальне значення для точного калібрування кінематичних параметрів. Крім того, цей підхід дозволяє оператору виявляти будь-які несподівані проблеми або обмеження в русі робота, які можуть бути додатково проаналізовані та потенційно вирішені під час процесу калібрування.

На рисунку 4.7, представлено відсоткове представлення діапазону даних для кожного роботизованого суглоба, досягнуте завдяки використанню кінестетичного наведення для захоплення даних.

Як показано на рисунку 4.7, цей підхід забезпечує відносно рівномірний розподіл даних по всьому діапазону рухів для кожного суглоба, без значних прогалин або кластерів даних для P1 і P2. З іншого боку, розподіл даних для P3 показує, що для спільних q_2 і q_3 дані не розподіляються по всій області. Це вказує на те, що процес калібрування призведе до кращої точності для точок P1 і P2, але меншої для точки P3.

Параметри ДХ вперше були визначені шляхом оптимізації для кожної з трьох окремих точок (P1, P2 і P3), і ця процедура повторювалася п'ять разів. Потім вимірювання були об'єднані, щоб отримати п'ять наборів даних для всіх трьох точок, позначених Паллом. Для порівняння ефективності запропонованого методу використовувався повний набір даних, що містить всі точки з усіх п'яти вимірювань. Типові результати для ідентифікації кожного параметра ДХ наведені на рисунку 4.8. Також, в обох експериментах використовувався один і той самий робот.

Отримані результати на рисунку 4.8 і таблиці 4.4, демонструють ефективність запропонованого методу і підтверджують його успішність в точному розрахунку параметрів ДХ. Зокрема, з огляду на всі три серії вимірювань (P1, P2 і Палл), результати можна порівняти з методом, використаним раніше, що демонструє надійність даного підходу [51]. Однак варто зауважити, що результати трохи гірші, коли використовується тільки серія вимірювань P3.

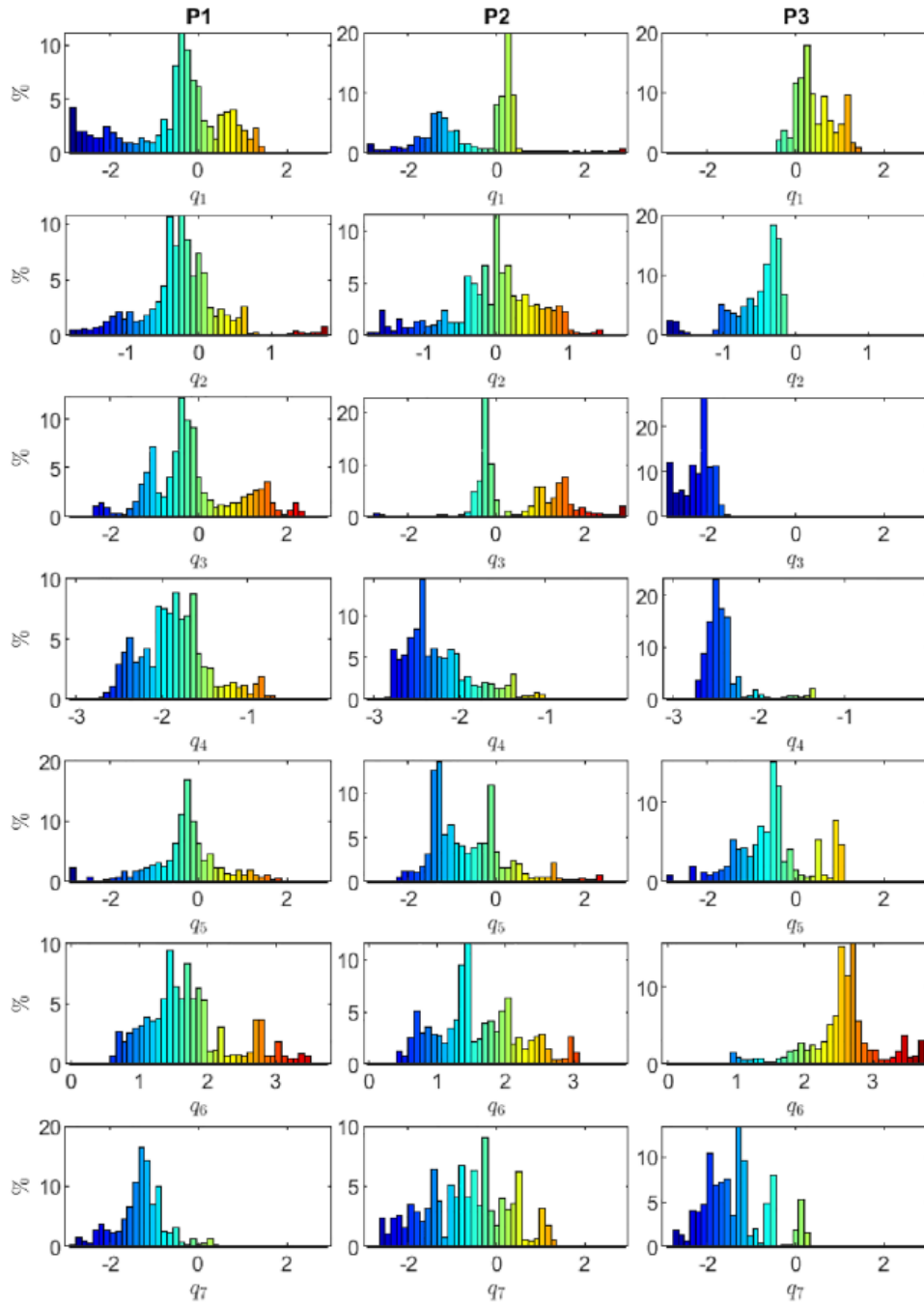


Рисунок 4.7 – Гістограма, що показує відсоткове представлення діапазону даних для точок P1, P2 і P3 для кожного роботизованого суглоба, досягнуте завдяки використанню кінестетичного наведення для захоплення даних

