

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ФАКУЛЬТЕТ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Владислав ШЛИКОВ

«10» червня 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою Медична інженерія

спеціальності 163 Біомедична інженерія

**на тему: «Віртуальна керована модель маніпулятора системи роботизованої
хірургії на основі Robot Operating System»**

Виконав:

студент IV курсу, групи БМ-01

Гайдук Серафим Андрійович _____

Керівник:

доц. каф. БМІ, к.т.н

Дубко Андрій Григорович _____

Рецензент:

завідувач кафедри ББЗЛ

Худецький Ігор Юліанович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
Факультет біомедичної інженерії
Кафедра біомедичної інженерії

Освітньо-кваліфікаційний рівень	<u>Перший (бакалаврський)</u>
Напрямок підготовки	<u>163 Біомедична інженерія</u>
Спеціальність	<u>Медична інженерія</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Владислав ШЛИКОВ

“ 12 ” квітня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Гайдуку Серафиму Андрійовичу

1. Тема роботи Віртуальна керована модель маніпулятора системи роботизованої хірургії на основі Robot Operating System
керівник роботи Дубко Андрій Григорович, к.т.н., доц. каф. БМІ,
затверджені наказом по університету від «29 » травня 2024 р. № 2165-с
2. Строк подання студентом роботи «8» червня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: наукові статті та література (в електронному вигляді), характеристики компонентів роботизованої системи, програмне забезпечення Fusion360, RViz, Python, ROS.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки : огляд літературних джерел на тему конструкції систем роботизованої хірургії та їх функціональних компонентів; розробка базової 3д моделі роботизованого хірургічного маніпулятора, програмного пакету системи керування маніпулятором.
5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація у форматі MS Power Point.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Демчук Г.В., к.т.н., доцент кафедри ОППЦБ		

7. Дата видачі завдання 12 квітня 2024 р. _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на ДР	15 квітня 2024 р.	
2	Ознайомлення з технікою безпеки	15 – 20 квітня 2024 р.	
3	Огляд літератури за темою	15 – 29 квітня 2024 р.	
4	Розробка схеми приладу та розрахунок його параметрів	22 квітня – 4 травня 2024 р.	
5	Розробка ТЗ, програмної архітектури та алгоритму взаємодії вузлів ROS	29 квітня – 19 травня 2024 р.	
6	Розробка 3D моделі відповідно до ТЗ	13 травня – 19 травня 2024 р.	
7	Подання ДР рецензенту. Отримання рецензії	7 червня 2024 р.	
8	Подання в електронному вигляді ДР та анотації	8 червня 2024 р.	
9	Подання документів в друкованому вигляді	11 червня 2024 р.	
10	Захист ДР	17 червня 2024 р.	

Студент _____

Серафим ГАЙДУК

Керівник роботи _____

Андрій ДУБКО

АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи: «Віртуальна керована модель маніпулятора системи роботизованої хірургії на основі Robot Operating System».

Обсяг дипломної роботи становить 60 сторінок, міститься 14 ілюстрацій, 10 таблиць. Загалом опрацьовано 25 джерел.

Актуальність теми: роботизовані маніпулятори відіграють ключову роль у хірургії, значно покращуючи точність і ефективність операцій. Проте існує кілька обмежень, які стримують їх широке застосування. Висока вартість і складність маніпуляторів робить їх недоступними для навчання, що обмежує підготовку студентів і молодих дослідників. Високий поріг входу у розробку маніпуляторів вимагає глибоких знань у галузі механіки, електроніки та програмування, що ускладнює залучення нових спеціалістів. Розробка доступних симуляційних моделей маніпуляторів та пакетів для їх розробки може надати більше можливостей для навчання і досліджень.

Мета: розробити систему керування спрощеним маніпулятором системи роботизованої хірургії у середовищі симуляції для подальшого застосування на фізичному прототипі.

Завдання:

1. Розглянути особливості будови та порівняти аналогічні системи.
2. Розробити технічні схеми та архітектурні діаграми для демонстрації взаємодії компонентів системи та їхніх залежностей.
3. Інтегрувати скрипти для автоматизованої конвертації моделі робота з Fusion 360 у формат URDF.
4. Запрограмувати вузол ROS для сприйняття даних введених користувачем і передачі даних керування роботом у інші відповідні вузли.
5. Реалізувати алгоритми розрахунку рухів для керування маніпулятором та протестувати симуляційну модель маніпулятора у середовищі RViz.

Ключові слова: Fusion360, RViz, Python, ROS, ROS2, роботизована хірургія.

SUMMARY

Thesis Title: "Virtual Controlled Model of a Robotic Surgery System Manipulator Based on the Robot Operating System".

Thesis Overview: The thesis encompasses 60 pages, contains 14 illustrations, and 10 tables. A total of 25 sources have been reviewed.

Relevance of the Topic: Robotic manipulators play a crucial role in surgery, significantly enhancing the precision and efficiency of operations. However, there are several limitations that hinder their widespread application. The high cost and complexity of manipulators make them inaccessible for training purposes, limiting the education of students and young researchers. The high entry barrier in manipulator development requires deep knowledge in mechanics, electronics, and programming, complicating the involvement of new specialists. Developing affordable simulation models of manipulators and development packages can provide more opportunities for training and research.

Objective: To develop a control system for a simplified manipulator of a robotic surgery system within a simulation environment for further application on a physical prototype.

Tasks:

1. Examine the structural features and compare similar systems.
2. Develop technical diagrams and architectural diagrams to demonstrate the interaction of system components and their dependencies.
3. Integrate scripts for the automated conversion of the robot model from Fusion 360 into the URDF format.
4. Program a ROS node to receive user input data and transmit control data to other relevant nodes.
5. Implement motion calculation algorithms for controlling the manipulator and test the simulation model of the manipulator in the RViz environment.

Keywords: Fusion360, RViz, Python, ROS, ROS2, robotic surgery.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	8
РОЗДІЛ 1	11
ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	11
1.1 Застосування роботизованих маніпуляторів в хірургії	11
1.2 Аналіз кінематики та механічних законів у дизайні хірургічних маніпуляторів	12
1.3 Огляд існуючих аналогів з паралелограмним механізмом RCM.	19
1.3.1 Роботизована хірургічна система da Vinci	19
1.3.2 Роботизована хірургічна система MiroSurge.....	21
1.3.3 Роботизована хірургічна система Senhance	23
1.4. Порівняння розглянутих аналогів	24
Висновки до розділу 1.....	26
РОЗДІЛ 2	27
3D МОДЕЛЬ МАНІПУЛЯТОРА	27
Висновки до розділу 2.....	29
РОЗДІЛ 3	30
ПРОГРАМА КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРОМ.....	30
3.1 Технічна схема та архітектурна діаграма взаємодії компонентів середовища розробки та їх залежності.....	30
3.2 Скрипти конвертації моделі робота з Fusion 360 у формат URDF... ..	32
3.3 Архітектура ROS пакету керування маніпулятором	34
3.4 Алгоритми розрахунку стану суглобів	39

					<i>БМ.01.05.2905.1705.ПЗ</i>			
Вим	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Гайдук С.А.				Віртуальна керована модель маніпулятора системи роботизованої	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Дубко А.Г.						6	
Реценз.	Худецький І.Ю.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБМІ БМ-1		
Н. Контр.	Андреев П.І.							
Затвердив	Шликов В.В.							

3.4.1 Розрахунок ланцюга інверсної кінематики	39
Для розрахунку кутів суглобів можуть використовуватись числові, аналітичні	39
та комбіновані методи вирішення задач інверсної кінематики порівняння яких показано в таблиці 3.1.....	40
3.4.2 Розрахунок стану ланцюга RCM	41
Висновки до розділу 3.....	43
РОЗДІЛ 4.....	44
ОХОРОНА ПРАЦІ	44
4.1 Характеристика прототипу маніпулятора системи роботизованої хірургії	44
4.1.1 Характеристики компонентів приладу.....	44
4.1.2. Складові компоненти пристрою	47
4.2 Опис небезпек, що створюються конструкцією приладу і заходи їх мінімізації.....	48
4.2.1 Електрична небезпека ураження струмом.....	49
4.2.2 Механічна небезпека	51
Висновки до розділу ОП	54
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57
ДОДАТОК А.....	61
ДОДАТОК Б	63
ДОДАТОК В.....	66

					<i>БМ.01.05.2905.1705.ПЗ</i>						
<i>Вим</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Віртуальна керована модель маніпулятора системи роботизованої</i>	<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>			
<i>Розробив</i>		<i>Гайдук С.А.</i>									
<i>Перевірів</i>		<i>Дубко А.Г.</i>					6				
<i>Реценз.</i>		<i>Худецький І.Ю.</i>				<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБМІ БМ-1</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Андреев П.І.</i>									
<i>Затвердив</i>		<i>Шликов В.В.</i>									

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ROS – Robot Operating System

RCM – Remote Center-of-Motion

MIS – Minimally Invasive Surgery

URDF – Unified Robot Description Format

ОП – Охорона праці

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

З моменту свого зародження у 1997 році роботизована хірургія поступово подолала численні виклики, включаючи високі витрати на устаткування та потребу в спеціалізованому навчанні хірургів. За даними дослідження, роботизована хірургія продемонструвала значні переваги, включаючи коротший час перебування в лікарні та нижчу вартість лікування порівняно з лапароскопічними та відкритими процедурами. Також важливо відмітити, що роботизовані операції показали нижчий рівень ускладнень у більшості хірургічних процедур. Загальний рівень смертності від роботизованих процедур є значно нижчим (0,097%), ніж від лапароскопічних (0,48%) та відкритих операцій (0,92%), що підкреслює потенційну безпеку та ефективність роботизованої хірургії [1].

Значними перевагами дистанційно контрольованих хірургічних робіт є вдосконалене стереоскопічне бачення та підвищена артикуляція хірургічних інструментів, що в поєднанні з методами масштабування рухів та зменшенням тремору сприяють підвищенню точності та зниженню тривалості хірургічних процедур. Водночас, існують технічні проблеми, такі як обмеження тріангуляції та можливі зіткнення інструментів, які виникають через обмежений простір для маніпуляції жорсткими хірургічними інструментами. Ці обмеження вимагають подальших інновацій і технологічних розробок, аби покращити хірургічні методики, що дозволить хірургам досягати кращих клінічних результатів, знижуючи ризики для пацієнтів та економлячи час на операції [2].

Мета: Розробка системи керування маніпулятором системи роботизованої хірургії у середовищі симуляції для подальшого застосування на фізичному прототипі.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

1. Розглянути особливості будови та порівняти аналогічні системи.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Розробити технічні схеми та архітектурні діаграми для демонстрації взаємодії компонентів системи та їхніх залежностей.
3. Інтегрувати скрипти для автоматизованої конвертації моделі робота з Fusion 360 у формат URDF.
4. Запрограмувати вузол ROS для сприйняття даних введених користувачем і передачі даних керування роботом у інші відповідні вузли.
5. Реалізувати алгоритми розрахунку рухів для керування іманіпулятором та протестувати симуляційну модель маніпулятора у середовищі RViz.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Застосування роботизованих маніпуляторів в хірургії

Концепція автоматизації та використання машин для заміни або допомоги в людській праці є давньою ідеєю, що зародилась ще в античності та пройшла через численні культурні та історичні етапи. Однак сучасне розуміння робота, як механізму, здатного автоматизувати та оптимізувати робочі процеси, з'явилося тільки у XX столітті. Роботизовані системи у медицині дозволили досягти вищої точності у хірургічних втручаннях, зменшити інвазивність процедур і скоротити час відновлення пацієнтів. Такі системи забезпечують кращу візуалізацію оперативного поля, знижують фізичне навантаження на хірургів і мінімізують вплив людського фактора, що підвищує загальну безпеку і ефективність хірургічних операцій [3].

Розвиток роботизованої хірургії значно просунувся протягом останніх чотирьох десятиліть, привівши до значних покращень у хірургічних результатах та спричинивши зміну в методах хірургічного лікування. Зокрема, інтеграція робототехніки з мінімально інвазивною хірургією (MIS) відкрила кращі шляхи подолання деяких обмежень традиційної відкритої хірургії. Хірургічний робот da Vinci, який виробляє компанія Intuitive Surgical Inc. у Каліфорнії, є найбільш поширеною роботизованою системою, що використовується для проведення складних операцій з мінімальними порушеннями тканин. Хоча його ефективність обмежена такими факторами, як маневреність у просторі близько до тіла, точність у відтворенні дрібних людських рухів, швидкість реакції та когнітивні здібності, необхідні для його керування, система знайшла широке застосування. Після отримання схвалення FDA (Food and Drug Administration) у 2000 році, понад 5114 одиниць системи

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

da Vinci були встановлені та використовуються по всьому світу для проведення різноманітних медичних процедур, включаючи біопсії та оперативні втручання. Маніпулятори цих систем переважно діють через малі розрізи, які служать точками входу для хірургічних інструментів, з дистанційним управлінням процесами [4]. На сьогоднішній день роботизована хірургія продовжує набирати популярність завдяки значним перевагам, таким як покращене ергономічне позиціонування хірурга, тривимірне бачення високої роздільної здатності, вища маневреність, а також застосування штучного інтелекту та доповненої реальності. Як свідчить дослідження, MIS демонструє кращі показники за морбідністю пацієнтів та тривалістю їх перебування в лікарні. Роботизовані хірургічні методики, засновані на інституційних кривих навчання та доступності довгострокових даних, показують поліпшення стану пацієнтів у порівнянні з лапароскопією, включаючи меншу крововтрату, меншу частоту переходу до відкритих операцій, менший біль та коротший час відновлення [5].

1.2 Аналіз кінематики та механічних законів у дизайні хірургічних маніпуляторів

Кінематика має ключове значення у процесі розробки роботів для мінімально інвазивної хірургії (MIS). Серед існуючих підходів до забезпечення можливостей роботів для виконання хірургічних розрізів можна виокремити:

- а) використання допоміжних суглобів, як у системі Endo[PA]R, призначеній для телеманіпуляцій під час кардіохірургічних втручань;
- б) інтеграція пасивних суглобів, подібно до системи Zeus, що знаменита проведенням трансатлантичної операції у 2001 році;

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

в) застосування механічно обмеженої структури, як у випадку з системою да Вінчі, яка стала найбільш вдалим прикладом у сфері хірургічної робототехніки.

