

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр  
Освітній рівень

Метод оптимізації траєкторії руху робота  
Назва теми

КвРАКІТР.2023175.01.07.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

Владислав ДЗИСЬ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

  
Підпис

Галина РАДЕЛЬЧУК  
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**

Дзисю Владиславу Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Метод оптимізації траєкторії руху робота

Керівник роботи Радельчук Галина Іванівна, кандидат технічних наук, доцент.

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.12.2024р.


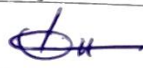

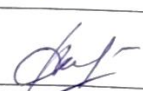
3 Вихідні дані до роботи Метою роботи є розробка методів оптимізації траєкторії руху робота. Предметом дослідження є траєкторія руху робота.

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

Вступ. Аналіз оптимізації траєкторії руху робота. Розробка оптимізації траєкторії з точки зору енергії та продуктивності промислового робота. Реалізація оптимізованої траєкторії промислового робота на основі вдосконаленого алгоритму. Дослідження оптимізації траєкторії для колаборативної робототехніки. 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 Аналіз оптимізації траєкторії руху робота	25.09.2024р.	Виконано
3 Розробка оптимізації траєкторії з точки зору енергії та продуктивності промислового робота	15.10.2024р.	Виконано
4 Реалізація оптимізованої траєкторії промислового робота на основі вдосконаленого алгоритму	30.10.2024р.	Виконано
5 Дослідження оптимізації траєкторії для колаборативної робототехніки	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

Дзись В.С.  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

Радельчук Г.І.  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: “Метод оптимізації траєкторії руху робота”

Автор роботи: Дзись В.С.

Керівник роботи: Радельчук Г.І.

Пояснювальна записка: 77 с., 31 рис., 11 таб., 1 дод., 71 джерел.

Графічна частина: 18 презентаційних слайдів

Ключові слова: індустрія 4.0; промисловий робот; оптимізація траєкторії; покращений алгоритм пошуку горобців, робот-маніпулятор; оптимізація траєкторії; маніпулятивність; електрична енергія.

**Мета роботи:** розробка методів оптимізації траєкторії руху робота. В роботі вияснено, що використання технології захоплення руху надає дані про положення та орієнтацію в режимі реального часу, які мають вирішальне значення для визначення оптимальної швидкості обертання коліс для досягнення оптимізованої продуктивності, що призводить до значного позитивного впливу на точність траєкторії робота.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	4
ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЕКТОРІЇ РУХУ РОБОТА .....	7
1.1 Модель мобільного робота з диференціальним приводом .....	8
1.2 Оптимізація траєкторії з точки зору енергії та продуктивності промислового робота .....	13
1.3 Оптимізація траєкторії промислового робота на основі вдосконаленого алгоритму пошуку.....	16
1.4 Функція вартості та модель людини в алгоритмі оптимізації .....	17
1.5 Система планування шляху .....	21
1.6 Висновки до першого розділу. Постановка задачі.....	24
2 РОЗРОБКА ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЄКТОРІЇ З ТОЧКИ ЗОРУ ЕНЕРГІЇ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА .....	26
2.1 Серійний робот.....	27
2.2 Алгоритм роботи PRM.....	36
2.3 Тривалість циклу.....	40
2.4 Дисперсія швидкості.....	42
2.5 Висновки до другого розділу.....	43
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ ТРАЄКТОРІЇ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА НА ОСНОВІ ВДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ .....	45
3.1 Кінематичний аналіз .....	45
3.2 Гібридна поліноміальна інтерполяція при плануванні траєкторії руху .....	51
3.3 Покращений алгоритм пошуку Sparrow .....	55
3.4 Імітаційний аналіз.....	58
3.5 Висновки до третього розділу .....	65
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЄКТОРІЇ ДЛЯ КОЛАБОРАТИВНОЇ РОБОТОТЕХНІКИ.....	67
4.1 Реалізація заданого дослідження .....	68

4.2 Дослідження оберненої та прямої механіки .....	71
4.3 Результати експерименту та оцінка .....	74
4.4 Висновки до четвертого розділу .....	80
ВИСНОВКИ .....	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	83
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі .....	91

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

DDMR – Мобільний робот з диференційним приводом

PRM – Імовірність дорожньої карти

DOF – Робот маніпулятор з п'ятьма ступенями свободи

SSA – Алгоритм пошуку горобців

PSO – Алгоритм оптимізації рою частинок

## ВСТУП

Останні досягнення в мехатроніці та робототехніці призвели до появи широкого спектру технологій з потенційним застосуванням їх у різних галузях. Цей прогрес спостерігався в останні роки і, як очікується, триватиме в міру того, як інтеграція роботів у повсякденне життя стає все більш поширеною.

Незважаючи на ці зміни, розгортання роботів у промислових середовищах, особливо на складальних операціях, все ще пов'язане з низкою проблем, включаючи ефективний розподіл завдань, заснованих на навичках, між людьми та роботизованими працівниками. У цій роботі запропоновано підхід до підвищення продуктивності роботизованих систем для оптимального планування шляху.

Ця техніка використовує технологію захоплення руху для збору даних про рухи робота в режимі реального часу, створення оптимальних стратегій планування шляху, а також для дистанційного керування та моніторингу діяльності робота. Запропонований підхід може значно розширити можливості роботизованих систем у різних промислових умовах. Результати мого дослідження демонструють, що інтеграція технології захоплення руху може значно підвищити точність та ефективність планування шляху в робототехнічних системах та підвищити їх загальну продуктивність.

Серія експериментів продемонструвала його ефективність у створенні оптимальних стратегій планування шляху, мінімізуючи при цьому ризик зіткнень та інших небезпек.

Метою роботи є розробка методів оптимізації траєкторії руху робота.

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

- дослідити наявні методи та засоби оптимізації траєкторії руху робота;
- виконати оцінку наявних методів;
- проаналізувати оптимізації траєкторії руху робота;
- дослідити обернену та пряму кінематику;

- виконати кінематичний аналіз;
- провести імітаційний аналіз.

Об'єктом дослідження є виявлення методів оптимізації траєкторії руху робота.

Предметом дослідження є траєкторія руху робота.

Методи досліджень. Була представлена багатоцільова задача, заснована на алгоритмі Кальмана. Цей алгоритм одночасно вивчає фактори маніпулятивності та електричної енергії. Дослідження було реалізовано для серійного робота з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям. У цього робота є гармата-ущільнювач, і ці параметри для оптимізації були вивчені для трьох різних траєкторій.

Наукова новизна отриманих результатів: впроваджено вдосконалений багатостратегічний алгоритм пошуку, який базується на плануванні траєкторії 3-5-3. Мета полягає в досягненні оптимального в часі планування траєкторії для промислових роботів.

## 1 АНАЛІЗ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЕКТОРІЇ РУХУ РОБОТА

В останні десятиліття мобільні роботи досягли успіху в ряді критично важливих безпілотних місій, від військових операцій до промислових і безпекових середовищ [1]. Однак для того, щоб ці роботи могли орієнтуватися в складних середовищах і автономно досліджувати, необхідно вирішити фундаментальну проблему планування шляху [2].

Дослідники цікавляться плануванням шляху ще з середини 1960-х років, і проблему можна визначити так: маючи робота і його оточення, робот шукає оптимальний можливий шлях від початкової позиції до пункту призначення, ґрунтуючись на певних критеріях продуктивності [4,5]. Розробивши потужну технологію планування шляху для мобільних роботів, можна не тільки заощадити дорогоцінний час, але й зменшити знос і капітальні інвестиції роботів.

В результаті свого значного практичного застосування, планування шляху для мобільних роботів стало популярною темою для досліджень як на внутрішньому, так і на міжнародному рівнях. Планування шляху мобільного робота є критично важливим завданням у робототехніці. Він передбачає пошук шляху без зіткнень для руху робота зі свого початкового положення до положення мети в кожному середовищі.

У динамічних середовищах завдання стає більш складним, оскільки робот повинен реагувати на зміни в навколишнє середовище в режимі реального часу. Тому пошук ефективного та надійного алгоритму планування шляху має вирішальне значення для успішного розгортання мобільних роботів у динамічних середовищах.

У літературі були запропоновані різні методи планування шляху, включаючи штучне поле, сітку, нейронну мережу та еволюційні алгоритми, такі як генетичний алгоритм хаосу.

Ці методи мають переваги і недоліки, а вибір методу залежить від конкретних вимог застосування.

Планування шляху мобільного робота може відрізнятися з точки зору реалізації від планування БПЛА, наприклад, використання кривих NURBS.

Тим не менш, основні принципи залишаються незмінними - розробляти ефективні та ефективні траєкторії, які забезпечують плавний і безпечний рух, подібно до стратегій планування шляху, що використовуються в автономних 3D-польотах [6,7]. Аналогічно, для БПЛА з нерухомим крилом були розроблені чіткі траєкторії польоту для польотів на низьких висотах, таких як посадка та сигнальна ракета [8].

Комп'ютерне моделювання та інструменти проектування [9], використовуються для допомоги в розробці 3D-траєкторій польоту. У даному дослідженні було вирішено використовувати криві NURBS для проектування бажаної траєкторії руху робота. Цей вибір був обумовлений дослідженнями, які продемонстрували, що такий підхід дозволяє ефективно уникнути різких змін швидкості робота [10,11].

Планування шляху має вирішальне значення для керування диференціальним мобільним роботом, оскільки він визначає траєкторію, за якою робот буде слідувати, і забезпечує безпечну та ефективну навігацію в навколишньому середовищі. Мобільний робот з диференціальним приводом (DDMR) є популярною та простою конструкцією серед різних типів мобільних роботів.

Диференціальні колеса поширені в автономних наземних роботах, але повна автономність вимагає уваги до зондування, планування шляху, контролю та самокалібрації. Наголосити на необхідності безпечної та комфортної взаємодії людини з роботами та транспортними засобами з диференціальним приводом [12].

### 1.1 Модель мобільного робота з диференціальним приводом

Запропонований метод моделювання мобільного робота за допомогою MATLAB/ Simulink надає детальну основу для моделювання динаміки та

поведінки чотириколісної конструкції, схожої на автомобіль. Це розширення дозволяє більш реалістично представляти мобільних роботів, які зазвичай зустрічаються в промислових і автомобільних додатках. Завдяки цій конфігурації, яка включає два передніх колеса, здатні керувати, і два задніх колеса з фіксованими заголовками, модель може точно зафіксувати складну взаємодію між рухом робота та його оточенням.

Крім того, можливість незалежного керування кожним колесом підвищує універсальність моделі, дозволяючи дослідникам і практикам вивчати широкий спектр сценаріїв руху, включаючи навігацію в обмеженому просторі, виконання точних маневрів і подолання нерівностей місцевості. Такий комплексний підхід до моделювання мобільних роботів закладає основу для розробки передових стратегій управління, оптимізації продуктивності системи, а також полегшення проектування та тестування автономних алгоритмів навігації.

Конфігурація мобільного робота представлена середньою точкою між задніми колесами  $(x, y)$  і кутом повороту  $\theta$ , що позначається  $q = (\phi, x, y, \psi)$ . У моделюванні мобільного робота виділяють кілька ключових параметрів та відіграють важливу роль у визначенні його динаміки. До них відноситься лінійна швидкість  $(v)$ , яка представляє швидкість, з якою робот рухається по прямій лінії.

Напрямок  $(\phi)$ , який вказує на орієнтацію робота відносно опорної осі. Кутова швидкість  $(\omega)$  описує швидкість зміни орієнтації робота з плином часу. Частота обертання коліс  $(\phi_R$  і  $\phi_L)$  відносяться до швидкостей обертання правого і лівого коліс відповідно, вплив на них робота.

Радіус колеса  $(r)$  і ширина коліс  $(d)$ . Кут повороту  $(\psi)$  визначає кут, під яким передні колеса повертаються, впливаючи на траєкторію руху робота, колісну базу.  $(l)$  являє собою відстань між осями передніх і задніх коліс, що впливає на стабільність і маневреність робота. Ці параметри в сукупності складають основу для моделювання кінематики та динаміки системи мобільного робота.

У контексті моделювання мобільного робота системи координат є фундаментальними компонентами, які визначають просторові відносини та орієнтації в системі. Ці системи координат забезпечують основу для

представлення положення, орієнтації руху робота та його компонентів. Як правило, для опису різних аспектів поведінки робота використовуються кілька систем координат.

Наприклад, глобальна система координат може визначати абсолютне положення та орієнтацію робота по відношенню до фіксованої системи відліку, такої як навколишнє середовище або карта. Місцеві системи координат, з іншого боку, часто прикріплені до конкретних компонентів робота, таких як його шасі або датчики, що дозволяє проводити локалізовані вимірювання та керування.

Крім того, системи координат, що фіксуються на тілі, узгоджуються з власною системою координат робота, що дозволяє точно описувати його рух і динамічні характеристики. Розуміння того, як ці системи координат пов'язані одна з одною та як вони використовуються в процесі моделювання, має важливе значення для точного моделювання поведінки робота та його взаємодії з навколишнім середовищем.

Рисунок 1.1 ілюструє модель чотириколісного мобільного робота, що служить наглядним посібником для розуміння структури та компонентів системи. В цілому, цей запропонований метод пропонує детальний підхід до моделювання кінематичної моделі мобільного робота з диференціальним приводом за допомогою MATLAB / Simulink.

Рівняння швидкості обертання колеса, описане рівнянням, є ключовим аспектом кінематичної моделі мобільного робота [13]. Він визначає швидкість обертання кожного колеса на основі таких параметрів, як швидкість, радіус колеса та ширина колії. Це рівняння відіграє вирішальну роль у точному контролі швидкості та напрямку руху коліс.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos(\theta) & \frac{r}{2} \cos(\theta) \\ \frac{r}{2} \sin(\theta) & \frac{v}{2} \sin(\theta) \\ -\frac{r}{2d} & \frac{r}{2d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi L \\ \varphi R \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

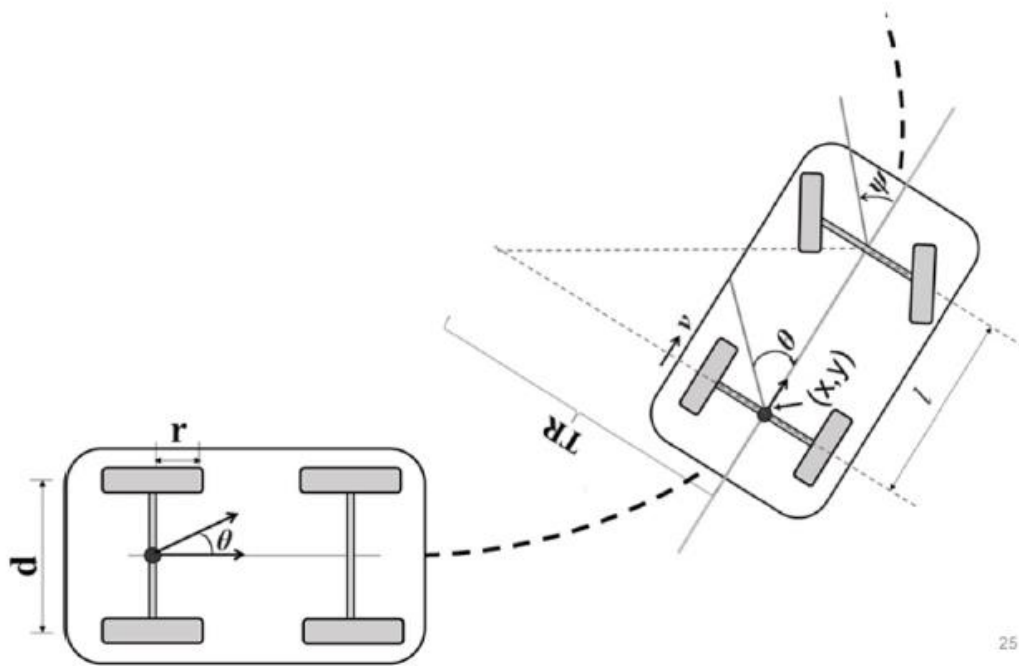


Рисунок 1.1 – Модель чотириколісного мобільного робота

Рівняння (1.2) окреслює кінематику мобільного робота, пропонуючи цінну інформацію про його динамічну поведінку. Це рівняння виражається наступним чином:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\tan \psi) & 0 \\ \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

Керуючі змінні, що позначаються як  $(v, \psi)$ , обмежені замкнутим інтервалом, що зображується рівнянням (1.3). І  $v$ , і  $\psi$  взаємопов'язані і можуть бути визначені за допомогою наведених виразів:

$$v = v, \psi = \tan^{-1} \left( \frac{l\omega}{v} \right), \quad (1.3)$$

Обидві керуючі змінні  $(v, \psi)$  розглядаються в цьому контексті з обмеженнями.

Спрощене представлення кінематики мобільного робота, відображене в рівнянні (1.4), підкреслює динамічну взаємодію між швидкістю і кутовою швидкістю, які укладені в керуючий вектор  $u$ . Це рівняння дає цінну інформацію про те, як зміни швидкості та кутової швидкості впливають на рух робота.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = G(q)u = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

З рівняння (1.4) ми можемо вивести обмеження за допомогою рівняння (1.5):

$$\dot{x} = v \cos \theta, \quad \dot{y} = v \sin \theta, \quad (1.5)$$

Щоб визначити значення  $v$ , потрібно ізолювати його в одне рівняння, а потім підставляти результат у рівняння (1.6), щоб отримати вираз через решту змінних.

$$A(q)\dot{q} = [0 \sin \theta - \cos \theta]\dot{q} = \dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0, \quad (1.6)$$

При постановці завдання на запропоновану систему управління важливо встановити чіткий критерій оптимізації. Критерій оптимізації я визначаю як мінімізацію відхилення між бажаною траєкторією і фактичним шляхом, прокресленим роботом. Цей показник відхилення служить мірилом продуктивності системи в точному слідуванні наміченому шляху, враховуючи динамічні обмеження та фактори навколишнього середовища.

1) Критерій оптимізації:  $J = \int_{t_0}^{t_f} \|\text{бажана траєкторія} - \text{фактичний шлях}\| dt$

У критерії оптимізації  $J$  представляє мету, яку потрібно мінімізувати, тоді як  $t_0$  і  $t_f$  позначають початковий і кінцевий час відповідно.

Інтеграл фіксує кумулятивне відхилення між бажаною траєкторією і фактичним шляхом за заданий інтервал часу. Цей критерій спрямовує систему управління на мінімізацію розбіжностей між запланованою траєкторією та фактичною траєкторією робота, забезпечуючи точну навігацію з урахуванням динамічних обмежень та факторів навколишнього середовища.

У нещодавніх застосуваннях дана модель відіграла важливу роль в аналізі стабільності та маневреності мобільних роботів у динамічному середовищі, особливо в сценаріях, що передбачають уникнення перешкод та планування шляху. Включивши реальні параметри та фактори навколишнього середовища в структуру моделювання, було отримано цінні розуміння поведінки робота в різних умовах.

Крім того, модель служить основним інструментом для розробки та перевірки алгоритмів керування, спрямованих на підвищення продуктивності робота в реальних умовах. Інтегруючи механізми керування зі зворотним зв'язком та обробку даних датчиків у середовище моделювання, ми можемо оцінити ефективність різних стратегій керування у досягненні бажаних цілей, таких як відстеження траєкторії та досягнення цілей.

## 1.2 Оптимізація траєкторії з точки зору енергії та продуктивності промислового робота

Були проведені численні дослідження, в ході яких багато методів планування шляху зосереджені на мінімізації часу, мінімізації зміщення швів [14] або мінімізації споживання електричної енергії. Ті, хто приймає критерій мінімізації споживання електричної енергії як частину багатоцільової задачі, використовували стохастичні методи.

Серед найбільш часто використовуваних методів можна виділити генетичні алгоритми, техніку Лагранжа і тунельні алгоритми. Однак немає свідчень про розвиток траєкторії планування за участю багатоцільового методу з використанням методу Кальмана.

З описаних вище причин і як новинка в літературі дана робота сформульована з подвійною метою: отримати максимальну продуктивність робота-маніпулятора і мінімізувати споживання електричної енергії в економічному та екологічному плані. Це було виконано для заданих траєкторій за допомогою методу Калмана, який за допомогою тестування та корекції забезпечує рішення за коротший час обчислення, ніж інші стохастичні алгоритми, та зменшує ефекти небажаних вхідних даних.

Можливість дослідження полягає у використанні функції щільності ймовірності, за якою слідує оцінка Калмана, з метою пошуку оптимального значення визначеної цільової функції. Як видно далі, результати і розрахунки можна екстраполювати на будь-який серійний маніпулятор і будь-яку траєкторію. Тому була перевірена придатність методу.

Блок-схема, показана на рисунок 1.2, вона являє собою послідовність оптимізації траєкторій в будь-якому маніпуляторі. Це відповідає конкретно створеному програмному забезпеченню, в якому вибирається маніпулятор і траєкторія для вивчення. При цьому програмне забезпечення оптимізує продуктивність та електричну енергію маніпулятора. Тому, для отримання відповідних результатів необхідно вивчити кінематику і динаміку обраного маніпулятора.

Пізніше реалізується цільова функція, визначена для вибору ваги для кожного з критеріїв оптимізації (маніпулятивність та електрична енергія). Як тільки ітераційний алгоритм отримує результати, що відповідають заданим умовам безробіття, він показує результати обох критеріїв оптимізації.

Оскільки більшість промислових роботів, що використовуються в автомобільному секторі, є серійними маніпуляторами з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям, ці фактори беруться за приклад для застосування запропонованого методу оптимізації.

Для цієї симуляції був обраний робот KUKA KR30-3, що представляє собою робота, в якому до кінцевого ефектора прикріплений пістолет для нанесення герметика. Компоненти та рухи робота показані на рисунку 1.3.

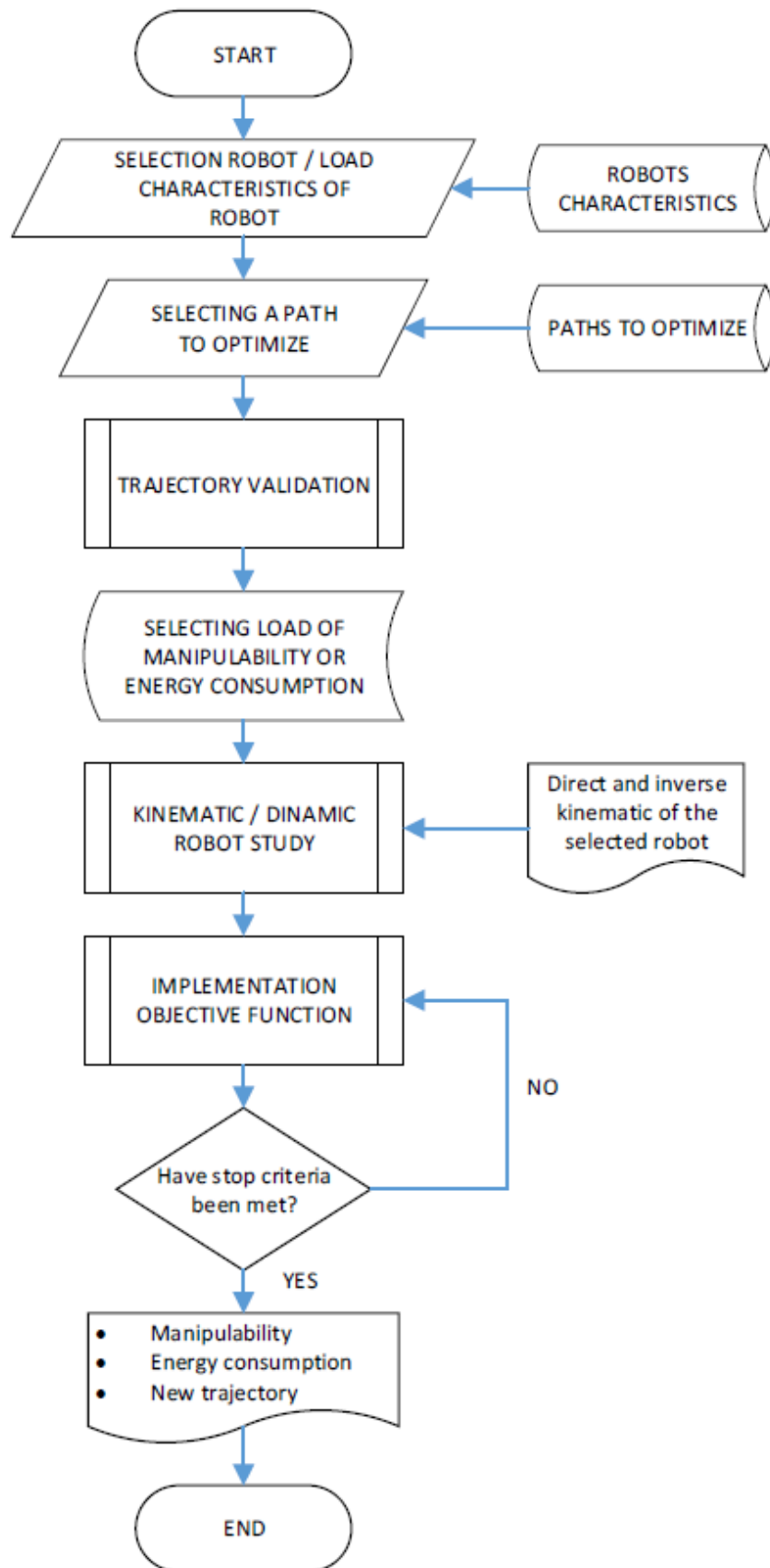


Рисунок 1.2 – Блок-схема, яка слідувала траєкторії сталої оптимізації

Оскільки індустріалізація продовжує розвиватися, країни в усьому світі активно просувають модернізацію промислового виробництва та модернізацію автоматизації. Промислові роботи, як основне обладнання для заміни ручної праці для підвищення ефективності виробництва, привернули широку увагу та дослідження на промислових автоматизованих виробничих лініях.

