

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет комп'ютерних наук та технологій
(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему СИСТЕМА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ
(назва теми)

ФУНКЦІОНУВАННЯ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

Виконав: студент 2 курсу, групи КНТ-613м
Спеціальності _____

(код і найменування спеціальності)

123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма (спеціалізація)

Спеціалізовані комп'ютерні системи

ХРАПКО А. С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ЗЕЛЕНЬОВА І.Я.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент КОЗИНА Г.Л.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Комп'ютерних наук і технологій
Кафедра «Комп'ютерні системи та мережі»
Ступінь вищої освіти магістерський
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) «Спеціалізовані комп'ютерні системи»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Кудерметов Р.К.

«_____» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

ХРАПКА Андрія Сергійовича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Система візуалізації для контролю функціонування
робота-маніпулятора

керівник проєкту (роботи) к. т. н., доцент, ЗЕЛЕНЬОВА Ірина Яківна,

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 18 » жовтня 2024 року № 149

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 1 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Мануал для робота моделі UR10e, програма для 3D
моделювання, анімації та візуалізації Blender

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз предметної області, дослідження наявних методів 3D
моделювання, анімації та візуалізації;

2) Розробка моделі;

3) Розробка анімації;

4) Моделювання та контроль алгоритму рухів робота-маніпулятора.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	ЗЕЛЕНЬОВА І.Я., доцент		
нормоконтроль	ПОЛЬСЬКА О.В., ст. викл.		

7. Дата видачі завдання « 12 » вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз технічного завдання та наявних засобів 3D моделювання, анімації та візуалізації	20.09.2024 р.	
2	Визначення програми, необхідної для створення 3D моделі та системи контролю	30.09.2024 р.	
3	Розробка 3D моделі робота	11.10.2024 р.	
4	Розробка скелету анімації для контролю робота	28.10.2024 р.	
5	Розробка алгоритму контролю робота	06.11.2024 р.	
6	Оформлення пояснювальної записки	25.11.2024 р.	

Студент(ка)

_____ **Андрій ХРАПКО**
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ **Ірина ЗЕЛЕНЬОВА**
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 80 с; 61 рис; 22 джерела.

3D МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕКСТУРУВАННЯ, РОБОТОТЕХНІКА, РЕНДЕР, АНІМАЦІЯ, РОБОТИЗОВАНИЙ МАНІПУЛЯТОР, ВІРТУАЛЬНА МОДЕЛЬ, BLENDER 3D

Об'єктом дослідження є розробка системи візуалізації для контролю функціонування робота-маніпулятора.

Предметом дослідження є засоби візуалізації, що дозволяють створити та контролювати тривимірну модель робота-маніпулятора.

Метою даного дипломного проекту є написання алгоритму розробки системи візуалізації робота, яка може бути використана для моделювання, аналізу та оптимізації дизайну.

Наукова новизна роботи полягає в реалізації системи, що дозволяє, слідуючи алгоритму та інструкціям, створити тривимірну віртуальну візуалізацію для контролю робота-маніпулятора .

Практична цінність результатів роботи полягає в розробці системи контролю тривимірної моделі робота, яка включає поетапну інструкцію та чіткий алгоритм, слідуючи якому можливо розробити власний віртуальний прототип робота, контролювати його інструментами анімації та створити ефектну презентацію моделі.

Результати впроваджені у лекційний курс та для виконання курсової роботи з дисципліни «Теорія синтезу цифрових систем на ПЛІС» для магістрів за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія».

ABSTRACT

Explanatory note to the master's work: 80 p., 61 figures, 22 sources.

3D MODELING, TEXTURING, ROBOTICS, RENDERING, ANIMATION,
ROBOTIC MANIPULATOR, VIRTUAL MODEL, BLENDER 3D

The object of research is the development of a visualization system for monitoring the functioning of a robot manipulator.

The subject of the research is visualization tools that allow creating and controlling a three-dimensional model of a robot manipulator.

The purpose of this project is to write an algorithm for developing a robot visualization system that can be used for modeling, analysis, and design optimization.

The scientific novelty of the work is the implementation of a system that allows to create a three-dimensional virtual visualization for controlling a robot manipulator by following the algorithm and instructions.

The practical value of the results is the development of a system for controlling a three-dimensional robot model, which includes step-by-step instructions and a clear algorithm, following which it is possible to develop your own virtual robot prototype, control it with animation tools and create an effective presentation of the model.

The results have been implemented in the lecture course and for course work in the discipline «Theory of synthesis of digital systems on FPGA» for masters in the specialty 123 «Computer Engineering».