Робот, розроблений за методом а, забезпечує високу жорсткість, але має певні ризики в хірургічному застосуванні. Водночас, метод б) вимагає компромісів у точності та жорсткості рухів. Через ці обмеження, метод в) став найбільш використовуваним у розробці MIS-роботів [6].

Класифікація кінематичних структур роботів для мінімально інвазивної хірургії (MIS) здійснюється на основі типів механізмів з віддаленим центром руху (RCM). Існує вісім основних типів механізмів RCM, які включають ізоцентри, дуги кругового слідування, паралелограми, сферичні з'єднання, гімбали, паралельні механізми зап'ястя та зубчасті передачі. Серед них найчастіше використовуються дуги кругового слідування, сферичні з'єднання та паралелограми.

Подвійний паралелограм є найпоширенішим типом механізму RCM у роботах MIS. Система да Вінчі - це один з прикладів успішного застосування цього типу механізму. Механізм паралелограма забезпечує два обертальні ступені свободи з ортогональними осями в точці RCM. Цей механізм з одним ступенем свободи RCM створюється шляхом поєднання двох паралелограмних ланок, як це показано на рис. 1.1 [6].

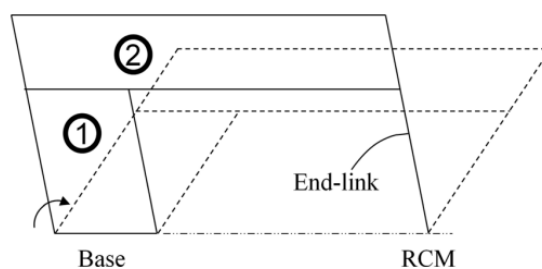


Рисунок 1.1 – Конструкція RCM з подвійним паралелограмом

Послідовне з'єднання двох паралелограмів є найпростішим методом формування чисто поступального 2DOFs-планарного механізму, який обмежений лише обертальними з'єднаннями.

У стандартному подвійному паралелограмі рухи двох горизонтальних ланок є взаємозалежними, тому обидва планарних 2DOFs механізми, що забезпечують дію цих горизонтальних ланок, також мають бути між собою з'єднані. Макет на рисунку 1.2 включає кілька паралелограмів: $O_1O_2A_2A_1$, $A_1A_2C_{12}C_{11}$, $B_{12}B_{11}C_{22}C_{21}$ та $C_{21}C_{22}B_{22}B_{21}$. Інші обмеження включають $C_{11}C_{12}/B_{21}B_{22}$, $B_{11}B_{12}/O_1O_2$ та $C_{12}E = C_{22}D$.

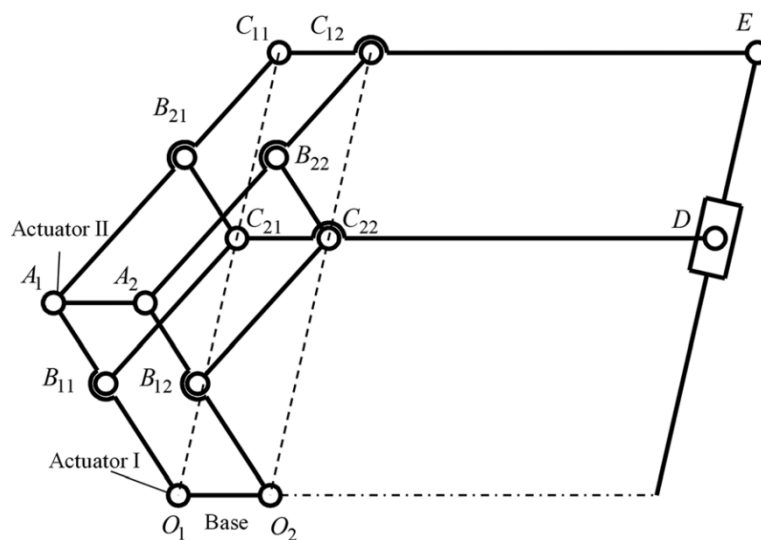


Рисунок 1.2 – Концепція дизайну планарного механізму RCM із двома ступенями свободи (2DOFs)

Однією з важливих умов для того, щоб таке з'єднання функціонувало як механізм RCM, є виконання таких обмежень (1.1) [6]:

$$\frac{C_{1i}B_{2i}}{C_{1i}A_i} = \frac{A_iB_{1i}}{A_iO_i} = k (i = 1,2; \text{та } 0 < k < 1), \quad (1.1)$$

де А, В, С – вершини ланок паралелограмів. k – співвідношення довжини ланок.

У цьому механізмі використано пасивний призматичний шарнір, який розташовується між з'єднувальною ланкою ED та ланкою $C_{22}D$. Такий шарнір може бути застосований для управління рухами хірургічного інструменту, що виконує функції аналогічні троакару під час роботизованих хірургічних операцій.

Завдяки тому, що рухи паралельних ланок в паралелограмі є однаковими через конструктивні обмеження паралелограма, кінематична модель шарніра може бути спрощена до плоского шарніра, як показано на рисунку 1.3 [6].

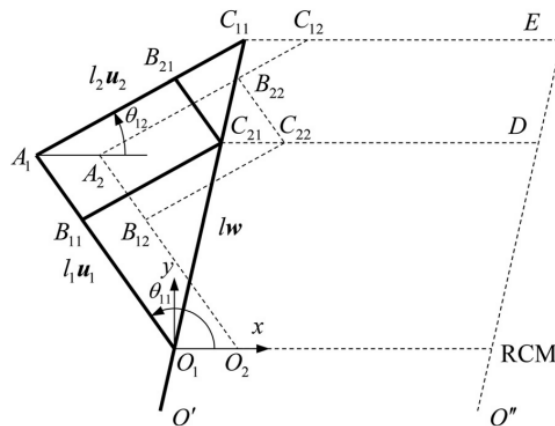


Рисунок 1.3 – Спрощена кінематична модель ланки

Далі проаналізуємо зв'язок між вхідними переміщеннями і рухами точки O' . Вектор положення точки O' можна отримати з наступного рівняння:

$$r = l_1 u_1 + l_2 u_2 - lw, \quad (1.2)$$

де $r = [x_{O'} y_{O'}]^T$. Величина l – це відстань між точками C_{11} та O' , що відповідає довжині хірургічного інструменту, $w = -(r/\|r\|)$ є вектором напрямку хірургічного інструменту. l_1 , l_2 , u_1 , u_2 – довжини та одиничні вектори ланок $O_1 A_1$ та $A_1 C_{11}$.

$$u_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{11} \\ \sin \theta_{11} \end{bmatrix}, u_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{12} \\ \sin \theta_{12} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Рівняння (1.2) також застосовується для встановлення прямого розташування механізму, що дає змогу знайти позицію референтної точки O' , знаючи кутові положення θ_{11} та θ_{12} [6].

Підставляючи вираз кожної змінної у рівняння (1.2), можна отримати наступні рівняння:

$$A_1 \sin \theta_{11} + B_1 \cos \theta_{11} + C_1 = 0, \quad (1.4)$$

$$A_2 \sin \theta_{12} + B_2 \cos \theta_{12} + C_2 = 0, \quad (1.5)$$

де $A_1 = 2l_1 C_y$, $B_1 = 2l_1 C_x$, $C_1 = 2l_1 C_x$, $C_1 = l_2^2 - (C_x)^2 - (C_y)^2 - l_1^2$,

$A_2 = 2l_2 C_y$, $B_2 = 2l_2 C_x$, $C_2 = l_2^2 - (C_x)^2 - (C_y)^2 - l_2^2$ та $C = 1 - l/\|r\|$.

Розв'язавши систему рівнянь (1.4) та (1.5) методом складання отримаємо наступні вирази:

$$\theta_{11} = 2 \arctan \frac{-A_1 - \sqrt{(A_1^2 + B_1^2 - C_1^2)}}{C_1 - B_1}, \quad (1.6)$$

$$\theta_{12} = 2 \arctan \frac{-A_2 - \sqrt{(A_2^2 + B_2^2 - C_2^2)}}{C_2 - B_2}, \quad (1.7)$$

Тоді відстань між точками C_{21} та O_1 можна виразити рівнянням (1.8):

$$|C_{21}O_1| = (1 - k)\|r + lw\| \quad (1.8)$$

Величина цього параметру має бути не надто малою, щоб запобігти будь-якій можливій взаємодії між механізмом і пацієнтом під час оперативного

втручання. Таким чином, відстань між точками C_{21} і C_{11} можна визначити наступним чином:

$$|C_{21}C_{11}| = k\|r + lw\| \quad (1.9)$$

Ця відстань також має бути достатньою, щоб забезпечити достатній зазор, аби механізм залишався на безпечному віддаленні від критичних позицій протягом усіх маніпуляцій [6].

Однією з ключових переваг використання паралелограмної конструкції в роботах для мінімально інвазивних хірургічних втручань є підвищена жорсткість порівняно з традиційною послідовною структурою. Цей збільшений рівень жорсткості критично важливий для точності і стабільності рухів хірургічного інструмента під час операції. Незважаючи на те, що паралелограмні механізми зазвичай характеризуються обмеженим діапазоном руху, їхня специфікація і ефективність роблять їх ідеальним вибором для застосування у MIS-роботах, де потреба у великих амплітудах руху може бути меншою в порівнянні з потребою в точності та контролі [7].

Іншою значною перевагою паралелограмної конструкції є можливість розміщення двох приводів, які є видимими з кінцевого інструменту і які можуть бути закріплені на основі маніпулятора у паралельній конфігурації. Механізм подвійного паралелограма забезпечує два ступені свободи (DOF), дозволяючи виконувати нахили і обертальні рухи. Один з прикладів паралелограмного механізму демонструється на прототипі популярного робота da Vinci (рис. 1.4 аркуш 18) [7,8].

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

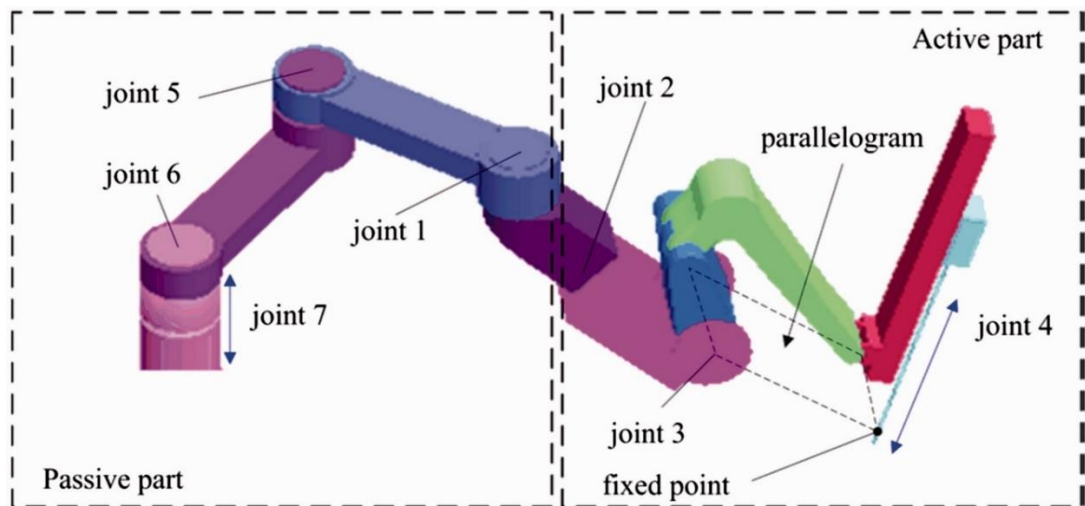


Рисунок 1.4 – Механізм RCM з подвійним паралелограмом[8]

Кінематична концепція механізму з віддаленим центром обертання, що використовує подвійний паралелограм, включає такі основні аспекти:

1. Точка перетину осей обертання маніпулятора і хірургічного інструменту залишається незмінною (тобто відповідає точці троакара на схемі);
2. Ротаційний шарнір, вмонтований у руку робота, з віссю обертання, що проходить через цю фіксовану точку, здатний забезпечити обертальний ступінь свободи, який відбувається навколо цієї точки;
3. Механічні обмеження подвійного паралелограма дозволяють створити додатковий обертальний центр, який також обертається навколо цієї ж нерухомої точки;
4. Третій обертальний DOF та трансляційний DOF можливі завдяки розміщенню двох приводів безпосередньо на кінцевому інструменті.

Ці характеристики роблять паралелограмний механізм вельми популярним і широко використовуваним [7].

1.3 Огляд існуючих аналогів з паралелограмним механізмом RCM

Паралелограмний механізм RCM використовується в багатьох роботизованих системах хірургії для забезпечення точного і стабільного руху інструментів відносно певної точки. Це дозволяє мінімізувати травматизацію тканин і покращити контроль над хірургічним процесом. Розглянемо популярні роботизовані системи з паралелограмним механізмом RCM: хірургічну систему da Vinci, MiroSurge і Senhance.

1.3.1 Роботизована хірургічна система da Vinci

Однією з найвідоміших роботизованих систем з паралелограмним механізмом RCM є хірургічна система da Vinci, запатентована компанією Intuitive Surgical. Вона забезпечує виняткову точність у хірургічних процедурах, зменшуючи травматизацію тканин та покращуючи візуалізацію завдяки 3D-баченню високої роздільної здатності. Система складається з трьох основних компонентів: робота-пацієнта, хірургічної консолі та візуальної системи [9,10].

На рисунку 1 додатку А зображено механічну структуру однієї з роботизованих рук системи da Vinci. Основні елементи конструкції включають кілька типів шарнірів, кожен з яких виконує специфічні функції для забезпечення точного керування рухом.

Обертовий шарнір J_4 розташований на спільній осі P_a і забезпечує обертання навколо цієї осі, що дозволяє інструменту рухатися з високою точністю. Віртуальний обертовий шарнір J_5 створює ілюзію присутності в точці RCM, забезпечуючи стабільність і точність у точці входу інструменту в

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		19

тіло пацієнта. Пасивний поворотний шарнір J_6 передає кутовий рух до тримача інструменту, що забезпечує контроль над його позицією. Інший пасивний поворотний шарнір J_7 синхронізується з J_6 , що забезпечує узгодженість рухів та стабільність маніпуляцій [10].