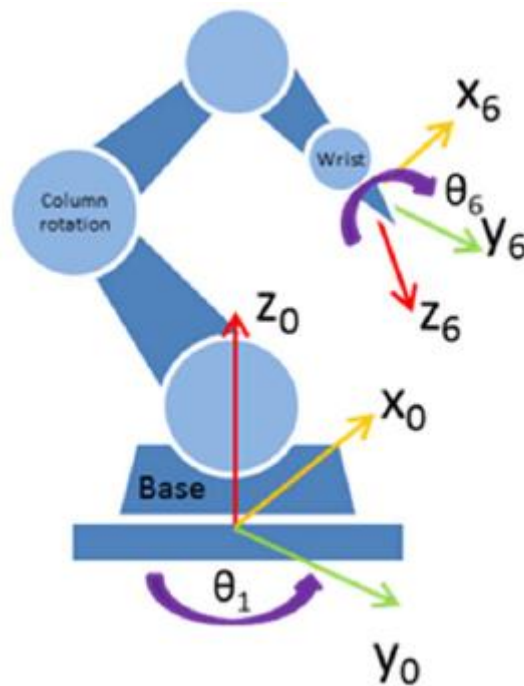


Рисунок 1.3 – Робот-маніпулятор з пістолетом-ущільнювачем

1.3 Оптимізація траєкторії промислового робота на основі вдосконаленого алгоритму пошуку

Розвиток технологій, пов'язаних зі штучним інтелектом, відкрив нову еру в галузі промислового виробництва, коли промислові роботи, які включають інтелектуальні технології, представляють значний напрямок для майбутнього розвитку. Для забезпечення ефективного і стабільного виконання виробничих завдань в процесі експлуатації промислових роботів обов'язковим є проведення комплексного дослідження оптимізації траєкторії на цих машинах.

Останніми роками дослідники провели масштабні дослідження з планування траєкторії для роботизованих рук [15], як виянилось планування траєкторії роботизованої руки в суглобовому просторі вимагає представлення

суглобових змінних як функцій, що залежать від часу, а потім обмеження їх кутів, кутових швидкостей і кутових прискорень.

Sabarigirish et al. [16], представляє визначення траєкторії між початковою точкою і кінцевою точкою для робота-маніпулятора з п'ятьма ступенями свободи (DOF) при наявності перешкод. Шлях визначається за допомогою кубічного многочлена, що забезпечує плавний рух робота.

Також враховується характер робота-маніпулятора. Fang et al. [17], виконали планування траєкторії руки робота за допомогою кубічного многочлена та функції квінтичного полінома. Результати моделювання показують, що метод квінтичного многочлена ефективно вирішує проблему розриву прискорення і отримує безперервну гладку криву траєкторії кожного суглоба.

Pogawagata et al. [18], об'єднали кубічні многочлени та поліноми п'ятого степеня та використали алгоритм інтерполяції 5-3-5-градусного полінома, щоб зробити згенеровану траєкторію руху безперервно диференційовною за положенням, швидкістю та прискоренням.

Цілі планування траєкторії варіюються в різних сферах застосування роботизованих рук, які можна класифікувати за оптимальним часом роботи, оптимальним споживанням енергії, оптимальним впливом і багатоцільовою оптимізацією. Примітно, що більшість наукових досліджень зосереджена на оптимальному плануванні траєкторії для оперативного часу [19].

#### 1.4 Функція вартості та модель людини в алгоритмі оптимізації

Функція вартості є ядром алгоритму оптимізації. Залежно від того, як визначена ця функція, вона визначатиме, де буде сходиться траєкторія робота.

Після того, як послідовність конфігурацій  $q$ , прийнятих роботом, була змодельована, положення кожної ланки знаходять шляхом вирішення прямої кінематичної задачі. На цьому етапі можна розрахувати відстань від відрізка [20] до відрізка між роботом і перешкодами.

Для того, щоб утримати робота-доріжку подалі від перешкоди, використовувався метод, схожий на штучний потенціал. Штраф у функції вартості додається, якщо будь-яка з ланок робота знаходиться близько до будь-якої перешкоди нижче порогу. Цей штраф обернено пропорційний відстані.

Чим ближче робот підходить до людини, тим повільніше робот може рухатися. Для поліпшення можливостей і загального результату траєкторія дискретизується на  $n$  об'єднаних ходів, кожен з яких може приймати різну швидкість.

В середині алгоритму моделювання мінімальна відстань між людиною та зв'язками робота обчислюється один раз для кожного підсегмента траєкторії  $i = 1, 2, \dots, n$ . Потім ця відстань використовується для визначення швидкості кожного підсегмента.

Максимальна швидкість буде пропорційна відстані за наступним рівнянням:

$$v_{max}^i = \frac{1}{T_B} k d_{min}^i, \quad (1.7)$$

де  $v_{max}^i$  ( $mm/s$ ) — максимальна швидкість з  $i^{th}$  підсегмент. Значення  $d_{min}^i$  ( $mm$ ) є мінімальною відстанню, розрахованої між конфігурації роботів в  $i^{th}$  підсегменті та людини. Час, з якого обчислюється  $T_B$  ( $s$ ) сума часу реакції контролера і час гальмування робота, як правило, це надається виробником робота.

Такого роду міркування породжується швидкістю алгоритму моніторингу, запропонованого ISO-TS-15066 [21] з основною відмінністю: стандарт ISO вимагає наявності датчиків у полі які вимірюють фактичну відстань оператора з бази робота в режимі реального часу. А наш сценарій натомість є лише імовірнісний дослідження: немає впевненості, що людина є не в безпосередній близькості від робота, а лише високо ймовірність.

Більше ненавмисне зіткнення ймовірно зв'язано з SSM. З цієї причини додається масштабний коефіцієнт безпеки  $k < 1$ , щоб зробити можливу аварію більш прийнятною, зменшуючи швидкість відносно підходу SSM. Масштабний коефіцієнт безпеки  $k$  має бути обраний обидва на основі надійності рухів особи та рівня ризику та збитку що може спричинити ненавмисний контакт.

Було перевірено три різні методи інтерпретації зайнятості людини в робочому просторі і, таким чином, алгоритм оптимізації. Залежно від способу обчислення відстаней розроблено три різні методи:

- статична об'ємна розгортка людини, рисунок 1.4, де алгоритм враховує всі положення, які оператор приймає протягом усієї операції;
- динамічна модель людини, рисунок 1.5, де алгоритм враховує лише відстань між роботом і оператором у позі, яка залежить від заданого моменту;
- модель людини часового вікна, рисунок 1.6, де алгоритм розглядає вікно позицій в кожен розглянутий момент.

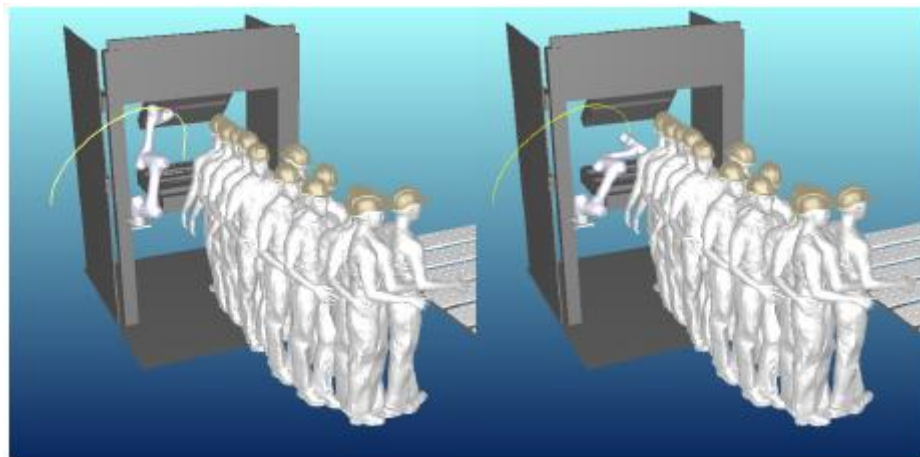


Рисунок 1.4 – Кожна точка траєкторії робота алгоритма враховує всі позиції оператора

Експерименти проводилися для перевірки в реальному житті якості траєкторій, згенерованих трьома алгоритмами. Завдання цього експерименту полягає в тому, щоб достовірно відобразити поведінку оператора на робочому місці.

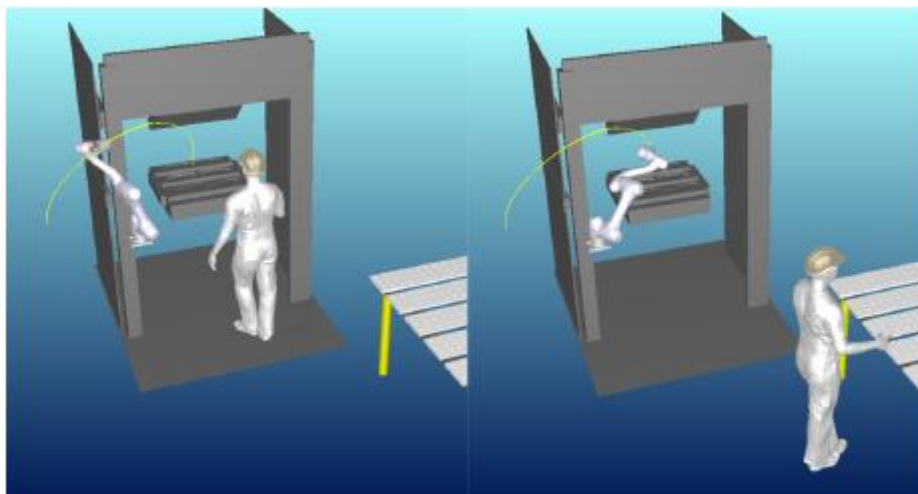


Рисунок 1.5 – Обчислення алгоритму відстані між роботом і положенням оператора в цю секунду Коли оператор знаходиться далеко, робот рухається з більшою швидкістю

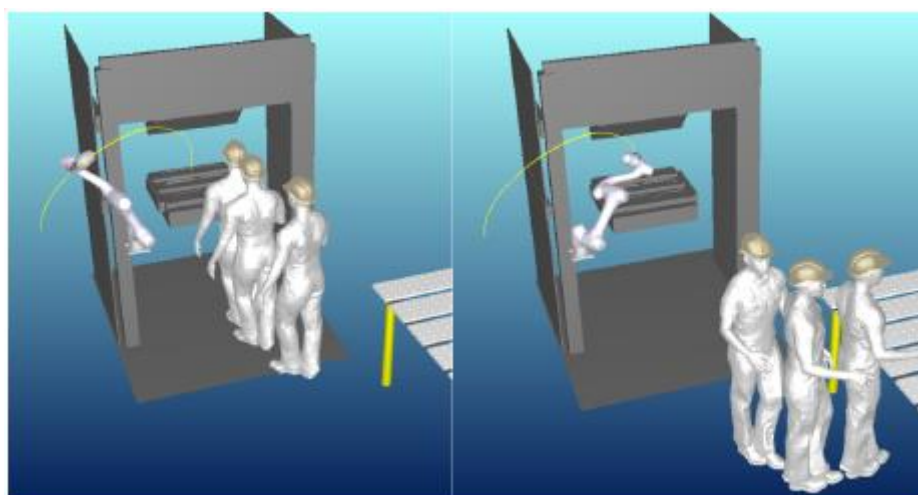


Рисунок 1.6 – Обчислення алгоритмом мінімальної відстань між роботом і трьома позиціями оператора: в цю секунду - одну секунду до і одну секунду після

В реальності працівник не може виконувати всі завдання точно в один і той же час, але залежать від різних факторів, таких як втома, нудьга і т.д., його швидкість може варіюватися. Намагаючись відтворити цю варіативність, експеримент проводився з різними виконаннями операторів.

Для того, щоб зрозуміти та кількісно оцінити ефективність трьох алгоритмів, потрібна була базова траєкторія. Ця траєкторія є орієнтиром, з яким можна порівнювати алгоритми. Ця траєкторія є найпростішим способом змусити робота рухатися від початкової точки до кінцевої.

Для програмування цієї функції використовувався метод навчання серво-асистента. Швидкість підтримувалася на рівні 20 градусів/с, тобто швидкість за замовчуванням, встановлена на роботі. Ця траєкторія буде називатися "База".

Для того, щоб порівняти ці 4 траєкторії (Base, Algorithm1, Algorithm2, Algorithm3). Першим з них повинен бути час циклу, тобто загальний час між відкриттям і закриттям преса.

Другий індекс - це енергія, що передається при перехідному контакті з плечем оператора. Останній порівняльний індекс - це дисперсія швидкості, допущена алгоритмом, тобто те, наскільки оператор може змінювати час виконання завдання без зіткнення з роботом.

### 1.5 Система планування шляху

Запропонована система планування шляху для мобільного робота, зображена на рисунку 1.4, вона охоплює мережу взаємопов'язаних компонентів, спрямованих на генерацію оптимальної навігаційної траєкторії, яка зображена на рисунку 1.4. Надані користувачем координати початку та мети служать вхідними даними для системи. Під час роботи з даними на етапі обробки система захоплення руху безперервно відстежує положення та орієнтацію робота, а датчики дальності збирають дані про навколишнє середовище. Згодом система будує карту навколишнього середовища за допомогою двійкового картографування зайнятості та генерує імовірнісну дорожню карту за допомогою алгоритму PRM мобільного робота.

Алгоритм PRM створює графік середовища, де кожен вузол представляє потенційне місце розташування робота, а кожен край представляє реальний шлях між двома вузлами. Алгоритм використовує пробний підхід для вибірки

випадкових конфігурацій робота та підключення їх до графіка. Переконавшись, що згенерований графік охоплює всі можливі шляхи.

Система використовує захоплення руху на основі камери для моніторингу рухів мобільних роботів. Це передбачає передачу даних про положення в режимі реального часу на MATLAB/Simulink через порт Ethernet з подальшою обробкою через блоки логіки управління. Згодом дані передаються роботу за допомогою QUARC-Real Time. На етапі обробки система захоплення руху безперервно відстежує положення та орієнтацію робота, а датчики дальності збирають дані про навколишнє середовище.

Згодом система будує карту навколишнього середовища за допомогою двійкового картографування зайнятості та генерує імовірнісну дорожню карту за допомогою алгоритму PRM мобільного робота.

Алгоритм PRM створює графік середовища, де кожен вузол представляє потенційне місце розташування робота, а кожен край представляє реальний шлях між двома вузлами.

Алгоритм використовує пробний підхід для вибірки випадкових конфігурацій робота та підключення їх до графіка. Переконавшись, що згенерований графік охоплює всі можливі шляхи.

Реалізована система використовує захоплення руху на основі камери для моніторингу рухів мобільних роботів. Це передбачає передачу даних про положення в режимі реального часу на MATLAB/Simulink через порт Ethernet з подальшою обробкою через блоки логіки управління. Згодом дані передаються роботу за допомогою QUARC-Real Time.

Реалізована наземна станція управління може похвалитися надійним обладнанням, оснащеним процесором Intel Core i7, 16 ГБ оперативної пам'яті DDR4 та необхідними програмними інструментами, такими як MATLAB 2020a та QUARC Real-Time Control Software 2020. Станція оснащена трьома моніторами, джойстиком USB-контролера польоту та дводіпазонним WiFi-роутером.

Тестова установка MoCap включає в себе 16 камер Vicon, які встановлюють систему координат для мобільних роботів і картографують робочий простір. Для точного визначення місцезнаходження та відстеження об'єктів потрібно щонайменше чотири камери. Система Vicon надає точні та надійні дані для додатків аналізу руху. Положення мобільного робота відстежується в 3D-просторі, але оскільки він працює на 2D-площині, дані про напрямок руху Z, а також кути крену і тангажу не мають значення.

Калібрування камер для синхронізації та виявлення проводиться за допомогою калібрувальної палички після встановлення зв'язку між системою Vicon та Simulink через Ethernet.

Результат даної системи є оптимальним шляхом для робота, враховуючи навколишнє середовище та перешкоди, з якими робот може зіткнутися на своєму шляху. Цей шлях можна використовувати, щоб направити робота до мети, уникаючи при цьому будь-яких перешкод, які можуть бути присутніми.

У цьому розділі було проведено порівняльний аналіз запропонованої системи планування шляху з існуючими підходами в літературі.

Результати аналізу розкривають кілька ключових висновків. По-перше, запропонована система демонструє порівнянну обчислювальну ефективність з традиційними методами, з незначним поліпшенням часу обробки, пов'язаним з інтеграцією технології захоплення руху. По-друге, шляхи, створені системою, демонструють вищу якість порівняно зі звичайними підходами, які характеризуються більш плавними траєкторіями та кращим уникненням перешкод.

По-третє, система вирізняється продуктивністю в режимі реального часу, швидко адаптуючись до змін у навколишньому середовищі, зберігаючи плавну та безпечну навігацію. Нарешті, надійність системи проявляється в її здатності ефективно справлятися з невизначеностями та порушеннями, що призводить до стабільної та надійної роботи.

Тестова установка MoCap включає в себе 16 камер Vicon, які встановлюють систему координат для мобільних роботів і картографують робочий простір. Для

точного визначення місцезнаходження та відстеження об'єктів потрібно щонайменше чотири камери. Система Vicon надає точні та надійні дані для додатків аналізу руху.

Положення мобільного робота відстежується в 3D-просторі, але оскільки він працює на 2D-площині, дані про напрямок руху  $Z$ , а також кути крену і тангажу не мають значення. Калібрування камер для синхронізації та виявлення проводиться за допомогою калібрувальної палички після встановлення зв'язку між системою Vicon та Simulink через Ethernet.

Результат системи є оптимальним шляхом для робота, враховуючи навколишнє середовище та перешкоди, з якими робот може зіткнутися на своєму шляху. Цей шлях можна використовувати, щоб направити робота до мети, уникаючи при цьому будь-яких перешкод, які можуть бути присутніми.

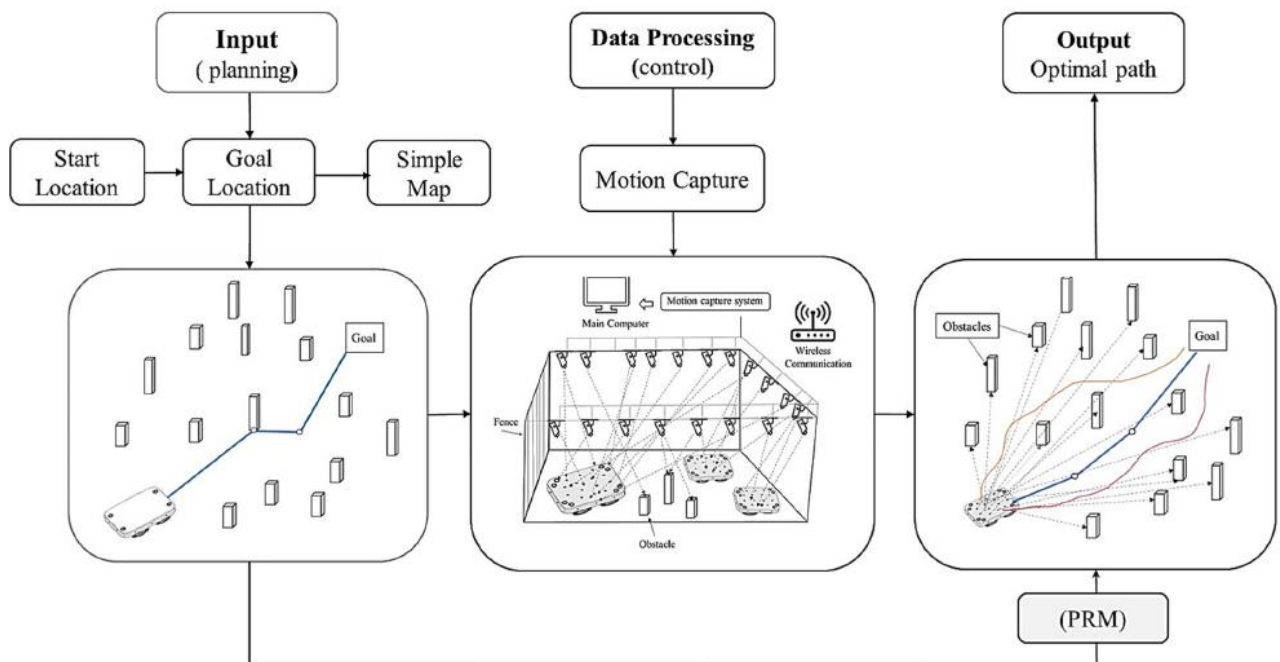


Рисунок 1.4 – Мобільна платформа робота з системою захоплення руху

## 1.6 Висновки до першого розділу. Постановка задачі

У цьому розділі було розглянуто та підкреслено переваги інтеграції технології захоплення руху та телекомунікаційних можливостей у планування

шляху для мобільних роботів, позиціонуючи запропонований підхід як значний прогрес у технології планування шляху мобільних наземна станція управління може похвалитися надійним обладнанням, оснащеним процесором Intel Core i7, 16 ГБ оперативної пам'яті DDR4 та необхідними програмними інструментами, такими як MATLAB 2020a та QUARC Real-Time Control Software 2020. Станція оснащена трьома моніторами, джойстиком USB-контролера польоту та дводіапазонним WiFi-роутером.

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

- дослідити наявні методи та засоби оптимізації траєкторії руху робота;
- виконати оцінку наявних методів;
- проаналізувати оптимізації траєкторії руху робота;
- дослідити обернену та пряму кінематику;
- виконати кінематичний аналіз;
- провести імітаційний аналіз.

## 2 РОЗРОБКА ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЄКТОРІЇ З ТОЧКИ ЗОРУ ЕНЕРГІЇ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Високий попит на нові та різноманітні продукти вимагає ефективних, гнучких та стійких виробничих систем. Часто ефективність шукають за рахунок автоматизації за допомогою машин, здатних виконувати кілька завдань одночасно, що має тенденцію до збільшення споживання енергії. Ця автоматизація за допомогою роботів може ще більше посилитися в середовищах Індустрії 4.0, де з'являються роботи, включаючи колаборативні роботи, і можуть бути більш домінуючими у виробничому процесі [22].

У цих контекстах роботизована інтеграція може призвести до підвищення рівня продуктивності, надійності, стійкості, точності та захисту від небезпечних середовищ, а також забезпечити більш раціональне прийняття рішень. Все це поширене в автомобільному секторі, де моделювання дозволяє верифікувати багатоцільові ситуації і, як наслідок, знижує ризики при прийнятті рішень [23].

Місце, де майбутній кузов транспортного засобу приймає свою остаточну форму, зване кузовним цехом, є найбільш автоматизованою ділянкою. У майстерні збираються різні комплекти та підмножини транспортних засобів. Ця збірка здійснюється за допомогою різних методів з'єднання, які повинні досягти правильної геометрії автомобіля, а також відповідати технічним вимогам дизайну. З огляду на величезну складність цих цехів, для забезпечення правильної збірки, рівень автоматизації цих цехів охоплює практично всі завдання [24], і дуже важливу роль відіграють роботи-маніпулятори.

Одним з основних завдань, які стоять перед роботами-маніпуляторами в майстерні, є нанесення ущільнювача на різні частини транспортного засобу. Герметизація – це техніка, яку часто використовує дизайнер. Ущільнювач використовується в складальних процесах завдяки його великій ефективності, простоті виконання і низькій вартості.

Крім того, ущільнювачі, що використовуються в автомобільному секторі, мають різне призначення, наприклад, забезпечують з'єднання деталей, запобігають потраплянню води або уникають вібрацій між деталями. Застосування ущільнювача за допомогою роботів широко використовується в даній галузі, так як виключає людський фактор з технологічного процесу [25].

Щоб забезпечити оптимальний процес, необхідно використовувати програмування, адаптоване до якості з'єднання, всіх відповідних параметрів, таких як швидкість потоку герметика, швидкість нанесення та тиск нанесення. Крім того, оскільки застосування ущільнювача виконується промисловим роботом, продуктивність рук робота-маніпулятора повинна бути оптимізована, щоб гарантувати високу продуктивність.

Для того, щоб отримати високий рівень продуктивності, траєкторії роботи робота повинні бути правильно сплановані. Зазвичай це здійснюється за допомогою оптимізації функції мети, визначеної користувачем. У данному розділі розглядається багатоцільова функція, заснована на максимізації продуктивності робота і мінімізації електричної енергії для заданої траєкторії.

## 2.1 Серійний робот

KUKA KR — це серія промислових роботів, оснащених шістьма ступенями свободи та сферичним зап'ястям, що забезпечує високу точність при керуванні точками та траєкторіями. Ці роботи мають велику гнучкість у виконанні різних завдань завдяки своїй конструкції, яка дозволяє маніпулювати в просторі з точністю до міліметрів. Різні моделі цієї серії відрізняються за максимальним навантаженням, яке може витримувати наконечник або інші компоненти, при цьому серед моделей є варіанти для легких або важких робіт.

Для симуляції було вибрано модель KUKA KR30-3, що оптимально підходить для невеликого навантаження, завдяки чому вона ідеально підходить для роботи з пістолетом-ущільнювачем, що потребує точної маніпуляції, але не високого робочого навантаження.

Основні технічні характеристики робота представлені нижче. Вони включають в себе робоче місце, в якому робот здатний діяти, рисунок 2.1. Крім того, в ньому дається опис його основних характеристик, таблиця 2.1. Також розглядаються характеристики інструменту, встановленого на його кінці для застосування герметика.

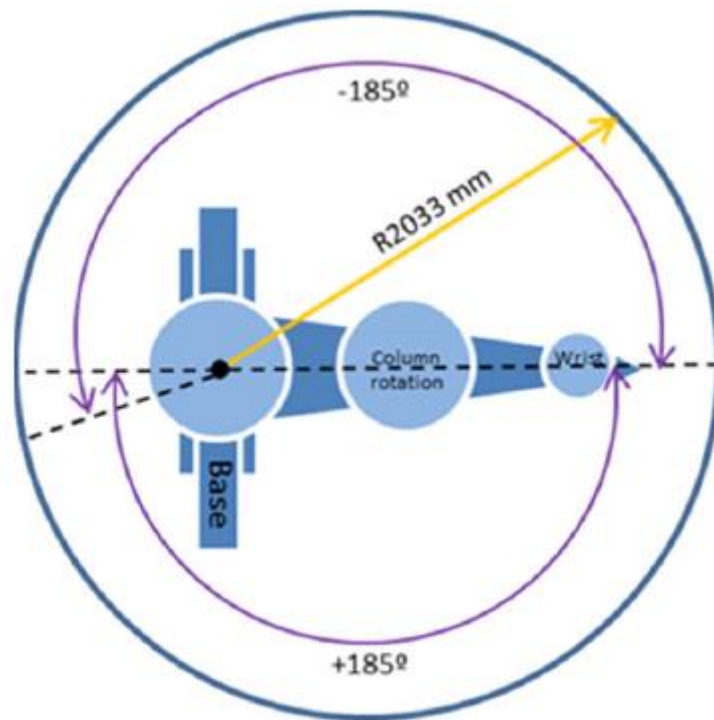


Рисунок 2.1 – Модифікований діапазон рухів робота [27]

Як уже згадувалося, інструментом, встановленим у роботі, є пістолет-ущільнювач, модель ADK6000, з мультибоксом 6000 марки SCA [26]. Це нанесення ущільнювача не можна проводити при кімнатній температурі, тому його необхідно нагріти в ємності, щоб забезпечити його правильне нанесення.