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз предметної області.....	8
1.1 Короткий огляд методів візуалізації	8
1.1.1 Методи моделювання	8
1.1.2 Методи анімації.....	11
1.2 Застосування візуалізації в робототехніці.....	14
1.3 Огляд робототехнічних систем.....	15
1.4 Постановка задачі.....	17
2 Розробка моделі.....	18
2.1 Аналіз робота-маніпулятора	18
2.2 Вибір фреймворків.....	21
2.3 Розробка непрозорої моделі.....	28
2.4 Розробка прозорої моделі.....	42
3 Розробка анімації.....	48
3.1 Основні етапи підготовки моделі та розробки анімації.....	48
3.2 Підготовка моделі: Закріплення деталей та створення скелету.....	49
3.3 Підготовка ефекту прозорості та внутрішнього механізму.....	55
3.4 Анімація моделі.....	56
3.5 Рендер анімації.....	62
3.6 Алгоритм та практичні рекомендації щодо розробки системи візуалізації робота.....	66
4 Приклад візуального контролю алгоритма робота.....	68
4.1 Приклад алгоритму функціонування робота-маніпулятора.....	68
4.2 Приклад анімації рухів робота.....	71
Висновки	78
Перелік джерел посилання.....	79

ВСТУП

У сучасному світі комп'ютерні технології розвиваються дуже стрімко. За останні роки їхнє застосування суттєво розширилося: такі галузі, як кіно, наука, економіка, маркетинг та багато інших, вже неможливо уявити без комп'ютерів.

Однією зі значних областей застосування комп'ютерних технологій є комп'ютерна графіка та її різновид – 3D графіка, моделювання та анімація. Головною задачею 3D моделювання є тривимірне візуальне представлення будь-якого об'єкту. Комп'ютерна графіка щільно увійшла в сучасне життя:

- архітектурна візуалізація стала спеціальним напрямком, який допомагає вписати будівлю в існуючі забудови або ландшафт та раціонально розпланувати внутрішні приміщення;
- інженери за допомогою комп'ютерної симуляції можуть розрахувати, як поводить себе конструкція при різних навантаженнях, та забезпечити її стійкістю;
- у медицині дана технологія використовується у томографії для отримання пошарових зображень та їх реконструкції у вигляді 3D моделі, а також для конструювання і створення протезів;
- у робототехніці та автоматизації розробка ефективного та надійного робота-маніпулятора вимагає ретельного проектування, моделювання та тестування, де в нагоді стає 3D моделювання та анімація. Роботизовані маніпулятори стали важливими інструментами в різних галузях, включаючи виробництво, охорону здоров'я, логістику та аерокосмічну промисловість. Ці роботизовані системи призначені для відтворення рухів рук людини, забезпечуючи точність, швидкість і послідовність, необхідні для виконання таких завдань, як складання, переміщення матеріалів, зварювання і навіть хірургічні операції.

Таким чином, процес моделювання, який знаходить все більше областей промисловості та науки, є дуже корисним для розвитку суспільства.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Короткий огляд методів візуалізації

Існує декілька основних видів 3D моделювання та анімації, які можна використовувати як окремо, так і в комбінації одне з одним. Вони відрізняються складністю та методами застосування в залежності від специфіки поставленої задачі. Для задачі візуалізації робота, зокрема, доцільно використовувати методи полігонального та промислового моделювання.

Щодо відображення і контролю рухів робота, то найбільш релевантними є методи анімації за ключовими кадрами, із захопленням руху, а також процедурні методи, що дозволяють відтворити не тільки поведінку робота, а й оточуюче середовище, в якому працює цей робот. Таке доповнення моделі потрібно для урахування можливих ризиків, наприклад, неправильних дій робота, зтикання з перешкодами, або ризиків травмування людини – тобто моделювання ситуацій з техніки безпеки.

1.1.1 Методи моделювання

Полігональне моделювання - це підхід до 3D-моделювання, який використовує ребра, вершини та грані для формування об'єктів. Моделювання починають з простих форм і додають деталі, щоб розробити потрібну форму. Приклад полігонального моделювання приведено на рисунку 1.1.