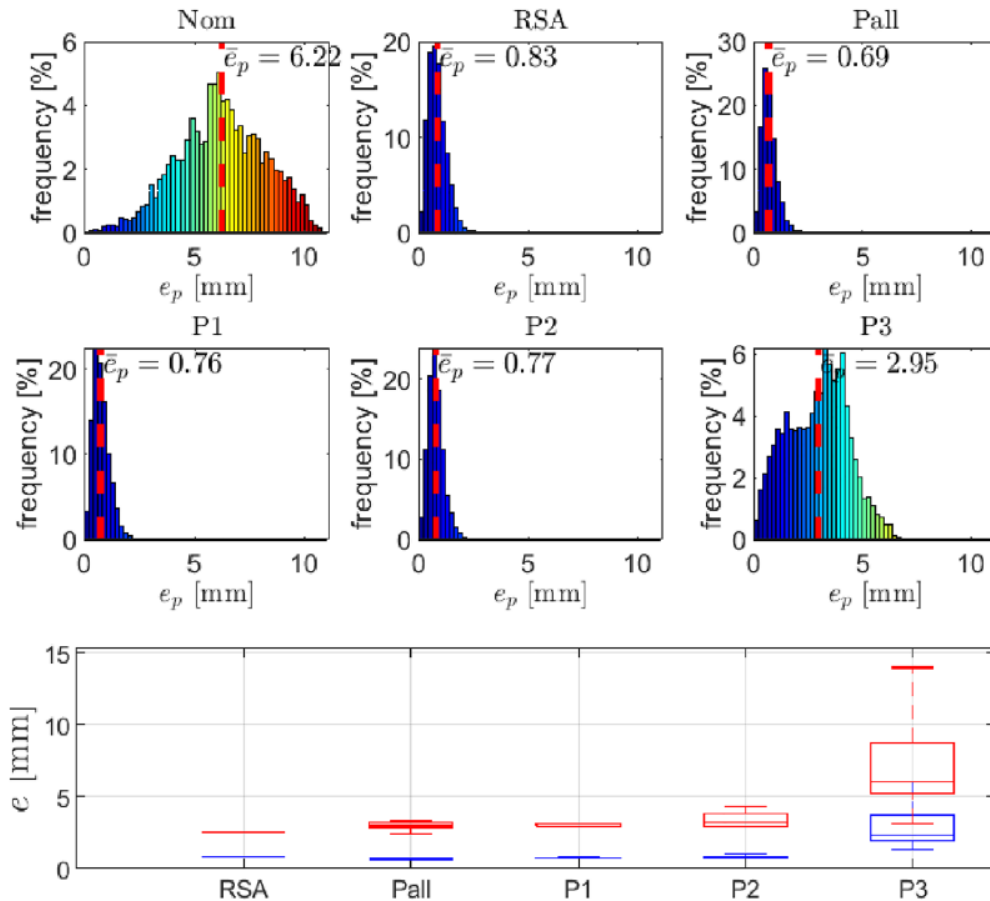


Рисунок 4.8 – Помилки позицій з використанням повного набору даних сферичних суглобів: розподіл помилок позицій (верхній і середній рядок), статистика помилок позиції (нижній рядок; синій представляє середню похибку, а червоний – максимальну похибку; зверніть увагу, що для набору даних RSA є лише одне доступне вимірювання, тоді як для інших наборів даних проведено аж п'ять

Таблиця 4.4 – Статистика похибки положення кінцевого ефектора з використанням повного набору даних сферичного з'єднання

Встановлення	Середня позиція \bar{e}_p (мм)			Максимальна похибка положення макс (e_p) (мм)		
	Середнє значення	Стандартне значення	Максимальне значення	Середнє значення	Стандартне значення	Максимальне значення
RSA	0.83	-	-	2.57	-	-
Pall	0.70	0.01	0.72	2.98	0.34	3.35
P1	0.84	0.07	0.89	3.07	0.12	3.17
P2	0.84	0.12	1.05	3.47	0.60	4.39
P3	2.95	1.81	6.02	7.24	4.04	13.99

Такий результат був очікуваним, оскільки представлення даних для суглобів q_2 і q_3 в цій множині обмежене. Незважаючи на це обмеження, запропонований метод має порівнянну продуктивність у порівнянні з існуючими підходами, які вимагають більш дорогого обладнання з точки зору точності та надійності, що підкреслює його потенціал для різних застосувань у реальному світі.

Крім того, результати, отримані в результаті валідації запропонованого методу на наборі даних RSA, представлені на рисунку 4.9 і таблиці 4.5. Як і очікувалося, рисунок 4.9 підкреслює успішне калібрування наборів даних P1, P2 і Pall за допомогою даного підходу. Варто відзначити, що якщо порівнювати з результатами, отриманими при ідентифікації параметрів ДХ, точність трохи нижче.

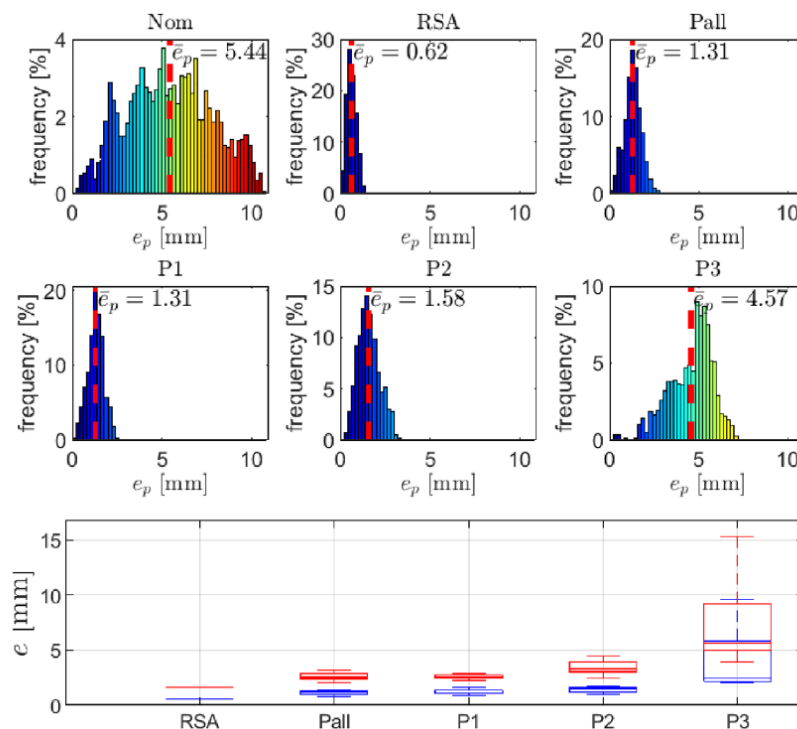


Рисунок 4.9 – Помилки позицій з використанням набору даних RSA: розподіл помилок позицій (верхній і середній рядок), статистика помилок позиції (нижній рядок; синій колір представляє середню похибку, а червоний – максимальну похибку)

Тим не менш, чудові показники методу все ще заслуговують на увагу, особливо з огляду на відносно низьку вартість обладнання, необхідного для калібрування, порівняно з вартістю обладнання, що використовується в інших методах.

Таблиця 4.5 – Статистика похибки позиції кінцевого ефектора з використанням набору даних RSA

Встановлення	Середня позиція \bar{e}_p (мм)			Maximal position error max (e_p) (мм)		
	Середнє значення	Стандартне значення	Максимальне значення	Середнє значення	Стандартне значення	Максимальне значення
RSA	0.62	-	-	1.67	-	-
Pall	1.15	0.22	1.39	2.58	0.43	3.17
P1	1.23	0.25	1.60	2.57	0.24	2.89
P2	1.44	0.28	1.71	3.45	0.71	4.43
P3	4.19	3.21	9.64	7.46	4.53	15.28

На рисунку 4.10, представлено наочне уявлення про продуктивність запропонованого методу. Зокрема, на рисунку 4.10, показані положення кінцевого ефектора робота, виміряні системою тосар і обчислені з використанням номінальних параметрів ДХ, а також положення, обчислені з використанням ідентифікованих параметрів ДХ на основі набору даних Палла.

Як видно з рисунок 4.10, виміряні дані, отримані за допомогою системи тосар, тісно співпадають з розрахованими даними, заснованими на виявлених параметрах ДХ, отриманих з набору даних Палла, що вказує на високу точність і надійність запропонованого підходу. Цей результат є переконливим доказом ефективності запропонованого методу в точній оцінці параметрів ДХ для різних роботизованих систем.

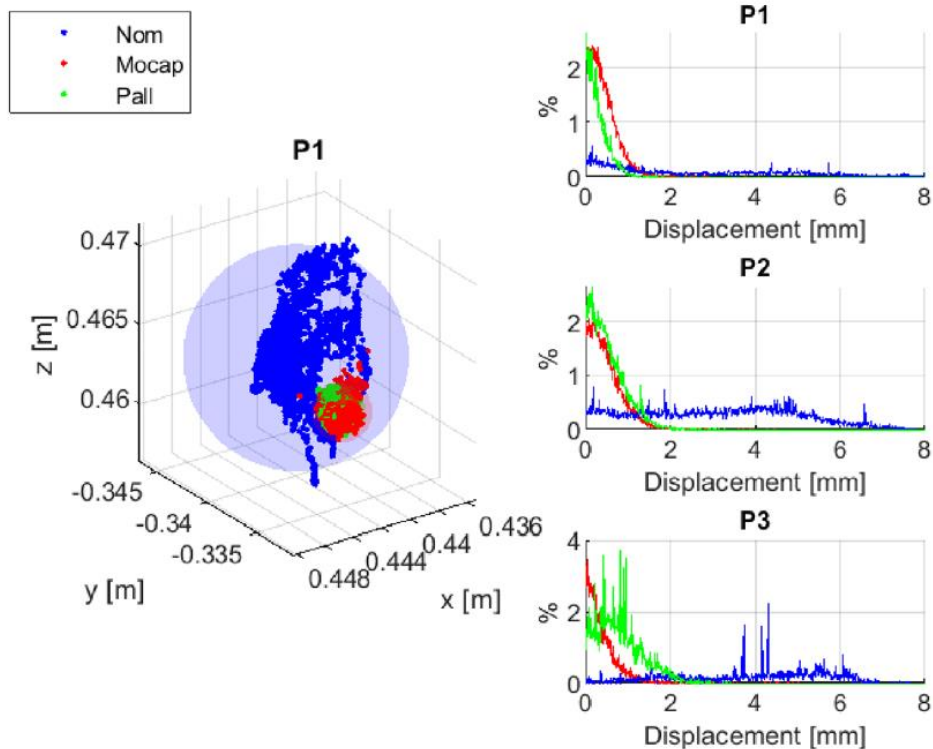


Рисунок 4.10 – Положення кінцевого ефектора робота в точці P1 виміряно за допомогою системи мосар (Мосар), обчислено з використанням номінальних параметрів ДХ (Nom) і обчислено з використанням ідентифікованих параметрів ДХ на основі набору даних Pall (Pall)