Таблиця 2.1 – Змінені положення і швидкість кожної осі робота [27]

Вісь робота	Позиція [°]	Швидкість [°/ів]
1	$\pm 185$	140
2	-35/-135	126
3	-158/-130	140
4	$\pm 350$	260
5	$\pm 119$	245
6	$\pm 350$	322

Для оцінки правильності поведінки методу пропонуються три траєкторії, по яких застосовується ущільнювач за допомогою робота, описаного вище.

Перша траєкторія, яка називається траєкторією «монтанте А», полягає в нанесенні ущільнювача на передню частину автомобіля, який запобігає потраплянню води в салон. Ця траєкторія має 71-точкову програму через складну геометрію транспортного засобу, рисунок 2.2.

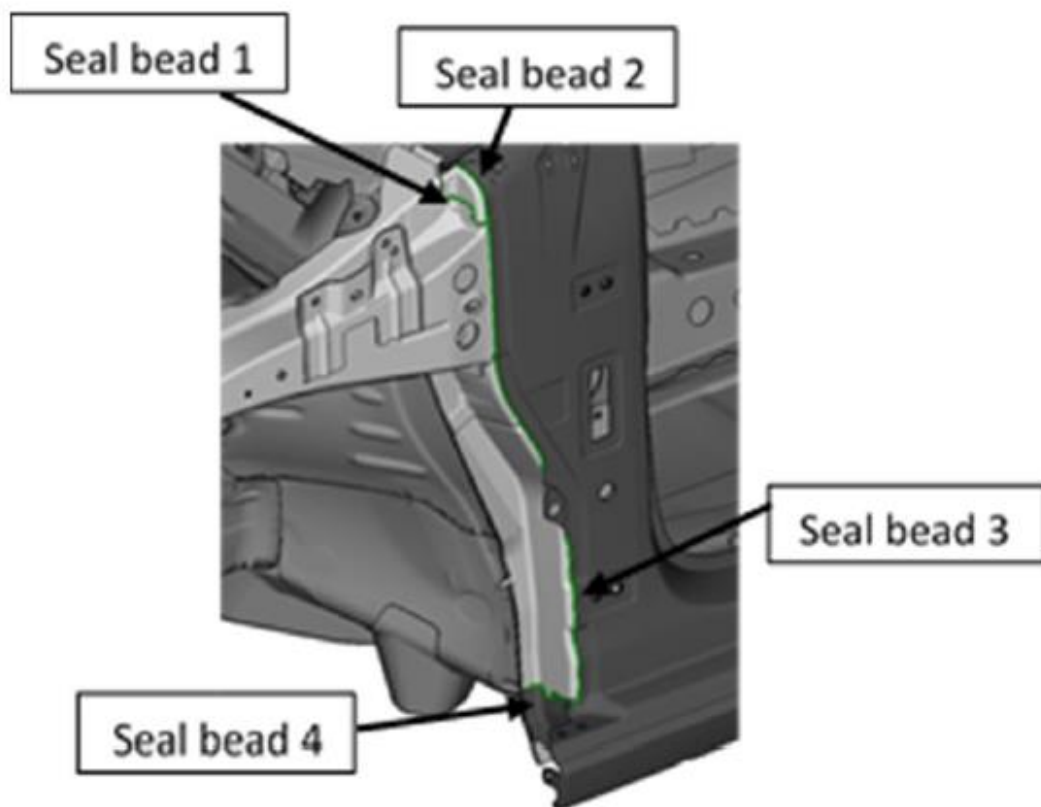


Рисунок 2.2 – Траєкторія застосування ущільнювача Montante А

Ці три траєкторії були отримані з реальних траєкторій, що використовуються в автомобільному секторі. Всі ці траєкторії задаються в кузовному цеху.

Друга траєкторія має 104-точкову програму, і вона полягає в нанесенні ущільнювача на ліву бічну панель. Цей ущільнювач має на меті обклеїти деталь, як ми можемо бачити на рисунку 2.3, деякими шматками, які додаються під час подальших операцій.

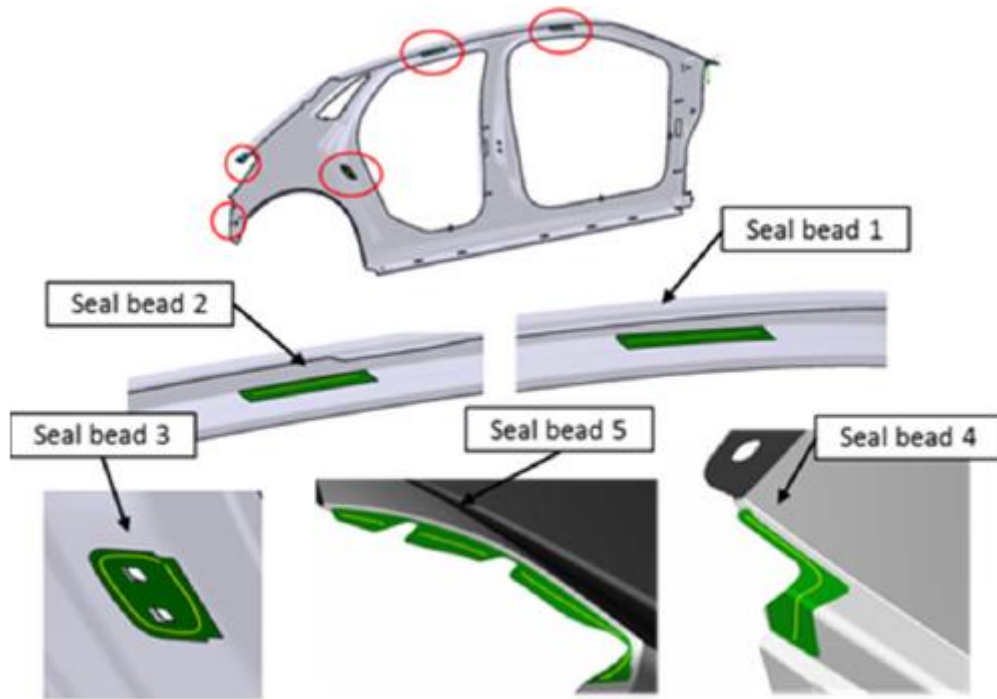


Рисунок 2.3 – Траєкторія нанесення ущільнювача на ліву сторону транспортного засобу (траєкторія 2)

Останньою траєкторією є нанесення ущільнювача на передні ліві бічні двері транспортного засобу. Ущільнювач виконує дві основні функції: по-перше, він використовується як герметизуюча паста для скріплення двох частин конструкції, забезпечуючи їх міцне з'єднання; по-друге, він слугує демпфуючим матеріалом, який зменшує рівень шуму, спричиненого вібраціями транспортного засобу під час його експлуатації. Процес нанесення ущільнювача передбачає виконання програми, яка включає 135 операцій, як показано на рисунку 2.4.

По-перше, щоб оцінити функцію витрат як потрібно, необхідно знати вагові коефіцієнти, які повинні бути призначені кожному з критеріїв. Для цього для першої обраної траєкторії був експериментально застосований алгоритм з різними вагами за критеріями маніпулятивності та електричної енергії. Отримані результати показані на рисунку 2.5(а,б).

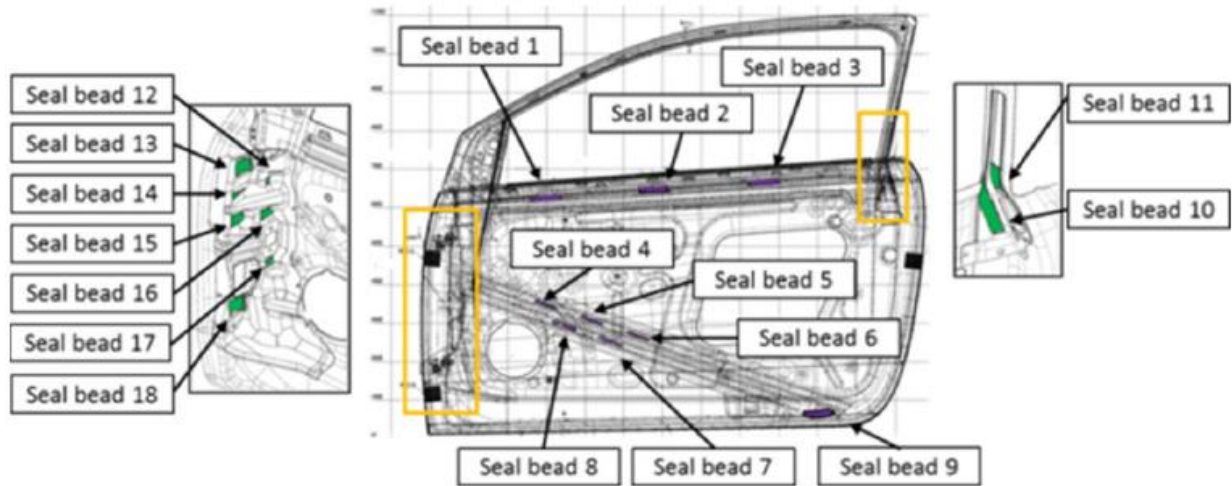


Рисунок 2.4 – Траєкторія нанесення ущільнювача на ліві бічні двері (траєкторія 3)

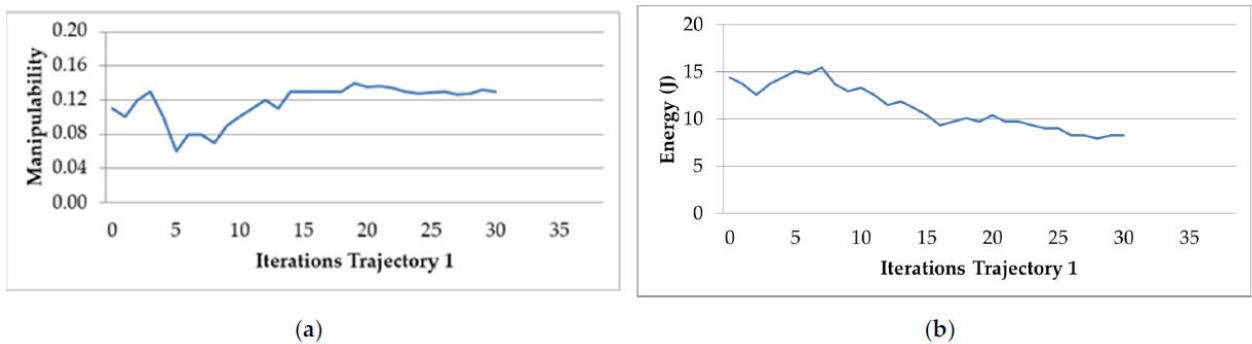


Рисунок 2.5 – Поведінка алгоритму оптимізації для траєкторії 1: (а) середня маніпулятивність; (б) середнє споживання електричної енергії

У цьому розділі представлені отримані результати на основі заданого алгоритму. Він показує значення маніпулятивності та електричної енергії для трьох траєкторій, представлених раніше.

Як видно, функція витрат, що підлягає мінімізації, буде залежати від ваги, присвоєної кожному критерію (маніпулятивність і електрична енергія). Призначена вага становить від 0 до 1. Вага була призначена експериментально на основі застосування алгоритму в траєкторії 1. Деякі результати наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння результатів з різними вагами для траєкторії 1

	Ваги		Ітерація	Енергія (Дж)	Маніпулятивн -ість
	Енергія	Маніпуляти -вність			
<b>Траєкторія руху 1</b>	0.01	0.99	49	9.63	0.11
	0.05	0.95	53	9.11	0.112
	0.5	0.5	46	9.1	0.111
	0.95	0.05	51	8.99	0.114
	0.99	0.01	80	8.66	0.109

З таблиці 2.2 видно, що алгоритм з вагою 0,99 по споживанню і 0,01 по маніпулятивності має найменше споживання, але і найнижчу маніпулятивність. Крім того, він вимагає більшої кількості ітерацій, ніж інші комбінації.

Дотримуючись таблиці 2.2, призначення ваги 0,95 для споживання електроенергії та 0,05 для даних про маніпулятивність виділяється як найбільш збалансоване вагове рішення. Помічено, що він представляє таку ж кількість ітерацій, як і решта, він має друге найнижче споживання з усіх, і він демонструє найвищу маніпулятивність. Ця обрана комбінація ваг звіряється з іншими реалізованими траєкторіями.

Далі буде показано поведінку досліджуваних параметрів і те, як алгоритм оптимізує траєкторію в кожній ітерації. Поведінка алгоритму оптимізації представлена на рисунку 2.5(а,б). Цей алгоритм враховує коефіцієнт маніпулятивності та споживання електричної енергії в траєкторії 1. На цих графіках видно, що обидва фактори стабілізуються на 30-й ітерації.

На рисунку 2.6(а,б) показана поведінка коефіцієнта маніпулятивності та споживання електричної енергії для початкової/оптимізованої траєкторії 1.

На рисунку 2.6(а) видно, що маніпулятивність оптимізованої траєкторії більша, ніж у вихідної. Крім того, підвищується продуктивність маніпулятора. Цінується і те, що він залишається постійним. Більш того, на рисунку 2.6(б) видно, що електрична енергія маніпулятора зменшується після оптимізації.

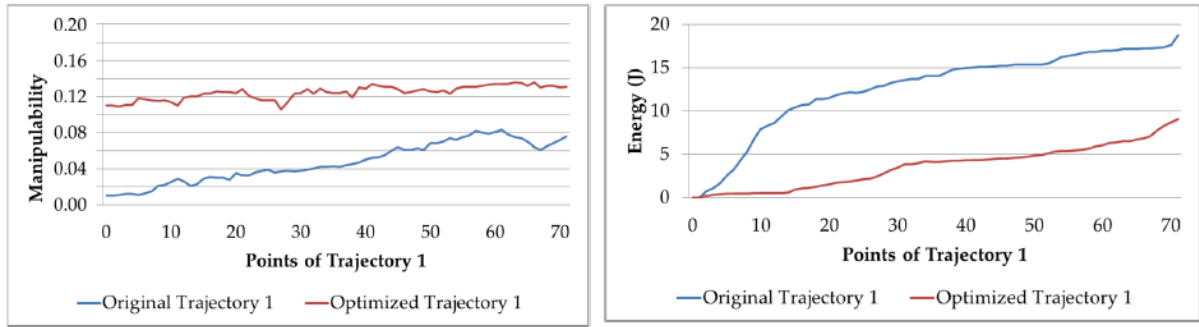


Рисунок 2.6 – Зображена оригінальна та оптимізована траєкторія 1: (а) маніпулятивність; б) споживання електричної енергії

На таких складних траєкторіях, як ця, особливо помітно зниження електричної енергії. Крім того, поліпшується продуктивність маніпулятора. Це пов'язано з тим, що траєкторії з'єднань робота повинні змінюватися.

На рисунках 2.7(а, б) показано, як алгоритм оптимізації працює для траєкторії 2. Обидва зображення демонструють, що алгоритм стабілізується на 27-й ітерації, коли виконується критерій зупинки. На рисунку 2.7(а) маніпулятивність поступово збільшується до значення близько 0,18, після чого стабілізується. Це свідчить про те, що алгоритм досяг оптимального значення маніпулятивності. З іншого боку, на рисунку 2.7(б) електрична енергія стабілізується на 27-й ітерації, що вказує на досягнення більш сталих значень енергоспоживання в кінцевій стадії оптимізації.

Ці графіки демонструють, як алгоритм оптимізації ефективно знаходить баланс між маніпулятивністю та енергоспоживанням, знижуючи варіації на останніх етапах виконання.

На рисунку 2.8(а,б) представлені графіки маніпулятивності та електричної енергії, які отримані за допомогою вихідної траєкторії 2 з відповідною оптимізованою траєкторією.

На рисунку 2.8(а) видно, що коефіцієнт маніпулятивності оптимізованої траєкторії багато в чому нагадує вихідну траєкторію. Зазначено вище, що в точці 3 і точці 84 маніпулятивність вихідної вище, ніж у оптимізованої траєкторії. Ці точки і є кінцями намистин ущільнювача в певній площині. Тут маніпулятору

необхідно переорієнтувати свої суглоби, а значить, може знизитися маніпулятивність.

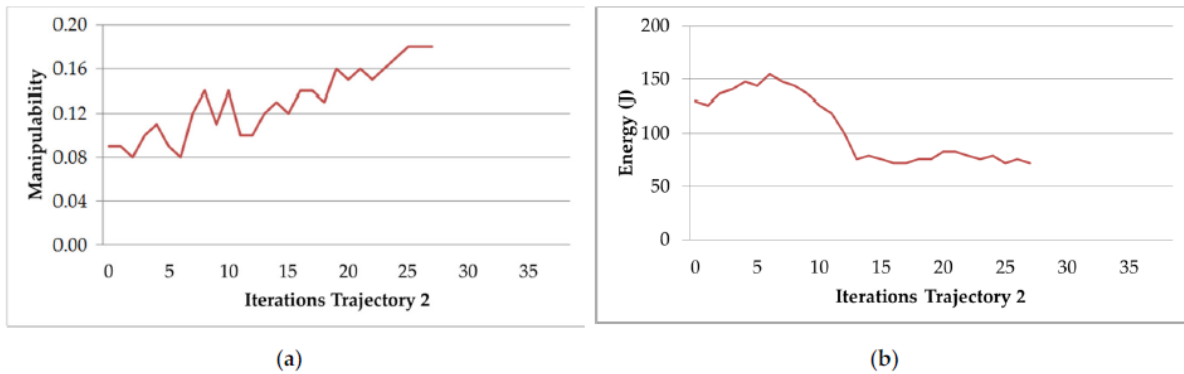


Рисунок 2.7 – Поведінка алгоритму оптимізації для траєкторії 2: (а) середня маніпулятивність; (б) середнє споживання електричної енергії

На рисунку 2.8(б), на якому показана електрична енергія, можна спостерігати ситуацію, аналогічну результатам за коефіцієнтом маніпулятивності. Між точками 4 і 11 є точки, де немає застосування ущільнювача (тільки переорієнтація і зміщення для нанесення наступної кульки ущільнювача). Тут електрична енергія нижча, ніж на початковій траєкторії.

Алгоритм оптимізації також досягає скорочення часу траєкторії за рахунок її оптимізації. У точках, де немає необхідності в обслуговуванні орієнтацій і положення кінцевого ефектора (при нанесенні герметика), він грає зі швидкістю і прискоренням маніпулятора.

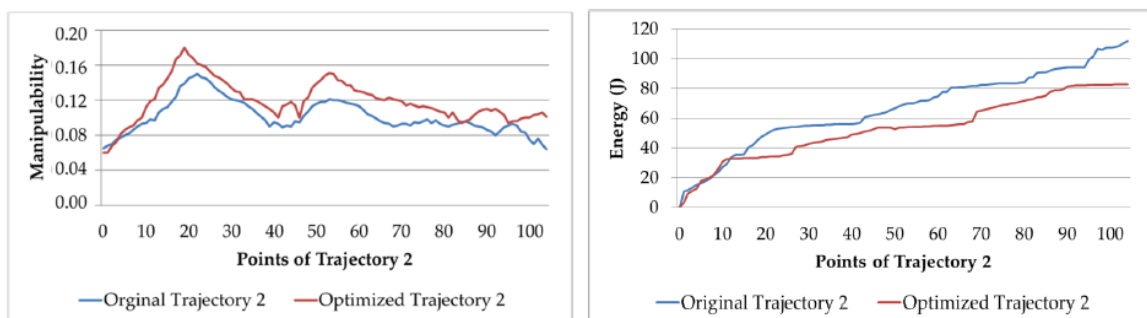


Рисунок 2.8 – Зображена оригінальна та оптимізована траєкторія 2: (а) маніпулятивність; б) споживання електричної енергії

Поведінка коефіцієнта маніпулятивності та алгоритму оптимізації електричної енергії для траєкторії 3 представлено на рисунку 2.9(а,б). Алгоритм стабілізується в ітерації 38, що видно на обох малюнках.

На рисунку 2.9.1(а,б) показана маніпулятивність і коефіцієнт електричної енергії вихідної траєкторії 3 в порівнянні з її оптимізованою траєкторією. На рисунку 2.9.1(а) видно, що коефіцієнт маніпулятивності також вище, ніж у вихідної траєкторії, і має тенденцію бути більш стабільним. Маніпулятивність у вихідній траєкторії виглядає більш нестабільною.

Однак маніпулятивність в оптимізованій траєкторії більш стабільна, зростаючи від 0,06 до 0,1–0,14.

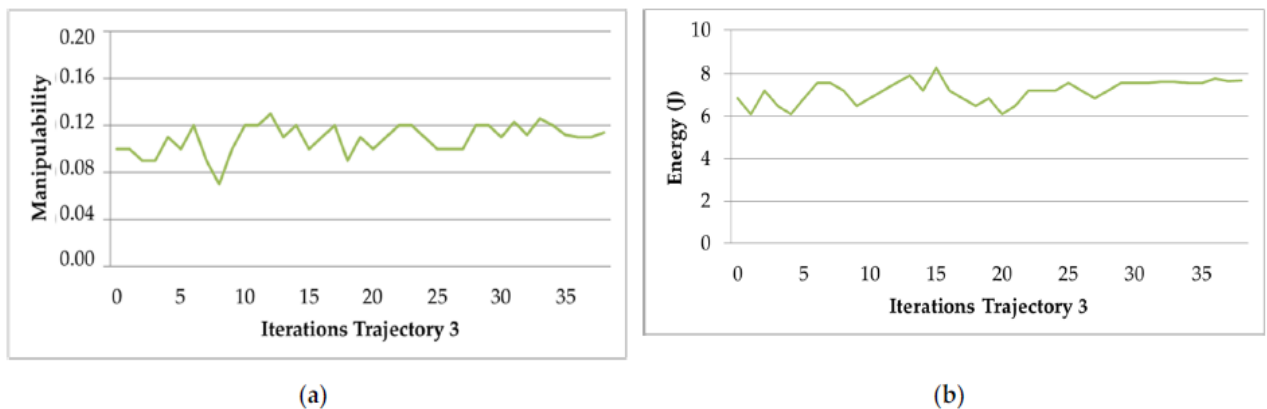


Рисунок 2.9 – Поведінка алгоритму оптимізації для траєкторії 3: а) середня маніпулятивність; б) середнє споживання електричної енергії

Як було зазначено, що траєкторія 3 – це нанесення кульок ущільнювача на двері транспортного засобу. Розміри деталей відносно невеликі, а кількість ущільнювачів враховується в різних великих площинах нанесення через постійну переорієнтацію для забезпечення правильного застосування безпосередньо впливає на вимірювання продуктивності маніпулятора. З впровадженням алгоритму оптимізації цей фактор поліпшується.

Що стосується електричної енергії, то на рисунку 2.10(б) нумерація рисунків містить номер розділу і порядковий номер рисунку у розділі, без «1»

чітко видно, що вона менша, ніж у вихідній траєкторії, послаблюючи стрибок споживання, що відбувається в точці 56 у вихідній.

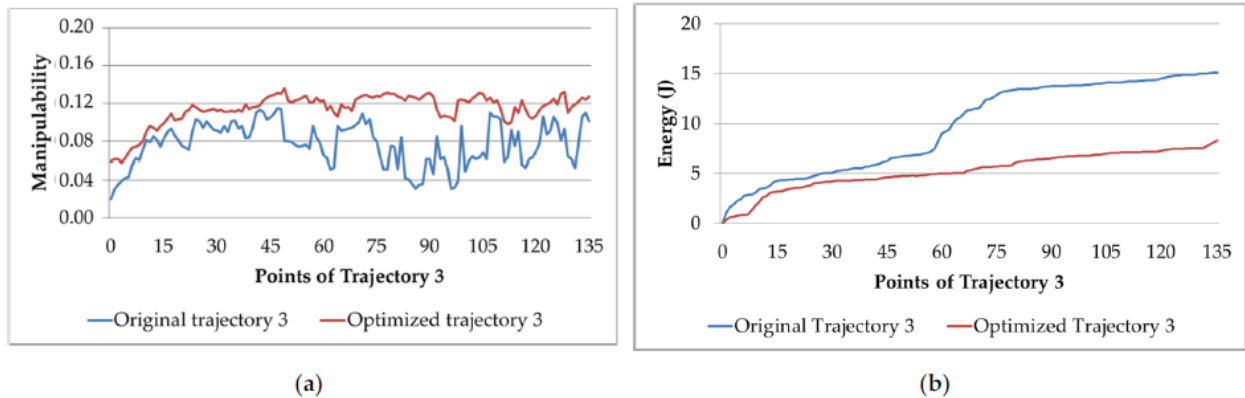


Рисунок 2.10 – Оригінальна та оптимізована траєкторія 3: (а) маніпулятивність; б) споживання електричної енергії

## 2.2 Алгоритм роботи PRM

В даній роботі запропонована інноваційна модель автономної мобільної навігації робота, яка складається з трьох ключових етапів: планування шляху, контролю та моделювання [28]. Потім ця інформація використовується для оновлення переконань і позиції робота, включаючи прогнозування, оновлення дій, сприйняття, вимірювання та оновлення корекції.

Планування шляху для мобільних роботів часто спирається на метод імовірнісної дорожньої карти (PRM) – техніку, що передбачає побудову дорожньої карти шляхом випадкового розміщення вузлів у вільному просторі конфігурації [29].

Хоча метод PRM (Probabilistic Roadmap) може не бути найпоширенішим підходом до планування, він пропонує ряд переваг, які роблять його особливо ефективним для нашого конкретного випадку застосування.

Метод PRM складається з двох основних етапів: навчання (попередньої обробки) та виконання онлайн-запитів. Під час етапу навчання випадковим чином визначаються численні можливі позиції робота, після чого

встановлюються зв'язки між сусідніми вузлами для створення дорожньої карти. Деталі цього процесу показані на рисунку 2.11, де демонструється ітеративний відбір вузлів і побудова з'єднань між ними відповідно до заданих критеріїв.