Призматичний шарнір J_8 забезпечує трансляцію з центром у точці RCM, що дозволяє точно контролювати положення інструменту під час операції. Вісь P_a є спільною для обертових шарнірів J_4 та J_5 , що дозволяє здійснювати узгоджені обертальні рухи навколо цієї осі. Точка RCM є точкою входу пацієнта, відносно якої здійснюються всі обертання. Завдяки цим механізмам роботизована система da Vinci дозволяє хірургу виконувати складні маніпуляції з високою точністю та мінімальною травматизацією тканин, покращуючи результати хірургічних втручань і скорочуючи період відновлення пацієнтів [9,10].

Роботизована хірургічна система da Vinci має кілька значних переваг. По-перше, вона забезпечує високу точність рухів завдяки паралелограмному механізму RCM, що дозволяє хірургу виконувати складні маніпуляції з мінімальним ризиком пошкодження тканин. По-друге, система дає можливість використовувати 3D-бачення високої роздільної здатності, що значно покращує візуалізацію операційного поля. Крім того, система дозволяє зменшити інвазивність процедур, що призводить до меншого болю та коротшого періоду відновлення для пацієнтів [11].

Однак, система da Vinci має і свої недоліки. Одним з основних є висока вартість як самого обладнання, так і його обслуговування, що може бути недоступним для багатьох медичних закладів. Іншим значним недоліком є відсутність сенсорного зворотного зв'язку, що обмежує здатність хірурга відчувати опір або контакт з тканинами, що може вплинути на ефективність операцій. Також існують складності у використанні системи через велику

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

кількість рухомих частин і необхідність ретельного навчання медичного персоналу [12].

1.3.2 Роботизована хірургічна система MiroSurge

Роботизована хірургічна система MiroSurge, розроблена німецьким аерокосмічним центром (DLR). Ця система вирізняється серед інших своєю модульною будовою та високою гнучкістю, що дозволяє здійснювати точні та контрольовані хірургічні втручання з мінімальним пошкодженням тканин.

На рисунку 2 додатку Б зображена роботизована рука системи MiroSurge з вказаними осями суглобів. Ця система є однією з передових у сфері роботизованої хірургії, забезпечуючи високу точність і гнучкість під час операцій. Кожна з осей виконує специфічні функції для забезпечення різноманітних рухів і маніпуляцій.

Вісь A_1 відповідає за рухи качення плеча, що дозволяє робити плавні та точні рухи у горизонтальній площині. Вісь A_2 призначена для рухів тангажу плеча, забезпечуючи вертикальні рухи, необхідні для точного позиціонування інструментів. Вісь A_3 відповідає за рухи риштовання плеча, додаючи ще одну ступінь свободи для більшої маневреності [13].

Передпліччя також має кілька осей, що забезпечують різні типи рухів. Вісь A_4 дозволяє рухи тангажу передпліччя, що важливо для точного управління інструментами у вертикальній площині. Вісь A_5 забезпечує рухи качення передпліччя, додаючи гнучкість у горизонтальній площині.

Зап'ястя робота MiroSurge має осі, що дозволяють виконувати складні маніпуляції, бвісь A_6 відповідає за рухи тангажу зап'ястя, забезпечуючи точне позиціонування кінцевого інструмента. Вісь A_7 дозволяє ротацію

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		21

ендоскопічних інструментів навколо їх осі, що є критично важливим для точного виконання хірургічних процедур.

Ця комплексна система осей і суглобів дозволяє роботизованій руці MiroSurge виконувати широкий спектр рухів, забезпечуючи хірургу високу точність і контроль під час операцій [13].

На рисунку 3 додатку А представлено дизайн зап'ястя роботизованої системи MiroSurge.

Зап'ястя оснащено кількома ключовими компонентами, що забезпечують його функціональність. Фланець кінцевого виконавчого пристрою (TCP flange) служить точкою кріплення для різних хірургічних інструментів, таких як свердло (drill), яке також зображено на малюнку. Лінійний напрямний механізм (linear guide) забезпечує точний рух інструментів уздовж визначеної траєкторії, що є критичним для виконання складних хірургічних маніпуляцій. Системи координат ($\cos \gamma_7$, x_7 , y_7 , z_7) та кут орієнтації (γ_7) для сьомого шарніру зап'ястя визначають положення та напрямку руху зап'ястя, що забезпечує точність і контроль під час хірургічних втручань [13].

Система MiroSurge забезпечує високу точність управління інструментами, зворотний зв'язок за силою, та модульну конструкцію, що дозволяє легко адаптуватися до різних хірургічних завдань. Це сприяє зниженню травматизації тканин та швидшому відновленню пацієнтів.

Основними недоліками є технічна складність, що вимагає ретельного дотримання заходів безпеки та високої кваліфікації персоналу. Крім того, система потребує точного управління обмеженнями робочого простору в операційній кімнаті [13].

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.3 Роботизована хірургічна система Senhance

Роботизована система Senhance від компанії Asensus Surgical є сучасною платформою для мінімально інвазивної хірургії, що використовується для різних хірургічних процедур, включаючи загальну, гінекологічну та урологічну хірургію. Однією з ключових особливостей системи Senhance є технологія цифрового управління, яка забезпечує хірургам відчуття тактильного зворотного зв'язку. Це дозволяє відчувати опір тканин під час маніпуляцій, що покращує контроль і безпеку процедур [14].

Система Senhance також відрізняється високою точністю і чутливістю, що дозволяє хірургам виконувати дуже точні рухи, які є критично важливими у хірургії. Висока ступінь свободи руху системи дозволяє легко імітувати рухи людської руки, що підвищує загальну ефективність хірургічних втручань. Роботизовані руки маніпуляторів керують хірургічними інструментами, а кокпіт з контрольними пристроями дозволяє хірургу керувати процедурою з високою точністю [14].

На рисунку 1.8 представлено правильне розташування середини телескопічних подовжувачів у хірургічній системі.

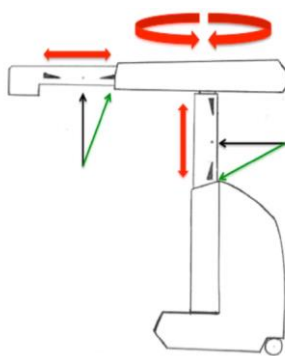


Рисунок 1.8 - Правильне розташування середини телескопічних подовжувачів [15]

На рисунку 1.8 стрілками позначено різні рухи, які можуть виконуватися телескопічними механізмами. Червоні стрілки вказують на вертикальні та обертові рухи, що забезпечують підйом і поворот подовжувачів. Зелені стрілки вказують на горизонтальні рухи, що дозволяють подовжувачам висуватися або втягуватися, надаючи інструментам можливість рухатися вперед або назад.

Правильне позиціонування є критично важливим для забезпечення оптимальної візуалізації та маневреності під час введення робочих інструментів. Телескопічні подовжувачі мають бути налаштовані таким чином, щоб забезпечити максимальну свободу руху без обмежень [15].

1.4. Порівняння розглянутих аналогів

Порівняння описаних роботизованих систем наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння систем роботизованої хірургії з паралелограмним RCM [13,14, 16-17]

Система	Основні компоненти	Переваги	Недоліки
da Vinci	Консоль хірурга (HD-екран, ручні контролери); пацієнтський візок (роботизовані руки та інструменти); візок візуалізації (HD-камери, системи візуалізації); EndoWrist інструменти (7 ступенів свободи руху) [16,17].	Виняткова точність. Зменшення травматизації тканин. Покращена візуалізація 3D-HD.	Відсутність сенсорного зворотного зв'язку. Складність систем зворотного зв'язку по силі.
MiroSurge	Модульні руки (точне управління інструментами); система зворотного зв'язку(тактильний зворотний зв'язок); модульна конструкція (адаптована до клінічних вимог)[13].	Висока точність управління. Зворотний зв'язок за силою. Модульність і налаштовуваність.	Технічна складність. Потребує суворого дотримання заходів безпеки.

Продовження таблиці 1.1

Senhance	Консоль управління (цифрове управління, тактильний зворотний зв'язок); роботизовані руки (висока ступінь свободи руху); інтерфейс з ендоскопом (правильне розташування для максимальної мобільності)[14].	Цифрове управління з тактильним зворотним зв'язком. Висока точність і чутливість. Ступінь свободи руху.	Потребує правильного розташування телескопічних подовжувачів. Можливі обмеження руху інструментів.
----------	---	---	--

1.5 Огляд архітектури та ключових компонентів ROS

ROS (Robot Operating System) — це гнучка платформа для написання програмного забезпечення для роботів, яка включає набір інструментів, бібліотек та конвенцій, що максимально спрощують завдання створення складної та надійної поведінки роботів у різноманітних середовищах. Важливою особливістю ROS є те, що вона сприяє співпраці в галузі робототехніки, надаючи можливість легкого обміну кодом та даними в наукових та промислових дослідженнях по всьому світу.

ROS використовує архітектуру на основі вузлів (nodes), які можуть публікувати або підписуватися на дані в загальних каналах (темах), що дозволяє розробникам роботів модульно структурувати та повторно використовувати код. Така модель сприяє паралельній роботі та інтеграції різноманітних систем і сенсорів, полегшуючи тестування та розгортання робототехнічних систем.

ROS2 у своїй основі має комунікаційну модель Publisher і Subscriber засновану на шаблоні «видавець-підписник» (publisher-subscriber), де nodes можуть видавати (publish) повідомлення на тему (topic), до якої інші nodes можуть підписуватися (subscribe). Це забезпечує високий рівень гнучкості та

масштабованості, оскільки nodes не потребують взаємного знання про існування один одного для обміну даними.

Система повідомлень у ROS2 використовує DDS (Data Distribution Service) для обміну даними між nodes. DDS — це промисловий стандарт для міжпрограмного спілкування, який забезпечує надійний, швидкий та гнучкий обмін даними у розподілених системах. Використання DDS у ROS2 значно покращує продуктивність та надійність порівняно з попередніми версіями ROS, особливо в складних або великомасштабних робототехнічних застосуваннях. У ROS1 для комунікації між різними вузлами використовувався інший механізм, який базувався на протоколі ROS Master та TCPROS/UDPROS. ROS Master слугував центральним реєстром усіх вузлів у системі та забезпечував імена та адресацію для взаємодії між вузлами. Коли вузол бажав з'єднатися з іншими вузлами, він спочатку звертався до ROS Master, щоб з'ясувати, де розташовані інші вузли та як до них підключитися.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи роботизованих систем хірургічних маніпуляторів, з особливим фокусом на кінематику та механічні закономірності, які є фундаментальними для розробки цих систем. Важливу роль відіграє використання системи Robot Operating System (ROS), яка забезпечує високий рівень модульності, переносимості та відкритості, що є критичними для розробки інноваційних медичних технологій. Також було проведено огляд існуючих аналогів систем з механізмом паралелограма RCM, який забезпечує стабільність і точність переміщення кінцевого ефектора.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

3D МОДЕЛЬ МАНІПУЛЯТОРА

У межах даної дипломної роботи було створено спрощену тривимірну модель маніпулятора для системи роботизованої хірургії. Для регулювання висоти маніпулятора, перша ланка першого ланцюга закріплена на вертикальній каретці. Далі йдуть два основних ланцюги кінематики (рис. 2.1)[11-13].

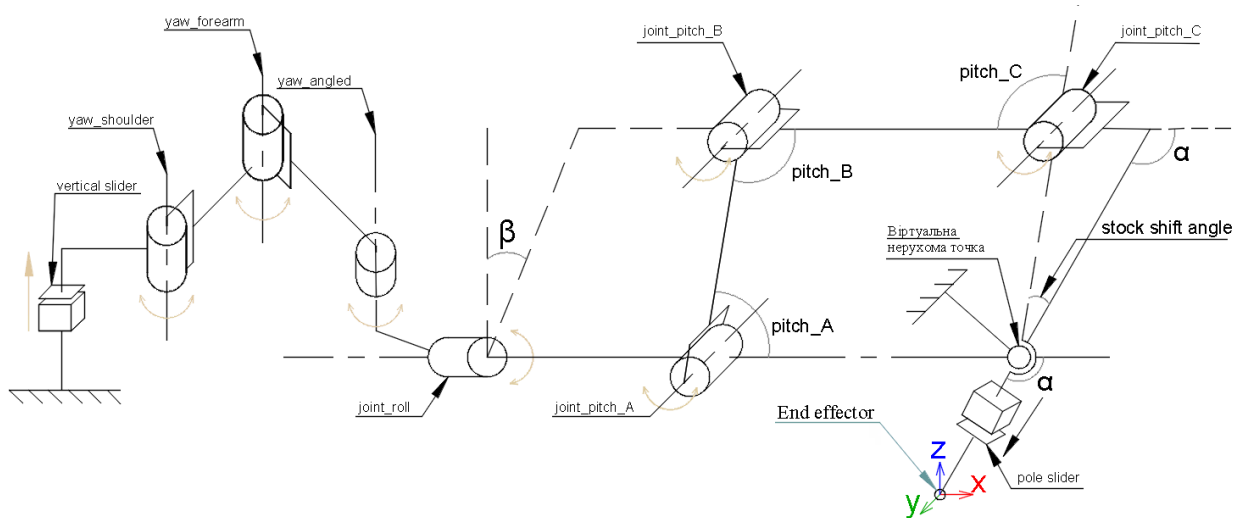


Рисунок 2.1 - Символічне зображення кінематики маніпулятора

Перший ланцюг маніпулятора включає три ланки з кінематикою SCARA: yaw_shoulder, yaw_forearm, yaw_angled, які призначені для переміщення у горизонтальній площині та налаштування горизонтальної орієнтації.

Головна складова демонстраційної моделі (рис. 2.2 аркуш 28) включає маніпулятор з нерухомою точкою, за принципом кінематики RCM (Remote Center of Motion), забезпечуючи переміщення кінцевого ефектору у просторі при зберіганні фіксованої позиції у певній точці.

Базова позиція маніпулятора з нерухомою точкою налаштовується

окремим базовим ланцюгом кінематики маніпулятора, що включає у себе SCARA ланцюг та одне з'єднання лінійного переміщення для регулювання висоти. Переміщення кінцевої точки SCARA ланцюга, враховуючи також каретку для вертикального переміщення, відбувається у трьох координатах, а орієнтація налаштовується по осі ристання навколо нерухомої точки.