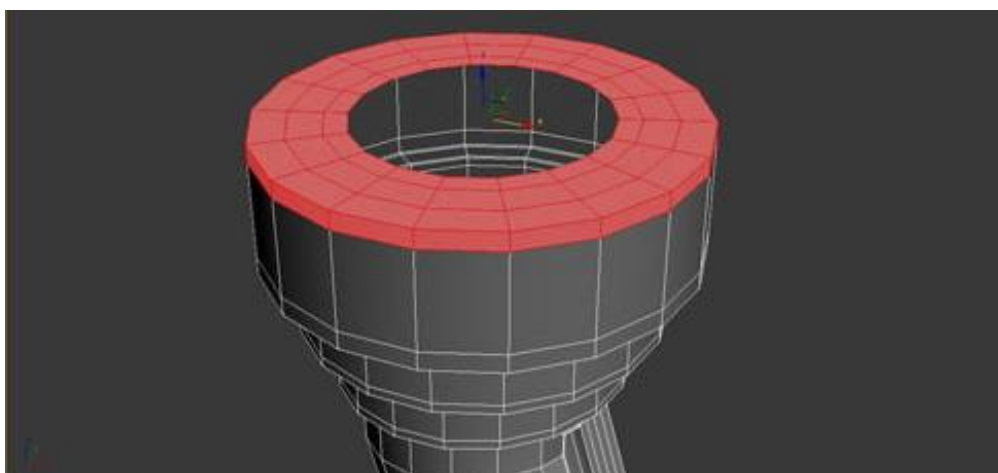


Рисунок 1.1 – Приклад полігонального моделювання у 3DS MAX

Цей метод фокусується на побудові моделей за допомогою багатокутників - фігур, що визначаються множиною вершин (точок), з'єднаних ребрами, які утворюють грані. Ці грані зазвичай є трикутними або чотирикутними, але у рідкісних випадках у якості граней можуть бути використані й більш складні фігури. Процес редагування фігур відбувається через зміну координат вершин та граней. Полігональна модель також називається фасетною, оскільки полігональні грані визначають її форму [1].

Полігональне або багатогранне моделювання найкраще підходить там, де зовнішній вигляд об'єкта має більше значення, ніж точність. Воно широко використовується дизайнерами відеоігор та анімаційними студіями. У тривимірних відеоіграх, такі моделі формують цілі світи та кожен предмет. Комп'ютери витрачають менше часу на рендеринг полігональних моделей. Тому найпростіші програми для полігонального моделювання добре працюють у навіть у браузері.

3D-скульптинг використовує більш художній, вільний підхід. Віртуальні інструменти для ліплення дозволяють штовхати, тягнути, стискати та органічно вирізати форми, як при роботі з глиною. Метою є творче самовираження та швидке досягнення конкретних художніх форм і силуетів [2]. Приклад 3D скульптури наведено на рисунку 1.2.

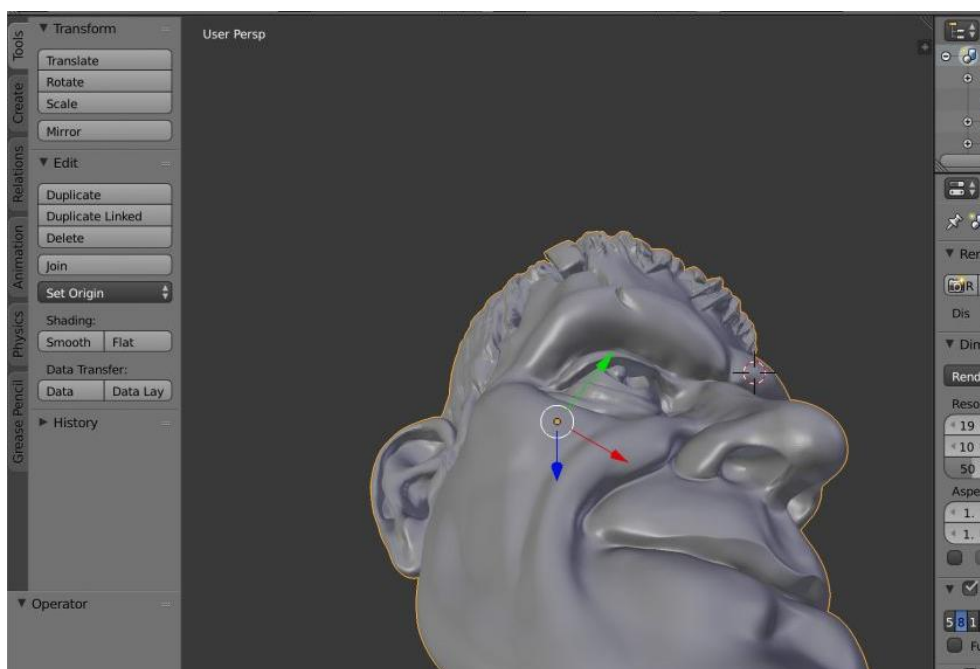


Рисунок 1.2 – 3D модель створена за допомогою інструментів скульптингу

Такий метод моделювання полегшує створення складних за структурою форм та даже можливість легко додавати на модель недосконалість або деформації, що допомагає збільшити переконливість та реалізм. За допомогою спеціальних програм можливо також використовувати скульптинг для нанесення текстурних карти прямо на поверхню 3D моделі. Також, у випадку якщо модель створену скульптингом потрібно оптимізувати, наприклад, для використання у відеогрі, можливо зробити ретопологію – переведення віртуальної скульптури у формат низько полігональної сітки.