Такий підхід дозволяє ефективно створювати оптимальні маршрути навіть у складних середовищах, забезпечуючи гнучкість і адаптивність до змін.

Алгоритм ефективно вирішує критичні питання, пов'язані з відбором проб вузлів, локальним плануванням та уникненням зіткнень, тим самим забезпечуючи генерацію можливих шляхів у різних середовищах. Крім того, характер алгоритму PRM визначає його придатність як для статичних середовищ, так і для тих, що мають незначні випадкові варіації.

Алгоритм планування шляху складається з ряду важливих кроків, починаючи з ініціалізації двох колекцій на кроках 1–2. Для кожного нового вузла  $q$  алгоритм вибирає набір сусідніх вузлів  $V$  і використовує локальний планувальник для планування шляху в кроках 5-8. Потім межа  $(q, q)$  допустимого шляху додається до множини, а шлях зіткнення видаляється на кроках 9-10.

---

#### Algorithm 1 PRM

---

```

1:  $V \leftarrow \emptyset$ 
2:  $E \leftarrow \emptyset$ 
3: loop
4:    $q \leftarrow$  a randomly chosen free configuration
5:    $V_q \leftarrow$  a set of candidate neighbors of  $q$  chosen from  $V$ 
6:    $V \leftarrow V \cup \{q\}$ 
7:   for  $q' \in V_q$ , in order of increasing,  $(q, q')$ , do
8:     if  $E = \text{same-connected-component}(q, q') < |(q, q')|$  then
9:        $E \leftarrow E \cup \{(q, q')\}$ 
10:    update  $E$ 's connected components

```

---

Рисунок 2.11 – Алгоритм PRM

Алгоритм вирішує чотири критичні проблеми під час процесу. По-перше, крок 4 гарантує, що випадково вибрана точка знаходиться у вільному просторі і

не стикається з перешкодами. По-друге, крок 8 включає в себе створення регіонального планувальника для з'єднання двох різних точок відбору проб, забезпечення впевненості та швидкості планувальника, одночасно розрізняючи місцевий шлях і виконуючи перевірки на уникнення зіткнень.

Нарешті, у кроці 5 викладено правила, які використовуються для вибору точок сусідства в межах певного діапазону відстаней. Вирішуючи ці питання, алгоритм планування шляху може ефективно генерувати можливі шляхи для даного робота в будь-якому заданому середовищі.

Використовуючи принципи випадковості та статистичного вибірки, алгоритм PRM може ефективно генерувати дорожню карту потенційних конфігурацій, що дозволяє ефективно планувати шлях у складних, високорозмірних просторах конфігурації. Хоча алгоритм PRM може не гарантувати глобальну оптимальність, він встановлює баланс між оптимальністю та обчислювальною ефективністю, що робить його добре придатним для нашої навігаційної моделі.

Крім того, здатність методу PRM знаходити можливі шляхи, навіть у середовищах з динамічними перешкодами, узгоджується з нашою метою дозволити мобільним роботам автономно переміщатися в складних середовищах.

На етапі запиту використовується алгоритм зображений на рисунку 2.12, для вибору шляху між початковою та цільовою позиціями за допомогою побудованого мережевого графіка шляху. Це передбачає ітеративний вибір та оцінку сусідніх вузлів для пошуку найефективнішого шляху. Отриманий глобальний шлях з'єднує початкову та цільову позиції, а для пошуку найкоротшого шляху можна застосувати подальші методи оптимізації.

У цьому процесі використовується мережевий граф неорієнтованого шляху  $G = (V, E)$ , побудований під час фази навчання в автономному режимі.

Пов'язуючи початкову позицію ( $q_s$ ) і цільове положення ( $q_g$ ) з двома точками ( $q_1, q_2$ ) на графіку, алгоритм знаходить шлях між  $q_1$  і  $q_2$ . Потім можна застосувати метод згладжування для пошуку найкоротшого шляху. Таким чином, етап запиту алгоритму планування шляху використовує раніше побудований

графік мережі шляхів для визначення найбільш ефективного шляху між початковою та кінцевою позиціями.

Крім того, реалізоване дослідження виходить за рамки традиційної методології планування шляху, включаючи алгоритм PRM у всеосяжну навігаційну модель, яка включає етапи планування шляху, керування та симуляції. Цей інтегрований підхід забезпечує безперебійну взаємодію між алгоритмами планування шляху та механізмами керування, що призводить до надійної та адаптивної навігаційної поведінки в реальних сценаріях.

Крім того, застосування алгоритму PRM у навігаційній моделі відкриває шляхи для подальших досліджень і розробок у галузі автономної мобільної навігації, особливо в галузі оптимізації, адаптації в режимі реального часу та масштабованості.

---

#### Algorithm 2 PRM

---

```

1:   Open ← ∅;
2:   Closed ← ∅;
3:   Open ← qs;
4:   while Open ≠ ∅
5:     q0 ← arg min f(x).
6:     REMOVED (Closed, q0);
7:     (Closed, q0);
8:     if q0 == qg then
9:       return Reconstruct PATH (qs, qg, Closed);
10:    S ← NEIGHBOURS (q0);
11:    for all q' ∈ S do
12:      g ← g(P');
13:      h ← D (q0, P');
14:      f ← g + h.
15:      if q' ∈ Open ∧ f (q0) < f(q') then
16:        return
17:      elseif q' ∈ closed ∧ f (q0) < f(q') then
18:        return
19:    open ← q;

```

---

Рисунок 2.12 – Алгоритм 2 PRM

### 2.3 Тривалість циклу

Розглядаючи оператора на стандартній швидкості, ми матимемо наступну тривалість циклу, таблиця 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння часу траєкторії та часу циклу, тобто від відкриття до закриття преса

Метод	Час траєкторії	Час циклу
База	54-ті роки	68-і рр.
ALG1	45-ті рр.	60-ті рр.
ALG2	27.1 сек	52-і роки
ALG3	34.7 розд.	52-і роки

Перші алгоритми особливо повільні, тому оператору доводиться чекати, поки робот виконає своє завдання. Це збільшить час циклу і додасть до процесу простою. Цього слід завжди уникати.

Другий і третій алгоритми мають однаковий час циклу, тому що коли оператор повертається, він може безпосередньо запустити прес, не чекаючи більше. Отже, в цьому порівняльному індексі другий і третій алгоритми однаково добре працюють.

Для визначення цього показника, який корелює з безпекою, розглядають енергію, що розсіюється за рахунок перехідного контакту. Ця величина зазвичай розраховується в рамках стратегії обмеження сили потужності.

Цей критерій був використаний тому, що не існує датчиків відстані, як того вимагає SSM, тому це завдання підпадає під регулювання PFL (ISO-TS-5066), оскільки може виникнути контакт. Індекс розраховується за формулою:

$$E = \frac{1}{2} \mu v_{rel}^2, \quad (2.1)$$

де  $v_{rel}^2$  - відносна швидкість між кінцевим ефектором і плечем оператора, коли він стоїть перед пресом,  $k$  - постійна пружності частини тіла,  $\mu$  - зменшена

маса системи двох тіл. Нарешті, вдалося створити графіки, показані на рисунку 2.13

Очевидно, що перший алгоритм, який є найбільш консервативним, має низьку енергію разом з такою ж низькою швидкістю. З іншого боку, Алгоритми 2 і 3 мають більш високу передачу енергії за рахунок більш швидких рухів. Однак таке збільшення небезпеки необхідне для того, щоб мати розумні терміни виконання. У будь-якому випадку, навіть якщо оператор опиниться поруч з роботом в момент максимального обміну енергії, це буде представляти прийнятний ризик відповідно до критерію FPL.

Дійсно, всі 4 траєкторії значно нижчі за поріг болю ISO E<sub>shoulder</sub> = 1.46 Дж розраховано за допомогою межі тиску, пов'язаного з плечовим суглобом, показано в таблиці 2.3. [30], на площі 1 сантиметр квадратний.

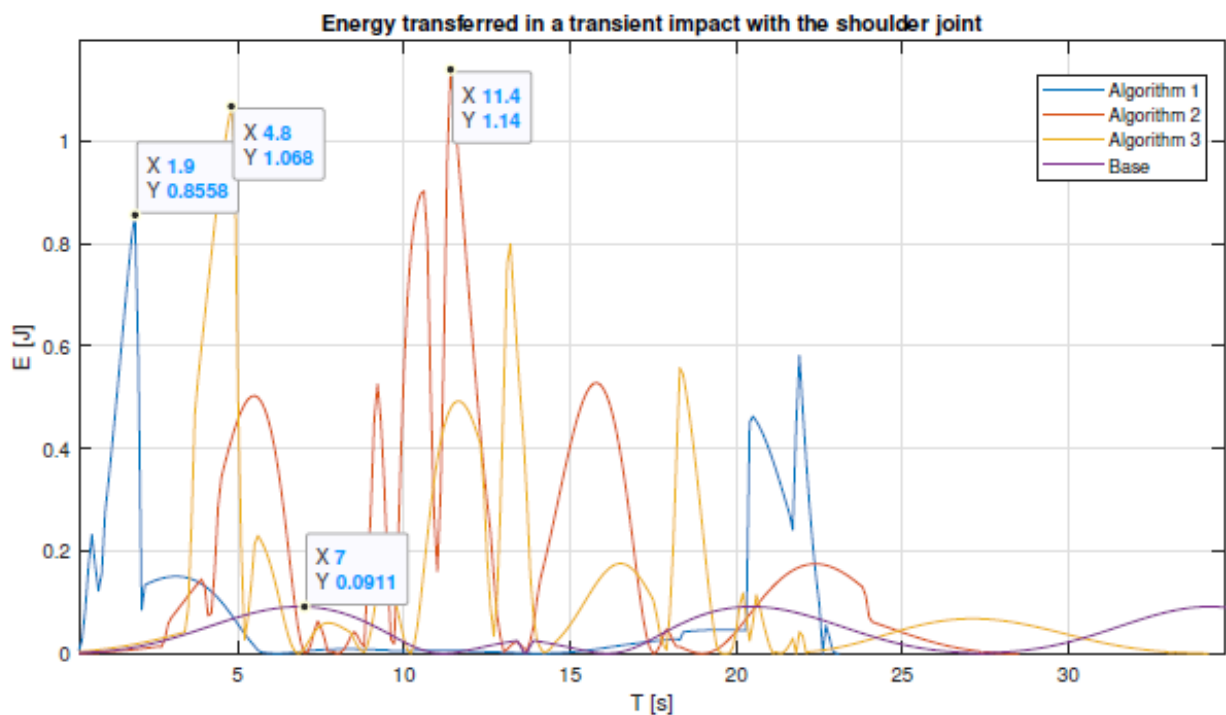


Рисунок 2.13 – Візуалізація енергії, яка може передаватися в перехідному контакті між роботом і плечем оператора. Примітка: Базовий графік обрізаний

Таблиця 2.3 – Максимальна енергія, що передається в найгіршому випадку від кобота до плеча оператора при перехідному зіткненні

Метод	Максимальна енергія удару
База	0.091J
Алгоритм дій 1	0.856J
Алгоритм дій 2	1.14 Дж
Алгоритм дій 3	1.068J

## 2.4 Дисперсія швидкості

Останній індекс, який враховує синхронність рухів, відображає варіацію швидкості оператора до того, як він вступає в контакт з коботом. Це дозволяє визначити, яку ступінь варіативності швидкості можна мати без негативних наслідків. Перевага надається більшій дисперсії швидкості, оскільки це створює більш універсальну траєкторію, яка ефективно працює в різних швидкісних діапазонах операційного пристрою.

Для цього параметра важливо також враховувати максимально допустиме зниження швидкості. Якщо оператор сповільнюється надто сильно, це може призвести до ситуації, коли кобот, продовжуючи рухатися, може потрапити в прес, навіть коли оператор ще не завершив свою задачу. Це підкреслює важливість оптимізації швидкості для забезпечення безпеки та ефективності взаємодії між оператором і роботом.

Для того, щоб підтвердити цей індекс, корисно вивчити експерименти з уповільненим темпом, рисунок 2.14.

Порівняння проводиться тільки між другим і третім алгоритмами, так як перший і базовий алгоритми вже виявилися неактуальними через надмірну повільність, показано в таблиці 2.4.

З експерименту видно, що випадок зниження швидкості на 20% дуже близький до межі алгоритму 2.2. Якщо вивчати це алгебраїчно ми бачимо, що точна межа 27%, тоді як для алгоритму 3 – 42%. Цей показник розкриває головну ознаку третього алгоритму.

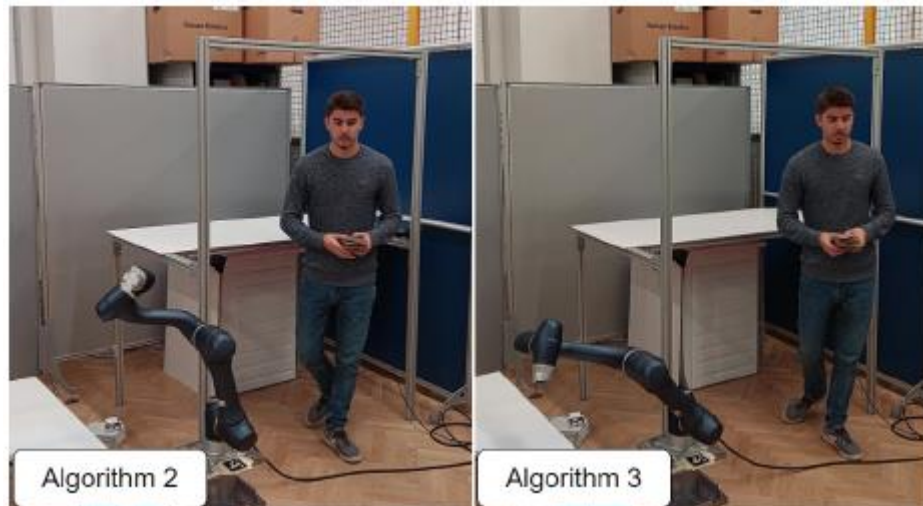


Рисунок 2.14 – Часові рамки моменту, коли оператор закінчив перше завдання і відходить від преса. Можна спостерігати, що кобот знаходиться ближче до спільного простору в другому алгоритмі

Таблиця 2.4 – Дисперсія максимальної швидкості, допущена до перетину присутності людини і робота перед пресом

Метод	Максимальна варіативність швидкості
Алгоритм дій 2	27%
Алгоритм дій 3	42%

Фактично, беручи до уваги вікно значень позицій оператора, він здатний краще сприймати можливі зміни відносно стандартних рухів. Крім того, під час результаті експериментів було виявлено, що цей алгоритм трохи менш агресивний, ніж другий, надаючи певним чином більш комфортний почуття до оператора.

## 2.5 Висновки до другого розділу

У цьому розділі ми вияснили, що статичний алгоритм об'ємної розгортки людини (Алгоритм 1), безумовно, є найбільш консервативним і безпечним з трьох, але його загальний час виконання не дозволяє розглядати його як рішення,

застосовне в реальному світі. Другий алгоритм, з динамічною моделлю людини, є найбільш ефективним алгоритмом з точки зору часу траєкторії.

Однак він має низьку дисперсію дозволеної швидкості оператора, тобто добре синхронізується з людиною лише в тому випадку, якщо його швидкість не надто відхиляється від початкового навантаження. Це призводить до більш високого ризику зіткнення, якщо оператор не завжди працює на однаковій швидкості. Поєднуючи цю вищу ймовірність з більшою енергією удару, ніж інші алгоритми (хоча й незначно), стає очевидною нижча безпека рішення.

Нарешті, третій алгоритм, модель людини часового вікна, яка поєднує динамічний підхід другого алгоритма з більш консервативним підходом першого, вдається досягти задовільних результатів. Зокрема, загальний час траєкторії добре узгоджується з часом циклу розглянутого процесу. Дійсно, покращена варіативність швидкості дозволяє покращити співпрацю з оператором.

## 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ ТРАЄКТОРІЇ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА НА ОСНОВІ ВДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ

### 3.1 Кінематичний аналіз

Цей розділ присвячений шестиосьовому промислового роботу, загальна структура робота зображена на рисунку 3.1(a,b,c), на ньому проілюстровано розміри шатуна робота, тоді як рисунок 3.1(c) зображує розташування кожної суглобової осі в роботі. Система координат для шатуна, як представлена на рисунку 3.2, побудована з використанням методу параметрів D-H.

Ця конструкція також враховує розміри механічної структури та розташування кожної осі з'єднання. Параметри D-H робота можна знайти в таблиці 3.1. Ці параметри представляють довжину ланки, скручування ланки, зміщення ланки і кут з'єднання [31].

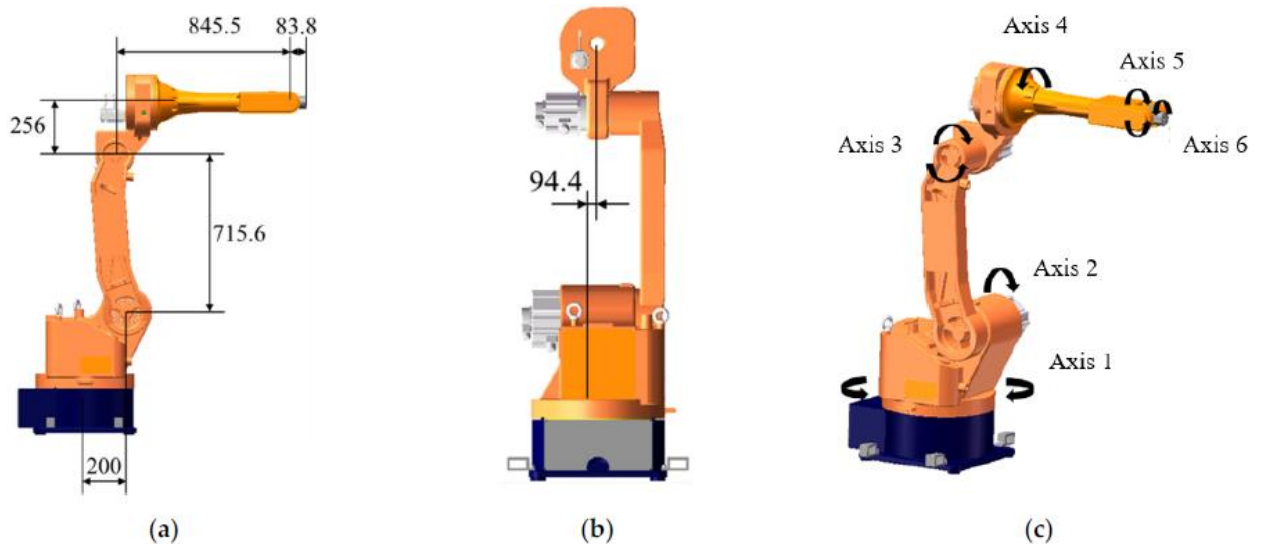


Рисунок 3.1 – (a,b) розміри шатунів робота; (c) положення кожної спільної осі робота

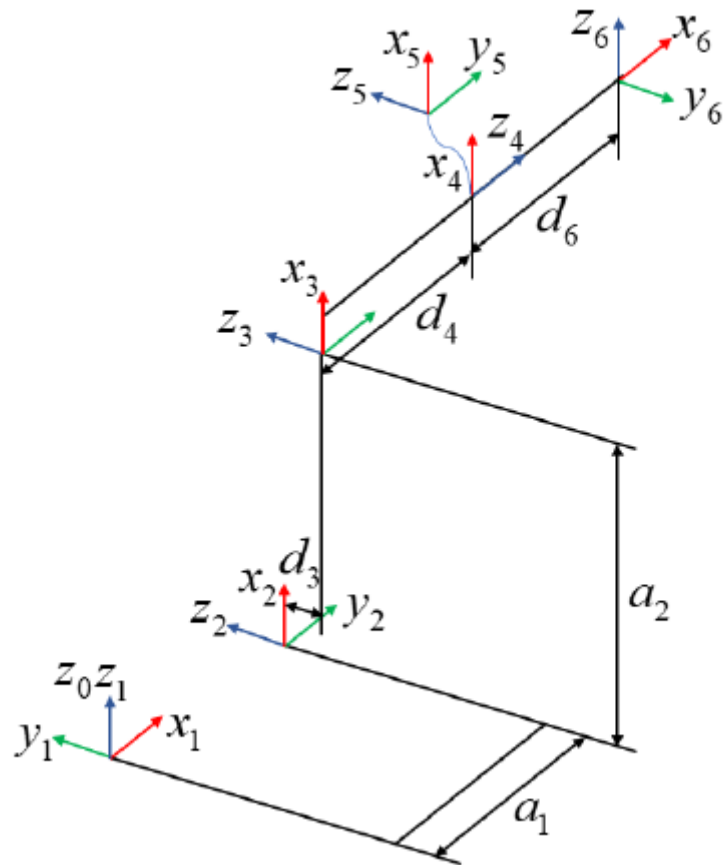


Рисунок 3.2 – Система координат робота

Таблиця 3.1 – Параметр D-H робота

Суглоб $i$	$a_{i-1}/mm$	$\alpha_{i-1}/^\circ$	$d_i/mm$	$\theta_i/^\circ$	Діапазон суглобів/ $^\circ$
1	0	0	0	$\theta_1$	$[-150 \sim 180]$
2	200	-90	0	$\theta_2$	$[-160 \sim 120]$
3	715.6	0	-94.4	$\theta_3$	$[-145 \sim 45]$
4	256	-90	845.5	$\theta_4$	$[-90 \sim 90]$
5	0	90	0	$\theta_5$	$[-90 \sim 90]$
6	0	-90	83.8	$\theta_6$	$[-180 \sim 180]$

Використовуючи параметричний метод D-H, матриця підперетворень між сусідніми системами координат зв'язку робота  $\{i-1\}$  і  $\{i\}$  представлена у вигляді рівняння 3.1) [31].

$${}^i_{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Для простоти виразу  $\sin \theta_i$  і  $\cos \theta_i$  в рівнянні (3.1) позначені як  $S_i$  та  $C_i$  відповідно.  $\sin(\theta_m + \theta_n)$  і  $\cos(\theta_m + \theta_n)$  позначаються як  $s_{mn}$  і  $c_{mn}$ , відповідно. У рівнянні (3.1)  $i, m, n \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .

Матриця позиції кінцевої точки робота зображена в рівнянні (3.2).

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

У рівнянні (3.2)  $P$  і  $R$  представляють положення і положення кінця робота по відношенню до базової системи координат. Це рівняння служить додатним кінематичним рівнянням для шестивісного промислового робота. Елементи рівняння (3.2) можна виразити у вигляді рівняння (3.3).

$$\left\{ \begin{array}{l} n_x = c_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] + s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) \\ n_y = s_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] - c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) \\ n_z = -s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6 \\ o_x = c_1[c_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] + s_1(c_4c_6 - s_4c_5s_6) \\ o_y = s_1[c_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] - c_1(c_4c_6 - s_4c_5s_6) \\ o_z = -s_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + c_{23}s_5s_6 \\ a_x = -c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - c_1s_4s_5 \\ a_y = -s_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) + c_1s_4s_5 \\ a_z = s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5 \\ p_x = d_6[-s_5(s_1s_4 + c_1c_4c_{23}) - c_1c_5s_{23}] - d_4c_1s_{23} - d_3s_1 - d_2s_1 + a_1c_1 + a_2c_1c_2 + a_3c_1c_{23} \\ p_y = d_6(c_1s_4s_5 - c_5s_1s_{23} - c_2c_3c_4s_1s_5 + c_4s_1s_2s_3s_5) - d_4s_1s_{23} + d_3c_1 + a_3c_{23}s_1 + a_2c_2s_2 + a_1s_1 \\ p_z = d_6(c_4s_5s_{23} - c_5c_{23}) - d_4c_{23} - a_3s_{23} - a_2s_2 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Обернена кінематика робота — це процес отримання кутів кожного суглоба робота шляхом перетворення матриці на основі відомого положення та положення кінцевого ефектора робота. У цьому дослідженні використовується аналітичний метод для вирішення зворотної кінематики робота [32].

Рівняння (3.4) виводиться з рівняння (3.2):

$${}^1_6T = {}^0_1T^{-1}(\theta_1){}^0_6T = {}^1_2T(\theta_2){}^2_3T(\theta_3){}^3_4T(\theta_4){}^4_5T(\theta_5){}^5_6T(\theta_6) \quad (3.4)$$

Враховуючи, що елементи (2,4) у рівнянні (3.4) еквівалентні наступним чином:

$$-s_1p_x + c_1p_y = d_3 \quad (3.5)$$

Значення  $\theta_1$  можна знайти за допомогою наступного постійного трикутного перетворення:

$$\theta_1 = \text{atan2}(p_y, p_x) - \text{atan2}\left(d_3, \pm\sqrt{(p_x^2 + p_y^2 - d_3^2)}\right) \quad (3.6)$$

У рівнянні (3.6) знаки плюс і мінус вказують на те, що  $\theta_1$  має два рішення.