4.4 Висновки до четвертого розділу

У цьому розділі було представлено новий підхід до калібрування колаборативних роботів за допомогою замкнутого кінематичного ланцюга над сферичним з'єднанням. Запропонований підхід пропонує кілька помітних внесків, включаючи чисельний підхід до калібрування роботизованих систем та аналіз необхідного діапазону з'єднань у нульовому просторі, необхідного для ідентифікації.

Незважаючи на неправильні параметри ДХ і шум вимірювань, рисунок 4.3, та рисунок 4.4., чітко демонструють, що запропонований підхід до ідентифікації все ще дає задовільні результати. Середня похибка і максимальна похибка, отримані від запропонованого підходу до калібрування, можна порівняти з вимірюваннями, що вказує на те, що запропонований підхід може ефективно

калібрувати кінематичні параметри робота навіть за наявності шуму і неточностей.

Результати показують, що похибки положення та орієнтації були значно зменшені порівняно з номінальними параметрами ДХ. Аналізуючи вплив вимірювання шуму на ідентифікацію параметрів ДХ, також показано, що якість ідентифікації знаходиться в межах можливостей системи вимірювання MoCap.

Далі вирішується матриця перетворення базових координат двох роботів. Результати експериментів показують, що реалізований метод може ефективно підвищити точність та ефективність калібрування. Тим часом, калібрування базових координат між роботами з довільною відстанню положення може бути реалізовано шляхом заміни ходу дротяного датчика, який демонструє хорошу адаптивність.

Крім того, було б корисно оптимізувати та перевірити метод на більш широкому спектрі роботизованих систем і сценаріїв, включаючи ті, що мають неоптимальну поведінку нульового простору в суглобах або невизначеність даних вимірювання. Крім того, вивчення інтеграції цього підходу з іншими методами калібрування може бути цікавим шляхом.

ВИСНОВКИ

Вияснено, що існує кілька підходів до підвищення точності робота для типового промислового робота, встановленого на нерухомій рамі. На противагу цьому, не існує методу підвищення точності робота, коли робот встановлений на мобільній основі, що характерно для колаборативних роботів.

У першому розділі були запропоновані методи, які, були підтвержені багатьма експериментами. У цьому розділі було узагальнено їх і висвітлено основні висновки. Потім оцінено кінематичні параметри виконуючи їх по типовому геометричному підході, схожого на той, з методикою, застосовною до роботів, встановлених на мобільній базі.

Результати показують, що похибки положення та орієнтації були значно зменшені порівняно з номінальними параметрами ДХ. Аналізуючи вплив вимірювання шуму на ідентифікацію параметрів ДХ було показано, що якість ідентифікації знаходиться в межах можливостей системи вимірювання MoCap.

У другому розділі визначено, що у промисловому застосуванні роботів, коли операція вимагає певного ступеня точності та керованості шляху, можна використовувати метод інтерполяції, запропонований у цій роботі, щоб задовольнити вимоги.

Дані варіаційних кривих суглобів свідчать про те, що вдосконалений метод ДХ ефективно покращує стабільність і точність траєкторії руху кожного суглоба. Результати моделювання дають основу для реалізації роботом більш гнучкого планування руху.

У третьому розділі було вияснено, що калібрування базової системи координат подвійного робота має вирішальне значення для реалізації координованої роботи подвійного робота в обробці, виробництві та складанні. У цьому дослідженні створена система калібрування двох роботів на основі каліброваних компонентів інструменту, і ця система проста в експлуатації.

У четвертому розділі було представлено новий підхід до калібрування колаборативних роботів за допомогою замкнутого кінематичного ланцюга над

сферичним з'єднанням. Запропонований підхід пропонує кілька помітних внесків, включаючи чисельний підхід до калібрування роботизованих систем та аналіз необхідного діапазону з'єднань у нульовому просторі, необхідного для ідентифікації.

Проведено оцінку параметрів ДХ як у моделюванні, так і в реальних сценаріях роботів, що продемонструвало високу точність та надійність запропонованого методу. Результати цього дослідження показують, що запропонований підхід може забезпечити економічно ефективний і практичний метод калібрування, що має перспективні наслідки для майбутнього розвитку колаборативних роботів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. M. Vincze, J. Prenninger, H. Gander, A laser tracking system to measure position and orientation of robot end effectors under motion, *Int. J. Robot. Res.* 13 (4) (1994) 305–314, <http://dx.doi.org/10.1177/027836499401300402>.
2. Nubiola, M. Slamani, A. Joubair, I.A. Bonev, Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker, *Robotica* 32 (3) (2014) 447–466, <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574713000714>.
3. Nubiola, M. Slamani, I.A. Bonev, A new method for measuring a large set of poses with a single telescoping ballbar, *Precis. Eng.* 37 (2) (2013) 451–460, <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.12.001>.
4. A.A. Hayat, R.A. Bobby, S.K. Saha, A geometric approach for kinematic identification of an industrial robot using a monocular camera, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 57 (2019) 329–346, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.008>.
5. H. Shen, Q. Meng, J. Li, J. Deng, G. Wu, Kinematic sensitivity, parameter identification and calibration of a non-fully symmetric parallel delta robot, *Mech. Mach. Theory* 161 (2021) <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104311>.
6. Brau-Avila, R. Acero, J. Santolaria, M. Valenzuela-Galvan, O. Icasio-Hernández, Kinematic parameter identification procedure of an articulated arm coordinate measuring machine based on a metrology platform, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 104 (1–4) (2019) 1027–1040, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-03878-w>.
7. Hartenberg R, Danavit J: Kinematic synthesis of linkages. New York: Mc Graw-Hill, 1964.
8. Murray RM, Li Z, Shankar Sastry S: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. Taylor and Francis, CRC Press; 2017.
9. Song E: Data of Kinematic analysis and motion planning simulation of cooperative robot. figshare. Dataset. 2021. <http://www.doi.org/10.6084/m9.figshare.17977205.v1>