Для моделювання різноманітних промислових об'єктів, запчастин, деталей та їх функціональності існує окремий вид 3D моделювання. Віртуальне моделювання за допомогою комп'ютера допомагає побачити помилки, що виникають при роботі механізму ще на етапі проектування, що дає змогу здешевити процес тестування прототипів. Вносячи зміни до моделі, можливо в реальному часі побачити як це впливає на роботу всього механізму, що сприяє досягненню оптимальної якості та ефективності. Крім того, тривимірна віртуальна симуляція може бути використана для створення прототипу, перевірки його працездатності та в якості презентації для інвесторів. Іншою особливістю цього різновиду моделювання є використання цілих форм, а не полігонів чи сплайнів. Приклад наведено на рисунку 1.3.

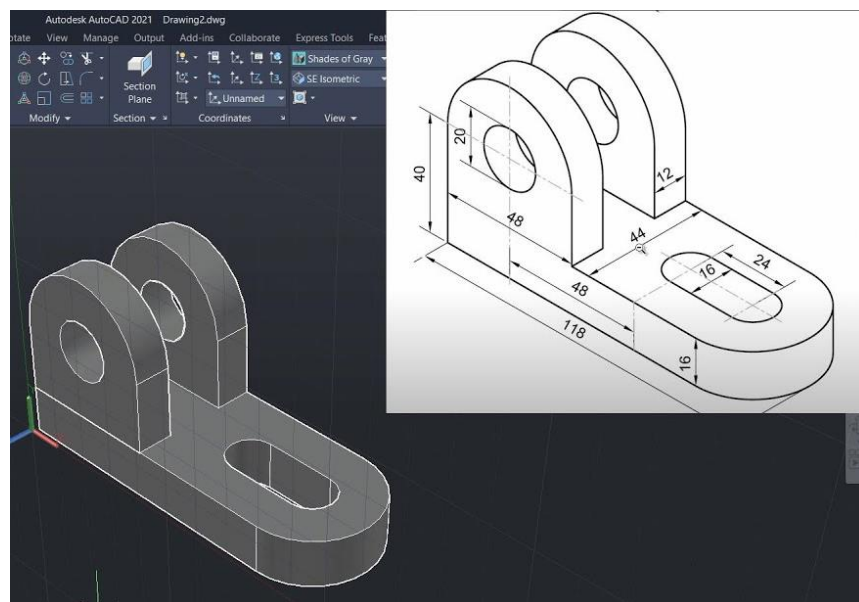


Рисунок 1.3 – Тривимірна промислова CAD модель

Застосування 3D моделей в промислових завданнях дозволяє знизити витрати на виготовлення продукції та прискорити процес розробки нових виробів. Для створення таких моделей використовуються системи автоматизованого проектування (англ. Computer-Aided Design). Ці програми призначені для відтворення точних віртуальних копій реальних об'єктів.

Промислове моделювання набуло великої популярності в інженерії завдяки тому, що враховує навіть найдрібніші деталі, включно з матеріалами виробів.

1.1.2 Методи анімації

3D-анімація - це комп'ютерна техніка, яка передбачає створення анімації з використанням тривимірних об'єктів і середовищ. Це складний процес, який вимагає спеціального програмного та апаратного забезпечення для створення реалістичних і приголомшливих візуальних ефектів. У 3D-анімації художник створює віртуальне середовище, персонажів та об'єкти, а потім анімує їх, щоб розробити кінцевий продукт.

Анімація ключових кадрів передбачає створення ключових кадрів на певних проміжках анімації. Художник створює перший і останній кадр, а програма автоматично заповнює простір проміжними кадрами. Анімація за ключовими кадрами - трудомісткий процес, але він дозволяє краще контролювати анімацію. Приклад анімації за ключовими кадрами наведено на рисунку 1.4.