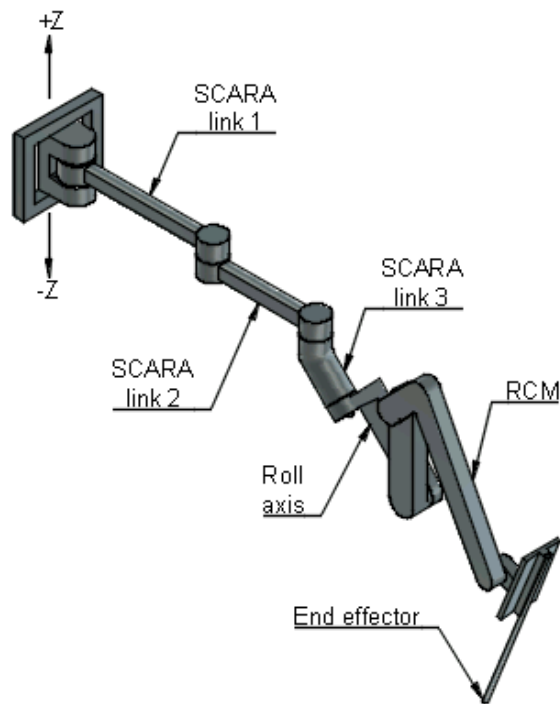


Рисунок 2.2 — 3D модель маніпулятора створена у середовищі Fusion360

SCARA ланцюг має 3 ступені свободи, та 4 разом з кареткою. Ланцюг з фіксованою точкою має 3 ступені свободи. Загалом маніпулятор має 7 ступенів свободи, але одночасно використовуються не всі. SCARA ланцюг відповідає за базове позиціонування, а RCM ланцюг — за точне переміщення у операційному просторі.

Висновки до розділу 2

Цей розділ демонструє функціональні особливості маніпулятора з нерухомою точкою, що працює на принципах кінематики RCM (Remote Center of Motion). Головною особливістю цього маніпулятора є його здатність переміщати кінцевий ефектор у трьох вимірах при збереженні стабільності фіксованої точки. Система має загалом сім ступенів свободи, проте використовуються не всі одночасно.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРОМ

3.1 Технічна схема та архітектурна діаграма взаємодії компонентів середовища розробки та їх залежності.

Була поставлена задача в першу чергу скоротити сумарні витрати часу під час усієї розробки проекту. Архітектуру середовища розробки (рис. 3.1) було наближено до стану при розробці з реальним роботом, тому вона є розподіленою, що пришвидшує робочі процеси, а саме оновлення 3D моделі в симуляції при її модифікації.

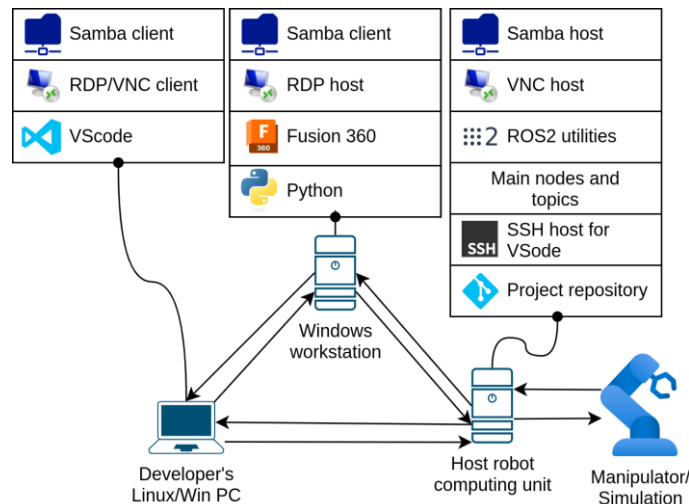


Рисунок 3.1 – Топологія обчислювальних вузлів та їх програмних компонентів

Користувач під'єднується до хоста керування маніпулятором через VNC протоколи, щоби мати доступ до користувацького інтерфейсу.

Для забезпечення вільного доступу до загальних файлів проекту, на хості керування маніпулятором було розташовано загальну папку, доступну з користувацького ПК, та робочої станції по протоколу samba. Це необхідно для

того, аби при генерації файлів на робочій станції, була можливість автоматично експортувати їх на хост керування.

Для роботи з програмним кодом розробник має доступ до файлів проекту, які знаходяться на хості керування, через підключення по SSH протоколу, що дозволяє повноцінно проводити розробку у IDE, що підтримують даний функціонал. За бажанням місце розташування репозиторію може бути на будь якому з трьох пристроїв та не має обмежень у цьому плані.

Завдяки гнучкості, фреймворк ROS може бути розгорнутим на будь якій системі, але з огляду на компактність обчислювального модуля, що має бути розміщеним у маніпуляторі, вибір припадає на linux платформу, яка може бути легко розгорнута на більшості одноплатних комп'ютерів з великою варіацією архітектур, тому для віртуальної машини, що симулює обчислювальний модуль робота, було обрано linux.

Для роботи з 3D моделлю, користувач під'єднуються до робочої станції по RDP протоколу, де редагує її у середовищі Fusion 360.

Середовище Fusion 360, було обрано, оскільки воно має багатофункціональне API що дозволяє створювати скрипти з високим ступенем інтеграції в процеси розробки складних проектів. Завдяки інтенсивній підтримці зі сторони розробників, Fusion 360 є стабільною CAD системою, що дозволяє використовувати сучасні методи проектування. Але оскільки робота з комплексними проектами в CAD системах вимагає великих обчислювальних потужностей, доцільно працювати з ними на відповідних по характеристикам обчислювальних пристроях, тому було вирішено перенести цей процес на окрему обчислювальну одиницю. Окрім цього, робота симулятора додатково навантажує систему, через що має бути відокремлена від інших програмних складових. Завдяки розподіленню вибагливих

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

обчислювальних задач на різних пристроях, відокремлюючи їх від користувацького пристрою, зменшуються як технічні вимоги до робочого пристрою, так і необхідність в стаціонарності розробника, дозволяючи вести процес розробки не будучи прив'язаним до постійного робочого місця.

3.2 Скрипти конвертації моделі робота з Fusion 360 у формат URDF.

Багатий функціонал Fusion 360 API дозволяє користувачам створювати скрипти взаємодії з проектом із власною логікою. Для конвертації f3d проекту у urdf формат було взято за основу та доповнено проект “fusion2urdf ROS2”[14]. Після підготовки збірки робота відповідно до інструкцій в документації fusion2urdf, після конвертації моделі користувач отримує пакет ROS, який містить у собі службові файли, необхідні для встановлення пакету, stl файли компонентів збірки, скрипти для ініціалізації та запуску Gazebo та RViz, конфігураційний файл RViz, та “.xacro” файли опису структури робота.

Хасро файли використовуються для запуску у симуляторі, та мають спрощену структуру відносно до URDF формату. Для роботи з кінематикою маніпулятора за допомогою бібліотеки ікру, необхідний саме “.urdf” файл. Необхідну конвертацію можна виконати однойменною утилітою хасро, викликаною з командної оболонки, такої як bash, shell, або ж з середовища python.

При збірці ROS пакету створеного на мові python, його код копіюється у папки build, та install. При локальному встановленні пакету, виконання коду виконується з файлів вкладених у папку install, що генерується при збірці проекту. Усі файли, що мають бути перенесені з джерела коду у папку інсталяції, мають бути зазначені у конфігу setup.py.

Файли коду мають бути розташовані у папці одноіменній назві пакету,

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		32

а допоміжні файли — у папках share та resource[14].

Share містить ширший спектр файлів і орієнтована на статичні, зазвичай не кодові активи, які необхідні для роботи пакета, але зазвичай не доступні програмно. Share икористовується більше для розгортання, конфігурації та описових файлів, які допомагають налаштувати або запустити пакет, але зазвичай рідше модифікуються під час виконання.

Resource головним чином містить файли, які доступні або завантажуються кодом пакета під час виконання. Вона більш вузько зосереджена на активах, які безпосередньо використовуються виконавчими файлами. Resource використовується процесами, що працюють у пакеті, часто для файлів, які є невід'ємною частиною функціонального виконання коду, таких як інтерфейси або динамічно завантажувані ресурси.

Отже, щоб дістати хасро файли з автоматично згенерованого пакету моделі робота, необхідно звернутись до share папки пакету за допомогою функції `get_package_share_directory(package_name)` з модуля `ament_index_python.packages`, та зберегти у share папці пакету, який запитує файли, або ж просто зберегти у змінну. Далі, викликавши утиліту хасро, файл конвертується в urdf формат.

Таким чином, після генерації пакету робота, при запуску іншого пакету можливо одразу працювати з .urdf файлом без зайвих мануальних кроків просто звертаючись через `get_package_share_directory(package_name)`, до share директорії пакету, що виконує код. В нашому випадку логіка конвертації хасро файлу в urdf формат була розміщена в окремому методі створеного пакету, але може бути частково інтегрована у скрипти проекту `fusion2urdf`.

Окрім конвертації у хасро формат, автор реалізував автоматичну генерацію ROS пакету з можливістю запуску сесії RViz, де відображатиметься модель робота. В пакеті реалізовано вузол `/robot_state_publisher`, який

підписаний на топік `/joint_states`. Саме в цьому місці RViz отримує дані для візуалізації поточного стану маніпулятора.

Завдяки цьому функціоналу використання `fusion2urdf` дозволяє значно пришвидшити процеси інтеграції оновленої моделі у робочий процес, вимагаючи лише реалізувати мінімальний інтерфейс взаємодії зі згенерованим пакетом, як показано на прикладі з конвертацією хасго файлу в `urdf` формат.

3.3 Архітектура ROS пакету керування маніпулятором

На рисунку 3.3 діаграма ілюструє архітектуру мережевої топології, що використовується для дистанційного управління роботом через Robot Operating System (ROS).

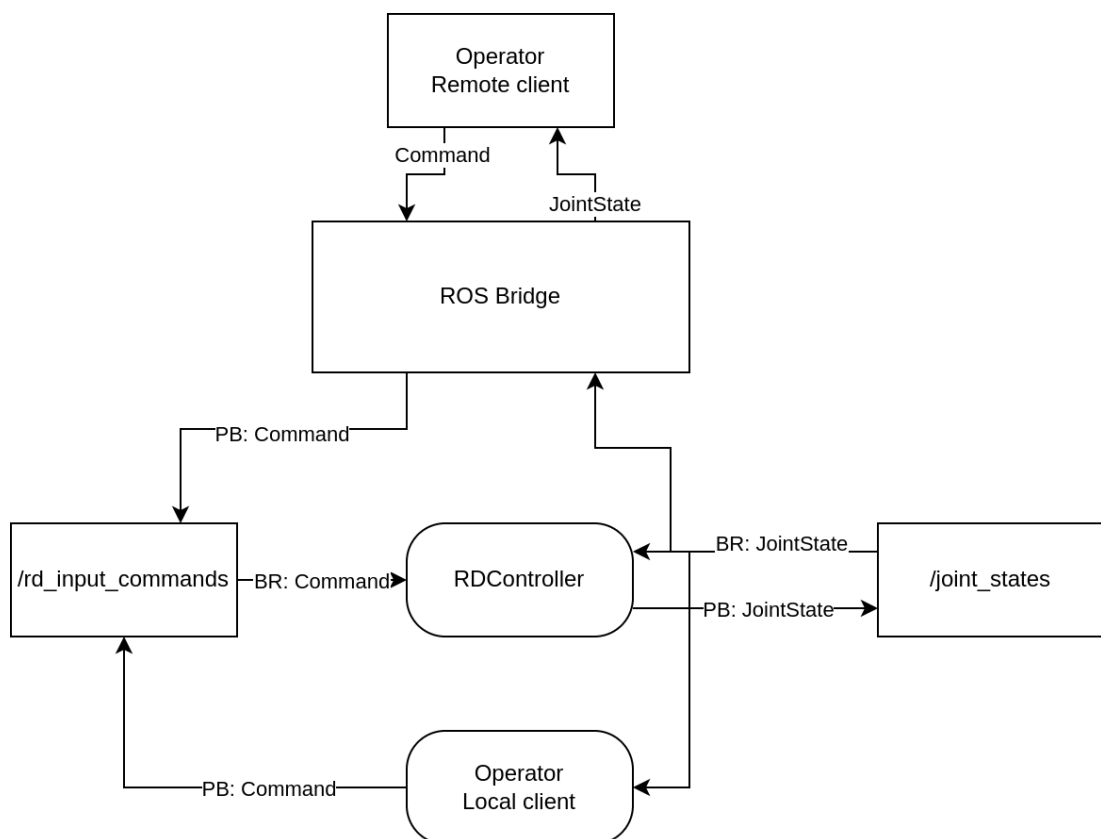


Рисунок 3.3 — Діаграма потоків даних ROS пакету керування маніпулятором.

Головним вузлом у цій системі є RDController, який безпосередньо виконує команди надіслані операторами та змінює стан робота.

На рисунку 3.4 зображено діаграму послідовностей для сценарію виконання команди оператора.