10. Sherwani, F.; Asad, M.; Ibrahim, B. Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0). In Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST), Karachi, Pakistan, 26–27 March 2020.
11. Mukherjee, D.; Gupta, K.; Chang, L.H.; Najjaran, H. A survey of robot learning strategies for human-robot collaboration in industrial settings. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* 2022, 73, 102231.
12. Leporini, A.; Oleari, E.; Landolfo, C.; Sanna, A.; Larcher, A.; Gandaglia, G. Technical and functional validation of a teleoperated multirobots platform for minimally invasive surgery. *IEEE Trans. Med. Robot. Bionics* 2020, 2, 148–156.
13. Xiao, J.; Zhao, S.; Guo, H.; Huang, T.; Lin, B. Research on the collaborative machining method for dual-robot mirror milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 105, 4071–4084.
14. Zhang, T.; Ouyang, F. Offline motion planning and simulation of two-robot welding coordination. *Front. Mech. Eng.* 2012, 7, 81–92.
15. Guo, C.; Xu, C.; Hao, J.; Xiao, D.; Yang, W. Ultrasonic non-destructive testing system of semi-enclosed workpiece with dual-robot testing system. *Sensors* 2019, 19, 3359.
16. Pellegrinelli, S.; Pedrocchi, N.; Tosatti, L.M.; Fischer, A.; Tolio, T. Multi-robot spot-welding cells for car-body assembly: Design and motion planning. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* 2017, 44, 97–116.
17. Talasaz, A.; Trejos, A.L.; Patel, R.V. The role of direct and visual force feedback in suturing using a 7-DOF dual-arm teleoperated system. *IEEE Trans. Haptics* 2016, 10, 276–287.
18. Wang, G.; Li, W.; Jiang, C.; Zhu, D.; Xie, H.; Liu, X.; Ding, H. Simultaneous calibration of multicoordinates for a dual-robot system by solving the $AXB = YCZ$ problem. *IEEE Trans. Robot.* 2021, 37, 1172–1185.
19. Wang, X.; Huang, J.; Song, H. Simultaneous robot–world and hand–eye calibration based on a pair of dual equations. *Measurement* 2021, 181, 109623.
20. Ren, Y.; Yin, S.; Zhu, J. Calibration technology in application of robot-laser scanning system. *Opt. Eng.* 2012, 51, 114204.

21. Zhao, D.; Bi, Y.; Ke, Y. Kinematic modeling and base frame calibration of a dual-machine-based drilling and riveting system for aircraft panel assembly. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 94, 1873–1884.
22. Fan, Q.; Gong, Z.; Zhang, S.; Tao, B.; Yin, Z.; Ding, H. A vision-based fast base frame calibration method for coordinated mobile manipulators. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* 2021, 68, 102078.
23. Ma, Q.; Goh, Z.; Ruan, S.; Chirikjian, G. Probabilistic approaches to the $AXB = YCZ$ calibration problem in multi-robot systems. *Auton. Robot.* 2018, 42, 1497–1520.
24. Fu, Z.; Pan, J.; Spyrakos-Papastavridis, E.; Chen, X.; Li, M. A Dual Quaternion-Based Approach for Coordinate Calibration of Dual Robots in Collaborative Motion. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2020, 5, 4086–4093.
25. Wang, W.; Liu, F.; Yun, C. Calibration method of robot base frame using unit quaternion form. *Precis. Eng.* 2015, 41, 47–54.
26. Xuan, J. Q. et al. Review on kinematics calibration technology of serial robots. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 15(8), 1759–1774. <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0528-1> (2014).
27. Gao, J., Han, H., Geng, J., Li, Z. & Li, D. *Kinematic Parameters Identification and Compensation of an Industrial Robot* (Springer, 2020).
28. Faria, C., Vilaca, J.L., Monteiro, S., Erlhagen, W., & Bicho, E. Automatic Denavit-Hartenberg Parameter Identification for Serial Manipulators. In *IECON 2019—45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. vol. 1; p. 610–617 (2019).
29. Bobby, R. A. & Klimchik, A. Combination of geometric and parametric approaches for kinematic identification of an industrial robot. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 71, 102142. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102142> (2021).
30. Chen, X., Zhang, Q. & Sun, Y. Non-kinematic calibration of industrial robots using a rigid-flexible coupling error model and a full pose measurement method.

Robot. Comput. Integr. Manuf. 57, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.002> (2019).

31. Žlajpah, L. & Petrič, T. Geometric Identification of Denavit-Hartenberg Parameters with Optical Measuring System. In *Advances in Service and Industrial Robotics Vol. 120* (eds Muller, A. & Brandstotter, M.) 1–8 (Springer, 2022).

32. Žlajpah, L. & Petrič, T. Kinematic calibration for collaborative robots on a mobile platform using motion capture system. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 79, 102446. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102446> (2023).

33. Hayat, A. A., Bobby, R. A. & Saha, S. K. A geometric approach for kinematic identification of an industrial robot using a monocular camera. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 57, 329–346. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.008> (2019).

34. Nubiola, A., Slamani, M., Joubair, A. & Bonev, I. A. Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker. *Robotica* 32(3), 447–466. <https://doi.org/10.1017/S0263574713000714> (2014).

35. Rodriguez-Guerra D, Sorrosal G, Cabanes I, et al.: Human-Robot Interaction Review: Challenges and Solutions for Modern Industrial Environments. *IEEE Access.* 2021; 9: 108557–78.

36. Rosillo N, Montés N, Alves JP, et al.: A Generalized Matlab/ROS/Robotic Platform Framework for Teaching Robotics. 10th International Conference on Robotics in Education (RiE). 2019 2020 Apr 10-12. Vienna, AUSTRIA, 2020; 1023: 159–169.

37. Zou Y, Zhou W: Automatic seam detection and tracking system for robots based on laser vision. *Mechatronics.* 2019; 63: 102261.

38. Wu J, Zhang D, Liu J, et al.: A Moment Approach to Positioning Accuracy Reliability Analysis for Industrial Robots. *IEEE Trans Reliab.* 2020; 69(2): 699–714.

39. Faria, J.L. Vilaza, S. Monteiro, W. Erlhagen, E. Bicho, Automatic denavithartenberg parameter identification for serial manipulators, in: IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, vol. 1, 2019, pp. 610–617, <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2019.8927455>.
40. A.A. Hayat, R.G. Chittawadigi, A.D. Udai, S.K. Saha, Identification of denavithartenberg parameters of an industrial robot, in: AIR '13, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2013, pp. 1–6, <http://dx.doi.org/10.1145/2506095.2506121>.
41. Umbach, K.N. Jones, A few methods for fitting circles to data, IEEE Trans. Instrum. Meas. 52 (6) (2003) 1881–1885, <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2003.820472>.
42. Visu P, Sivakumar N, Kumaresan P, et al.: Removing leaf petioles and auto locating apex-base points using straight line interpolation and bisection. *Multimed Tools Appl.* 2020; 79(1): 5355–5369.
43. Hu B, Cao Z, Zhou M: An Efficient RRT-Based Framework for Planning Short and Smooth Wheeled Robot Motion Under Kinodynamic Constraints. *IEEE Trans Ind Electron.* 2021; 68(4): 3292–302.
44. Song E: Data of Kinematic analysis and motion planning simulation of cooperative robot. *figshare. Dataset.* 2021. <http://www.doi.org/10.6084/m9.figshare.17977205.v1>
45. Q. Chen, Y. Zhou, Y. Wang, M. Zhu, L. Guo, C. He, Research on stability and accuracy of the OptiTrack system based on mean error, in: S. Nakashima, S. Mu, H. Lu (Eds.), *International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics 2021*, SPIE, 2021, p. 75, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2605796>.
46. G. Nagymate, R.M. Kiss, Motion capture system validation with surveying techniques, *Mater. Today Proc.* 5 (13) (2018) 26501–26506, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.107>.
47. Todorov, E. Convex and analytically-invertible dynamics with contacts and constraints: Theory and implementation in MuJoCo. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE; p. 6054–6061 (2014).