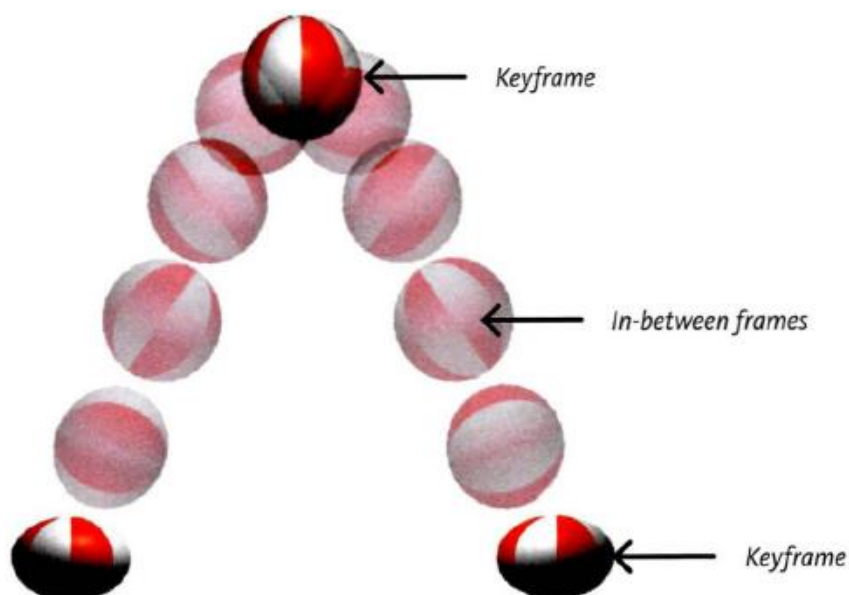


Рисунок 1.4 – Анімація за ключовими кадрами

Коли для певного атрибута встановлюються ключі, значення ключів зберігаються у спеціальних вузлах, які називаються вузлами кривих анімації. Ці криві визначаються ключами, які відображають значення атрибута в часі [3].

Анімація із захопленням руху (англ. Motion Capture) передбачає використання датчиків для відстеження рухів людини або об'єкта який анімують. Потім ці рухи записуються і накладаються на 3D-модель. Ця техніка зазвичай використовується у фільмах та відеоіграх для створення реалістичних анімацій рухів людей та або тварин. Приклад створення такої анімації можна побачити на рисунку 1.5.

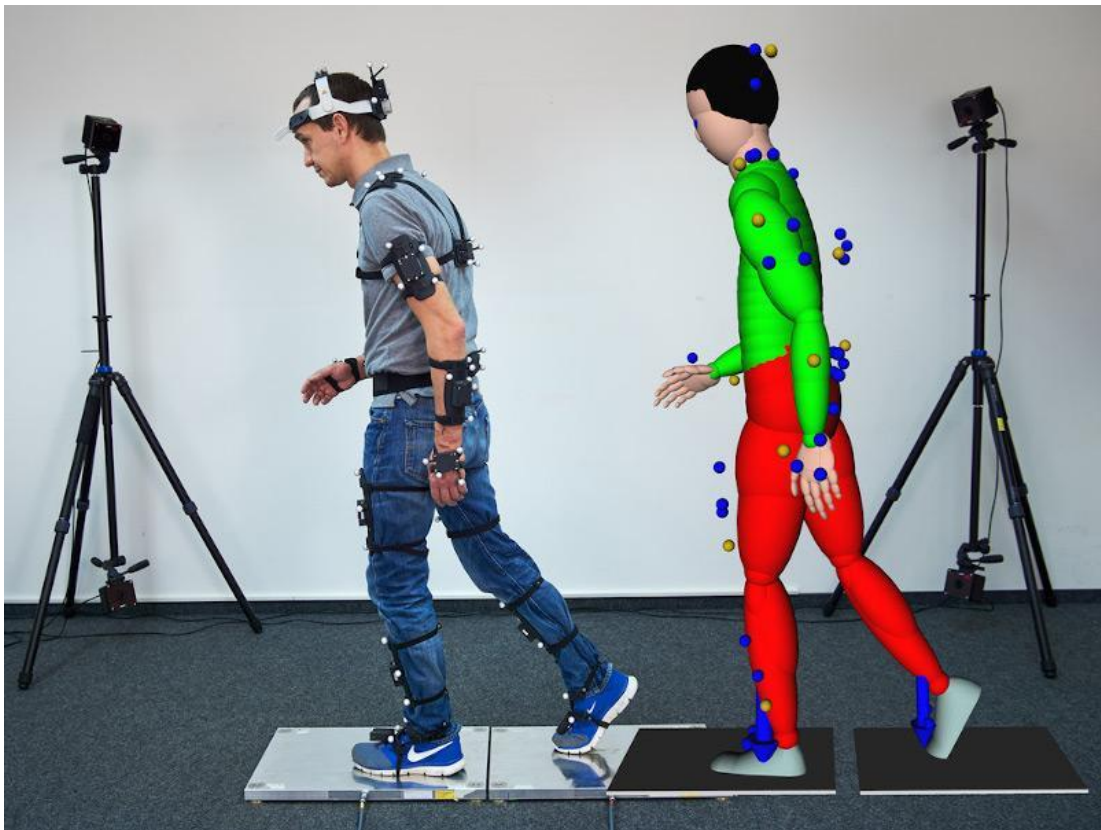


Рисунок 1.5 – Процес запису рухів людини за технологією Motion Capture

Перед початком захоплення руху дуже важливо точно відкалібрувати маркери тіла, щоб отримати чітку копію рухів об'єкта.