Встановивши розв'язок для  $\theta_1$ , елементи (1,4) і (3,4) по обидва боки рівняння (3.4) рівні, і ми можемо отримати наступне:

$$\begin{cases} c_1p_x + s_1p_y = a_1 + a_3c_{23} - d_4s_{23} + a_2c_2 \\ -p_z = a_3s_{23} + d_4c_{23} + a_2s_2 \end{cases} \quad (3.7)$$

Потрібно звести обидві частини рівняння (3.5) і рівняння (3.7) у квадрат відповідно, а потім додати ці рівняння, щоб отримати рівняння (3.8).

$$a_3c_3 - d_4s_3 = k$$

$$k = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_3^2 - d_4^2 - 2a_1c_1p_x - 2a_1s_1p_y}{2a_7}. \quad (3.8)$$

Член  $\theta_2$  був виключений з рівняння, що дозволило обчислити рівняння (9) для  $\theta_3$  за допомогою тригонометричної підстановки.

$$\theta_3 = \text{atan2}(a_3, d_4) - \text{atan2}\left(k, \pm\sqrt{a_3^2 + d_4^2 - k^2}\right) \quad (3.9)$$

Знаки плюс і мінус у рівнянні (3.9) означають, що  $\theta_3$  має два корені. Розібравшись з рівнянням (3.4), можна отримати рівняння (3.10):

$${}^0_3T^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) {}^0_6T = {}^3_4T(\theta_4) {}^4_5T(\theta_5) {}^5_6T(\theta_6) \quad (3.10)$$

Враховуючи, що елементи (1,4) і (2,4) в рівнянні (3.10) еквівалентні

$$c_1c_{23}p_x + c_{23}s_1p_y - s_{23}p_z - a_1c_{23} - a_2c_3 = a_3 \quad (3.11)$$

$$-c_1s_{23}p_x - s_1s_{23}p_y - c_{23}p_z + a_1s_{23} + a_2s_3 = d_4 \quad (3.12)$$

$\theta_2$  можна отримати наступним чином:

$$\theta_2 = \text{atan2}(s_{23}, c_{23}) - \theta_3 \quad (3.13)$$

Тут:

$$s_{23} = \frac{(-a_3 - a_2c_3)p_z + (c_1p_x + s_1p_y - a_1)(a_2s_3 - d_4)}{p_z^2 + (c_1p_x + s_1p_y - a_1)^2} \quad (3.14)$$

$$c_{23} = \frac{(-d_4 + a_2 s_3) p_z - (c_1 p_x + s_1 p_y - a_1)(-a_2 c_3 - a_3)}{p_z^2 + (c_1 p_x + s_1 p_y - a_1)^2} \quad (3.15)$$

Враховуючи, що елементи (1,3) і (3,3) в рівнянні (3.10) еквівалентні

$$a_x c_1 c_{23} + a_y c_{23} s_1 - a_z s_{23} = -c_4 s_5 \quad (3.16)$$

$$-a_x s_1 + a_y c_1 = s_4 s_5 \quad (3.17)$$

$\theta_4$  можна розв'язати

$$\theta_4 = \text{atan2}(-a_x s_1 + a_y c_1, -a_x c_1 c_{23} - a_y c_{23} s_1 + a_z s_{23}) \quad (3.18)$$

Якщо  $s_5 = 0$ , робот займе положення особливої форми. Для сингулярних форм для обчислення відповідного  $\theta_6$  можна вибрати будь-яке значення  $\theta_4$ .

Розібравшись з рівнянням (3.10), можна отримати рівняння (3.19):

$${}^0_4 T^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) {}^0_6 T = {}^4_5 T(\theta_5) {}^5_6 T(\theta_6) \quad (3.19)$$

Враховуючи, що елементи (1,3) і (3,3) в рівнянні (3.19) еквівалентні

$$a_x (s_1 s_4 + c_1 c_4 c_{23}) + a_y (s_1 c_{23} c_4 - c_1 s_4) - a_z s_{23} c_4 = -s_5 \quad (3.20)$$

$$a_x (-c_1 s_{23}) + a_y (-s_1 s_{23}) + a_z (-c_{23}) = c_5 \quad (3.21)$$

$\theta_5$  можна розв'язати:

$$\theta_5 = \text{atan2}(s_5, c_5) \quad (3.22)$$

Розібравшись з рівнянням (3.19), можна отримати рівняння (3.23):

$${}^0_5T^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) {}^0_6T = {}^5_6T(\theta_6) \quad (3.23)$$

За умови, що елементи (3,1) і (1,1) в рівнянні (3.23) еквівалентні

$$-n_x(c_1c_{23}s_4 - s_1c_4) - n_y(s_1c_{23}s_4 + c_1c_4) + n_z(s_{23}s_4) = s_6 \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} & n_x[(c_1c_{23}c_4 + s_1s_4)c_5 - c_1s_{23}s_5] \\ & + n_y[(s_1c_{23}c_4 - c_1s_4)c_5 - s_1s_{23}s_5] \\ & - n_z(s_{23}c_4c_5 + c_{23}s_5) = c_6 \end{aligned} \quad (3.25)$$

Розв'язок замкнутої форми для  $\theta_6$  задається рівнянням (3.26).

$$\theta_6 = \text{atan2}(s_6, c_6) \quad (3.26)$$

### 3.2 Гібридна поліноміальна інтерполяція при плануванні траєкторії руху

У той час як звичайні алгоритми інтерполяції кубічних і квінтичних поліноміалів є високоефективними для траєкторій руху між двома точками, роботи часто проходять більше двох точок шляху під час роботи [33]. Щоб підвищити ефективність і точність роботизованих завдань, у цій роботі представлено метод гібридного планування траєкторії, який поєднує кубічні та квінтичні поліноміальні інтерполяції для сценаріїв кількох точок шляху. Конкретний метод впровадження адаптований до досліджуваного робота.

Визначаються дві задалегідь визначені точки шляху для позначення початкового та кінцевого положень руху руки робота. Початкова та кінцева точки шляху розділені на три окремі сегменти, як показано на рисунку 3.3.

У межах відрізка  $0 \sim t_1$  використовується інтерполяція кубічного полінома з подальшою інтерполяцією квінтичного многочлена всередині відрізка  $t_1 \sim t_1 + t_2$ . Інтерполяція кубічного многочлена знову використовується на відрізку  $t_1 + t_2 \sim t_1 + t_2 + t_3$ . Ці кроки в сукупності складають гібридний поліноміальний інтерполатор «3-5-3».

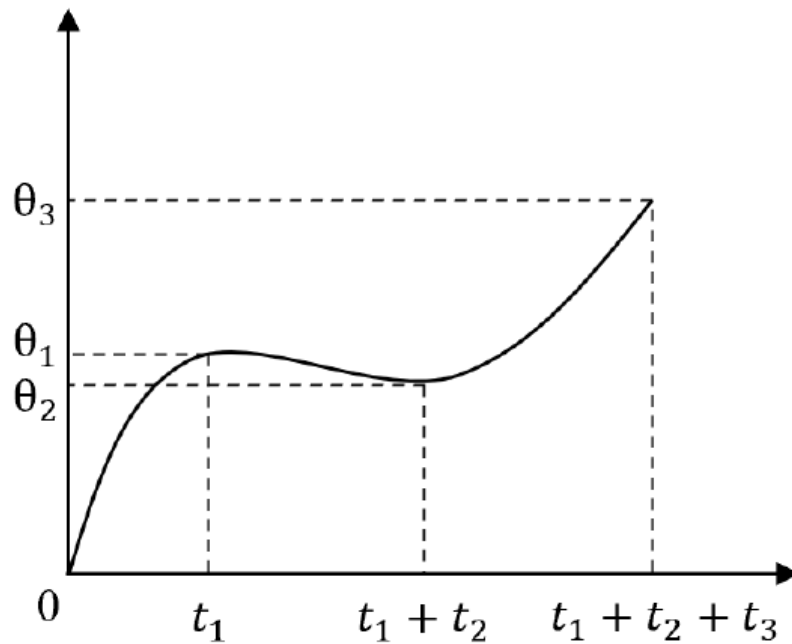


Рисунок 3.3 – Схема гібридної поліноміальної інтерполяції

Залежність між положенням суглоба  $j$  і часом руху різна на різних відрізках шляху.

За проміжок часу  $0 < t < t_1$  його можна виразити в рівнянні (3.27):

$$\begin{cases} \theta_{j1}(t) = a_{j13}t^3 + a_{j12}t^2 + a_{j11}t + a_{j10} \\ \dot{\theta}_{j1}(t) = 3a_{j13}t^2 + 2a_{j12}t + a_{j11} \\ \ddot{\theta}_{j1}(t) = 6a_{j13}t + 2a_{j12} \end{cases} \quad (3.27)$$

Протягом періоду часу  $t_1 + t_2 < t < t_1 + t_2 + t_3$ , це можна виразити в рівнянні (3.28)

$$\begin{cases} \theta_{j3}(t) = a_{j33}(t - t_1 - t_2)^3 + a_{j32}(t - t_1 - t_2)^2 + a_{j31}(t - t_1 - t_2) + a_{j30} \\ \dot{\theta}_{j3}(t) = 3a_{j33}(t - t_1 - t_2)^2 + 2a_{j32}(t - t_1 - t_2) + a_{j31} \\ \ddot{\theta}_{j3}(t) = 6a_{j33}(t - t_1 - t_2) + 2a_{j32} \end{cases} \quad (3.28)$$

У рівняннях (3.27) та (3.28),  $t$  представляє поточний час руху. Змінні  $t_1$ ,  $t_2$  і  $t_3$  позначають час руху суглобів по трьохсегментних траєкторіях шляху. Тут  $a_{j1k}$ ,  $a_{j2k}$  і  $a_{j3k}$  (де  $j$  коливається від 1 до 6) означають  $k$ -ті коефіцієнти інтерполяції функція, пов'язана з  $j$ -м суглобом в цих траєкторіях. Терміни  $\dot{\theta}_{j1}(t)$ ,  $\dot{\theta}_{j2}(t)$  та  $\dot{\theta}_{j3}(t)$  — швидкість суглоба  $j$  на трьохсегментних траєкторіях шляху.

Навпаки

$\ddot{\theta}_{j1}(t)$ ,  $\ddot{\theta}_{j2}(t)$ , і  $\ddot{\theta}_{j3}(t)$ , вказують на прискорення суглоба  $j$  по одних і тих же траєкторіях. Комплексна траєкторія шляху включає чотири точки інтерполяції, а саме  $X_{j1}$ ,  $X_{j2}$ ,  $X_{j3}$  і  $X_{j4}$ , які далі поділяються на три окремі частини. Кінематичні рівняння (3.29)–(3.32) можна вивести з рівнянь (3.27) та (3.28).

$$\mathbf{A}\mathbf{a} = \mathbf{A}^{-1}\boldsymbol{\theta} \quad (3.29)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ X_{j1} \ 0 \ 0 \ X_{j2} \ 0 \ 0 \ X_{j3} \ X_{j4}] \quad (3.30)$$

$$\mathbf{a} = [a_{j13} \ a_{j12} \ a_{j11} \ a_{j10} \ a_{j25} \ a_{j24} \ a_{j23} \ a_{j22} \ a_{j21} \ a_{j20} \ a_{j33} \ a_{j32} \ a_{j31} \ a_{j30}] \quad (3.31)$$

$$A = \begin{bmatrix} t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6t_1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_2^5 & t_2^4 & t_2^3 & t_2^2 & t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5t_2^4 & 4t_2^3 & 3t_2^2 & 2t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20t_2^3 & 12t_2^2 & 6t_2 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_3^3 & t_3^2 & t_3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3t_3^2 & 2t_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6t_3 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

У змішаному многочлені 3-5-3 коефіцієнти  $a_{j1k}$ ,  $a_{j2k}$  і  $a_{j3k}$  (де  $j$  коливається від 1 до 6) можна визначити шляхом підстановки їх у рівняння (3.29) - (3.32) на основі часових точок  $t_1$ ,  $t_2$  і  $t_3$  кожної траєкторії шляху. Цей процес дозволяє вивести зв'язок між трьома траєкторіями шляху, пов'язаними зі спільним  $j$  і часом  $t$ .

В рамках обмежень максимальної швидкості і прискорення для суглобів робіт сформульована фітнес-функція з акцентом на оптимізацію часу. Спочатку оптимальне значення визначається в межах цих обмежень за допомогою математичної моделі, як це зображено в рівнянні (3.33).

$$\begin{cases} F(x) = (\min f_1(x), \min f_2(x), \dots, \min f_m(x)) \\ \text{s.t. } Q_i(x) \leq |Q_{\max}| \\ J_i(x) \leq |J_{\max}| \end{cases} \quad (3.33)$$

У рівнянні (3.33)  $x$  представляє вектор  $[x_1, x_2, x_3 \dots x_n]$ , де  $Q_i(x)$  і  $J_i(x)$  служать обмеженнями. Цільова функція оптимізації  $F(x)$  будується з  $F_m(x)$ .

У контексті змішаної поліноміальної інтерполяції функція придатності окреслена рівняннями (3.34) і (3.35) з урахуванням трьох стадій часу руху.

$$f(t) = \min \sum_{i=0}^n (t_{i1} + t_{i2} + t_{i3}) \quad (3.34)$$

$$\begin{cases} |v_{ij}(t)| \leq v_{\max} \\ |a_{ij}(t)| \leq a_{\max} \\ |J_{ij}(t)| \leq J_{\max} \end{cases} \quad (3.35)$$

У рівняннях (3.34) і (3.35)  $t_{i1}, t_{i2}, i t_{i3}$  представляють час руху кожного суглоба по трьом різним траєкторіям руху, тоді як  $v_{ij}(t)$  позначає швидкість руху суглоба. Термін  $v_{\max}$  означає максимальну швидкість обмеження, яка визначається прискоренням руху суглоба  $a_{ij}(t)$ . Крім того,  $a_{\max}$  являє собою максимально допустиме прискорення обмеження.

### 3.3 Покращений алгоритм пошуку Sparrow

Алгоритм пошуку горобців (SSA) — це новий інтелектуальний алгоритм пошуку, спочатку запропонований Хуе [34] у 2020 році. Цей алгоритм в першу чергу моделює пошуки їжі та поведінку проти хижаків, щоб визначити оптимальне рішення в багатовимірному просторі. Популяція горобців поділяється на три окремі групи залежно від їхніх характеристик: першовідкривачі, послідовники та вігіланти.

Особини з більш високою пристосованістю в популяції функціонують як першовідкривачі, відповідальні за пошук їжі. Послідовники, які слідують за першовідкривачами, несуть відповідальність за збереження пильності щодо збиральництва серед населення. Вартові, які б'ють на сполох при виявленні небезпеки, оновлюють місцезнаходження популяції та переселяються в інші райони для добування їжі, коли значення пильності перевищує певний поріг.

Припустимо, що в  $D$ -вимірному просторі розподілено  $n$  горобців, то початковий розподіл населення можна представити у вигляді матриці у вигляді рівняння (36).

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,\text{dim}} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,\text{dim}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,\text{dim}} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Пристосованість  $n$ -го окремого горобця представлена рівнянням (3.37).

$$F_n = [f(x_{i,1}), f(x_{i,2}), f(x_{i,3}), \cdots, f(x_{i,\text{dim}})] \quad (3.37)$$

Пристосованість кожного окремого горобця в межах початкової популяції підвищується за рахунок безперервного пошуку в просторі. Оновлення положення першовідкривача представлено рівнянням (3.38).

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot N_{\text{gen}}}\right), R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L, R_2 \geq ST \end{cases} \quad (3.38)$$

Тут  $X_{i,j}^t$  позначає положення  $i$ -го горобця в  $j$ -вимірному просторі протягом  $t$ -та ітерація. Змінна  $\alpha$  означає випадкове число, яке дотримується єдиної форми розподіл в діапазоні від 0 до 1.  $N_{\text{gen}}$  представляє максимальну кількість ітерацій, тоді як  $Q$  є випадковим числом, яке слідує за нормальним розподілом у тому ж діапазоні.  $L$  символізує матрицю в  $1 \times d$  з елементами, рівними 1.

$R_2$  означає попереджувальне значення, а  $ST$  означає значення безпеки. Якщо значення попередження перевищує безпечне значення, відкривач виконає випадкові оновлення положення на основі поточної позиції.

Рівняння для того, хто слідує, щоб оновити своє положення на основі положення першовідкривача, представлено в рівнянні (3.39)

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_w^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right), i > \frac{NP}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L, i \leq \frac{NP}{2} \end{cases} \quad (3.39)$$

Тут,  $X_w^t$  — позиція найгірше пристосованого горобця на ітерації  $t$ ,  $X_p^{t+1}$  — позиція найкраще пристосованого горобця на ітерації  $t + 1$ ,  $A$  являє собою  $1 \times b$  матрицю з елементами, випадковим чином встановленими на 1 або -1,  $L$  є матрицею  $1 \times b$  з елементами, встановленими на 1, а  $NP$  — чисельність популяції.

Опікунам, які становлять від 10% до 20% населення, доручено дотримуватися пильності під час добування їжі горобцями. Виявивши потенційну небезпеку, ці опікуни припиняють свою поточну кормову діяльність і переселяються до наступного доступного місця добування їжі.

Математична формула, яка використовується для оновлення розташування цих охоронців, представлена в рівнянні (3.40).

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_b^t + \beta \cdot |X_{i,j}^t - X_b^t|, f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \cdot \left(\frac{|X_{i,j}^t - X_w^t|}{(f_i > f_w) + \varepsilon}\right), f_i = f_g \end{cases} \quad (3.40)$$

Тут,  $X_b^t$  позначає позицію горобця з найвищою глобальною пристосованістю на ітерації  $t$ . Змінна  $\beta$  — це випадкове число, отримане з нормального розподілу (0,1),  $K$  — рівномірно розподілене випадкове число в діапазоні (-1,1), а  $\varepsilon$  — мінімальне значення, яке запобігає перетворенню знаменника на нуль.  $f_i, f_g$  і  $f_w$  представляють фізичну форму нинішнього горобця, найвищого індивідуума в світі і найнижчого індивіда в усьому світі відповідно.

Якщо пильний індивід займає глобальне оптимальне положення, він буде рухатися, виходячи зі свого поточного місця розташування. І навпаки, якщо вона

не займе глобальне оптимальне положення, то зміститься в бік поточного оптимального положення.

Звичайний алгоритм пошуку горобця ініціалізує популяцію випадковим чином у просторі пошуку. Однак у міру повторення алгоритму відбувається поступове зменшення як різноманітності, так і збалансованості розподілу населення. Це може негативно вплинути на швидкість збіжності та стабільність алгоритму.

Крім того, згідно з рівнянням (3.38), в межах діапазону попереджувальних значень першовідкривач оновлює своє положення на основі невеликого діапазону його поточного місця розташування. Отже, позиції особин горобця після ітерації мають тенденцію до сходження в одну точку, що значно підвищує ймовірність потрапляння алгоритму в локальну оптимізацію [35]. Коли значення попередження перевищено, першовідкривач використовує випадкову стратегію для оновлення свого положення.

### 3.4 Імітаційний аналіз

Шестиосьовий промисловий робот, розроблений для цього дослідження, моделюється кінематично за допомогою MATLAB. Траєкторія кінцевої точки робота планується в декартовому просторі, як показано на рисунку 3.5. Для планування траєкторії вибираються чотири точки шляху, які визначають рух робота від початкової до кінцевої точки. Інтервал між кожною з цих точок становить 2 секунди. Це дозволяє створити чітке й ефективне траєкторне планування для роботизованої системи, що важливо для забезпечення точності та стабільності рухів при виконанні складних завдань.

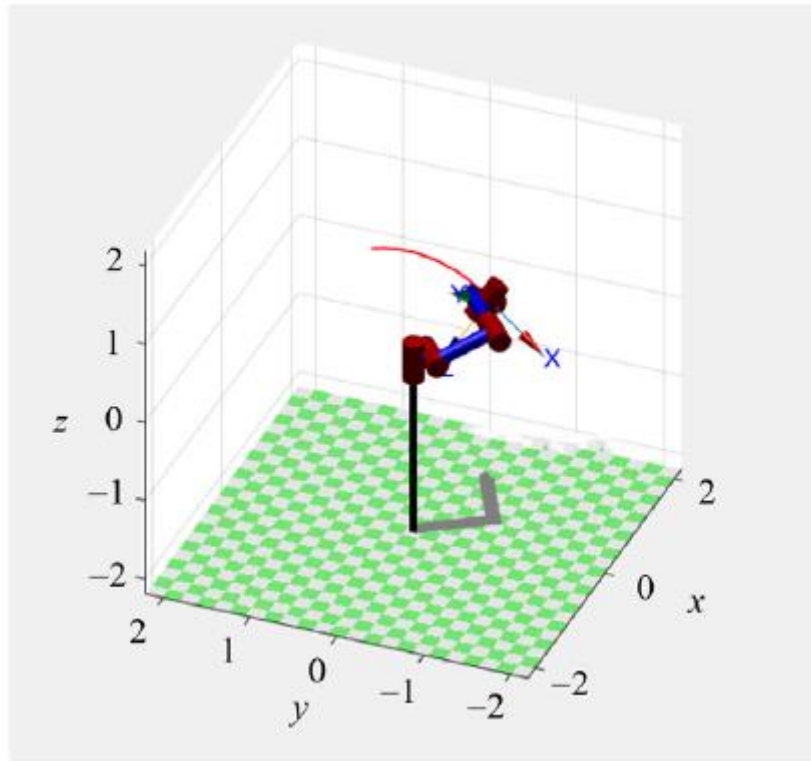


Рисунок 3.5 – Декартові траєкторії просторового планування

Згодом до цих чотирьох точок шляху застосовується обернене кінематичне рішення для визначення значень кутів з'єднання, що відповідають кожному з шести суглобів робота. Ці значення представлені в таблиці 3.2. Кінематичні обмеження, пов'язані з кожним суглобом робота, детально описані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 – Відповідні значення кутів для кожної спільної точки інтерполяції

Суглоб $i$	Точка шляху 1/°	Точка шляху 2/°	Точка шляху 3/°	Точка шляху 4/°
1	0	0	0	0
2	0	-30	-45	-50
3	-45	-30	-20	-20
4	0	30	45	60
5	0	0	30	60
6	0	0	0	30

Щоб з'ясувати ефективність запропонованого в цьому дослідженні вдосконаленого алгоритму горобця (ISSA), я його порівняв зі стандартним

алгоритмом горобця (SSA) та стандартним алгоритмом оптимізації рою частинок (PSO) для оптимізації траєкторії змішаної поліноміальної інтерполяції «3-5-3».

Таблиця 3.3 – Кінематичні обмеження суглобів

Суглоб $i$	Максимальна кутова швидкість ( $^{\circ}/s$ )	Максимальне кутове прискорення ( $^{\circ}/s$ )
1	150	93
2	180	120
3	210	160
4	360	170
5	360	260
6	450	330

І навпаки, алгоритм PSO був ініціалізований з наступними параметрами: розмір популяції 30, максимальна кількість ітерацій 1000, початкова інерційна вага 0,9 і кінцева вага інерції 0,4. Криві збіжності для трьох алгоритмів, які базуються на оптимальному за часом плануванні траєкторії для шести суглобів робота, зображені на рисунку 3.6.

Як видно з цього малюнка, алгоритм ISSA демонструє чудову продуктивність як з точки зору швидкості збіжності, так і з точністю в порівнянні з алгоритмами PSO і SSA. Порівнюючи криві збіжності з'єднань 2, 3, 4, 5 і 6, алгоритм ISSA значно перевершує як алгоритми PSO, так і SSA за точністю збіжності, як показано в таблиці 3.4.

Зокрема, для суглоба 2 алгоритм ISSA демонструє точність збіжності, яка на 13% вища, ніж у алгоритму SSA, і на 33% вища, ніж у алгоритму PSO. Для суглоба 3 алгоритм ISSA демонструє подібну точність збіжності до алгоритму SSA і демонструє точність збіжності, яка на 6% вища, ніж у алгоритму PSO. У разі з'єднання 4 точність збіжності, досягнута завдяки реалізації алгоритму ISSA, перевищує точність алгоритмів SSA і PSO на 18,8% і 48% відповідно.

Для joint 5 алгоритм ISSA перевершує алгоритми SSA і PSO на 6,5% і 9,3% відповідно. У випадку суглоба 6 алгоритм ISSA демонструє збільшення точності збіжності на 2,4% у порівнянні з алгоритмом PSO. У більш широкому масштабі

очевидно, що алгоритм ISSA стабільно забезпечує чудову точність збіжності, перевершуючи алгоритми SSA і PSO на 18,8% і 48% відповідно.

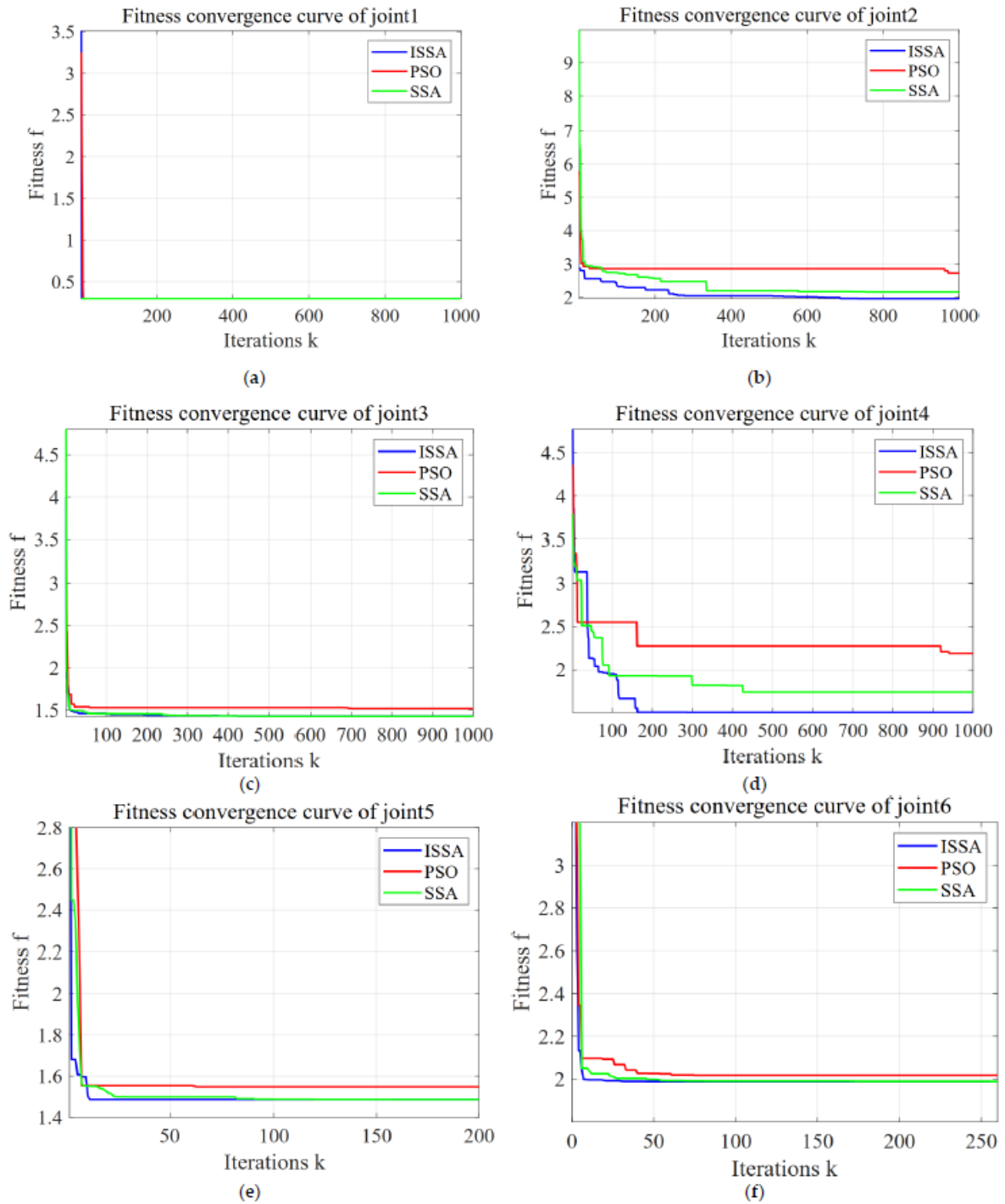


Рисунок 3.6 – Крива конвергенції пристосованості суглобів робота 1–6

Було проведено порівняльний аналіз результатів оптимізації, отриманих з цих трьох алгоритмів. Під час фази оптимізації алгоритми ISSA та SSA були ініціалізовані такими параметрами: розмір популяції горобця 30, максимальна кількість ітерацій 1000, частка першовідкривача 20%, пильна частка 10% та значення пильності 0,8.