48. Žlajpah, L. & Petrič, T. Geometric Identification of Denavit-Hartenberg Parameters with Optical Measuring System. In *Advances in Service and Industrial Robotics Vol. 120* (eds Muller, A. & Brandstotter, M.) 1–8 (Springer, 2022).
49. Žlajpah, L. & Petrič, T. Kinematic calibration for collaborative robots on a mobile platform using motion capture system. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 79, 102446. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102446> (2023).
50. Žlajpah, L. & Petrič, T. Geometric Identification of Denavit-Hartenberg Parameters with Optical Measuring System. In *Advances in Service and Industrial Robotics Vol. 120* (eds Muller, A. & Brandstotter, M.) 2–10 (Springer, 2022).
51. Žlajpah, L. & Petrič, T. Kinematic calibration for collaborative robots on a mobile platform using motion capture system. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 78-80, 102446. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102446> (2023).
52. Sun, T., Liu, C., Lian, B., Wang, P. & Song, Y. Calibration for precision kinematic control of an articulated serial robot. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 68(7), 6000–6009. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2994890> (2021).
53. Sun, Y., & Hollerbach, J.M. Observability index selection for robot calibration. In *Proceedings—IEEE International Conference on Robotics and Automation*. p. 831–836 (2008).
54. Klimchik, A., Caro, S. & Pashkevich, A. Optimal pose selection for calibration of planar anthropomorphic manipulators. *Precis. Eng.* 40, 214–229 (2015).
55. Wang, W., Song, H., Yan, Z., Sun, L. & Du, Z. A universal index and an improved PSO algorithm for optimal pose selection in kinematic calibration of a novel surgical robot. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 50, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.09.011> (2018).
56. Li, K. L., Yang, W. T., Chan, K. Y. & Lin, P. C. An optimization technique for identifying robot manipulator parameters under uncertainty. *Springerplus* 5(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3417-5> (2016).

57. Harrison, K. R., Engelbrecht, A. P. & Ombuki-Berman, B. M. Self-adaptive particle swarm optimization: A review and analysis of convergence. *Swarm Intell.* 12(3), 187–226. <https://doi.org/10.1007/s11721-017-0150-9> (2018).
58. Mocap Crew. Українська студія Motion Capture (2024). <https://www.mocapcrew.com/uk/>
59. B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, *Robotics - Modelling, Planning and Control*, Springer-Verlag London, 2009, <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1>.
60. A.A. Hayat, R.G. Chittawadigi, A.D. Udai, S.K. Saha, Identification of Denavit-Hartenberg parameters of an industrial robot, in: *AIR '13*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2013, pp. 1–6, <http://dx.doi.org/10.1145/2506095.2506121>.
61. M. Abderrahim, A.R. Whittaker, Kinematic model identification of industrial manipulators, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 16 (1) (2000) 1–8, [http://dx.doi.org/10.1016/S0736-5845\(99\)00038-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00038-1).
62. D. Umbach, K.N. Jones, A few methods for fitting circles to data, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 52 (6) (2003) 1881–1885, <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2003.820472>.
63. J.S. Ketchel, P.M. Larochele, Collision detection of cylindrical rigid bodies using line geometry, in: *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference- DETC2005*, vol. 7 B, 2005, pp. 811–825, <http://dx.doi.org/10.1115/DETC2005-84699>.
64. C. Rajeevlochana, S. Subir, K. Shivesh, Automatic extraction of DH parameters of serial manipulators using line geometry, in: *The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics*, (May) 2012, pp. 1–9.
65. Y. Pan, L. Iorga, A.A. Pelegri, Numerical generation of a random chopped fiber composite RVE and its elastic properties, *Compos. Sci. Technol.* 68 (13) (2008) 2792–2798, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.007>.

66. Wang, W., Song, H., Yan, Z., Sun, L. & Du, Z. A universal index and an improved PSO algorithm for optimal pose selection in kinematic calibration of a novel surgical robot. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 50, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.09.011> (2018).
67. Li, K. L., Yang, W. T., Chan, K. Y. & Lin, P. C. An optimization technique for identifying robot manipulator parameters under uncertainty. *Springerplus* 5(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3417-5> (2016).
68. Švaco, M., Šekoranja, B., Šuligoj, F. & Jerbić, B. Calibration of an industrial robot using a stereo vision system. *Pro. Eng.* 69, 459–463. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.012> (2014).
69. Harrison, K. R., Engelbrecht, A. P. & Ombuki-Berman, B. M. Self-adaptive particle swarm optimization: A review and analysis of convergence. *Swarm Intell.* 12(3), 187–226. <https://doi.org/10.1007/s11721-017-0150-9> (2018).
70. Todorov, E. Convex and analytically-invertible dynamics with contacts and constraints: Theory and implementation in MuJoCo. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE; p. 6054–6061 (2014).
71. Faria, C., Vilaca, J.L., Monteiro, S., Erlhagen, W., & Bicho, E. Automatic Denavit-Hartenberg Parameter Identification for Serial Manipulators. In *IECON 2019—45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. vol. 1; p. 610–617 (2019).

Додаток А

Стаття у фаховому журналі (подана до редакції журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка у технологічних процесах»)

ЇДК 004.8

DOI:

Петро ПЕЛХОВСЬКИЙ, Наталія МОРКУН

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0009-0002-1922-0727

0000-0002-1261-1170

e-mail: pelexovsij@gmail.com

nataliia.morkun@lnu.edu.ua

МЕТОД КІНЕМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТІВ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ

У цій статті буде проаналізовано два підходи до підвищення абсолютної точності робота, встановленого на мобільній платформі за допомогою оптичної системи вимірювання. Перший підхід заснований на геометричних операціях, які використовуються для розрахунку осей обертання кожного суглоба. Цей підхід ідентифікує всі осі обертання, що дозволяє розрахувати параметри і, таким чином, створити повну кінематичну модель, включаючи похибки положення та орієнтації кінцевого ефектора робота та основи робота. Другий підхід до оцінки параметрів заснований на оптимізації з використанням набору спільних положень і поз кінцевого ефектора для знаходження оптимальних параметрів ДХ. Оскільки робот встановлений на мобільній основі, яка не закріплена, для динамічного та одночасного вимірювання положення основи робота та кінцевого ефектора використовувалася оптична вимірювальна система.

Ефективність двох запропонованих методів була проаналізована та підтверджена на роботі 7-DoF Franka Emika Panda, встановленому на мобільній платформі PAL Tiago-base. Результати свідчать про значне поліпшення абсолютної точності для обох запропонованих підходів.

Ключові слова: параметри денавіта-хартенберга, кінематичне калібрування, роботи, подвійний робот; калібрувальний інструмент; базова координата.

Petro PELIHOVSKY, Nataliya MORKUN

Khmelnytskyi National University

METHOD OF KINEMATIC CALIBRATION OF COLLABORATIVE ROBOTS ON A MOBILE PLATFORM

This paper will analyze two approaches to improve the absolute accuracy of a robot mounted on a mobile platform using an optical measurement system. The first approach is based on geometric operations used to calculate the axes of rotation of each joint. This approach identifies all axes of rotation, allowing the parameters to be calculated and thus a complete kinematic model, including the position and orientation errors of the robot end effector and the robot base. The second approach to parameter estimation is based on optimization using a set of joint positions and poses of the end effector to find optimal DH parameters. Since the robot is mounted on a mobile base that is not fixed, an optical measurement system was used to dynamically and simultaneously measure the position of the robot base and the end effector.

The effectiveness of the two proposed methods was analyzed and confirmed on the 7-DoF Franka Emika Panda, installed on the PAL Tiago-base mobile platform. The results show a significant improvement in absolute accuracy for both proposed approaches.

Keywords: Denavit-Hartenberg parameters, kinematic calibration, robots, double robot; calibration tool; base coordinate.

Постановка проблеми

В даній час роботи широко використовуються в промисловості для автоматизації виробничих процесів з метою підвищення ефективності та виробництва. Для великих обсягів виробничих процесів типова стратегія програмування полягає в переміщенні робота в потрібне положення, яке записується, а потім повторюється.

На противагу цьому, таке програмування не буде економічно вигідним для малосерійного виробництва, оскільки зазвичай воно забірає дуже багато часу. З іншого боку, стратегії автономного програмування можуть

бути використані для подолання розриву, але вони вимагають абсолютної точності робота для виконання завдання на реальному роботі.

У цьому випадку необхідні знання кінематики роботів. Зазвичай виробники роботів надають номінальну кінематичну модель роботів у вигляді параметрів Денавіта-Хартенберга (ДХ), яка відрізняється від фактичної моделі через помилки при виготовленні, складанні роботів тощо. Часто номінальні параметри також не є загальнодоступними, оскільки вони використовуються внутрішньо контролером робота. Все це обмежує практичне використання роботів у багатьох малооб'ємних додатках.