Рухи камери також можуть бути записані: віртуальна камера на сцені буде міняти ракурс, нахилитися або переміщатися по сцені, керована оператором під час виступу актора. Водночас система захоплення руху може фіксувати камеру і

реквізит, а також рухи актора. Це дозволяє комп'ютерно згенерованим персонажам, образам і декораціям мати таку ж перспективу, як і на відео з камери.

Техніка анімації цільовим морфінгом передбачає створення різних форм або цілей для 3D-моделі. Програма деформує або рухає модель від однієї цілі до іншої, створюючи анімацію. Анімації морфінгу зазвичай використовується в анімації персонажів для створення виразів обличчя та синхронізації губ.

Також подібна анімація може бути створена в реальному часі: у деяких відеоіграх рот персонажа може рухатися залежно від звуків та літер, що промовляє гравець. Приклад анімації обличчя з цільовим морфінгом наведено на рисунку 1.6.

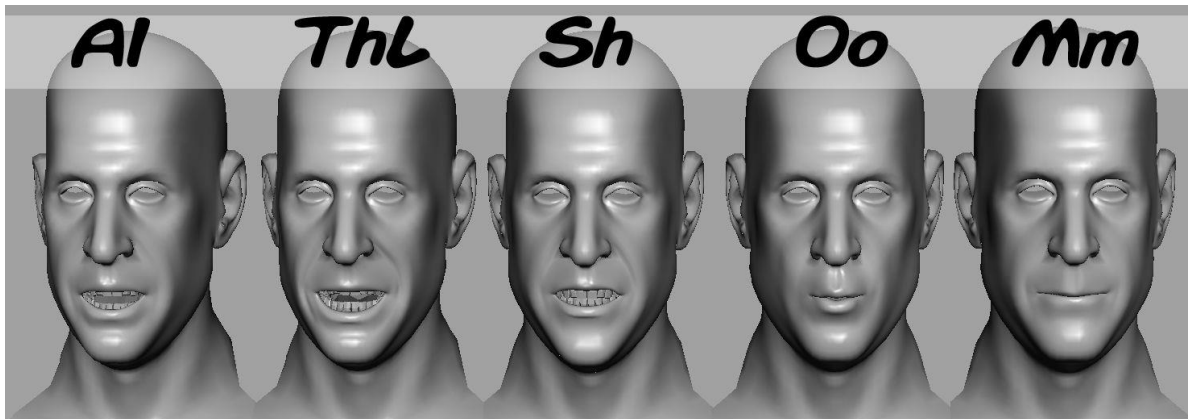


Рисунок 1.6 – Модель обличчя з анімаціями, які орієнтуються на звук

Основною перевагою такого методу анімації є те, що художник має більше контролю над рухами об'єкта, оскільки можливо визначати індивідуальні позиції вершин у межах ключового кадру, а не зіштовхуватись з обмеженнями скелету моделі. Це може бути корисно для анімації одягу, шкіри та виразу обличчя, оскільки такі дрібні деталі важко узгодити з кістками моделі, які потрібні для скелетної анімації.

Процедурна анімація передбачає використання алгоритмів для створення анімації. Художник створює правила та параметри для анімації, а програма генерує анімацію на основі цих правил. Така анімація зазвичай використовується для створення складних об'єктів та явищ, таких як вода, вогонь і дим. Приклад процедурного вогню з димом показано на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Процедурно створений вогонь, що випускає дим при горінні

Ця техніка особливо актуальна в ігровій індустрії, де реалістична та плавна анімація має вирішальне значення для створення захоплюючих ігрових світів. Вона додає реалістичності персонажам і об'єктам, роблячи їх більш живими і правдоподібними. Це може значно покращити загальне занурення та задоволення від гри.

1.2 Застосування візуалізації в робототехніці

3D-моделювання відіграє вирішальну роль у робототехніці, покращуючи різні аспекти проектування, розробки та експлуатації роботів.