Таблиця 3.4 – Показники точності збіжності ISSA в порівнянні з SSA і PSO

Точність збіжності	Порівняння ISSA з SSA	ISSA в порівнянні з PSO
Суглоб 2	13%	33%
Суглоб 3	-	6%
Суглоб 4	18.8%	48%
Суглоб 5	6.5%	9.3%
Суглоб 6	2.4%	18.8%

При порівнянні з'єднань 4, 5 і 6 стає очевидним, що алгоритм ISSA демонструє вищу швидкість збіжності в порівнянні з алгоритмами PSO і SSA, як показано в таблиці 3.5. Зокрема, для суглоба 4 швидкість збіжності, досягнута за допомогою алгоритму ISSA, перевищує швидкість алгоритму SSA на 25% і перевершує алгоритм PSO на 16,7%.

Алгоритм ISSA показує значно вищу швидкість збіжності порівняно з іншими алгоритмами оптимізації. Для суглоба 5 швидкість збіжності алгоритму ISSA вища на 80% у порівнянні з алгоритмом PSO. У випадку суглоба 6, швидкість збіжності алгоритму ISSA перевищує швидкість алгоритму SSA на 44,4% та алгоритму PSO на 56%. В загальному масштабі алгоритм ISSA демонструє покращення швидкості збіжності до 73% порівняно з SSA і до 80% порівняно з PSO. Це свідчить про значну ефективність ISSA в оптимізації роботизованих систем, де швидка та точна збіжність є критичним фактором для виконання складних задач.

Таблиця 3.5 – Швидкість збіжності ISSA в порівнянні з SSA і PSO

Швидкість збіжності	Порівняння ISSA з SSA	ISSA в порівнянні з PSO
Суглоб 4	25%	16.7%
Суглоб 5	52%	80%
Суглоб 6	44.4%	56%

Враховуючи мінімальний інтервал між точками шляху, криві пристосованості двох альго-ріфتم демонструють незначні відмінності в суглобі 1.

Отже, використання алгоритму ISSA для оптимального в часі планування траєкторії шестиосьових промислових роботів є можливим і ефективним. Завдяки застосуванню алгоритму ISSA стає можливим ефективно виконувати планування траєкторії в найкоротші терміни, тим самим підвищуючи ефективність роботи робота і оптимізуючи його продуктивність. У той же час, ефективність алгоритму ISSA демонструє сильну практичність і перспективні перспективи застосування в реальних інженерних сценаріях.

На рисунку 3.7 показані криві кутового переміщення, кутової швидкості та кутового прискорення, отримані після застосування алгоритмів ISSA, SSA та PSO в оптимальному за часом плануванні траєкторії для промислового робота з шістьма шарнірами. Цей процес забезпечує дотримання кінематичних обмежень.

Як показано на рисунку 3.7, промисловий робот, оптимізований за алгоритмом PSO, працює в момент приблизно 3,77099 с. На противагу цьому, робот, оптимізований за алгоритмом SSA, функціонує в середньому за 3,33759 с, тоді як робот, оптимізований алгоритмом ISSA, працює на позначці 3,17564 с.

Час роботи робота, оптимізованого ISSA, помітно коротший, ніж у неоптимізованої моделі, на 2,82436 с, що означає зниження на 47%. Крім того, час роботи робота, оптимізованого ISSA, на 0,16195 с або 4,9% коротший, ніж у

робота, оптимізованого за алгоритмом SSA, і на 0,59535 с або 15,8% швидше, ніж у робота, оптимізованого за алгоритмом PSO.

Це порівняння вказує на те, що кожна спільна траєкторія неоптимізованого робота зазнає значного скорочення часу роботи при оптимізації алгоритмами ISSA, SSA або PSO.

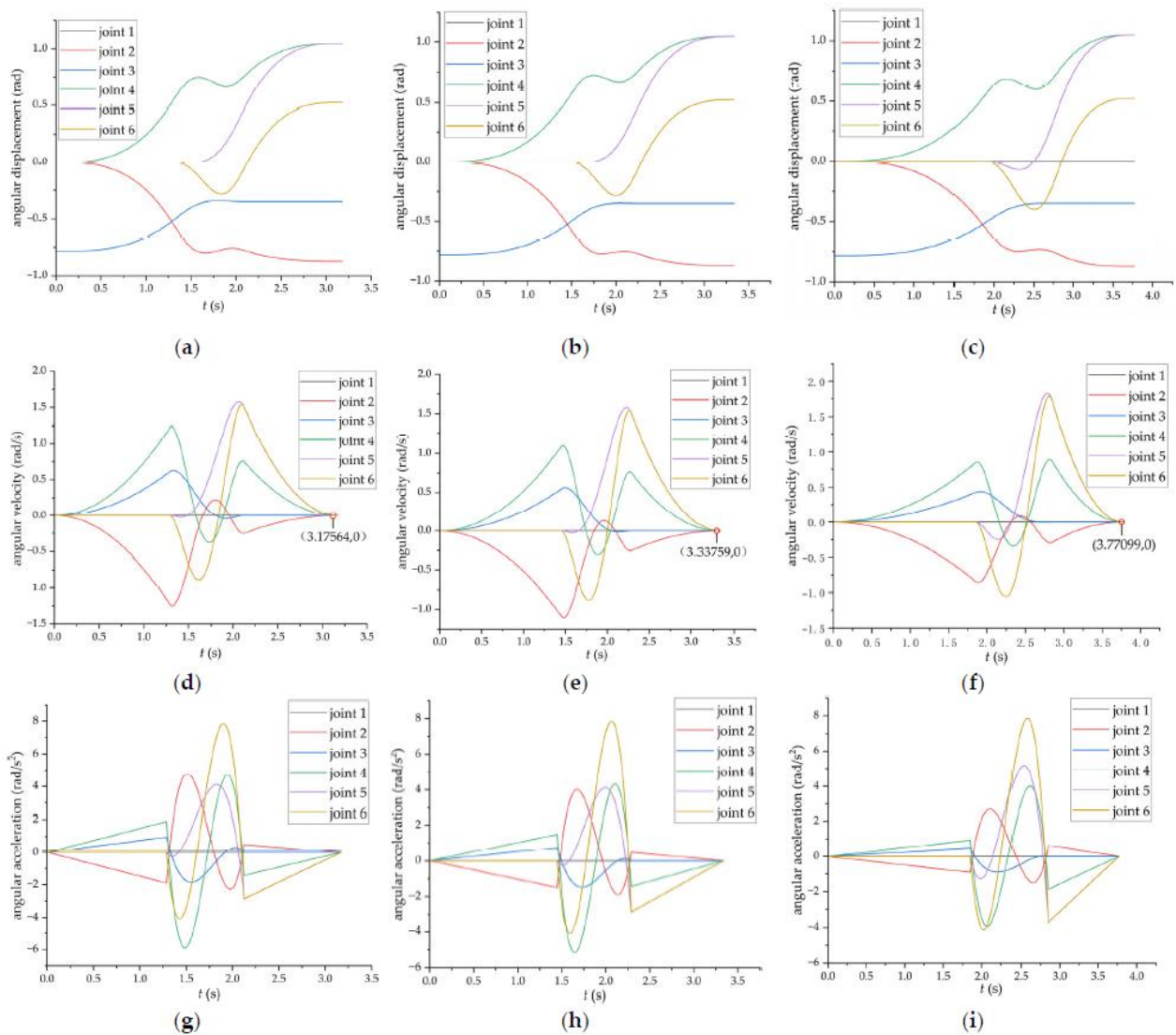


Рисунок 3.7 – Крива кутового переміщення, отримана після використання алгоритмів ISSA, SSA та PSO; (d–f) крива кутової швидкості, отримана після використання алгоритмів ISSA, SSA та PSO; (g–i) крива кутового прискорення, отримана після використання алгоритмів ISSA, SSA та PSO

Однак оптимізаційний ефект алгоритму ISSA перевершує ефект алгоритмів SSA та PSO, ефективно підвищуючи ефективність роботи. Зокрема, час роботи кожного суглоба скорочується на 0,59535 с у порівнянні з неоптимізованою моделлю.

Після оптимізації криві, що представляють кутове переміщення, швидкість і прискорення для кожного суглоба робота, є більш плавними і не демонструють різких змін, тим самим пом'якшуючи будь-який жорсткий або гнучкий вплив на продуктивність робота.

### 3.5 Висновки до третього розділу

У цьому розділі представлено вдосконалений багатостратегічний алгоритм пошуку горобців, який базується на плануванні траєкторії 3-5-3. Мета полягає в досягненні оптимального в часі планування траєкторії для промислових роботів.

Конкретні стратегії вдосконалення включають ініціалізацію населення за допомогою двовимірної логістичної хаотичної системи для забезпечення різноманітності та балансу, реалізацію стратегії польоту та нелінійного адаптивного зважування для покращення оператора оновлення положення першовідкривача, а також впровадження стратегії зворотного навчання для вдосконалення оператора, який оновлює позицію.

Такий підхід гарантує, що під час ранніх ітерацій алгоритму більша вага підвищує можливість глобального пошуку. І навпаки, у пізніших ітераціях менша вага збільшує можливість локального пошуку. Цей метод одночасно пом'якшує проблеми «скоростиглості» та локальної оптимізації, тим самим підвищуючи надійність алгоритму, а також його точність та швидкість збіжності.

За об'єкт дослідження береться самостійно розроблений шестиосьовий промисловий робот, а вдосконалений алгоритм пошуку горобця, традиційний алгоритм пошуку горобця та алгоритм рою частинок використовуються, відповідно, для проведення експериментів з моделювання оптимального за часом планування траєкторії на основі гібридної поліноміальної інтерполяції 3-5-3.

Чисельні результати демонструють, що вдосконалений алгоритм пошуку горобців перевершує як стандартний алгоритм горобця, так і алгоритм рою частинок за швидкістю збіжності та точністю при оптимізації траєкторії робота. Цей вдосконалений алгоритм не тільки сходиться швидше, але й досягає більшої точності, тим самим підвищення ефективності роботи та загальної продуктивності робота.

## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЄКТОРІЇ ДЛЯ КОЛАБОРАТИВНОЇ РОБОТОТЕХНІКИ

Сьогодні сфера колаборативної робототехніки знаходить значний розвиток. Зростаючий попит на нові установки йде рука об руку зі зростаючою увагою до безпеки та комфорту оператора, який працює з коботом. З огляду на відмінні риси коботів у порівнянні зі звичайними роботами, очікується, що вони стануть лідерами в масовій кастомізації, зменшать вимоги до простору, підвищать якість продукції, ефективність виробництва та покращать умови роботи для людей, як з точки зору безпеки, так і з точки зору ергономіки

В алгоритмі оптимізації використовуються симуляції, передані на аутсорсинг спеціальній програмі: RoboDK [36]. Це потужний симулятор для промислових роботів. Він має велику бібліотеку роботів-маніпуляторів від більш ніж 40 різних виробників роботів, що дозволяє імітувати будь-який контролер робота.

Алгоритм оптимізації виконується на MATLAB, і за допомогою виклику функції Python можна запустити симуляцію через RoboDK API.

Загальна ідея полягає в оптимізації завдання вибору та розміщення, що є однією з найбільш універсальних і універсальних функцій, які ми можемо знайти в робототехніці. Початкова і кінцева конфігурації завдання залежать від положення робота в робочій зоні, тому вони не піддаються модифікації.

Траєкторія буде оптимізована шляхом модифікації проміжної точки, як вона зображена на рисунку 4.1. При оптимізації буде шукатися проміжна конфігурація, яка призводить до найкоротшого часу виконання завдання, іншими словами, функція вартості є робочим часом, а змінна оптимізації є проміжною конфігурацією.

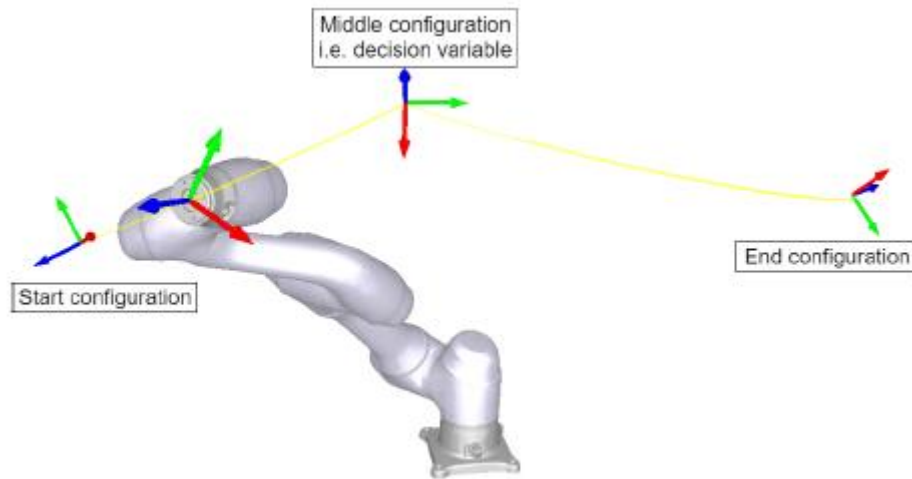


Рисунок 4.1 – Візуалізація змодельованої траєкторії робота, разом із початковою та кінцевою фіксованою конфігурацією та середньою, яка є змінною рішення оптимізації

Функція вартості враховує відстань між роботом і оператором і перешкоди в навколишньому середовищі. Загалом оптимізація буде спрямована на три балансуєчі цілі: мінімізувати час, максимізувати безпеку та уникати перешкод.

#### 4.1 Реалізація заданого дослідження

Під прямою кінематикою розуміється положення і орієнтація кінцевого ефектора. У ньому використовується Денатівсько-Гартенберзька конвенція. Крім того, ця ж домовленість використовується для знаходження оберненої кінематики робота. При цьому обернену кінематику можна вирішити геометричними методами [37].

Вирішується в два етапи, тому що в маніпуляторах зі сферичними зап'ястями рух трьох останніх ланок не змінює положення центру зап'ястя маніпулятора. Орієнтація і положення кінця пістолета по відношенню до основи робота відомі. Отже,

$$P.wirts \frac{0}{4} = \frac{0}{6} T \times P.wirts \frac{6}{4}, \quad (4.1)$$

Де  $P.wirts \frac{0}{4}$ , це положення зап'ястя щодо основи робота, а  $P.wirts \frac{6}{4}$  є положення кінця інструменту щодо зап'ястя.

Після цього необхідно використовувати матрицю Якобіана. Розглядається диференціальна кінематика, що стосується центру зап'ястя.

$$V_w = \begin{bmatrix} W_w \\ p_w \end{bmatrix} = J(\theta) \times \dot{\theta}, \quad (4.2)$$

де  $W_w$  – кутова швидкість зап'ястя, а  $p_w$  – лінійна швидкість зап'ястя.

$$W_m = J_{ra} \times \dot{\theta}_a + J_{rw} \times \dot{\theta}_w; \quad \dot{\theta}_w = J_{rw}^{-1} \times (W_w - J_{ra} \times \dot{\theta}_a), \quad (4.3)$$

$$p_w = J_{ta} \times \dot{\theta}_a; \quad \dot{\theta}_a = J_{ta}^{-1} \times p_w, \quad (4.4)$$

Аналогічний процес виконується і в разі прискорення.

За допомогою вже відомої кінематики маніпулятора можна отримати маніпулятивність. Це один з двох параметрів для оптимізації в цьому розділі. Розрахунок маніпулятивності заснований на дослідженнях, проведених Йошикава [38].

Йошикава стверджував, що маніпулятивність може бути відображена у вигляді еліпсоїда в евклідовому просторі. Крім того, для розрахунку маніпулятивності використовується розкладання маніпулятора, запропоноване Йошикава [39]. Автори пропонують розкладання на дві секції для маніпулятора з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям, показано на рисунку 4.2.

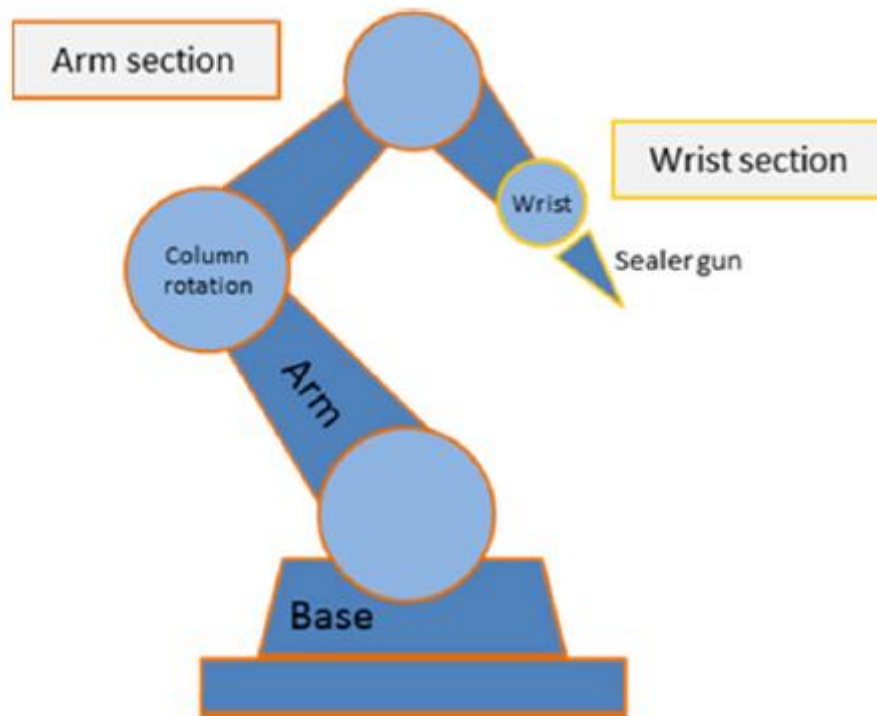


Рисунок 4.2 – Розкладання робота-маніпулятора (адаптовано з методу Йошикава [39])

При описаному методі матриця Якобі маніпулятора з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям задається формулою

$$J = [J_{a1}, J_{a2}, J_{a3}, J_{w4}, J_{w5}, J_{26}], \quad (4.5)$$

де  $J_{a1}$  — яacobіанська матриця  $i$ -го зчленування руки (для  $i = 1, 2, 3$ ), а  $J_{wi}$  — яacobіанська матриця  $i$ -го зчленування зап'ястя (для  $i = 1, 2, 3$ ).

Отже, отримуємо наступну яacobіанську матрицю:

$$J = \begin{bmatrix} z_1 & x & p_1 & z_2 & x & p_2 & z_3 & x & p_3 & z_4 & x & p_4 & z_5 & x & p_5 & z_6 & x & p_6 \\ & z_1 & & z_2 & & z_3 & & z_4 & & z_5 & & z_6 & & z_6 & & & & \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

де  $z_1$  — одиничний вектор у напрямку осі  $z$ , а  $x$  — векторний добуток.

Індекс маніпулятивності визначається як

$$w = \det \sqrt{J(q) \times J^T(q)}, \quad (4.7)$$

скільки метою є моделювання рухів і, виходячи з них, оптимізація роботи маніпулятора та електричної енергії, необхідно провести дослідження динаміки для обраного маніпулятора: робота KUKA KR30-3. Для вивчення динаміки прийнята формула Ньютона-Ейлера через її легку реалізацію [40]. Крім того, це формулювання є більш обчислювально ефективним [41].

#### 4.2 Дослідження оберненої та прямої механіки

Орієнтуючись на обчислення оберненої динаміки для цього маніпулятора, алгоритм Ньютона – Ейлера можна розділити на дві фази: перша фаза - це пряме поширення швидкостей і прискорень самих суглобів. Це відбувається від зчленування з 1 по 6 досліджуваного маніпулятора. Крім того, другим етапом обчислення є зворотне поширення (від зчленування 6 до 1) результуючих пар і сил.

Так як суглоби, присутні в даному маніпуляторі, є обертальними, то рівняння першої фази алгоритму представлені нижче.

Поширення кутової швидкості:

$$w_i = w_{i-1} + z_{i-1} \dot{\theta}_i, \quad (4.8)$$

Поширення кутового прискорення:

$$\dot{w}_i = \dot{w}_{i-1} + z_i \ddot{\theta}_i + w_{i-1} \times z_{i-1} \dot{\theta}_i, \quad (4.9)$$

Поширення лінійної швидкості:

$$v_i = v_{i-1} + w_{i-1} x r_i, \quad (4.10)$$

Поширення лінійного прискорення:

$$\dot{v}_i = \dot{v}_{i-1} + \dot{w}_{i-1} x r_i + w_i x (w_i x r_i), \quad (4.11)$$

Щоб мати можливість додавати прискорення та швидкості, вони повинні знаходитися в одній системі відліку.

Поширення кутової швидкості:

$${}^i w_i = {}^i R_{i-1} ({}^{i-1} w_{i-1} + {}^{i-1} z_{i-1} \dot{\theta}_i), \quad (4.12)$$

Поширення кутового прискорення:

$${}^i \dot{w}_i = {}^i R_{i-1} ({}^{i-1} \dot{w}_{i-1} + {}^{i-1} \dot{z}_{i-1} \ddot{\theta}_i + {}^{i-1} w_{i-1} x^{i-1} z_{i-1} \dot{\theta}_i) \quad (4.13)$$

Поширення лінійної швидкості:

$${}^i v_i = {}^i R_{i-1} ({}^{i-1} v_{i-1} + {}^i w_{i-1} x^i r_i), \quad (4.14)$$

Поширення лінійного прискорення:

$${}^i \dot{v}_i = {}^i R_{i-1} ({}^{i-1} \dot{v}_{i-1} + {}^i \dot{w}_{i-1} x^i r_i + {}^i w_i x ({}^i w_i x^i r_i)), \quad (4.15)$$

Лінійне прискорення центру мас має:

$${}^i \dot{v}_{ci} = ({}^i \dot{v}_i + {}^i \dot{w}_i x^i r_{ci} + {}^i w_i x ({}^i w_i x^i r_{ci})), \quad (4.16)$$

де  $r_i$  — положення системи I по відношенню до системи  $i - 1$ ,  $r_{ci}$  — вектор положення центру мас ланки I по відношенню до системи  $i - 1$ ,  $v_i$  — швидкість системи  $i$ ,  $v_{ci}$  — лінійна швидкість центру мас ланки  $i$ ,  $\dot{v}_i$  - лінійне прискорення

системи  $i$ ,  $\dot{v}_{ci}$  — лінійне прискорення центру мас ланки  $i$ ,  $z_i$  — вісь  $z_i$  зі спільною координатою  $\theta_{i+1}$ ,  $w_i$  кутова швидкість ланки  $i$ ,  $\dot{w}_i$  — кутове прискорення ланки  $i$ , а  ${}^iR_{i-1}$  є об'єктом ортонормальної матриці обертання яка веде від  $i - 1$  до  $i$ .

Ефект гравітації включається шляхом присвоєння величини гравітації, але в напрямку, протилежному лінійному прискоренню базової ланки робота [42].

Для вивчення прямої динаміки призначене загальне рівняння для маніпулятора  $n$  необхідно враховувати ступені свободи.

$$\vec{Q} = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q), \quad (4.17)$$

Де  $\vec{Q}$  — узагальнений вектор сил,  $q$  — суглобові координати,  $\dot{q}$  — суглобові швидкості,  $\ddot{q}$  — суглобові прискорення,  $M$  — повна інерційна матриця маніпулятора,  $C$  — ефект Коріоліса,  $F$  — в'язке і кулонівське тертя, а  $G$  — сила тяжіння.

Як видно, цей рекурсивний алгоритм розроблений з прямою рекурсією для обчислення лінійних/кутових швидкостей, лінійних/кутових прискорень та їх центру мас. Після того, як це обчислено, виконується зворотна рекурсія для знаходження сил і крутних моментів.

Всі існуючі роботи мають двигуни, здатні виробляти рух. Найбільш поширеними є двигуни постійного струму і серводвигуни. Промислові роботи, як правило, використовують серводвигуни, які є синхронними двигунами з постійними магнітами [43]. Електричну потужність, споживану двигунами, можна позначити як

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^6 P_{ci} + P_{femi}, \quad (4.18)$$

де  $P_{ci}$  — теплова потужність, що виробляється ефектом Джоуля на кожному з двигунів, а  $P_{femi}$  — потужність для створення руху в кожному з двигунів. За

допомогою попереднього рівняння електричну енергію маніпулятора по траєкторії можна розрахувати для оптимізації:

$$E. energy = \sum_{j=1}^n P_{Totalj} \times t_j, \quad (4.19)$$

де  $E. energy$  - це електрична енергія маніпулятора для заданої траєкторії і сукупності двигунів, що входять до її складу, а  $P_{Totalj}$  – миттєва електрична потужність, споживана двигунами при спільному  $j$  досліджуваній траєкторії.

### 4.3 Результати експерименту та оцінка

У цій роботі представлена нова система управління роботом, яка використовує наступний контролер шляху для генерації керуючих сигналів, тим самим дозволяючи роботу рухатися по запланованій траєкторії. Система управління включає в себе радіус цілі, який служить мірилом бажаної близькості між кінцевим положенням робота і місцем розташування мети. Робот запрограмований на зупинку свого руху, як тільки він досягне цього радіусу мети.