Загалом кінематичне калібрування можна розділити на дві групи залежно від використовуваного методу вимірювання. Метод розімкнутого контуру, коли вимірюється абсолютне положення робота, і метод замкнутого циклу, коли вимірюється положення робота щодо системи відліку. Однак в цілому обидва методи вимагають еталонної системи вимірювання для визначення кінематичних параметрів.

Аналіз останніх джерел

Роботи продемонстрували надзвичайно високі можливості праці та виконання в галузі механічної обробки, виробництва та складання, а також добре пристосовані до суворих умов праці [1]. Незважаючи на те, що роботизована технологія досягла значного прогресу, в умовах все більш складних завдань вантажопідйомність і робочий простір одного робота обмежені, а деякі складні великомасштабні завдання з навантаженням не можуть бути виконані одним роботом. У цьому випадку потрібні колаборативні системи з кількома роботами. У порівнянні з одним роботом, кілька роботів мають ряд переваг, таких як краща гнучкість, спільна робота і надійність [2].

Мультироботизовані системи знайшли широке застосування в медичній галузі [3], аерокосмічній галузі [4], а також у промислових додатках, таких як зварювання та складання [5]. Наприклад, Guo et al. [6], запропонували схему неруйнівного контролю напівзакритих заготовок з системою двох роботів і використовували її для випробування композитних деталей зі складними криволінійними поверхнями.

Pelle-grinelli et al. [7], запропонували метод оптимізації загального дизайну комірки та планування руху для кількох роботів, щоб скоротити ручну роботу зі складання металевих панелей. Крім того, Talasaz et al. [8], використовували тактильну дистанційну операційну систему з двома руками «майстер-підлеглий» для вимірювання сили взаємодії між тканиною та інструментом і виявили, що прямий зворотний зв'язок із силою може мінімізувати пошкодження тканин.

Таким чином, система кількох роботів широко використовується для виконання високоточних, великовантажних і складних завдань, демонструючи високу ефективність і бажані ефекти. Калібрування системи з двома роботами в основному вирішує проблему співвідношення координатної матриці рука-око робота, базової координати-базиса та інструмент-фланець [9].

Серед них калібрування єдиної роботизованої системи також включає калібрування «рука-око» робота та калібрування фланця інструменту [10]. Таким чином, калібрування базової системи координат двох роботів є основою, передумовою та необхідною умовою для реалізації спільної роботи двох роботів. Для базової системи координат подвійного робота в основному існують два методи калібрування, а саме: контактний і безконтактний.

Безконтактне калібрування зазвичай отримує співвідношення пози подвійних роботів за допомогою зовнішніх датчиків, таких як камери та лазерні трекери. Ren et al., запропонували метод калібрування для 3D-лазерного сенсора і пози робота, і тест показав, що точність калібрування досягла 0,062 мм. Нгуєн і Фам запропонували строгий метод виведення для вирішення коваріації X в задачі $AX = XB$, а A і B є випадковими матрицями збурень.

Результати експерименту показують, що цей метод має хорошу точність у прогнозуванні коваріації трансформації рука-очі. Zhuang et al., запропонували лінійне рішення. Враховуючи трансформацію з базової рами робота на фланцеву раму робота, матрицю перетворення зі світу роботів на базу робота та з координатних рамок робота-інструменту на координатні рамки фланця робота можна отримати, вимірявши позу кінцевого ефектора робота.

Tan et al., перетворили проблему калібрування роботизованої руки та м'якого пальця в проблему $AX = YB$ і порівняли три методи, засновані на нелінійній оптимізації та еволюційних обчисленнях. Крім того, Ruan et al. [11],

використовували систему бінокулярного зору і метод теорії перетворення координат для отримання просторового співвідношення між базовою координатою і базовою координатою шліфувальних роботів.

Zhao et al. [12], запропонували метод кінематичного моделювання та калібрування базової рами для автоматичної системи свердління та клепки літальних апаратів. Результати експериментів показали, що точність позиціонування подвійного робота становила 0,1 мм і 0,07° відповідно, а після компенсації точність калібрування базової рами після компенсації покращилася з 0,187 мм і 0,052° до 0,053 мм та 0,022° відповідно.

Fan et al. [13], використовували метод швидкого калібрування базової рами на основі зору, щоб отримати відносну позу координуючого робота шляхом маркування зображень для задоволення вимог калібрування в реальному часі. Результати експериментів показали, що точність цього методу калібрування досягала 2 мм і 0,1. Підводячи підсумок, можна сказати, що X , Y і Z в цих методах отримуються крок за кроком, і в процесі калібрування будуть кумулятивні похибки, що впливає на надійність результатів калібрування.

Для того, щоб зменшити похибки вищевказаних методів калібрування, Wang et al., запропонували ітеративний алгоритм лінійного наближення для вирішення матричного рівняння $AXB = YCZ$, досягаючи одночасного калібрування рука-око, інструмент-фланець і робот-робот для системи з двома роботами. Wu et al., і Ma et al. [14], використовували ітеративні та ймовірнісні методи для одночасного вирішення X , Y та Z у системі з кількома роботами відповідно.

Однак для розрахунку ітераційного методу потрібно багато часу, а імовірнісний метод серйозно впливає на шумові перешкоди. Wang et al., запропонували новий метод калібрування двох роботів шляхом поєднання методу закритої форми, заснованого на продукті Кронекера, та ітераційного методу задачі оптимізації опуклої функції. Цей метод підвищив ефективність і точність ітерацій.

Fu et al. [15], запропонували калібрувальну задачу, засновану на алгоритмі розкладання подвійного кватерніона і сингулярного значення, а моделювання і експеримент підтвердили більш високу точність калібрування цього методу. Qin et al., запропонували комбіноване рішення для вирішення невідомих параметрів у рівнянні $AXB = YCZ$ на основі рішення подвійного кватерніона замкнутої форми та ітераційного рішення Левенберга Марквардта (LM), реалізуючи калібрування системи подвійного робота в ортопедичній хірургії.

Хоча ці безконтактні методи калібрування можна автоматизувати, система з двома роботами, яка використовує цей метод, складна з високою вартістю, а похибки вимірювання датчика спричинять похибки калібрування. Ці проблеми обмежують його серійне застосування в промисловому виробництві. Контактне калібрування використовує спеціальні інструменти для допоміжного позиціонування і обчислює відносне позиційне співвідношення базової системи координат.

Gan et al., запропонували метод калібрування базових координат двох роботів тільки з використанням серії операцій «затискання рук» і відповідної спільної інформації. Методи множника Кватерніона і Лагранжа використовуються для проведення ітерації матриці обертання ортогональної нормалізації. Однак, коли використовуються ці методи, процес розрахунку ускладнюється, а ручна операція призведе до збільшення похибки калібрування.

Wang et al. [16], запропонували метод з використанням одиничного кватерніона для калібрування базової системи координат робота, який покращив ортогональність матриці обертання, і цей метод вимірював п'ять різних центральних точок інструменту (TCP), але операція TCP була трудомісткою і неточною.

Метою роботи є: розробка методів кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі.

Виклад основного матеріалу

В експерименті використовується робот 1600 ABB для проведення повторного калібрувального експерименту базових координат одного робота ($i = 1$). Нижній комп'ютер зв'язується з дротовим датчиком по протоколу MODBUS через однокристальний мікрокомп'ютер (чіп STM32F103ZET6).

Як показано на рисунку 1, робот управляється в різних положеннях за допомогою підвіски для навчання (щоб не втрачати загальності, є 14 груп вимірювання точки навчання, $j = 1, 2, \dots, 14$), довжина мотузки, яка виводиться датчиком, і положення кінцевого адаптера інструменту, показане на підвісці для навчання, рисунок 1.