Програмне забезпечення для 3D-моделювання дозволяє інженерам створювати детальні віртуальні прототипи компонентів і вузлів роботів, що уможливорює ітеративні процеси проектування, оптимізацію механічних конструкцій та візуалізацію кінцевого продукту перед фізичним виробництвом. Для технічного обслуговування та моніторингу стану обладнання в реальному часі використовуються цифрові двійники роботів з використанням 3D-моделей.

Також 3D-моделі використовуються в робототехнічних симуляторах для тестування та перевірки поведінки роботів, алгоритмів керування та планування руху у віртуальному середовищі. Це скорочує час розробки та витрати, пов'язані з фізичним прототипуванням.

У системі розпізнавання об'єктів, маніпулювання, навігації у просторі, в алгоритмах планування траєкторій використовуються 3D-моделі роботів та їхнього оточення, що дозволяє уникати перешкод і забезпечити ефективний рух. Системи комп'ютерного зору для роботів дозволяють їм сприймати та інтерпретувати навколишнє середовище в трьох вимірах. Роботи використовують методи 3D-моделювання для створення точних карт свого оточення, необхідних для автономної навігації та дослідження.

Тривимірна віртуальна симуляція дає можливість проводити навчання та підготовку спеціалістів у сферах медицини, інженерії, керування промисловою та військовою технікою.

Завдяки використанню 3D-моделювання сфера робототехніки продовжує розвиватися, вдосконалюючи дизайн, функціональність та інтеграцію роботів у різних галузях і сферах застосування.

1.3 Огляд робототехнічних систем

Розвиток технічних засобів і засобів обчислювальної техніки, зокрема поява багатоцільового автоматичного технологічного обладнання (наприклад, багатоопераційних верстатів із числовим програмним керуванням), промислових роботів, автоматичних вантажно-розвантажувальних пристроїв, транспортних і нагромаджувальних систем зумовило виникнення соціально-економічного замовлення суспільства на створення РТС (робототехнічних систем), яке може бути реалізоване сукупним використанням сучасних науково-технічних знань та технічних засобів.

РТС — є сукупність інформаційно-сенсорних, механічних виконавчих і керуючих пристроїв, що функціонують разом з метою виконання заданого технологічного процесу або операції. РТС реалізується у вигляді комплексу технологічного та транспортного обладнання в сукупності с промисловими роботами, що виконують основні або допоміжні технологічні операції в умовах автоматизованого виробництва [4].

Робототехнічна система є сукупність підсистем, а саме:

- комп'ютеризованої інженерно-технологічної служби;
- комплексу автоматизованого технологічного обладнання з інтегрованою системою контролю, включаючи промислові роботи;
- автоматизованої транспортної системи, що поєдную склад заготовок, підсистему упорядкування виробничого середовища та склад готової продукції;
- загальної системи автоматичного керування виробничим комплексом.

Роботизовані виробничі системи класифікуються за сферою використання, розвиненістю структури, гнучкістю, рівнем автоматизації, функціональним призначенням системи керування обладнанням і типом конфігурації (рисунок 1.8).