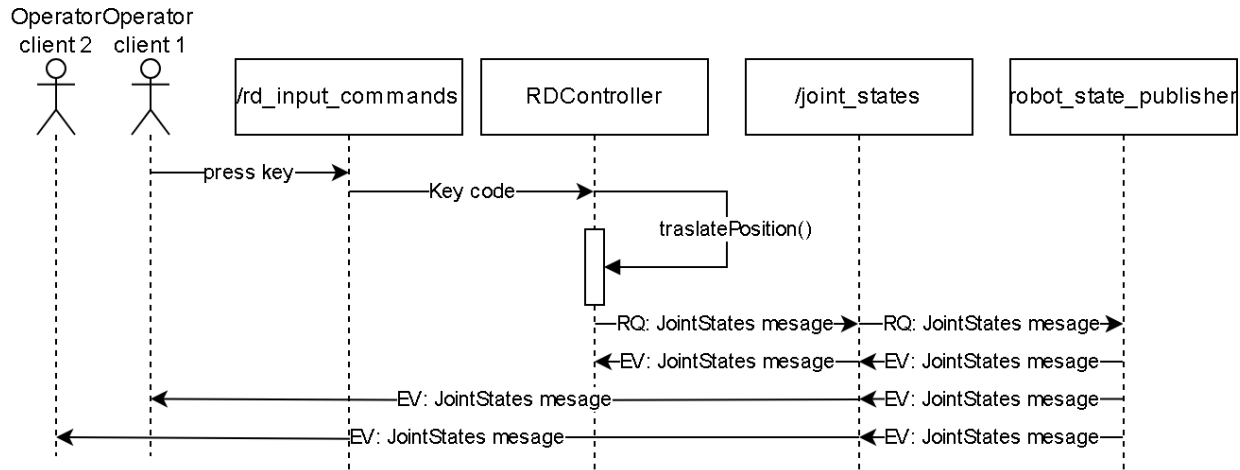


Рисунок 3.4 — Діаграма послідовностей для сценарію надсилання одиначної команди для зміни позиції маніпулятора

На діаграмі послідовності показано процес взаємодії операторів із системою управління роботом через повідомлення JointState в ROS2. Сценарій розпочинається з того, що один з операторів, представлений як Operator client 1, натискає клавішу, яка надсилає команду до теми /rd_input_commands. Ця команда у вигляді коду клавіші надходить до RDController, який викликає функцію translatePosition(), щоб перетворити введену команду в нові значення позицій з'єднань.

Після обробки RDController публікує повідомлення до теми /joint_states, щоб оновити позиції з'єднань. Це повідомлення JointState передається до robot_state_publisher, який потім передає оновлені стани з'єднань до відповідної теми /joint_states. Оновлені повідомлення JointState передаються далі до всіх вузлів, що мають знати поточний стан робота, інформуючи їх про нові позиції з'єднань. Таким чином, діаграма ілюструє, як команди, введені операторами, обробляються системою для оновлення станів з'єднань робота,

і як ці оновлення передаються назад операторам через відповідні теми ROS.

У додатку Б зображено демонстрацію обрахунку команд. На рисунку 1 зображено переміщення на 10см по осі Y, на рисунку 2 — по осі Y а на рисунку 3 — по осі Z. Змінна `target_vector` відображає значення координати, у яку має переміститись кінцевий ефектор, `L` — позначає відстань, на яку має видовжитись шток, `alpha` — кут тангажу а `beta` — кут крену. У повідомленні `JointState` можна відслідкувати зміну положення кутів з'єднань через масив з назвою `position`, що їх описує. Для поворотних з'єднань значення в масиві задаються в радіанах, а для з'єднань лінійного переміщення у метрах.

ROS Bridge служить важливою складовою, яка забезпечує зв'язок через мережу, дозволяючи дистанційним операторам підключатися до системи. `Operator Remote Client` відправляє команди до ROS Bridge, який ретранслює ці команди до `RDController`. Водночас, `Operator Local Client` виступає як додатковий вузол взаємодії, приймаючи команди від ROS Bridge та також передаючи їх до `RDController`.

Стан з'єднань, після їх зміни, необхідно передавати на вузли клієнтів для відображення актуального стану робота. Стани з'єднань, отримані з топіка `/joint_states`, поступають до локального клієнта напряму, а до віддаленого — через ROS Bridge, якщо віддалений клієнт підсаний на цей топік. `RDController` відіграє центральну роль, обробляючи вхідні команди, що надходять через ROS-топік `/rd_input_commands`, і керуючи внутрішніми процесами робота, тому також важливо інформувати його про поточний стан робота. Актуальний стан з'єднань у подальшому використовується для оптимального розрахунку переміщення на мінімально необхідну відстань для кожного з'єднання, що дозволяє робити рухи плавними

Ця архітектура не тільки забезпечує централізоване управління роботом через `RDController` з мінімальним програмним інтерфейсом на стороні клієнта, але й дозволяє гнучко взаємодіяти з системою через мережу за допомогою

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		36

ROS Bridge, що робить управління роботом ефективним і адаптивним до змін.

Створений програмний пакет структурований таким чином, щоб забезпечити розробників роботів інструментами для ефективного управління різними аспектами роботизованої системи. Завдяки використанню модульної архітектури являє собою бібліотеку, яка дозволяє легко додавати нові функції та компоненти, що робить її масштабованою та адаптивною до потреб користувача.

Основа бібліотеки складається з класу `RDControllerBase`, який забезпечує базові механізми для обміну повідомленнями в ROS, включаючи публікацію розрахованих станів робота та обробку вхідних команд. Цей клас також ініціює ноду для запуску в системі обміну повідомленнями. `RDController`, який наслідує від `RDControllerBase`, розширює цей функціонал, обробляючи специфічні вхідні команди, активуючи відповідні методи класу `KinematicsSolver` для розрахунку кінематичних станів та надсилання їх у `/joint_states`.

`KinematicsSolverBase` та `KinematicsSolver` працюють разом для керування кінематикою робота. `KinematicsSolver` зокрема ініціалізує кінематичні ланцюги, визначаючи імена ланок, з'єднання, типи кінематики та параметри залежності між з'єднаннями, що дозволяє користувачам адаптувати логіку до специфіки своїх роботів.

Цілісний підхід до реалізації бібліотеки забезпечує чітке відокремлення між обробкою вхідних команд та кінематичними розрахунками, спрощуючи управління складністю системи та покращуючи зрозумілість інтеграції з іншими компонентами робототехнічних систем. Така структура сприяє гнучкості у використанні, дозволяючи розробникам впроваджувати індивідуальні рішення для керування рухами робота, що є критично важливим для динамічно змінюваних умов експлуатації або високих вимог до точності і швидкості виконання завдань.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		37

В результаті, завдяки цій бібліотеці, розробники здатні ефективно реалізувати складні робототехнічні системи, оптимізувавши кожен аспект управління роботом,

На наданих класових діаграмах на рисунках 3.4 та 3.5 (арк. 39) кольором підкреслено структуру бібліотеки: синім кольором виділено базовий функціонал, який вже реалізовано і готовий до використання. Це включає класи, які забезпечують основні механізми для взаємодії з ROS та управління кінематичними процесами.

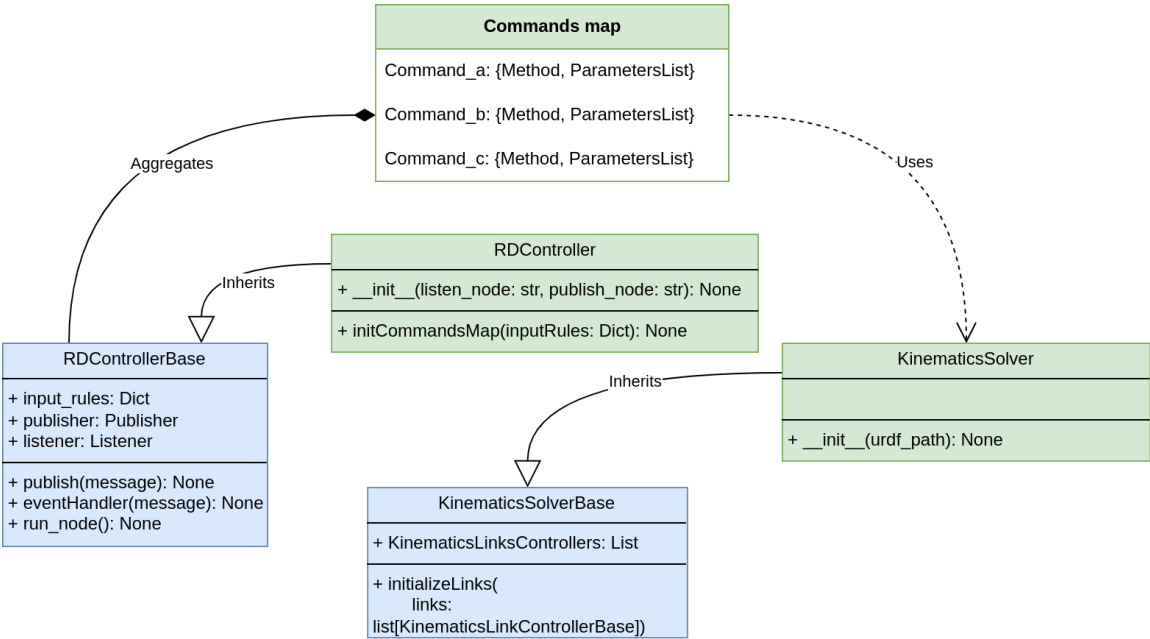


Рисунок 3.4 — Класова діаграма системи керування роботом

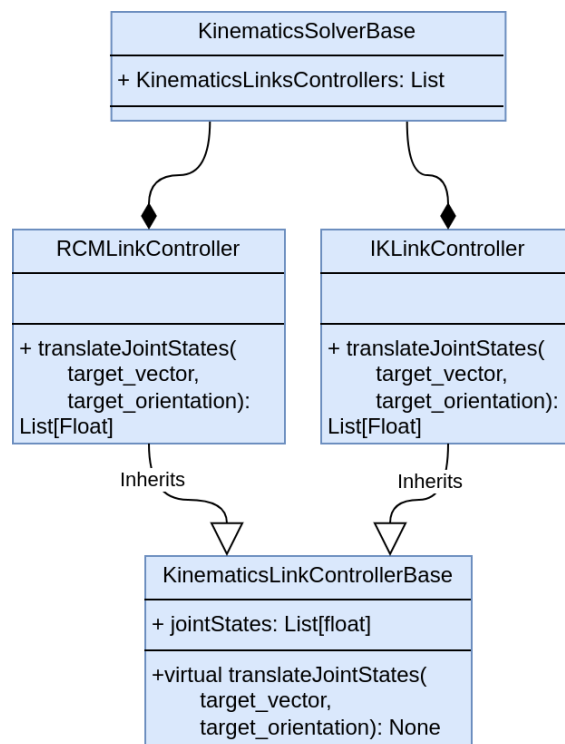


Рисунок 3.5 — Класова діаграма контролерів кінематичних ланок

Зеленим кольором виділено класи, які розробник має реалізувати самостійно, виходячи зі специфічних потреб своєї робототехнічної системи. Ці класи вимагають від розробника створення індивідуального функціоналу на основі базових класів, дозволяючи адаптувати систему управління до конкретних задач і параметрів роботи.

Крім того, існує можливість створення власних контролерів кінематики, наслідуючись від базового класу KinematicsLinkControllerBase. Це дозволяє розробникам розширити або змінити стандартну логіку кінематичного контролю, впроваджуючи нові алгоритми для керування рухами робота залежно від вимог та особливостей конструкції.

3.4 Алгоритми розрахунку стану суглобів

3.4.1 Розрахунок ланцюга інверсної кінематики

Для розрахунку кутів суглобів можуть використовуватись числові, аналітичні

та комбіновані методи вирішення задач інверсної кінематики порівняння яких показано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Порівняння способів розрахунку задач інверсної кінематики

Характеристика	Аналітичні Підходи	Числові Підходи
Точність	Висока	Варіативна, залежить від обчислювальної точності
Обчислювальна Ефективність	Висока, швидкі розв'язки	Зазвичай повільніші через ітеративний характер
Складність Реалізації	Висока, потребує виведення рівнянь	Низька, менш складна для реалізації
Гнучкість	Обмежена певними геометріями	Висока, підходить для будь-яких геометрій
Конвергенція	Гарантована (при правильному виведенні рівнянь)	Не завжди гарантована, може застрягати у локальних мінімумах
Застосування	Простіші роботи, де можливо вивести аналітичні розв'язки	Складні роботи, надлишкові кінематичні ланцюги

Аналітичні підходи базуються на точних математичних формулах і методах для знаходження розв'язку задачі інверсної кінематики. Вони використовують алгебраїчні маніпуляції та геометричні методи для виведення рівнянь, що описують рухи робота.

Числові підходи використовують ітеративні методи для знаходження наближеного розв'язку задачі інверсної кінематики. Вони часто базуються на чисельному аналізі, методах оптимізації та наближення.

З огляду на універсальність проекту, було обрано числові методи, оскільки конфігурація робота може часто змінюватись в процесі розробки, що

вимагатиме нових розрахунків рівнянь, а аналітичні методи можна застосовувати вже на етапі релізу проекту, коли конфігурація маніпулятора остаточно визначена[15, 16].

Реалізацію числового методу вирішення задач надлишкових кінематичних ланцюгів, а саме алгоритму “Jacobian inverse method”, має бібліотека ікру[17, 18]. З її допомогою було інтегровано алгоритм обчислення кутів обертання з’єднань для SCARA ланцюга маніпулятора незалежно від кількості ланок. Інформація про параметри ланок на з’єднань автоматично завантажуються з URDF файлу, який в свою чергу автоматично генерується з 3D моделі, тому при розробці, окрім відсутності необхідності виведення рівнянь, виключено і мануальний етап конфігурації кінематики.

3.4.2 Розрахунок стану ланцюга RCM

Положення кінцевого ефектора по осі X залежить від довжини L та кута α , а він у свою чергу, від кута β , оскільки проекція на площину під кутом змінює кути в площині, перпендикулярній до кута площини, де кутом площини в цьому випадку є β (рис. 3.4). Положення по осі Y залежить тільки від кута β та довжини штоку.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

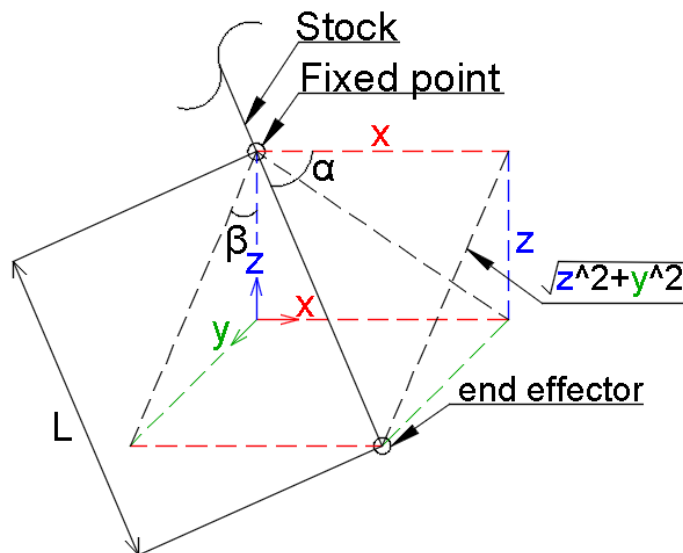


Рисунок 3.4 — Геометричне зображення положення кінцевого ефектора в просторі

Для задання позиції у трьохвимірному просторі необхідно визначити три значення: L , α , β :

$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (3.1)$$

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{x}{\sqrt{z^2 + y^2}}\right), \quad (3.2)$$

$$\beta = -\arctan\left(\frac{y}{z}\right), \quad (3.3)$$

де L — визначатиме довжину подачі штоку,

β — кут повороту осі roll,

α — кут повороту осей pitch:

$$pitch_C = pitch_B = \alpha - (stockshiftangle), \quad (3.4)$$

$$pitch_A = -pitch_B, \quad (3.5)$$

де $pitch_C$, $pitch_B$ — залежні з'єднання RCM маніпулятора по осі подачі,

$pitch_A$ — незалежне з'єднання осі подачі,

$stockshiftangle$ — базовий кут штока кінцевого ефектора.