Крім того, система управління безперервно обчислює відстань між поточним місцем розташування робота та місцем досягнення мети, і якщо ця відстань перевищує радіус цілі, робот зупиняється, щоб уникнути будь-якої несподіваної поведінки поблизу цілі. Запропонований підхід був впроваджений і широко протестований з використанням мобільного робота і в симуляційних прогонах.

Під час експериментів робот продемонстрував вражаючі показники, досягаючи до 60 радіан в секунду для лівого колеса і 50 радіан в секунду для правого колеса. Така висока швидкість роботи в поєднанні з короткими часовими інтервалами значною мірою сприяла швидкому досягненню робота наміченої мети.

За допомогою широких досліджень та уважно стеживши за траєкторією робота в різних умовах, було всебічно оцінено його продуктивності. Згодом було

порівняно результати експерименту з симуляціями, щоб оцінити покращення простежуваного шляху робота, зображеного на рисунку 4.3, з часовим проміжком 1 с і 0,03 с. Використання такого поєднання високої швидкості і коротких часових інтервалів істотно сприяло швидкому досягненню роботом наміченої мети.

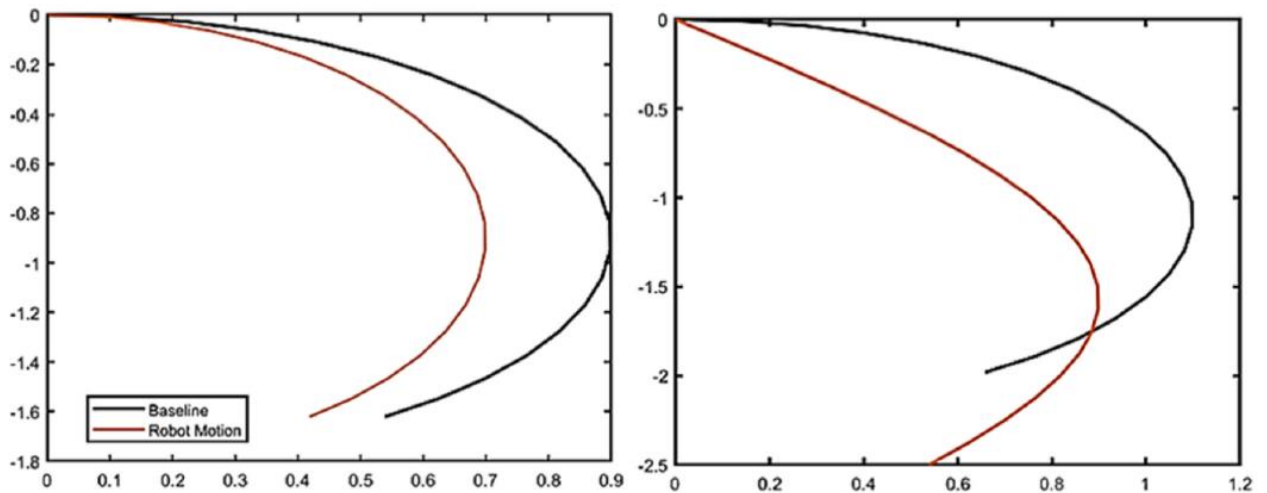


Рисунок 4.3 – Змодельований результат руху мобільного робота, що рухається з різною швидкістю обертання коліс

В якості другого експерименту оптимальна швидкість лівого і правого колеса мобільного робота для відстеження бажаної траєкторії, згенерованої шляхом моделювання руху робота за допомогою кінематичної моделі і вирішення задачі оптимізації для визначення швидкостей коліс, що мінімізувало похибку між фактичною траєкторією робота і бажаною траєкторією.

Експеримент відображав оптимальні швидкості обертання коліс у різні моменти часу вздовж траєкторії, на додаток до відповідних положень  $x$  та  $y$  робота. Ця інформація може бути використана для контролю руху робота та досягнення точного відстеження траєкторії.

Демонстрація, наведена в таблиці 4.1, в ній показано використання чисельних методів для моделювання кінематики мобільного робота. Вказавши вхідні частоти обертання коліс і початковий стан робота, стає можливим обчислити положення і орієнтацію робота на різних кроках часу. Цей метод є

основоположним у робототехніці для ефективного керування рухом мобільних роботів.

Примітно, що розв'язувач обчислює кінематичні рівняння робота, що дозволяє точно моделювати рух робота навіть при неоднакових вхідних швидкостях.

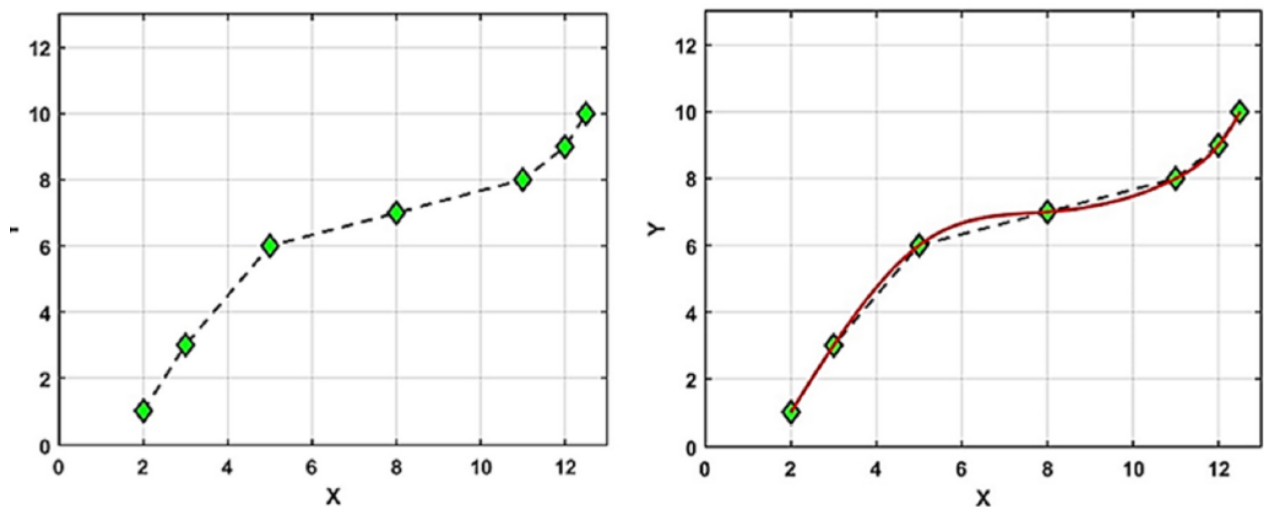
Таблиця 4.1 – Порівняння частот обертання коліс для робота з диференціальним приводом

Час (s)	Частота обертання коліс 1 (PRM)	Частота обертання коліс 2 (PRM)	Частота обертання коліс 3 (PRM)	Частота обертання коліс 4 (PRM)
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	2.9317	2.4287	1.9256	1.4225
0.10	5.7949	4.7939	3.7928	2.7917
0.15	8.6052	7.1075	5.6098	4.1116
0.20	11.3645	9.3993	7.3351	5.2709
0.25	14.0741	11.6572	8.9447	6.2323
0.30	16.7346	13.8700	10.4295	7.0329
0.35	19.3467	16.0267	11.7736	7.7119
0.40	21.9108	18.1163	12.9639	8.3033
0.45	24.4275	20.1277	13.9902	8.8356
0.50	26.8975	22.0502	14.8430	9.3326
0.55	29.3214	23.8725	15.5163	9.8130
0.60	31.6999	25.5838	16.0077	10.2917
0.65	34.0336	27.1735	16.3171	10.7795
0.70	36.3232	28.6311	16.4474	11.2836
0.75	38.5693	29.9463	16.4040	11.8083
0.80	40.7726	31.1090	16.1955	12.3557
0.85	42.9338	32.1092	15.8331	12.9276
0.90	45.0537	32.9371	15.3306	13.5251
0.95	47.1329	33.5830	14.7045	13.9762

У цій роботі представлено новий підхід до створення плавних траєкторій для навігації роботів, що інтегрує технологію захоплення руху для підвищення ефективності та точності. Запропонований метод використовує сплайнову інтерполяцію, математичний метод, який зазвичай використовується в захопленні

руху, для створення безперервних шляхів, які обходять гострі кути та різкі зміни напрямку.

Отриманий гладкий шлях, візуально представлений червоною лінією на згенерованому графіку зображений на рисунку 4.4, ефективно проходить всі вказані шляхові точки. У той час як сплайнова інтерполяція добре зарекомендувала себе в захопленні руху, її застосування в навігації роботів є інноваційним.



Рисунку 4.4 – Шлях слідування для робота з диференціальним приводом і плавний шлях для навігації робота

Гладкі траєкторії, згенеровані цим алгоритмом, пропонують просте та ефективне рішення для навігації роботів, особливо корисне в різних робототехнічних програмах, особливо тих, що включають захоплення руху.

Було проведено експерименти з оптимізації швидкості обертання коліс для точного відстеження траєкторії, продемонструвавши ефективність чисельних методів у моделюванні кінематики мобільних робочих роботів.

Алгоритм керування був реалізований та оцінений за допомогою чисельного моделювання за допомогою MATLAB/Simulink.

Нелінійна модель, яка зазвичай використовується в захопленні руху, була використана для перевірки алгоритму на п'яти різних траєкторіях, включаючи

прямі лінії з різними кутами в залежності від бажаного шляху та мети, показано на рисунку 4.5.

Модель інтегрує вхідні дані швидкостей лівого та правого колеса, а також лінійних та кутових швидкостей для визначення напрямку руху робота.

Результати проведеної оцінки демонструють високу ефективність запропонованого алгоритму управління траєкторією, який забезпечує точне і стабільне ведення мобільного робота за заданою траєкторією. Особливо помітні переваги спостерігаються при інтеграції алгоритму з технологією захоплення руху, що значно підвищує точність виконання завдань.

В експерименті використовувався мобільний робот з диференціальним приводом, для якого було спеціально розроблено алгоритм із врахуванням функціоналу технології захоплення руху. Це дозволило досягти кращої синхронізації рухів і підвищити ефективність роботи в реальних умовах, навіть за складної динаміки середовища.

Було розроблено інноваційний підхід для створення плавних траєкторій навігації, який дозволяє мобільним роботам рухатися більш природно та гармонійно, мінімізуючи різкі зміни напрямку та уникання гострих кутів. Завдяки використанню шліцьової інтерполяції вдається генерувати безперервні траєкторії, які сприяють ефективному і безпечному виконанню навігаційних завдань навіть у складних умовах.

Додатково, інтеграція технології захоплення руху значно підвищує точність виконання складних маневрів, що дозволяє забезпечити більш високу надійність роботи роботів у реальних середовищах. Цей підхід поєднує простоту реалізації з високою ефективністю, що робить його оптимальним рішенням для модернізації навігаційних алгоритмів сучасних мобільних платформ.

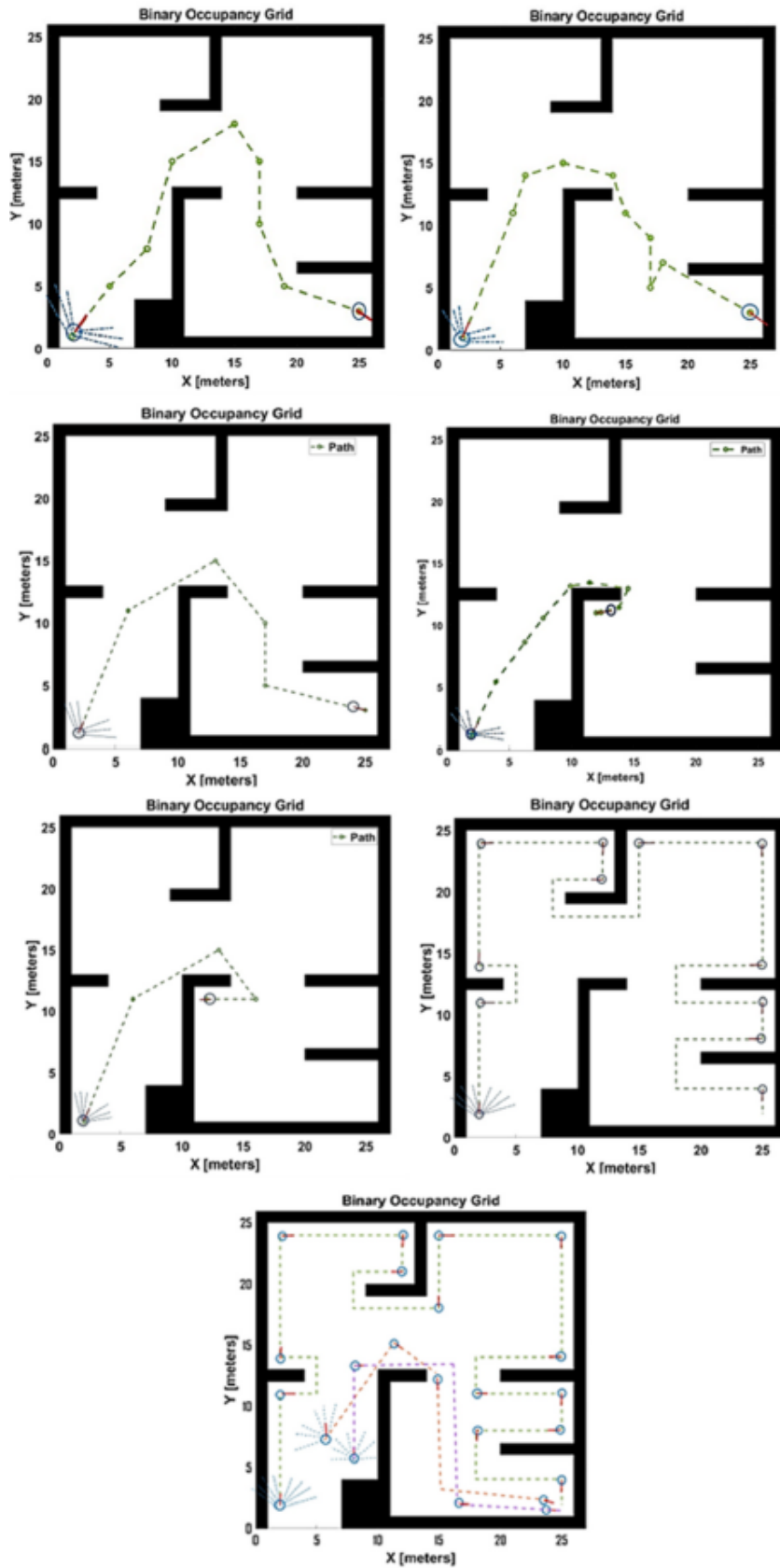


Рисунок 4.5 – Результат моделювання плану шляху мобільного робота

#### 4.4 Висновки до четвертого розділу

Результати демонструють, що використання технології захоплення руху надає дані про положення та орієнтацію в режимі реального часу, які мають вирішальне значення для визначення оптимальної швидкості обертання коліс для досягнення оптимізованої продуктивності, що призводить до значного позитивного впливу на точність траєкторії.

Різні методи розрахунку швидкості обертання коліс оцінюються за допомогою моделювання та експериментів, при цьому система управління зі зворотним зв'язком дає найкращі результати, досягаючи траєкторії, яка точно слідує бажаному шляху.

Це дослідження може сприяти розробці більш ефективних і точних алгоритмів планування шляху для мобільних роботів з потенційним застосуванням у різних галузях, таких як промислова автоматизація, охорона здоров'я та логістика.

Подальші дослідження можуть досліджувати інтеграцію методів штучного інтелекту, таких як машинне навчання та глибоке навчання, в алгоритм планування шляху мобільних роботів, а також вивчати потенціал периферійних обчислень для забезпечення автономної роботи в складних середовищах з обмеженими обчислювальними ресурсами.

Створено додаток на мові C для поширення розробленого алгоритму на інші роботи/траєкторії. Параметри роботи можна вводити як вхідні дані. Крім того, бажана вага може бути призначена кожному з оптимізованих факторів (маніпулятивність і електрична енергія).

## ВИСНОВКИ

В останні десятиліття мобільні роботи досягли успіху в ряді критично важливих безпілотних місій, від військових операцій до промислових і безпекових середовищ. Однак для того, щоб ці роботи могли орієнтуватися в складних середовищах і автономно досліджувати, необхідно вирішити фундаментальну проблему планування шляху.

У першому розділі пропонується нова техніка для підвищення безпеки мобільних роботів (MR) шляхом інтеграції імовірнісних методів у компоненти планування та локалізації шляху. Досліджено вплив включення технології захоплення руху в алгоритм планування траєкторії MR на точність їх траєкторії.

У другому розділі представлена багатоцільова задача, заснована на алгоритмі Кальмана. Цей алгоритм одночасно вивчає фактори маніпулятивності та електричної енергії. Дослідження було реалізовано для серійного робота з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям. У цього робота є гармата-ущільнювач, і ці параметри для оптимізації були вивчені для трьох різних траєкторій.

У третьому розділі представлено вдосконалений багатостратегічний алгоритм пошуку горобців, який базується на плануванні траєкторії 3-5-3. Мета полягає в досягненні оптимального в часі планування траєкторії для промислових роботів.

Конкретні стратегії вдосконалення включають ініціалізацію населення за допомогою двовимірної логістичної хаотичної системи для забезпечення різноманітності та балансу, реалізацію стратегії польоту та нелінійного адаптивного зважування для покращення оператора оновлення положення першовідкривача, а також впровадження стратегії зворотного навчання для вдосконалення оператора, який оновлює позицію.

У четвертому розділі було виявлено, що статичний алгоритм об'ємної розгортки людини (Алгоритм 1), безумовно, є найбільш консервативним і безпечним з трьох, але його загальний час виконання не дозволяє розглядати його

як рішення, застосовне в реальному світі. Другий алгоритм, з динамічною моделлю людини, є найбільш ефективним алгоритмом з точки зору часу траєкторії.

Результати демонструють, що використання технології захоплення руху надає дані про положення та орієнтацію в режимі реального часу, які мають вирішальне значення для визначення оптимальної швидкості обертання коліс для досягнення оптимізованої продуктивності, що призводить до значного позитивного впливу на точність траєкторії робота.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. B.W. Tang, Z.X. Zhu, J. Luo, Hybridizing particle swarm optimization and differential evolution for the mobile robot global path planning, *Int. J. Adv. Rob. Syst.* 13 (2016) 1–17.
2. Y. Zhuang, Y.L. Sun, W. Wang, Mobile robot hybrid path planning in an obstacle-cluttered environment based on steering control and improved distance propagating, *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control* 8 (2012) 4095–4109.
3. M. Park, J. Jeon, M. Lee, Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field, in: *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium, 2001*, pp. 1530–1535. Pusan.
4. M. Oscar, O. Ulises, S. Roberto, Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles, *Expert Syst. Appl.* 42 (12) (2015) 5177–5191.
5. E. Balasubramanian, E. Elangovan, P. Tamilarasan, G.R. Kanagachidambaresan, D. Chutia, Optimal energy efficient path planning of UAV using hybrid MACO-MEA\* algorithm: theoretical and experimental approach, *J. Ambient Intell. Hum. Comput.* 25 (2022 Jun) 1–21.
6. K. Karur, N. Sharma, C. Dharmatti, J.E. Siegel, A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots, *MDPI*, 2021, pp. 148–168.
7. J. Liang, S. Wang, B. Wang, Online motion planning for fixed-wing aircraft in precise automatic landing on mobile platforms, *Drones MDPI* 7 (5) (2023) 324.
8. L. Liu, X. Wang, X. Yang, H. Liu, J. Li, P. Wang, Path planning techniques for mobile robots: review and prospect, *Expert Syst. Appl.* 227 (2023).
9. N.H. Thai, T.T.K. Ly, NURBS curve trajectory tracking control for Differential-Drive mobile robot by a linear state feedback controller, in: *Proc. International Conference on Engineering Research and Applications, 2021*, pp. 685–696.

10. D.F. Rogers, *An Introduction to NURBS*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
11. S.J. Al-Kamil, T. Szakács, Design all-wheel drive vehicles based on differential speed control systems. *Mechatronic Systems and Control*, 2021, pp. 25–29.
12. P. Kumar, P. Sukant, K. Bisoy, Localization strategies for autonomous mobile robots: a review, *Journal of King Saud University -Computer and Information Sciences* 34 (8) (2022) 6019–6039.
13. Garriz, C.; Domingo, R. Development of Trajectories through the Kalman Algorithm and Application to an Industrial Robot in the Automotive Industry. *IEEE Access* 2019, 7, 23570–23577.
14. Yudha, H.M.; Dewi, T.; Risma, P.; Oktarina, Y. Arm Robot Manipulator Design and Control for Trajectory Tracking; a Review. In *Proceedings of the 2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, Malang, Indonesia, 16–18 October 2018; pp. 304–309.
15. Ma, C.; Zhang, Y.; Cheng, S. Time Optimal Trajectory Planning Based on Redundant Manipulator. In *Proceedings of the 2021 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)*, Shanghai, China, 9–11 October 2021; pp. 125–129.
16. Sabarigirish, S.; Mija, S.J. Obstacle avoiding trajectory planning for 5 degree of freedom robot. In *Proceedings of the 2016 IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, India, 4–6 July 2016; pp. 1–5.
17. Fang, S.; Ma, X.; Zhao, Y.; Zhang, Q.; Li, Y. Trajectory Planning for Seven-DOF Robotic Arm Based on Quintic Polynomial. In *Proceedings of the 2019 11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Hangzhou, China, 24–25 August 2019; pp. 198–201.
18. Porawagama, C.D.; Munasinghe, S.R. Reduced jerk joint space trajectory planning method using 5-3-5 spline for robot manipulators. In *Proceedings of the 7th International Conference on Information and Automation for Sustainability*, Colombo, Sri Lanka, 22–24 December 2014; pp. 1–6.

19. Wang, N.G.; Dong, Y.C.; Chen, H.Q. A Time Optimal Trajectory Planning of the Metamorphic Industrial Robot. *J. Mech. Eng.* 2023, 59, 100–111.
20. Luka Peternel et al. “Towards ergonomic control of human-robot comanipulation and handover”. In: 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids). 2017, pp. 55–60. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8239537.
21. Rainer Müller, Matthias Vette, and Ortwin Mailahn. “Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction”. In: *Procedia CIRP* 44 (2016). 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), pp. 210–215. issn: 2212-8271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.080>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116003620>.
22. Oztemel, E.; Gursev, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *J. Intell. Manuf.* 2020, 31, 127–182.
23. Javaid, M.; Haleem, A.; Singh, R.P.; Suman, R. Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation. *Cognit. Rob.* 2021, 1, 58–75.
24. Volkswagen Navarra. Proceso Productivo VW Navarra. Available online: <http://vw-navarra.es/category/nuestra-fabrica/proceso-productivo/> (accessed on 30 June 2022).
25. Maiolino, P.; Woolley, R.; Branson, D.; Benardos, P.; Popov, A.; Ratchev, S. Flexible Robot Sealant Dispensing Cell using RGB-D Sensor and Off-line Programming. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2017, 48, 188–195.
26. Atlas Copco. SCA, SCA ADKE6000. Available online: <https://www.atlascopco.com/nl-nl/itba/products/joining-solutions/industrial-dispensing-systems> (accessed on 30 June 2022).
27. KUKA. Robot Industrial KR-30. Available online: <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robotindustrial/kr-30> (accessed on 30 June 2022).

28. J. Abdor-Sierra, E. Merch'an-Cruz, R. Rodríguez-Cañizo, A comparative analysis of metaheuristic algorithms for solving the inverse kinematics of robot manipulators, *Results in Engineering* 16 (2022).
29. M. Branicky, S. LaValle, K. Olson, L. Yang, quasi-randomized path planning, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001, pp. 1481–1487.
30. Rainer Müller, Matthias Vette, and Ortwin Mailahn. “Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction”. In: *Procedia CIRP* 44 (2016). 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), pp. 210–215. issn: 2212-8271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.080>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116003620>.
31. Craig, J.J. *Introduction to Robotics*, 4th ed.; Pearson Education, Inc.: London, UK, 2018.
32. Feng, M.; Dai, J.; Zhou, W.; Xu, H.; Wang, Z. Kinematics Analysis and Trajectory Planning of 6-DOF Hydraulic Robotic Arm in Driving Side Pile. *Machines* 2024, 12, 191.
33. Tonan, M.; Bottin, M.; Doria, A.; Rosati, G. Motion Planning of Differentially Flat Planar Underactuated Robots. *Robotics* 2024, 13, 57.
34. Xue, J.K.; Shen, B. A Novel Swarm Intelligence Optimization Approach: Sparrow Search algorithm. *Syst. Sci. Control Eng.* 2020, 8, 22–34.
35. Su, Y.Y.; Wang, S.X. Adaptive Hybrid Strategy Sparrow Search Algorithm. *Comput. Eng. Appl.* 2023, 59, 75–85.
36. Organization for Standardization: Switzerland. ISO TC184/SC2, ISO/TS 15066 Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots. 2013.
37. Kleppe, A.; Egeland, O. Inverse Kinematics for Industrial Robots using Conformal Geometric Algebra. *Model. Identif. Control.* 2016, 37, 63–75.
38. Yoshikawa, T. Dynamic Manipulability of Robot Manipulators. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 25–28 March 1985.

39. Yoshikawa, T. *Foundations of Robotics: Analysis and Control*; The MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1990; pp. 127–154.
40. Khalil, W. Dynamic modeling of robots using recursive Newton-Euler techniques. In *Proceeding of the 7th International Conference on Informatics, in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2010)*, Funchal, Madeira, Portugal, 15–18 June 2010.
41. Featherstone, R.; Orin, D. *Robot Dynamics: Equations and Algorithms*. In *Proceedings of the 2000 ICRA-IEEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, USA, 24–28 April 2000.
42. Craig, J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 4th ed.; Pearson Education: Hoboken, NJ, USA, 2021.
43. Martinez, J.; Sabater, J.M. *Guía Docente para el Diseño de Robots de Servicio*. Available online: <https://sites.google.com/a/goumh.umh.es/hidma> (accessed on 30 June 2022).
44. Oztemel, E.; Gursev, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *J. Intell. Manuf.* 2020, 31, 127–182.
45. Javaid, M.; Haleem, A.; Singh, R.P.; Suman, R. Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation. *Cognit. Rob.* 2021, 1, 58–75.
46. Garriz, G.; Domingo, R. Simulation, through Discrete Events, of Industrial Processes in Productive Environments. *Procedia Manuf.* 2017, 13, 1074–1081.
47. Volkswagen Navarra. *Proceso Productivo VW Navarra*. Available online: <http://vw-navarra.es/category/nuestra-fabrica/proceso-productivo/> (accessed on 30 June 2022).
48. Alekseeva, E.I.; Nanush'yan, S.R.; Ruskol, I.Y.; Sokolyuk, E.V. Silicone Compounds and Sealants and their Application in Various Branches of Industry. *Polym. Sci. Ser. D* 2010, 3, 244–248.
49. Lavery, M. Sealants in the automotive industry. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2002, 22, 443–445.