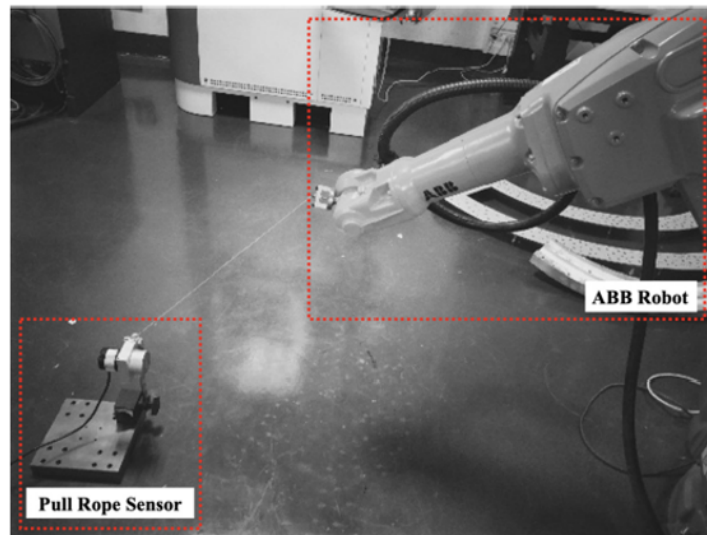


Рисунок 1 – Режим вимірювання калібрування одного робота

Після цього відрегулюємо калібрувальний інструмент для продовження вимірювання, а записані дані наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Запис даних експерименту з одним роботом

Точка калібрування k	Точка викладання j	Довжина мотузки $L_{1,j}L_{1,j}$ (мм)	Положення кінцевого адаптера $tkjt_{\{k\}}tkj$ (мм)
1	1	804.29199	[1295.78, -46.49, 1042.74]
	2	881.30255	[1295.80, 209.68, 1042.73]
	3	841.0332	[1295.84, -452.11, 1042.68]
	4	826.1182	[1188.90, -393.30, 1226.34]
	5	995.62207	[1189.90, -5.61, 1203.27]
	6	955.6239	[1083.19, -160.56, 748.53]
	7	524.83978	[1185.55, -344.85, 617.74]
	8	811.83495	[1183.51, 486.36, 592.35]
	9	511.13655	[1183.51, 12.84, 592.32]
	10	612.17269	[1183.52, -399.40, 726.54]
	11	684.66007	[1183.53, -79.43, 860.12]
	12	804.26715	[1183.53, 261.18, 860.11]
	13	811.26715	[1183.54, -213.55, 1013.35]
	14	909.52759	[1183.55, -378.61, 1098.11]

14 елементів даних у таблиці 1, розділені на дві групи (по 7 елементів даних у кожній групі), а цільова функція побудована для обчислення оптимального значення $p_{k(B_i)}$ у формулі (1). $L_{1,j,k}$ — довжина мотузки, що виводиться дотяганим датчиком, а $t_{1,j}$ — це положення кінцевої адаптер робота.

$$\begin{cases} S_{k_1} = \sum_{j=1}^7 \left(\|t_{1j} - p_{k_1(B_1)}\| - L_{1j_k} \right)^2 \\ S_{k_2} = \sum_{j=8}^{14} \left(\|t_{1j} - p_{k_2(B_1)}\| - L_{1j_k} \right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

У формулі (1), S_{k_1} та S_{k_2} є цільовими функціями перших семи груп і останніх семи груп даних, що відповідають точці калібрування p_k . $p_{k_1(B_1)}$ та $p_{k_2(B_1)}$ — це значення $p_{k(B_1)}$, обчислене, що відповідає двом групам даних.

Аналіз ефективності запропонованого методу

Результати показують, що похибки положення та орієнтації були значно зменшені порівняно з номінальними параметрами ДХ. Аналізуючи вплив вимірювання шуму на ідентифікацію параметрів ДХ, також показано, що якість ідентифікації знаходиться в межах можливостей системи вимірювання MoCap.

Далі вирішується матриця перетворення базових координат двох роботів. Результати експериментів показують, що реалізований метод може ефективно підвищити точність та ефективність калібрування. Тим часом, калібрування базових координат між роботами з довільною відстанню положення може бути реалізовано шляхом заміни ходу дрютяного датчика, який демонструє хорошу адаптивність.

Крім того, було б корисно оптимізувати та перевірити метод на більш широкому спектрі роботизованих систем і сценаріїв, включаючи ті, що мають неоптимальну поведінку нульового простору в суглобах або невизначеність даних вимірювання. Крім того, вивчення інтеграції цього підходу з іншими методами калібрування може бути цікавим шляхом.

ВИСНОВКИ

Вияснено, що існує кілька підходів до підвищення точності робота для типового промислового робота, встановленого на нерухомій рамі. На противагу цьому, не існує методу підвищення точності робота, коли робот встановлений на мобільній основі, що характерно для колаборативних роботів.

Були запропоновані методи, які, були підтвержені багатьма експериментами. У цьому розділі було узагальнено їх і висвітлено основні висновки. Потім оцінено кінематичні параметри виконуючи їх по типовому геометричному підході, схожого на той, з методикою, застосовною до роботів, встановлених на мобільній базі.

Результати показують, що похибки положення та орієнтації були значно зменшені порівняно з номінальними параметрами ДХ. Аналізуючи вплив вимірювання шуму на ідентифікацію параметрів ДХ було показано, що якість ідентифікації знаходиться в межах можливостей системи вимірювання MoCap.

Визначено, що у промисловому застосуванні роботів, коли операція вимагає певного ступеня точності та керованості шляху, можна використовувати метод інтерполяції, запропонований у цій роботі, щоб задовольнити вимоги.

Дані варіаційних кривих суглобів свідчать про те, що вдосконалений метод ДХ ефективно покращує стабільність і точність траєкторії руху кожного суглоба. Результати моделювання дають основу для реалізації роботом більш гнучкого планування руху.

Було вияснено, що калібрування базової системи координат подвійного робота має вирішальне значення для реалізації координованої роботи подвійного робота в обробці, виробництві та складанні. У цьому дослідженні створена система калібрування двох роботів на основі каліброваних компонентів інструменту, і ця система проста в експлуатації.

Представлено новий підхід до калібрування колаборативних роботів за допомогою замкнутого кінематичного ланцюга над сферичним з'єднанням. Запропонований підхід пропонує кілька помітних внесків, включаючи чисельний підхід до калібрування роботизованих систем та аналіз необхідного діапазону з'єднань у нульовому просторі, необхідного для ідентифікації.

Проведено оцінку параметрів ДХ як у моделюванні, так і в реальних сценаріях роботів, що продемонструвало високу точність та надійність запропонованого методу. Результати цього дослідження показують, що запропонований підхід може забезпечити економічно ефективний і практичний метод калібрування, що має перспективні наслідки для майбутнього розвитку колаборативних роботів.