У додатку В на рисунку 1 та 2 зображено демонстрацію лінійності алгоритму із застосуванням цих формул. На рисунку 3 зображено результат

слідування маніпулятора по траєкторії координат точок векторного зображення.

Висновки до розділу 3

У даному розділі було розроблено технічну схему та архітектурну діаграму взаємодії компонентів середовища розробки та їх залежності. Завдяки розподіленій архітектурі вдалося значно зменшити технічні вимоги до користувачького пристрою та збільшити мобільність процесу розробки. Реалізовано можливість взаємодіяти з системою через глобальну мережу.

Було інтегровано скрипти конвертації моделі робота у URDF формат. Описано методи доступу до згенерованих файлів з пакетів ROS.

Представлено архітектуру ROS пакету керування маніпулятором, що включає обробку вхідних сигналів, публікацію стану суглобів та розрахунки кінематики.

Також було наведено формули для розрахунку кута з'єднань RCM-паралелограма та роз'яснено вибір числових методів для вирішення задачі інверсної кінематики.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Характеристика прототипу маніпулятора системи роботизованої хірургії

4.1.1 Характеристики компонентів приладу.

Запропонований прототип базується на платі керування драйверами крокових двигунів BIGTREE TECH Octopus V1.1, крокових двигунах різної потужності, для різних по навантаженню з'єднань, оптичного кінцевого давача TCST2103 та блоку живлення на 24V. Технічні характеристики основних компонентів наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики ключових елементів прототипу маніпулятора

№	Найменування елементів приладу	Основні характеристики	К-ть	Позиція на схемі
1	Блок живлення I3D Selection A110004	Клас захисту виробу: I Клас за ступенем захисту (IP): IP30 (передбачається, оскільки точні дані можуть відрізнятися) Споживана потужність: Визначається споживанням підключених пристроїв, але загальна потужність може бути до кількох сотень Вт. Напруга живлення: Вихідна напруга може бути 12V або 24V (передбачається на основі типових характеристик таких блоків живлення) Максимальний струм живлення: Визначається потужністю блоку живлення (наприклад, для 12V блоку потужністю 360W максимальний струм буде 30A)	1	1

Продовження таблиці 4.1

2	Плата керування драйверами BIGTREETECH Octopus V1.1	Клас захисту виробу: I Клас за ступенем захисту (IP): IP20 (звичайно для електронних плат, без додаткового захисту) Споживана потужність: Залежить від підключених компонентів Напруга живлення: 12V або 24V (зазвичай підтримує обидва варіанти) Максимальний струм живлення: Залежить від підключених компонентів, але може обмежуватися специфікацією плати	1	2
3	Драйвер крокового двигуна TMC2208	Клас захисту виробу: I Клас за ступенем захисту (IP): IP20 (типово для електронних модулів) Споживана потужність: Залежить від режиму роботи Напруга живлення: 4.75V до 5.25V (логіка), 5.5V до 36V (силова частина) Максимальний струм живлення: До 1.4A RMS (2A пікового струму на фазу)	4	3
4	Драйвер крокового двигуна TMC5160	Клас захисту виробу: I Клас за ступенем захисту (IP): IP20 (типово для електронних модулів) Споживана потужність: Залежить від режиму роботи Напруга живлення: 8V до 60V (силова частина) Максимальний струм живлення: До 3A RMS (піковий струм до 5A)	3	4

Продовження таблиці 4.1

5	Кроковий двигун FY56ED420A	Клас захисту виробу: I Клас за ступенем захисту (IP): IP20 або вищий залежно від конструкції Споживана потужність: Залежить від напруги і струму Напруга живлення: Типово 12V до 24V Максимальний струм живлення: Зазвичай до 4.2A на фазу	1	5
6	Кроковий двигун 17HS9425	Клас захисту виробу: I Клас за ступенем захисту (IP): IP20 або вищий залежно від конструкції Споживана потужність: Залежить від напруги і струму Напруга живлення: Типово 12V до 24V Максимальний струм живлення: До 2.5A на фазу	2	6
7	Кроковий двигун 17HS4401	Клас захисту виробу: I Клас за ступенем захисту (IP): IP20 або вищий залежно від конструкції Споживана потужність: Залежить від напруги і струму Напруга живлення: Типово 12V до 24V Максимальний струм живлення: До 1.7A на фазу	4	7
8	Оптичний кінцевий давач TCST2103	Клас захисту виробу: I Клас за ступенем захисту (IP): IP30 (типово для малих електронних компонентів) Споживана потужність: до 0.02 Вт Напруга живлення: 2.3V до 5.5V Максимальний струм живлення: До 4 мА	7	8

Рівні захисту застосованих компонентів визначені згідно зі стандартами ДСТУ EN 61140:2015 «Захист від ураження електричним струмом. Загальні вимоги до установок та обладнання». Для проектного пристрою не висуваються специфічні вимоги щодо вологості повітря, умов освітлення, температури та тиску.

4.1.2. Складові компоненти пристрою

Схема прототипу маніпулятора зображена на рисунку 4.1.

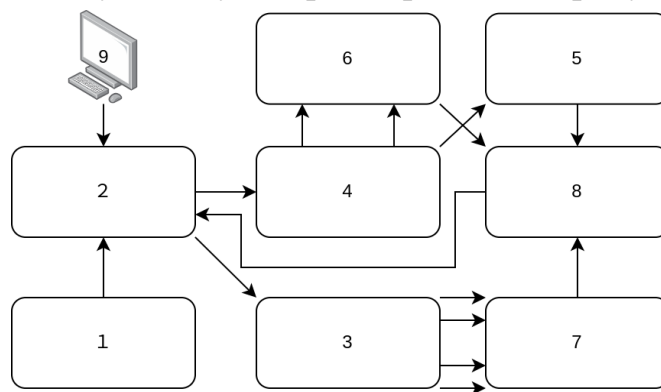


Рисунок 4.1 - Функціональна схема прототипу маніпулятора

Блок живлення плати контролера (позначено цифрою 1) забезпечує живлення силової частини робота та мікропроцесора на платі, за відсутності живлення контролера від 5-ти вольтового джерела. Плата контролер (2) необхідна для розміщення на ній драйверів та відповідає за керування ними відповідно до вхідних команд з хоста (комп'ютера). Драйвери TMC2208 керують малонавантаженими двигунами з орієнтацією uaw та подачею штока. Потужні драйвери TMC5160 (4) необхідні для керування двигунами осі Z, roll та pitch відповідно до команд з надісланих з плати контролера. Кроковий двигун FY56ED420A (5) керує віссю Z. 17HS9425 (6) керує осями roll та pitch. 17HS4401 (7) — осями uaw. Оптичні кінцеві давачі необхідні для калібрування початкової позиції, а дані надсилають на плату контролер.

4.1.3. Характер взаємодії людини з пристроєм

Пристрій є керованим програмно, тому людина контактує з ним лише у вимкненому стані, через що рівень безпеки підвищується. Індикатори на платі контролера сповіщають про роботу приладу. Оскільки плата є прихованим компонентом, то слід передбачити сигнальні індикатори з зовнішньої сторони бар'єрів що розміщені навколо маніпулятора.

Таблиця 4.2 – Взаємодія об'єкту в системі «людина – об'єкт»

№	Найменування компонентів приладу	Вид відображення інформації	Кількість
1	Плата керування драйверами BIGTREE TECH Octopus V1.1	Індикатор роботи - світлодіод	1
2	Драйвер крокового двигуна TMC2208	Індикатор роботи - світлодіод	4
3	Драйвер крокового двигуна TMC5160	Індикатор роботи - світлодіод	3

4.2 Опис небезпек, що створюються конструкцією приладу і заходи їх мінімізації.

Для забезпечення безпечної експлуатації маніпулятора системи роботизованої хірургії та захисту здоров'я користувачів необхідно дотримуватися встановлених норм безпеки, які включають заходи проти електричних ризиків та запобігання механічним несправностям. Оскільки маніпулятор може використовуватися в медичних установах, де критично важлива надійність та безпека, детальний аналіз потенційних джерел небезпек і причин їх виникнення, а також оцінка можливих наслідків, є обов'язковими.

4.2.1 Електрична небезпека ураження струмом

Забезпечення безпеки при роботі з електричними компонентами маніпулятора системи роботизованої хірургії є критично важливим. Ураження електричним струмом може статися через прямий контакт з оголеними проводами або компонентами, що знаходяться під напругою, що може призвести до серйозних травм або летальних наслідків. Додаткові ризики включають пробій ізоляції, що може спричинити ураження струмом через непомітний контакт з корпусом обладнання, а також перевантаження та короткі замикання, які можуть викликати пожежі або поломки.

Таблиця 4.3 – Оцінка небезпек електричного характеру

№	Найменування компоненті вприладу	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1	Плата керування драйверами BIGTREETECH Octopus V1.1	Постійний струм	Ушкодження ізоляції	Ураження електричним струмом
			Неправильне з'єднання із іншими елементами приладу	Ушкодження контролерної плати та/або інших електронних компонентів.
2	Блок живлення I3D Selection A110004	Змінний струм	Ушкодження ізоляції	Ураження електричним струмом
			Неправильне підключення до плати	Ушкодження контролерної плати та/або інших електронних компонентів.
			Поява високої напруги у системі в результаті некоректної роботи приладу	Ушкодження контролерної плати та/або інших електронних компонентів.

В таблиці 1.4 представлено порівняння між реальними та стандартними значеннями електричних ризикових факторів.

Таблиця 4.4 – Реальні та нормативні фактори електричної небезпеки

№	Фактор небезпеки	Реальні значення	Нормативні значення
1	Струм в системі	6.875А	5-7мА
2	Підвищена напруга	24В	оптимальні: 7-12 В, допустимі: 6-20В

Таблиця 4.5 – Заходи із забезпечення охорони праці щодо електробезпеки

№	Група номенклатурних заходів ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1	Технічні засоби	Надійна ізоляція струмопровідних частин приладу	Уникнення контакту зі струмопровідними елементами пристрою
		Кольорове маркування дротів	Полегшення ідентифікації підключень і зменшення ризику електричної помилки, спрощення процесу діагностики та ремонту
		Захист від ушкоджень механічного характеру і потрапляння води шляхом розміщення плати контролера у пластиковому відсіку відведеному під електроніку	Мінімізація ризику ушкодження приладу впливом зовнішнього середовища, захист від ураження струмом
2	Організаційні засоби	Інструкція користувача для роботи з приладом	Інструкції для забезпечення правильного використання приладу та відповідності вимогам безпеки.
3	Режимні засоби	Діагностику та виправлення дефектів необхідно проводити лише при відключенні пристрою	Перевірка та усунення проблем мають здійснюватись тільки після відключення приладу від мережі.

Продовження таблиці 4.5

4	Експлуатаційні засоби	Перевірка на правильність підключення всіх компонентів приладу	Контроль за коректним підключенням усіх елементів приладу для забезпечення його безпечної роботи.
		Перевірка ізоляції та порівняння характеристик блоку живлення з номінальними параметрами.	Забезпечення безпечної експлуатації приладу

Для усунення цих небезпек слід використовувати компоненти і матеріали з надійною ізоляцією та регулярно перевіряти ізоляційні властивості проводів і компонентів. Обслуговувати сухі та припаяні контакти рухомих проводів. Встановлення автоматичних вимикачів та запобіжників забезпечить захист від перевантажень і коротких замикань. Необхідно також забезпечити наявність захисних кожухів на всіх електричних компонентах і заземлення для всіх металевих частин конструкції.

4.2.2 Механічна небезпека

Таблиця 4.6 – Механічні небезпеки

№	Назва компонентів приладу	Джерело небезпеки	Причина небезпеки	Наслідки небезпеки
1	Рухомі ланки маніпулятора	Механічний тиск	Потрапляння сторонніх предметів на шляху маніпулятора або між ланками	Деформація конструкції, перенавантаження двигунів
2	Крокові двигуни	Механічне навантаження	Підвищене механічне навантаження чи тиск у системі, що може виникнути під час роботи	Перевантаження і можливе пошкодження двигуна через надмірне навантаження

Таблиця 4.7 – Реальні та нормативні фактори механічної небезпеки

№	Фактор небезпеки	Реальні значення	Нормативні значення
1	Механічне навантаження в системі	0.253 – 1 Н×м	0.76 – 3 Н×м

Таблиця 4.8 – Заходи забезпечення охорони праці

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1	Технічні засоби	Модульна будова приладу	Можливість легкої заміни деталей приладу
		Ізоляція рухомих частин редукторів на з'єднаннях.	Мінімізація ризику потрапляння в систему сторонніх предметів, які заважають руху редукторів.
2	Організаційні засоби	Інструкція користувача для роботи з приладом	Забезпечення коректної роботи з приладом і дотримання правил безпеки
3	Режимні засоби	Розміщення зразків у затискачах необхідно проводити лише при відключеному пристрою	Мінімізація ризику потрапляння в систему сторонніх предметів, які заважають руху блокам із затискачами і тросику
4	Експлуатаційні засоби	Перевірка на наявність механічних ушкоджень компонентів приладу	Забезпечення безпечної експлуатації приладу

4.3. Розробка «Інструкції з техніки безпеки при експлуатації прототипу маніпулятора системи роботизованої хірургії».