50. Maiolino, P.; Woolley, R.; Branson, D.; Benardos, P.; Popov, A.; Ratchev, S. Flexible Robot Sealant Dispensing Cell using RGB-D Sensor and Off-line Programming. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2017, 48, 188–195.
51. Yoshikawa, T. Dynamic Manipulability of Robot Manipulators. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 25–28 March 1985.
52. Elkady, A.Y.; Mohammed, M.; Sobh, T. A New Algorithm for Measuring and Optimizing the Manipulability Index. *J. Intell. Robot. Syst.* 2009, 59, 75–86.
53. Doty, K.L.; Melchior, C.; Schwartz, E.M.; Bonivento, C. Robot Manipulability. *IEEE Trans. Rob. Autom.* 1995, 11, 462–468.
54. From, P.J.; Robertsson, A.; Johansson, R. On the Manipulability of Velocity-constrained Serial Robotic Manipulators. In *Proceedings of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, Cape Town, South Africa, 24–29 August 2014.
55. Pozna, C.R.; Horváth, E.; Hollósi, J. The Inverse Kinematics Problem, a Heuristical Approach. In *Proceedings of the IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, Herlany, Slovakia, 21–23 January 2016.
56. 13. Jin, L.; Li, S.; La, H.M.; Luo, X. Manipulability Optimization of Redundant Manipulators Using Dynamic Neural Networks. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 4710–4720.
57. Dufour, K.; Suleiman, W. On Inverse Kinematics with Nonlinear Criteria: Trajectory Relaxation. In *Proceedings of the IEEE 15th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, Tokyo, Japan, 9–11 March 2018.
58. Choi, D.S.; Kim, S.J.; Kim, Y.; Ha, I.J. A Computationally Efficient Approach to Time-Optimal Control of Robotic Manipulators along Specified Paths. In *Proceedings of the ISIE 2001, 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Pusan, Korea, 12–16 June 2001. [CrossRef]
59. Saravanan, R.; Ramabalan, S. Evolutionary Minimum Cost Trajectory Planning. *J. Intell. Robot. Syst.* 2008, 52, 45–77.

60. Abu-Dakka, F.J.; Assad, F.I.; Alkhdour, R.M.; Abderahim, M. Statistical evaluation of an evolutionary algorithm for minimum time trajectory planning problem for industrial robots. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 89, 389–406.
61. Saidur, R. A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 14, 877–898.
62. Paes, K.; Dewulfa, W.; Elst, K.V.; Kellens, K.; Slaets, P. Energy efficient trajectories for an industrial ABB robot. *Procedia CIRP* 2014, 15, 105–110.
63. 20. Meike, D.; Ribickis, L. Energy Efficient Use of Robotics in the Automobile Industry. In *Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Robotics*, Tallin, Estonia, 20–23 June 2011.
64. Wei, H.; Zhang, Y.; Tan, L.; Zhong, Z. Energy efficiency evaluation of hot-wire laser welding based on process characteristic and electric energy. *J. Clean. Prod.* 2015, 87, 255–262.
65. Wigström, O.; Lennartson, B.; Vergnano, A.; Breitholtz, C. High-Level Scheduling of Energy Optimal Trajectories. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2013, 10, 57–64.
66. Riazi, S.; Bengtsson, K.; Bischoff, R.; Aurnhammer, A.; Wigström, O.; Lennartson, B. Energy and Peak-power Optimization of Existing Time-optimal Robot Trajectories. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, FortWorth, TX, USA, 21–25 August 2016.
67. Paryanto, M.N.; Kohl, J.; Merhof, J.; Spreng, S.; Franke, J. Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system. *Procedia CIRP* 2014, 23, 131–136.
68. Björkenstam, S.; Gleeson, D.; Bohlin, R.; Carlson, J.S.; Lennartson, B. Energy Efficient and Collision Free Motion of Industrial Robots using Optimal Control. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Madison, WI, USA, 17–20 August 2013.
69. Rubio, F.; Valero, F.; Sunyer, J.; Cuadrado, J. Optimal time trajectories for industrial robots with torque, power, jerk and energy consumed constraints. *Ind. Robot* 2012, 39, 92–100.

70. Mukund-Nilakantan, J.; Huang, G.Q.; Ponnambalam, S.G. An investigation on minimizing cycle time and total energy consumption in robotic assembly line systems. *J. Clean. Prod.* 2015, 90, 311–325.

71. Zhou, B.-H.; Shen, C.-Y. Multi-objective optimization of material delivery for mixed model assembly lines with energy consideration. *J. Clean. Prod.* 2018, 192, 293–305.

## Додаток А

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

УДК 004.8

DOI:

**Владислав ДЗИСЬ, Дмитро МАРТИНЮК, Галина РАДЕЛЬЧУК**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0009-0000-2472-5653

0009-0002-3524-872X

0000-0002-9728-4390

e-mail: vladdzys@gmail.com

martiniyuk.dim14@gmail.com

gal\_2015@ukr.net

#### МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ РОБОТА

*У статті висвітлюється техніка, яка використовує технологію захоплення руху для збору даних про рухи робота в режимі реального часу, створення оптимальних стратегій планування шляху, а також для дистанційного керування та моніторингу діяльності робота. Запропонований підхід може значно розширити можливості роботизованих систем у різних промислових умовах. Результати дослідження демонструють, що інтеграція технології захоплення руху може значно підвищити точність та ефективність планування шляху в робототехнічних системах та підвищити їх загальну продуктивність.*

*Для вирішення проблеми оптимізації траєкторії руху робота, представлена багатоцільова задача, заснована на алгоритмі Кальмана. Цей алгоритм одночасно вивчає фактори маніпулятивності та електричної енергії. Дослідження реалізовано для серійного робота з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям. У цього робота є гармата-уцілювач, і ці параметри для оптимізації були вивчені для трьох різних траєкторій.*

*У дослідженні впроваджено вдосконалений багатостратегічний алгоритм пошуку, який базується на плануванні траєкторії 3-5-3. Мета полягає в досягненні оптимального в часі планування траєкторії для промислових роботів.*

*Ключові слова: індустрія 4.0; промисловий робот; оптимізація траєкторії; покращений алгоритм пошуку горобців, робот-маніпулятор; оптимізація траєкторії; маніпулятивність; електрична енергія.*

**Vladyslav DZYS, Dmytro MARTYNYUK, Halyna RADELCHUK**

Khmelnytskyi National University

#### THE METHOD OF OPTIMIZING THE TRAJECTORY OF ROBOT MOVEMENT

*The paper highlights a technique that uses motion capture technology to collect real-time data on robot movements, generate optimal path planning strategies, and remotely control and monitor robot activity. The proposed approach can significantly expand the capabilities of robotic systems in various industrial environments. The research results demonstrate that the integration of motion capture technology can significantly improve the accuracy and efficiency of path planning in robotic systems and improve their overall performance.*

*To solve the problem of optimizing the trajectory of the robot, a multi-objective problem based on the Kalman algorithm is presented. This algorithm simultaneously studies manipulability and electrical energy factors. The study was implemented for a serial robot with six degrees of freedom and a spherical wrist. This robot has a compactor gun and these optimization parameters were studied for three different trajectories.*

*The study implemented an improved multi-strategy search algorithm based on 3-5-3 trajectory planning. The goal is to achieve time-optimal trajectory planning for industrial robots.*

*Keywords: industry 4.0; industrial robot; trajectory optimization; improved sparrow search algorithm, manipulator robot; trajectory optimization; manipulateness; electrical energy.*

## Постановка проблеми

Останні досягнення в мехатроніці та робототехніці призвели до появи широкого спектру технологій з потенційним застосуванням їх у різних галузях. Цей прогрес спостерігався в останні роки і, як очікується, триватиме в міру того, як інтеграція роботів у повсякденне життя стає все більш поширеною.

Незважаючи на ці зміни, розгортання роботів у промислових середовищах, особливо на складальних операціях, все ще пов'язане з низкою проблем, включаючи ефективний розподіл завдань, заснованих на навичках, між людьми та роботизованими працівниками. У цій роботі запропоновано підхід до підвищення продуктивності роботизованих систем для оптимального планування шляху.

Серія експериментів продемонструвала його ефективність у створенні оптимальних стратегій планування шляху, мінімізуючи при цьому ризик зіткнень та інших небезпек.

## Аналіз останніх джерел

В останні десятиліття мобільні роботи досягли успіху в ряді критично важливих безпілотних місій, від військових операцій до промислових і безпекових середовищ [1]. Однак для того, щоб ці роботи могли орієнтуватися в складних середовищах і автономно досліджувати, необхідно вирішити фундаментальну проблему планування шляху [2].

Дослідники цікавляться плануванням шляху ще з середини 1960-х років, і проблему можна визначити так: маючи робота і його оточення, робот шукає оптимальний можливий шлях від початкової позиції до пункту призначення, ґрунтуючись на певних критеріях продуктивності [4,5]. Розробивши потужну технологію планування шляху для мобільних роботів, можна не тільки заощадити дорогий час, але й зменшити знос і капітальні інвестиції роботів.

В результаті свого значного практичного застосування, планування шляху для мобільних роботів стало популярною темою для досліджень як на внутрішньому, так і на міжнародному рівнях. Планування шляху мобільного робота є критично важливим завданням у робототехніці. Він передбачає пошук шляху без зіткнень для руху робота зі свого початкового положення до положення мети в кожному середовищі.

У динамічних середовищах завдання стає більш складним, оскільки робот повинен реагувати на зміни в навколишньому середовищі в режимі реального часу. Тому пошук ефективного та надійного алгоритму планування шляху має вирішальне значення для успішного розгортання мобільних роботів у динамічних середовищах.

У літературі були запропоновані різні методи планування шляху, включаючи штучне поле, сітку, нейронну мережу та еволюційні алгоритми, такі як генетичний алгоритм хаосу.

Ці методи мають переваги і недоліки, а вибір методу залежить від конкретних вимог застосування.

Планування шляху мобільного робота може відрізнятися з точки зору реалізації від планування БПЛА, наприклад, використання кривих NURBS.

Тим не менш, основні принципи залишаються незмінними - розробляти ефективні та ефективні траєкторії, які забезпечують плавний і безпечний рух, подібно до стратегій планування шляху, що використовуються в автономних 3D-польотах [6,7]. Аналогічно, для БПЛА з нерухомим крилом були розроблені чіткі траєкторії польоту для польотів на низьких висотах, таких як посадка та сигнальна ракета [8].

Комп'ютерне моделювання та інструменти проектування [9], використовуються для допомоги в розробці 3D-траєкторій польоту. У даному дослідженні було вирішено використовувати криві NURBS для проектування бажаної траєкторії руху робота. Цей вибір був обумовлений дослідженнями, які продемонстрували, що такий підхід дозволяє ефективно уникнути різких змін швидкості робота [10,11].

Планування шляху має вирішальне значення для керування диференціальним мобільним роботом, оскільки він визначає траєкторію, за якою робот буде слідувати, і забезпечує безпечну та ефективну навігацію в навколишньому середовищі. Мобільний робот з диференціальним приводом (DDMR) є популярною та простою конструкцією серед різних типів мобільних роботів.

Диференціальні колеса поширені в автономних наземних роботах, але повна автономність вимагає уваги до зондування, планування шляху, контролю та самокалібрації. Наголосити на необхідності безпечної та комфортної взаємодії людини з роботами та транспортними засобами з диференціальним приводом [12].

**Метою роботи є:** розробка методів оптимізації траєкторії руху робота.

### Виклад основного матеріалу

Під прямою кінематикою розуміється положення і орієнтація кінцевого ефектора. У ньому використовується Денатівсько-Гартенберзька конвенція. Крім того, ця ж домовленість використовується для знаходження оберненої кінематики робота. При цьому обернену кінематику можна вирішити геометричними методами [13].

Вирішується в два етапи, тому що в маніпуляторах зі сферичними зап'ястями рух трьох останніх ланок не змінює положення центру зап'ястя маніпулятора. Орієнтація і положення кінця пістолета по відношенню до основи робота відомі. Отже,

$$P.wirts \frac{0}{4} = \frac{0}{6} T \times P.wirts \frac{6}{4}, \quad (1)$$

Де  $P.wirts \frac{0}{4}$ , це положення зап'ястя щодо основи робота, а  $P.wirts \frac{6}{4}$  є положення кінця інструменту щодо зап'ястя.

Після цього необхідно використовувати матрицю Якобіана. Розглядається диференціальна кінематика, що стосується центру зап'ястя.

$$V_w = \begin{bmatrix} W_w \\ p_w \end{bmatrix} = J(\theta) \times \dot{\theta}, \quad (2)$$

де  $W_w$  – кутова швидкість зап'ястя, а  $p_w$  – лінійна швидкість зап'ястя.

$$W_m = J_{ra} \times \dot{\theta}_a + J_{rw} \times \dot{\theta}_w; \dot{\theta}_w = J_{rw}^{-1} \times (W_w - J_{ra} \times \dot{\theta}_a) \quad (3)$$

$$\dot{p}_w = J_{ta} \times \dot{\theta}_a; \dot{\theta}_a = J_{ta}^{-1} \times \dot{p}_w, \quad (4)$$

Аналогічний процес виконується і в разі прискорення.

За допомогою вже відомої кінематики маніпулятора можна отримати маніпулятивність. Це один з двох параметрів для оптимізації в цьому розділі. Розрахунок маніпулятивності заснований на дослідженнях, проведених Йошикава [14].

Йошикава стверджував, що маніпулятивність може бути відображена у вигляді еліпсоїда в евклідовому просторі. Крім того, для розрахунку маніпулятивності використовується розкладання маніпулятора, запропоноване Йошикава [15]. Автори пропонують розкладання на дві секції для маніпулятора з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям, показано на рисунку 1.

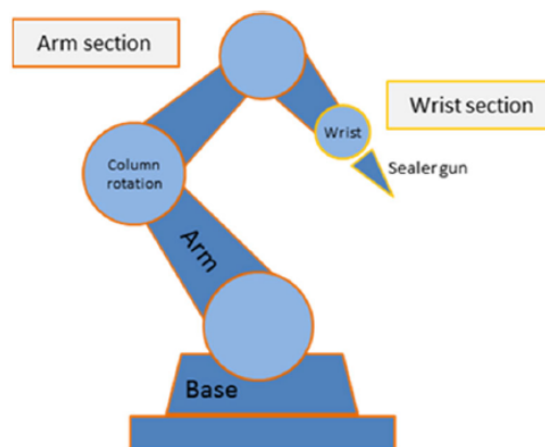


Рисунок 1 – Розкладання робота-маніпулятора (адаптовано з методу Йошикава [15])

При описаному методі матриця Якобі маніпулятора з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям задається формулою

$$J = [J_{a1}, J_{a2}, J_{a3}, J_{w4}, J_{w5}, J_{26}], \quad (5)$$

де  $J_{a1}$  — якобіанська матриця  $i$ -го зчленування руки (для  $i = 1, 2, 3$ ), а  $J_{wi}$  — якобіанська матриця  $i$ -го зчленування зап'ястя (для  $i = 1, 2, 3$ ).

|

#### Аналіз ефективності запропонованого методу

Результати демонструють, що використання технології захоплення руху надає дані про положення та орієнтацію в режимі реального часу, які мають вирішальне значення для визначення оптимальної швидкості обертання коліс для досягнення оптимізованої продуктивності, що призводить до значного позитивного впливу на точність траєкторії.

Різні методи розрахунку швидкості обертання коліс оцінюються за допомогою моделювання та експериментів, при цьому система управління зі зворотним зв'язком дає найкращі результати, досягаючи траєкторії, яка точно слідує бажаному шляху.

Це дослідження може сприяти розробці більш ефективних і точних алгоритмів планування шляху для мобільних роботів з потенційним застосуванням у різних галузях, таких як промислова автоматизація, охорона здоров'я та логістика.

Подальші дослідження можуть досліджувати інтеграцію методів штучного інтелекту, таких як машинне навчання та глибоке навчання, в алгоритм планування шляху мобільних роботів, а також вивчати потенціал периферійних обчислень для забезпечення автономної роботи в складних середовищах з обмеженими обчислювальними ресурсами.

Створено додаток на мові C для поширення розробленого алгоритму на інші роботи/траєкторії. Параметри робота можна вводити як вхідні дані. Крім того, бажана вага може бути призначена кожному з оптимізованих факторів (маніпулятивність і електрична енергія).

#### ВИСНОВКИ

В роботі запропонована нова техніка для підвищення безпеки мобільних роботів (MR) шляхом інтеграції імовірнісних методів у компоненти планування та локалізації шляху. Досліджено вплив включення технології захоплення руху в алгоритм планування траєкторії MR на точність їх траєкторії.

Згодом представлена багатоцільова задача, заснована на алгоритмі Кальмана. Цей алгоритм одночасно вивчає фактори маніпулятивності та електричної енергії. Дослідження було реалізовано для серійного робота з шістьма ступенями свободи і сферичним зап'ястям. У цього робота є гармата-ущільнювач, і ці параметри для оптимізації були вивчені для трьох різних траєкторій.

Запропоновано вдосконалений багатостратегічний алгоритм пошуку горобців, який базується на плануванні траєкторії 3-5-3. Мета полягає в досягненні оптимального в часі планування траєкторії для промислових роботів.

Конкретні стратегії вдосконалення включають ініціалізацію населення за допомогою двовимірної логістичної хаотичної системи для забезпечення різноманітності та балансу, реалізацію стратегії польоту та нелінійного адаптивного зважування для покращення оператора оновлення положення першовідкривача, а також впровадження стратегії зворотного навчання для вдосконалення оператора, який оновлює позицію.

В дослідженні було виявлено, що статичний алгоритм об'ємної розгортки людини (Алгоритм 1), безумовно, є найбільш консервативним і безпечним з трьох, але його загальний час виконання не дозволяє розглядати його як рішення, застосовне в реальному світі. Другий алгоритм, з динамічною моделлю людини, є найбільш ефективним алгоритмом з точки зору часу траєкторії.

Результати демонструють, що використання технології захоплення руху надає дані про положення та орієнтацію в режимі реального часу, які мають вирішальне значення для визначення оптимальної швидкості обертання коліс для досягнення оптимізованої продуктивності, що призводить до значного позитивного впливу на точність траєкторії робота.

### Література

1. B.W. Tang, Z.X. Zhu, J. Luo, Hybridizing particle swarm optimization and differential evolution for the mobile robot global path planning, *Int. J. Adv. Rob. Syst.* 13 (2016) 1–17.
2. Y. Zhuang, Y.L. Sun, W. Wang, Mobile robot hybrid path planning in an obstacle-cluttered environment based on steering control and improved distance propagating, *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control* 8 (2012) 4095–4109.
3. M. Park, J. Jeon, M. Lee, Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field, in: *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium*, 2001, pp. 1530–1535. Pusan.
4. M. Oscar, O. Ulises, S. Roberto, Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles, *Expert Syst. Appl.* 42 (12) (2015) 5177–5191.
5. E. Balasubramanian, E. Elangovan, P. Tamilarasan, G.R. Kanagachidambaresan, D. Chutia, Optimal energy efficient path planning of UAV using hybrid MACO-MEA\* algorithm: theoretical and experimental approach, *J. Ambient Intell. Hum. Comput.* 25 (2022 Jun) 1–21.
6. K. Karur, N. Sharma, C. Dharmatti, J.E. Siegel, A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots, *MDPI*, 2021, pp. 148–168.
7. J. Liang, S. Wang, B. Wang, Online motion planning for fixed-wing aircraft in precise automatic landing on mobile platforms, *Drones MDPI* 7 (5) (2023) 324.
8. L. Liu, X. Wang, X. Yang, H. Liu, J. Li, P. Wang, Path planning techniques for mobile robots: review and prospect, *Expert Syst. Appl.* 227 (2023).
9. N.H. Thai, T.T.K. Ly, NURBS curve trajectory tracking control for Differential-Drive mobile robot by a linear state feedback controller, in: *Proc. International Conference on Engineering Research and Applications*, 2021, pp. 685–696.
10. D.F. Rogers, *An Introduction to NURBS*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
11. S.J. Al-Kamil, T. Szakács, Design all-wheel drive vehicles based on differential speed control systems. *Mechatronic Systems and Control*, 2021, pp. 25–29.
12. P. Kumar, P. Sukant, K. Bisoy, Localization strategies for autonomous mobile robots: a review, *Journal of King Saud University -Computer and Information Sciences* 34 (8) (2022) 6019–6039.
13. Kleppe, A.; Egeland, O. Inverse Kinematics for Industrial Robots using Conformal Geometric Algebra. *Model. Identif. Control.* 2016, 37, 63–75.
14. Yoshikawa, T. Dynamic Manipulability of Robot Manipulators. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 25–28 March 1985.
15. Yoshikawa, T. *Foundations of Robotics: Analysis and Control*; The MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1990; pp. 127–154.

### References

1. B.W. Tang, Z.X. Zhu, J. Luo, Hybridizing particle swarm optimization and differential evolution for the mobile robot global path planning, *Int. J. Adv. Rob. Syst.* 13 (2016) 1–17.
2. Y. Zhuang, Y.L. Sun, W. Wang, Mobile robot hybrid path planning in an obstacle-cluttered environment based on steering control and improved distance propagating, *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control* 8 (2012) 4095–4109.
3. M. Park, J. Jeon, M. Lee, Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field, in: *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium*, 2001, pp. 1530–1535. Pusan.
4. M. Oscar, O. Ulises, S. Roberto, Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles, *Expert Syst. Appl.* 42 (12) (2015) 5177–5191.
5. E. Balasubramanian, E. Elangovan, P. Tamilarasan, G.R. Kanagachidambaresan, D. Chutia, Optimal energy efficient path planning of UAV using hybrid MACO-MEA\* algorithm: theoretical and experimental approach, *J. Ambient Intell. Hum. Comput.* 25 (2022 Jun) 1–21.
6. K. Karur, N. Sharma, C. Dharmatti, J.E. Siegel, A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots, *MDPI*, 2021, pp. 148–168.
7. J. Liang, S. Wang, B. Wang, Online motion planning for fixed-wing aircraft in precise automatic landing on mobile platforms, *Drones MDPI* 7 (5) (2023) 324.
8. L. Liu, X. Wang, X. Yang, H. Liu, J. Li, P. Wang, Path planning techniques for mobile robots: review and prospect, *Expert Syst. Appl.* 227 (2023).
9. N.H. Thai, T.T.K. Ly, NURBS curve trajectory tracking control for Differential-Drive mobile robot by a linear state feedback controller, in: *Proc. International Conference on Engineering Research and Applications*, 2021, pp. 685–696.
10. D.F. Rogers, *An Introduction to NURBS*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
11. S.J. Al-Kamil, T. Szakács, Design all-wheel drive vehicles based on differential speed control systems. *Mechatronic Systems and Control*, 2021, pp. 25–29.
12. P. Kumar, P. Sukant, K. Bisoy, Localization strategies for autonomous mobile robots: a review, *Journal of King Saud University -Computer and Information Sciences* 34 (8) (2022) 6019–6039.

13. Kleppe, A.; Egeland, O. Inverse Kinematics for Industrial Robots using Conformal Geometric Algebra. *Model. Identif. Control.* 2016, *37*, 63–75.
14. Yoshikawa, T. Dynamic Manipulability of Robot Manipulators. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 25–28 March 1985.
15. Yoshikawa, T. *Foundations of Robotics: Analysis and Control*; The MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1990; pp. 127–154.

## РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Дзись Владислав Сергійович

Тема: Метод оптимізації траєкторії руху робота

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

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень -; кількість сторінок записки 77

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі розроблено метод  
оптимізації траєкторії руху робота

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 пропонується нова техніка для підвищення безпеки мобільних роботів (MR) шляхом інтеграції імовірнісних методів у компоненти планування та локалізації шляху. Досліджено вплив включення технології захоплення руху в алгоритм планування траєкторії MR на точність їх траєкторії. У другому розділі представлена багатоцільова задача, заснована на алгоритмі Кальмана. У третьому розділі представлено вдосконалений багатостратегічний алгоритм пошуку горобців, який базується на плануванні траєкторії 3-5-3. Мета полягає в досягненні оптимального в часі планування траєкторії для промислових роботів. У четвертому розділі було виявлено, що статичний алгоритм об'ємної розгортки людини (Алгоритм 1), безумовно, є найбільш консервативним і безпечним з трьох, але його загальний час виконання не дозволяє розглядати його як рішення, застосовне в реальному світі. Другий алгоритм, з динамічною моделлю людини, є найбільш ефективним алгоритмом з точки зору часу траєкторії.

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

“12” 12 2024р.



Лисенко Сергій (підпис)  
Лисенко Сергій

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

Дзись В.С.

ІІБ 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.

\_\_\_\_\_

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:** Владислав ДЗИСЬ

**Співавтор:**

**Назва:** МКР Дзись

**Науковий керівник:** Галина РАДЕЛЬЧУК.

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

**Коефіцієнт подібності 1:** 0.7%

**Коефіцієнт подібності 2:** 0.4%

**Мікропробіли:** 0

**Заміна букв:** 28

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2024-12-12 06:39:35.0

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.

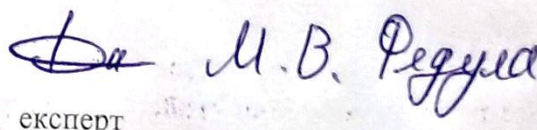
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

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

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилоч в документах: 9%**

ID: 158063 Назва: МКР Метод оптимізації траєкторії руху робота Додано в БД: 2024-12-12 Автора: Владислав ДЗИСЬ Керівники: Галина РАДЕЛЬЧУК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	85314	1267	876 (1%)	9 (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 оптимізації траєкторії руху робота

Автор: Дзись Владислав Сергійович

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

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

Науковий керівник: Радельчук Галина Іванівна, кандидат технічних наук, доцент

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 укриття 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% і адресується до 70 джерел, 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

Галина РАДЕЛЬЧУК