Jireparatpa

1. Sherwani, F.; Asad, M.; Ibrahim, B. Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0). In Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST), Karachi, Pakistan, 26–27 March 2020.
2. Mukherjee, D.; Gupta, K.; Chang, L.H.; Najjaran, H. A survey of robot learning strategies for human-robot collaboration in industrial settings. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* **2022**, *73*, 102231.
3. Leporini, A.; Oleari, E.; Landolfo, C.; Sanna, A.; Larcher, A.; Gandaglia, G. Technical and functional validation of a teleoperated multirobots platform for minimally invasive surgery. *IEEE Trans. Med. Robot. Bionics* **2020**, *2*, 148–156.
4. Xiao, J.; Zhao, S.; Guo, H.; Huang, T.; Lin, B. Research on the collaborative machining method for dual-robot mirror milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2019**, *105*, 4071–4084.
5. Zhang, T.; Ouyang, F. Offline motion planning and simulation of two-robot welding coordination. *Front. Mech. Eng.* **2012**, *7*, 81–92.
6. Guo, C.; Xu, C.; Hao, J.; Xiao, D.; Yang, W. Ultrasonic non-destructive testing system of semi-enclosed workpiece with dual-robot testing system. *Sensors* **2019**, *19*, 3359.
7. Pellegrinelli, S.; Pedrocchi, N.; Tosatti, L.M.; Fischer, A.; Tolio, T. Multi-robot spot-welding cells for car-body assembly: Design and motion planning. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* **2017**, *44*, 97–116.
8. Talasaz, A.; Trejos, A.L.; Patel, R.V. The role of direct and visual force feedback in suturing using a 7-DOF dual-arm teleoperated system. *IEEE Trans. Haptics* **2016**, *10*, 276–287.
9. Wang, G.; Li, W.; Jiang, C.; Zhu, D.; Xie, H.; Liu, X.; Ding, H. Simultaneous calibration of multicoordinates for a dual-robot system by solving the $AXB = YCZ$ problem. *IEEE Trans. Robot.* **2021**, *37*, 1172–1185.
10. Wang, X.; Huang, J.; Song, H. Simultaneous robot–world and hand–eye calibration based on a pair of dual equations. *Measurement* **2021**, *181*, 109623.
11. Ren, Y.; Yin, S.; Zhu, J. Calibration technology in application of robot-laser scanning system. *Opt. Eng.* **2012**, *51*, 114204.
12. Zhao, D.; Bi, Y.; Ke, Y. Kinematic modeling and base frame calibration of a dual-machine-based drilling and riveting system for aircraft panel assembly. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2018**, *94*, 1873–1884.
13. Fan, Q.; Gong, Z.; Zhang, S.; Tao, B.; Yin, Z.; Ding, H. A vision-based fast base frame calibration method for coordinated mobile manipulators. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* **2021**, *68*, 102078.
14. Ma, Q.; Goh, Z.; Ruan, S.; Chirikjian, G. Probabilistic approaches to the $AXB = YCZ$ calibration problem in multi-robot systems. *Auton. Robot.* **2018**, *42*, 1497–1520.
15. Fu, Z.; Pan, J.; Spyrakos-Papastavridis, E.; Chen, X.; Li, M. A Dual Quaternion-Based Approach for Coordinate Calibration of Dual Robots in Collaborative Motion. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **2020**, *5*, 4086–4093.
16. Wang, W.; Liu, F.; Yun, C. Calibration method of robot base frame using unit quaternion form. *Precis. Eng.* **2015**, *41*, 47–54.

References

1. Sherwani, F.; Asad, M.; Ibrahim, B. Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0). In Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST), Karachi, Pakistan, 26–27 March 2020.
2. Mukherjee, D.; Gupta, K.; Chang, L.H.; Najjaran, H. A survey of robot learning strategies for human-robot collaboration in industrial settings. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* **2022**, *73*, 102231.
3. Leporini, A.; Oleari, E.; Landolfo, C.; Sanna, A.; Larcher, A.; Gandaglia, G. Technical and functional validation of a teleoperated multirobots platform for minimally invasive surgery. *IEEE Trans. Med. Robot. Bionics* **2020**, *2*, 148–156.
4. Xiao, J.; Zhao, S.; Guo, H.; Huang, T.; Lin, B. Research on the collaborative machining method for dual-robot mirror milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2019**, *105*, 4071–4084.
5. Zhang, T.; Ouyang, F. Offline motion planning and simulation of two-robot welding coordination. *Front. Mech. Eng.* **2012**, *7*, 81–92.
6. Guo, C.; Xu, C.; Hao, J.; Xiao, D.; Yang, W. Ultrasonic non-destructive testing system of semi-enclosed workpiece with dual-robot testing system. *Sensors* **2019**, *19*, 3359.
7. Pellegrinelli, S.; Pedrocchi, N.; Tosatti, L.M.; Fischer, A.; Tolio, T. Multi-robot spot-welding cells for car-body assembly: Design and motion planning. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* **2017**, *44*, 97–116.
8. Talasaz, A.; Trejos, A.L.; Patel, R.V. The role of direct and visual force feedback in suturing using a 7-DOF dual-arm teleoperated system. *IEEE Trans. Haptics* **2016**, *10*, 276–287.
9. Wang, G.; Li, W.; Jiang, C.; Zhu, D.; Xie, H.; Liu, X.; Ding, H. Simultaneous calibration of multicoordinates for a dual-robot system by solving the $AXB = YCZ$ problem. *IEEE Trans. Robot.* **2021**, *37*, 1172–1185.
10. Wang, X.; Huang, J.; Song, H. Simultaneous robot–world and hand–eye calibration based on a pair of dual equations. *Measurement* **2021**, *181*, 109623.

11. Ren, Y.; Yin, S.; Zhu, J. Calibration technology in application of robot-laser scanning system. *Opt. Eng.* 2012, 51, 114204.
12. Zhao, D.; Bi, Y.; Ke, Y. Kinematic modeling and base frame calibration of a dual-machine-based drilling and riveting system for aircraft panel assembly. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 94, 1873–1884.
13. Fan, Q.; Gong, Z.; Zhang, S.; Tao, B.; Yin, Z.; Ding, H. A vision-based fast base frame calibration method for coordinated mobile manipulators. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.* 2021, 68, 102078.
14. Ma, Q.; Goh, Z.; Ruan, S.; Chirikjian, G. Probabilistic approaches to the $AXB = YCZ$ calibration problem in multi-robot systems. *Auton. Robot.* 2018, 42, 1497–1520.
15. Fu, Z.; Pan, J.; Spyrakos-Papastavridis, E.; Chen, X.; Li, M. A Dual Quaternion-Based Approach for Coordinate Calibration of Dual Robots in Collaborative Motion. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2020, 5, 4086–4093.
16. Wang, W.; Liu, F.; Yun, C. Calibration method of robot base frame using unit quaternion form. *Precis. Eng.* 2015, 41, 47–54.

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Пеліховський Петро Вячеславович

Тема: Метод кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі

Спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень -; кількість сторінок записки 81

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі розроблено метод кінематичного калібрування колаборативних роботів на мобільній платформі

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі були запропоновані методи, які, були підтверджені багатьма експериментами. У цьому розділі було узагальнено їх і висвітлено основні висновки. Потім оцінено кінематичні параметри виконуючи їх по типовому геометричному підході, схожого на той, з методикою, застосовною до роботів, встановлених на мобільній базі. У другому розділі визначено, що у промисловому застосуванні роботів, коли операція вимагає певного ступеня точності та керованості шляху, можна використовувати метод інтерполяції. У третьому розділі було виявлено, що калібрування базової системи координат подвійного робота має вирішальне значення для реалізації координованої роботи подвійного робота в обробці, виробництві та складанні. У четвертому розділі було представлено новий підхід до калібрування колаборативних роботів за допомогою замкнутого кінематичного ланцюга над сферичним з'єднанням.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: немає.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4,00 (С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Лисенко Сергій Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри КІС

“ 11 ” 12 2024р.



І.С.Мартинюк (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Пеліховський П.В.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРм-23-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

08.12.2023р.

дата



підпис

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Петро ПЕЛІХОВСЬКИЙ

Співавтор:

Назва: МКР Пеліховський

Науковий керівник: Наталя МОРКУН

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 1.1%

Коефіцієнт подібності 2: 0.8%

Мікропробіли: 5

Заміна букв: 28

Інтервали: 0

Білі знаки: 1

Дата створення звіту: 2024-12-12 06:38:52.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2024-12-12

Дата


експерт

М.В. Федуса

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилоч в документах: 8%**

ID: 158064 Назва: МКР Метод кінематичного калібрування колаборативних робіт на мобільній Додано в БД: 2024-12-12 Автора: Петро ПЕЛІХОВСЬКИЙ Керівники: Наталя МОРКУН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	97244	754	746 (1%)	10 (1%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод оцінки та компенсація похибки позиціонування промислових роботів

Автор: Пеліховський Петро Вячеславович

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Науковий керівник: Моркун Наталя Володимирівна, доктор технічних наук, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріплення запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;


3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

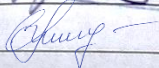
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 1.1% і адресується до 71 джерела, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи





Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Наталя МОРКУН