1. Загальні положення, що стосуються прав і обов'язків обслуговуючого персоналу щодо дотримання вимог техніки безпеки:

- Персонал, що обслуговує маніпулятор, має бути належним чином ознайомлений із всіма інструкціями безпеки, а також пройти спеціалізоване навчання для роботи з цим обладнанням.

- Використання маніпулятора дозволено лише кваліфікованим фахівцям, які мають відповідні знання та досвід роботи з медичними роботизованими системами.

2. Технологічні вимоги до заходів безпеки:

- Перед початком роботи необхідно ретельно перевірити технічний стан маніпулятора, включно з електричними з'єднаннями та механічними компонентами.
- Під час роботи з маніпулятором слід дотримуватись процедур, що забезпечують захист від механічних, електричних та інших видів ушкоджень.
- Після закінчення роботи маніпулятор має бути вимкнений, а робоче місце — прибране та підготовлене до наступного використання.
- У випадку надзвичайних ситуацій необхідно негайно припинити експлуатацію маніпулятора та викликати фахівця для усунення проблем.

3. Особливості обслуговування маніпулятора

- Технічне обслуговування та калібрування маніпулятора має проводитись регулярно згідно з графіком, що визначений виробником.
- Під час обслуговування слід звертати особливу увагу на стан рухомих частин та елементів, які можуть вплинути на точність і безпеку роботи маніпулятора.
- Всі втручання у систему повинні документуватися з зазначенням дати, часу, виконаних дій і особи, яка проводила обслуговування.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		53

Висновки до розділу ОП

У цьому розділі було проведено ґрунтовний аналіз потенційних ризиків та небезпек, асоційованих із експлуатацією маніпулятора системи роботизованої хірургії. Оцінено різноманітні електричні, механічні та пожежні ризики, які можуть виникати під час роботи з цим обладнанням.

Зокрема, було ідентифіковано критичні електричні загрози, такі як можливість ураження електричним струмом через несправність ізоляції чи неправильне обслуговування обладнання. Механічні небезпеки включають ризик травмування через рухомі частини або падіння важких компонентів, а пожежні ризики пов'язані з перегрівом електроніки.

На основі аналізу були розроблені специфічні процедури та рекомендації, спрямовані на мінімізацію цих ризиків. Ці заходи включають використання надійної ізоляції, регулярні перевірки стану обладнання, належне навчання та інструктаж персоналу, встановлення захисних бар'єрів та забезпечення ефективної системи вентиляції.

В результаті впровадження цих заходів забезпечується не тільки безпека персоналу, а й оптимізація робочого процесу з обладнанням, що підвищує його ефективність та продуктивність в умовах медичних досліджень та роботизованої хірургії. Висновки з цього розділу формують основу для подальшого вдосконалення прототипу маніпулятора та його безпечної експлуатації.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		54

ВИСНОВКИ

В процесі виконання даної дипломної роботи було розроблено та реалізовано комплексну систему для керування маніпулятором в середовищі симуляції RViz.

Проведено детальний літературний огляд існуючих принципів роботи та керування роботизованими хірургічними маніпуляторами.

Визначено, що найуспішнішим механізмом з віддаленим центром обертання (RCM) для мінімально інвазивної хірургії є подвійний паралелограм.

Створено спрощену тривимірну модель маніпулятора, яка включає два основні кінематичні ланцюги.

Розроблено технічну схему та архітектурну діаграму взаємодії компонентів середовища розробки, що дозволило скоротити сумарні витрати часу на розробку.

Інтегровано скрипти для автоматизованої конвертації моделі робота з проекту Fusion 360 у формат URDF, що спрощує процес розробки та налагодження файлу опису робота. Створено ROS пакет, який включає класи для обробки вводу, публікації стану суглобів та контролю кінематики.

Впроваджено алгоритми розрахунку стану суглобів для ланцюгів інверсної кінематики та RCM, зокрема, використано числовий метод вирішення задач надлишкових кінематичних ланцюгів за допомогою бібліотеки ікру та виведено рівняння для кутів RCM ланцюга. Створено та протестовано симуляційну модель маніпулятора в середовищі RViz. Проведено тестування алгоритмів планування рухів, яке успішно продемонструвало відповідність рухів до заданих координат.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		55

Таким чином, у даній роботі було досягнуто мети розробки системи керування спрощеним маніпулятором системи роботизованої хірургії у середовищі симуляції, що може бути застосоване для подальшого використання на фізичному прототипі. Розроблена система забезпечує високу гнучкість та ефективність у процесі розробки та тестування, зменшуючи необхідність використання фізичного прототипу та підвищуючи продуктивність процесу розробки логіки.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		56

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Salman M, Bell T, Martin J, Bhuva K, Grim R, Ahuja V. Use, Cost, Complications, and Mortality of Robotic versus Nonrobotic General Surgery Procedures Based on a Nationwide Database. *The American Surgeon*TM. 2013;79(6):553-560. doi:[10.1177/000313481307900613](https://doi.org/10.1177/000313481307900613)
2. Marino MV, Shabat G, Gulotta G, Komorowski AL. From Illusion to Reality: A Brief History of Robotic Surgery. *Surgical Innovation*. 2018;25(3):291-296. doi:[10.1177/1553350618771417](https://doi.org/10.1177/1553350618771417)
3. Marino MV, Shabat G, Gulotta G, Komorowski AL. From Illusion to Reality: A Brief History of Robotic Surgery. *Surgical Innovation*. 2018;25(3):291-296. doi:[10.1177/1553350618771417](https://doi.org/10.1177/1553350618771417)
4. Omisore, O. M., Han, S., Xiong, J., Li, H., Li, Z., & Wang, L. (2020). *A Review on Flexible Robotic Systems for Minimally Invasive Surgery. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 1–14*. doi:10.1109/tsmc.2020.3026174
5. Boal, M., Di Girasole, C.G., Tesfai, F. et al. Evaluation status of current and emerging minimally invasive robotic surgical platforms. *Surg Endosc* 38, 554–585 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00464-023-10554-4>
6. Kong, K., Li, J., Zhang, H., Li, J., & Wang, S. (2016). *Kinematic Design of a Generalized Double Parallelogram Based Remote Center-of-Motion Mechanism for Minimally Invasive Surgical Robot. Journal of Medical Devices, 10(4), 041006*. doi:10.1115/1.4033668
7. Yun-ping, Zhu and Zhang Fan. “A Novel Remote Center-of Motion Parallel manipulator for Minimally Invasive Celiac Surgery.” (2015).
8. Yan Z, Du Z, Zhang F, Wang W. Preoperative optimization of the surgical robot considering internal diversity of workspace. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018;232(6):1091-1107. doi:[10.1177/0954406217699019](https://doi.org/10.1177/0954406217699019)

9. SURGICAL ROBOT SYSTEM [Электронный ресурс] // EUROPEAN PATENT SPECIFICATION. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20231004/patents/EP3685787NWB1/document.pdf>.

10. The da Vinci® system: technology and surgical analysis [Электронный ресурс] // Ento Key. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://entokey.com/the-da-vinci-system-technology-and-surgical-analysis/>.

11. Kim, Da & Kim, Hwan & Kwak, Sanghyun & Baek, Kwangha & Na, Gina & Kim, Ji-Hoon & Kim, Se. (2016). The Settings, Pros and Cons of the New Surgical Robot da Vinci Xi System for Transoral Robotic Surgery (TORS): A Comparison With the Popular da Vinci Si System. Surgical Laparoscopy, Endoscopy & Percutaneous Techniques. 26. 1. 10.1097/SLE.0000000000000313.

12. Reddy K, Gharde P, Tayade H, Patil M, Reddy LS, Surya D. Advancements in Robotic Surgery: A Comprehensive Overview of Current Utilizations and Upcoming Frontiers. Cureus. 2023 Dec 12;15(12):e50415. doi: 10.7759/cureus.50415. PMID: 38222213; PMCID: PMC10784205.

13. Hagn, U., Konietschke, R., Tobergte, A., Nickl, M., Jörg, S., Kübler, B., Passig, G., Gröger, M., Fröhlich, F., Seibold, U., Le-Tien, L., Albu-Schäffer, A., Nothhelfer, A., Hacker, F., Grebenstein, M., & Hirzinger, G. (2010). DLR MiroSurge: a versatile system for research in endoscopic telesurgery. International journal of computer assisted radiology and surgery, 5(2), 183–193. <https://doi.org/10.1007/s11548-009-0372-4>

14. Melling, N., Barr, J., Schmitz, R., Polonski, A., Miro, J., Ghadban, T., ... Perez, D. (2018). Robotic cholecystectomy: first experience with the new Senhance robotic system. Journal of Robotic Surgery. doi:10.1007/s11701-018-0877-3

15. Darwich, I., Stephan, D., Klöckner-Lang, M. et al. A roadmap for robotic-assisted sigmoid resection in diverticular disease using a Senhance™

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Pierre Manceron. IKPy's documentation [Електронний ресурс] / Pierre Manceron – Режим доступу до ресурсу: https://ikpy.readthedocs.io/en/latest/modules/ikpy/inverse_kinematics.html?highlight=inverse_kinematic_optimization#

25. Aristidou, Andreas & Lasenby, Joan. (2009). Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver.

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

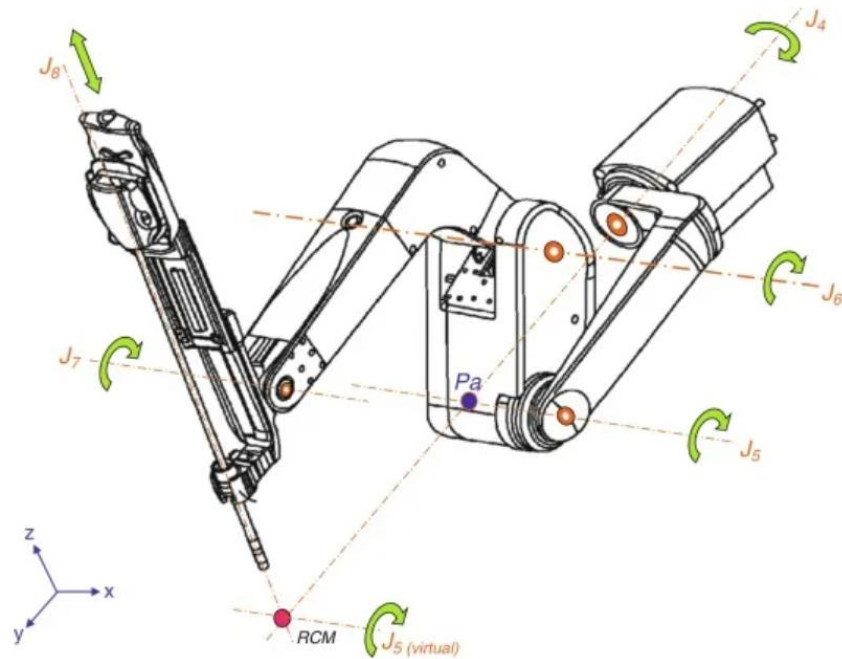


Рисунок 1 – Роботизована рука системи da Vinci® [10]

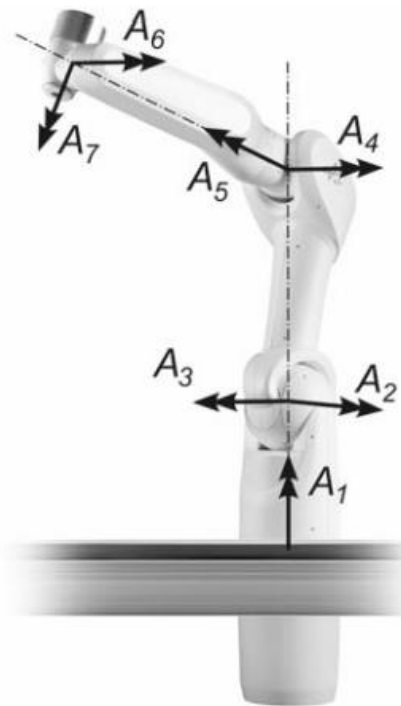


Рисунок 2 – Роботизована рука MiroSurge із зображеними осями суглобів [6]

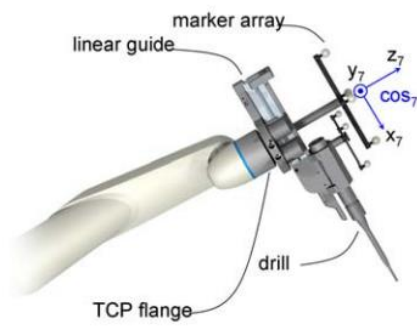
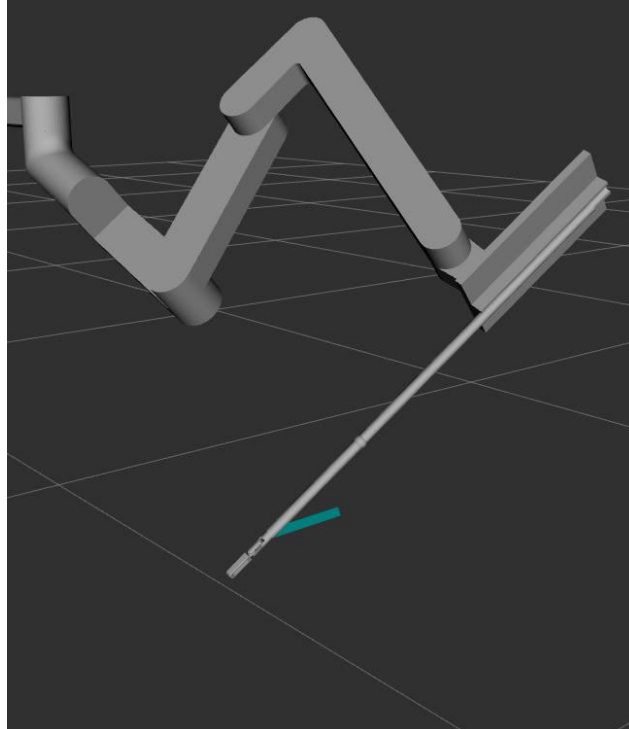


Рисунок 1.7 - Дизайн зап'ястя MiroSurge [6]

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		62

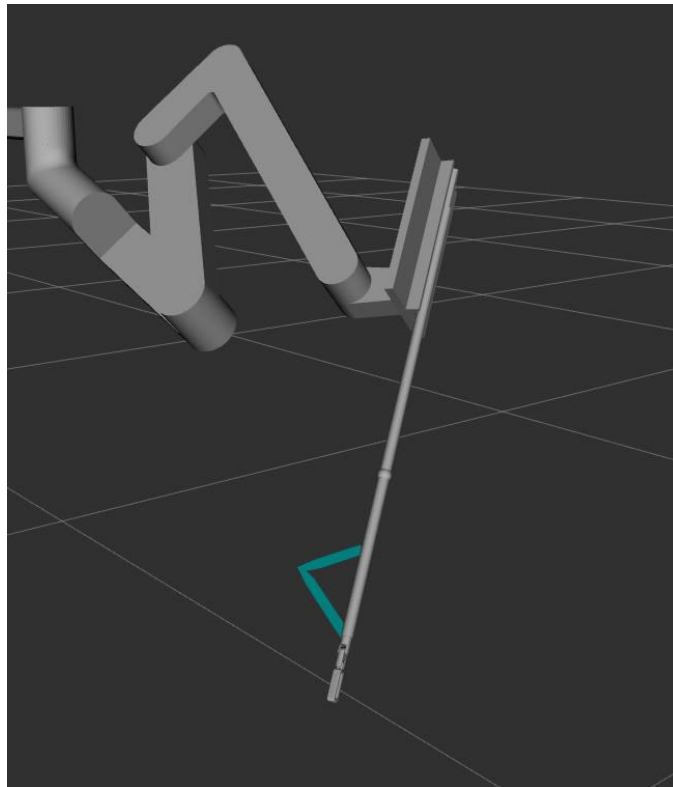
ДОДАТОК Б



```
target_vector: {'x': 0, 'y': 0.1, 'z': 0.1}
calculate_l_a_b(x_target=0.00, y_target=0.10, z_target=0.10)
calculate_l_a_b res: l=0.14 alpha=-0.00rad, -0.00° beta=-0.79rad,
-45.00°
translate rcmp res:
length=0.03
roll=-0.79rad, -45.00°
pitch_C_a=-0.39rad, -22.30°
pitch_B_a=-0.39rad, -22.30°
pitch_A_a=0.39rad, 22.30°

sensor_msgs.msg.JointState(header=std_msgs.msg.Header(
stamp=builtin_interfaces.msg.Time(sec=1717655806, nanosec=659288118),
frame_id=''), name=['joint_Slider_vertical',
'joint_Revolute_yaw_shoulders', 'joint_Revolute_yaw_forearm',
'joint_Revolute_yaw_angled', 'joint_Revolute_roll',
'joint_Slider_point', 'joint_Revolute_pitch_A',
'joint_Revolute_pitch_B', 'joint_Revolute_pitch_C', 'joint_Slider_pole',
'joint_Rigid_clamp_fix', 'joint_Revolute_clamp_elbow',
'joint_Revolute_clamp_right', 'joint_Revolute_clamp_left'],
position=[0.0, 0.0, 0.0, 0.0, -0.7854, 0.615, 0.3892, -0.3892,
-0.3892084231947355, 0.0324, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0], velocity=[],
effort=[])
```

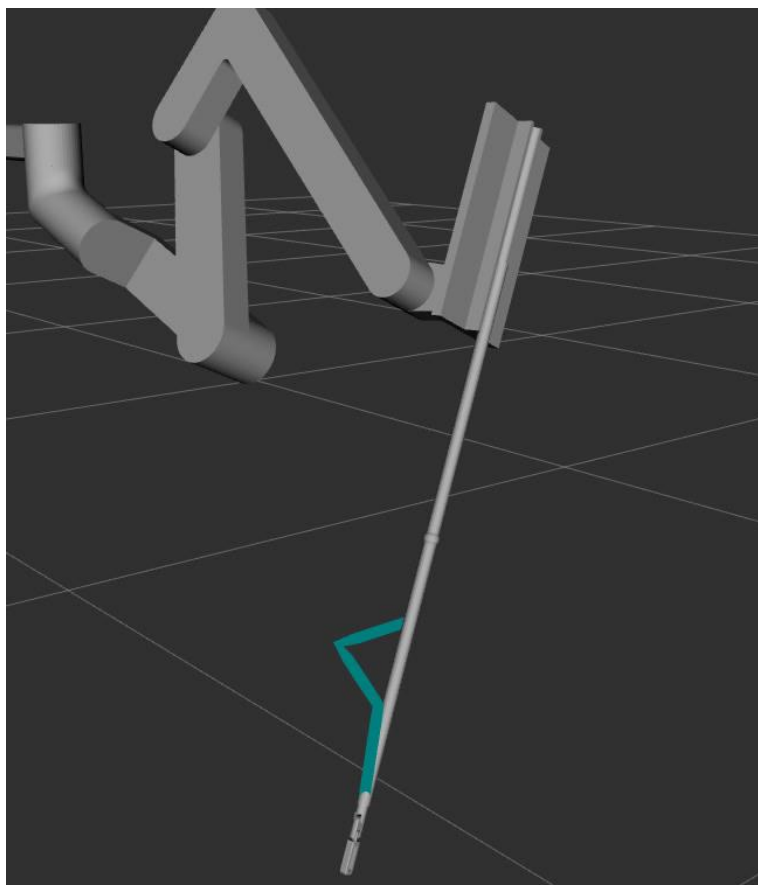
Рисунок 1 — переміщення на 10 см по осі Y.



```
target_vector: {'x': 0.1, 'y': 0.1, 'z': 0.1}
calculate_l_a_b(x_target=0.10, y_target=0.10, z_target=0.10)
calculate_l_a_b res: l=0.17 alpha=-0.62, -35.26°? beta=-0.79, -45.00°?
translate_rcmp res:
length=0.06
roll=-0.79rad, -45.00°
pitch_C_a=-1.00rad, -57.56°
pitch_B_a=-1.00rad, -57.56°
pitch_A_a=1.00rad, 57.56°

sensor_msgs.msg.JointState(header=std_msgs.msg.Header(
stamp=builtin_interfaces.msg.Time(sec=1717655812, nanosec=84445652),
frame_id=''), name=['joint_Slider_vertical',
'joint_Revolute_yaw_shoulders', 'joint_Revolute_yaw_forearm',
'joint_Revolute_yaw_angled', 'joint_Revolute_roll',
'joint_Slider_point', 'joint_Revolute_pitch_A',
'joint_Revolute_pitch_B', 'joint_Revolute_pitch_C', 'joint_Slider_pole',
'joint_Rigid_clamp_fix', 'joint_Revolute_clamp_elbow',
'joint_Revolute_clamp_right', 'joint_Revolute_clamp_left'],
position=[0.0, 0.0, 0.0, 0.0, -0.7854, 0.615, 1.0047, -1.0047, -1.0047,
0.0642, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0], velocity=[], effort=[])
```

Рисунок 2 — переміщення на 10 см по осі X.



```
target_vector: {'x': 0.1, 'y': 0.1, 'z': 0.2}
calculate_l_a_b(x_target=0.10, y_target=0.10, z_target=0.20)
calculate_l_a_b res: l=0.24 alpha=-0.42rad, -24.09° beta=-0.46rad,
-26.57°
translate rcmp res:
length=0.14
roll=-0.46rad, -26.57°
pitch_C_a=-0.81rad, -46.39°
pitch_B_a=-0.81rad, -46.39°
pitch_A_a=0.81rad, 46.39°

sensor_msgs.msg.JointState(header=std_msgs.msg.Header(
stamp=builtin_interfaces.msg.Time(sec=1717655847, nanosec=33410363),
frame_id=''), name=['joint_Slider_vertical',
'joint_Revolute_yaw_shoulders', 'joint_Revolute_yaw_forearm',
'joint_Revolute_yaw_angled', 'joint_Revolute_roll',
'joint_Slider_point', 'joint_Revolute_pitch_A',
'joint_Revolute_pitch_B', 'joint_Revolute_pitch_C', 'joint_Slider_pole',
'joint_Rigid_clamp_fix', 'joint_Revolute_clamp_elbow',
'joint_Revolute_clamp_right', 'joint_Revolute_clamp_left'],
position=[0.0, 0.0, 0.0, 0.0, -0.4637, 0.615, 0.8097, -0.8097, -0.8097,
0.1359, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0], velocity=[], effort=[])
```

Рисунок 3— переміщення на 10 см по осі Z.

ДОДАТОК В

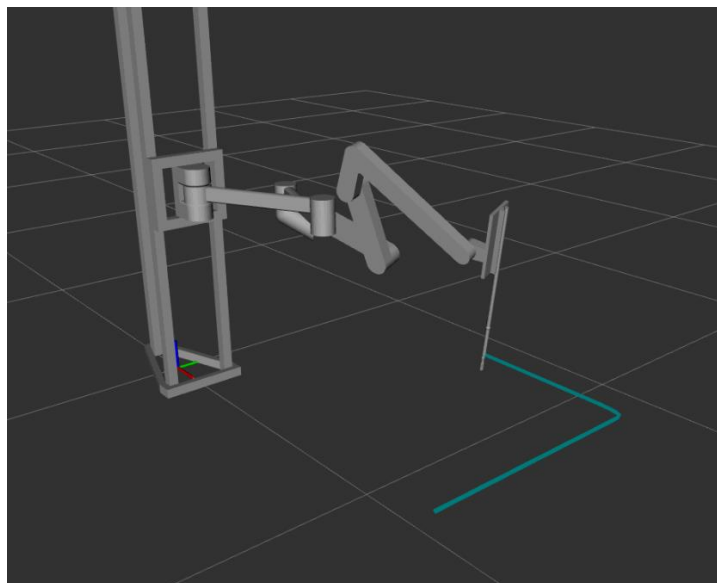


Рисунок 1 – лінійне переміщення

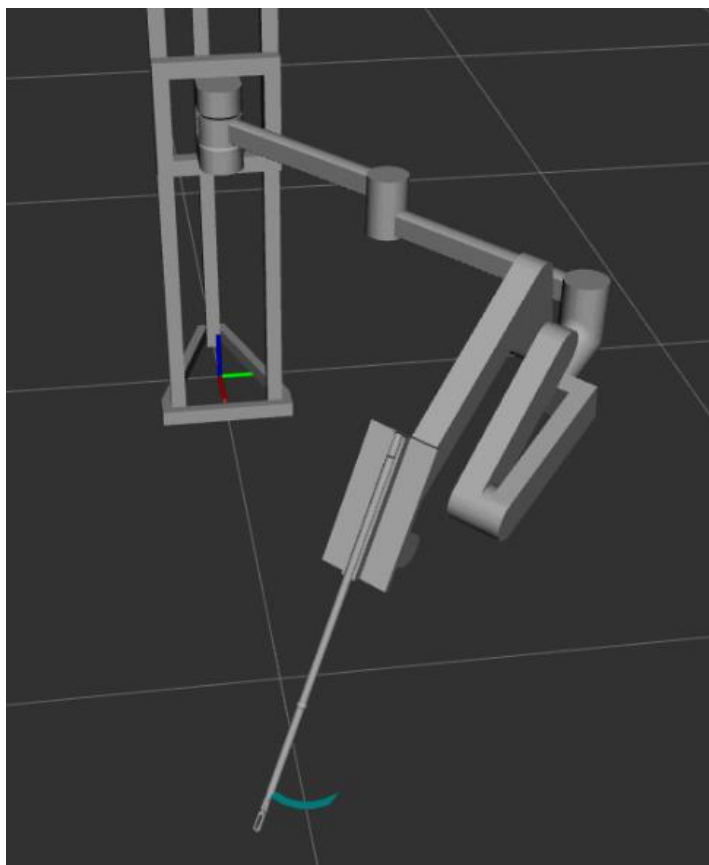


Рисунок 2 – Поворот по осі рискання

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

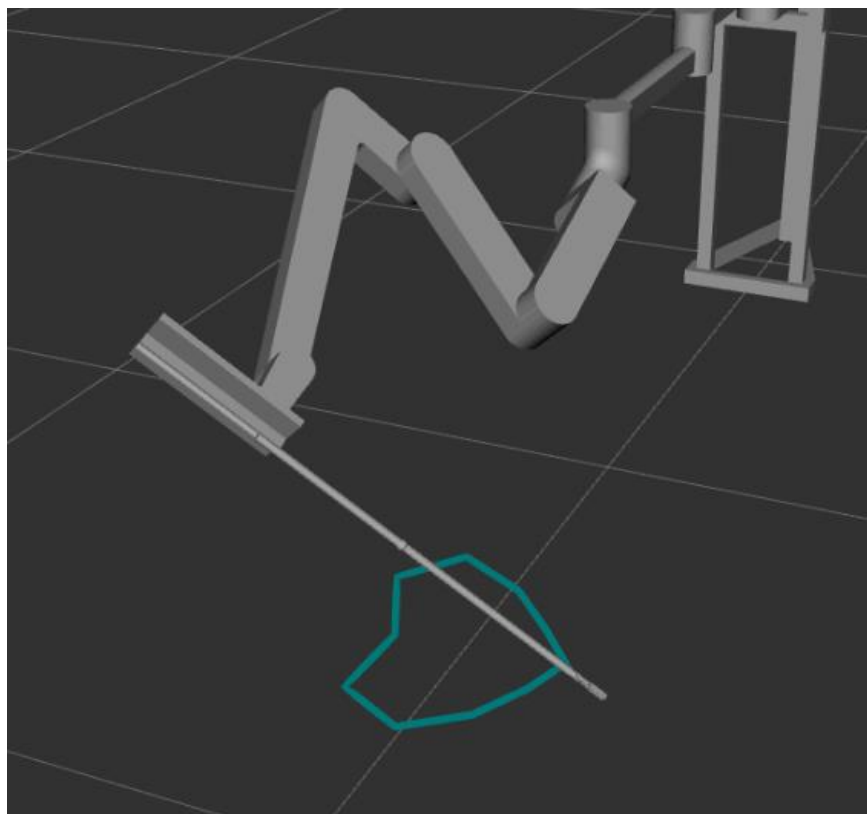


Рисунок 3 – Переміщення маніпулятора по координатам векторного зображення

					БМ01.05.2905.1706.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		67