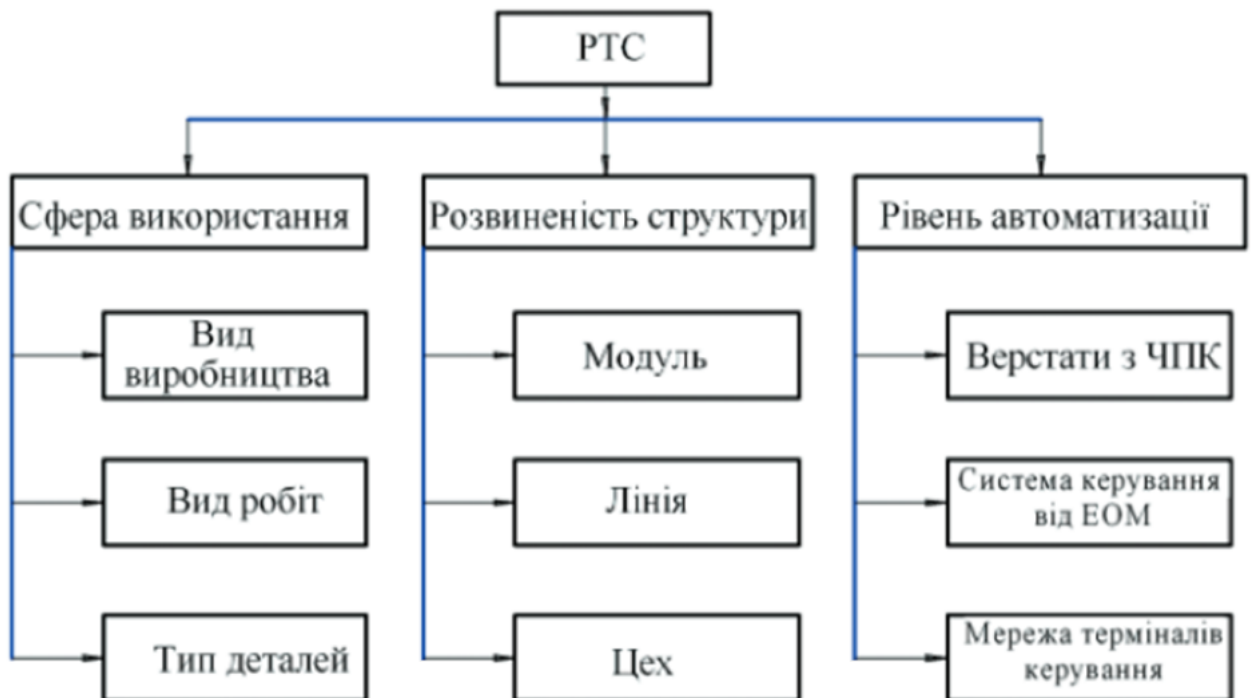


Рисунок 1.8 – Класифікація РТС

Роботи-маніпулятори широко використовуються для допомоги працівникам у виконанні повторюваних і небезпечних завдань у безлічі промислових процесів, виконуючи їх швидше та ефективніше. Прикладами такої діяльності є транспортування, виробництво, зварювання та свердління. При цьому важливо, щоб маніпулятори дуже точно відстежували бажані траєкторії зі швидким зближенням [5].

1.4 Постановка задачі

Сфера використання РТС у машино- та приладобудуванні надзвичайно широка й охоплює практично всі види виробництва (від заготівельних до складальних), спектр видів робіт (слюсарні, регулювальні та ін.), основні типи деталей (пласкі, корпусні, тіла обертання) [6].

У сучасній автоматизації та виробництві роботи-маніпулятори відіграють важливу роль у виконанні завдань, що вимагають точності, швидкості та надійності. Ці роботизовані маніпулятори використовуються в різних галузях промисловості, зокрема в автомобілебудуванні, електроніці, охороні здоров'я та логістиці, де вони виконують такі завдання, як збирання, переміщення матеріалів та пакування продукції. Однак проектування та моделювання цих маніпуляторів у реальних умовах створює проблеми з точки зору досягнення оптимальної продуктивності, скорочення часу на розробку та забезпечення економічно ефективного виробництва.

Метою цього проекту є написання алгоритму розробки системи візуалізації робота, яка може бути використана для моделювання, аналізу та оптимізації дизайну. Для досягнення цілей проекту необхідно розробити два варіанти моделі робота:

– непрозора модель, що слугуватиме для контролю позиціонування та зовнішніх маніпуляцій робота;

– прозора модель для демонстрації роботи та контролю стану внутрішніх ланок та механізмів робота маніпулятора.

Основні вимоги до проекту включають:

– геометрична точність: забезпечення того, щоб 3D-модель точно відображала побудову маніпулятора, включаючи з'єднання, ланки та детальну внутрішню структуру;

– кінематичне моделювання: моделювання прямої та зворотної кінематики для прогнозування положення та орієнтації маніпулятора в просторі;

– анімація: розробка анімації для симулювання та демонстрації функціонування робота у віртуальному просторі.

Створюючи чіткий та зрозумілий алгоритм розробки 3D-моделі, цей проект має на меті спростити процес проектування, зменшити витрати на створення прототипів та підвищити продуктивність роботів-маніпуляторів.

2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ

2.1 Аналіз робота-маніпулятора

Для моделювання було обрано маніпулятор UR10e від компанії Universal Robotics. UR10e – це промисловий кобот (англ. *cobot*, *collaborative robot*) середнього розміру, який поєднує в собі великий радіус дії та високу вантажопідйомність. Цей робот легко інтегрується в широкий спектр застосувань і забезпечує безмежні можливості автоматизації [7].

Даний робот може бути запрограмований на роботу з різноманітними інструментами та обміну інформацією з іншими машинами за допомогою електричних сигналів. Він являє собою маніпулятор, що складається з екструдованих алюмінієвих трубок і з'єднань. Зовнішній вигляд робота представлено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Робот моделі UR10e

Маніпулятори Universal Robots серії E мають шість суглобів (з'єднань) та широкий діапазон гнучкості, що слугує для імітації діапазону рухів людської руки (рисунок 2.2). Це промислові роботи, призначені для роботи з інструментами/кінцевими ефекторами та пристосуваннями, а також для обробки або переміщення компонентів, деталей чи виробів.

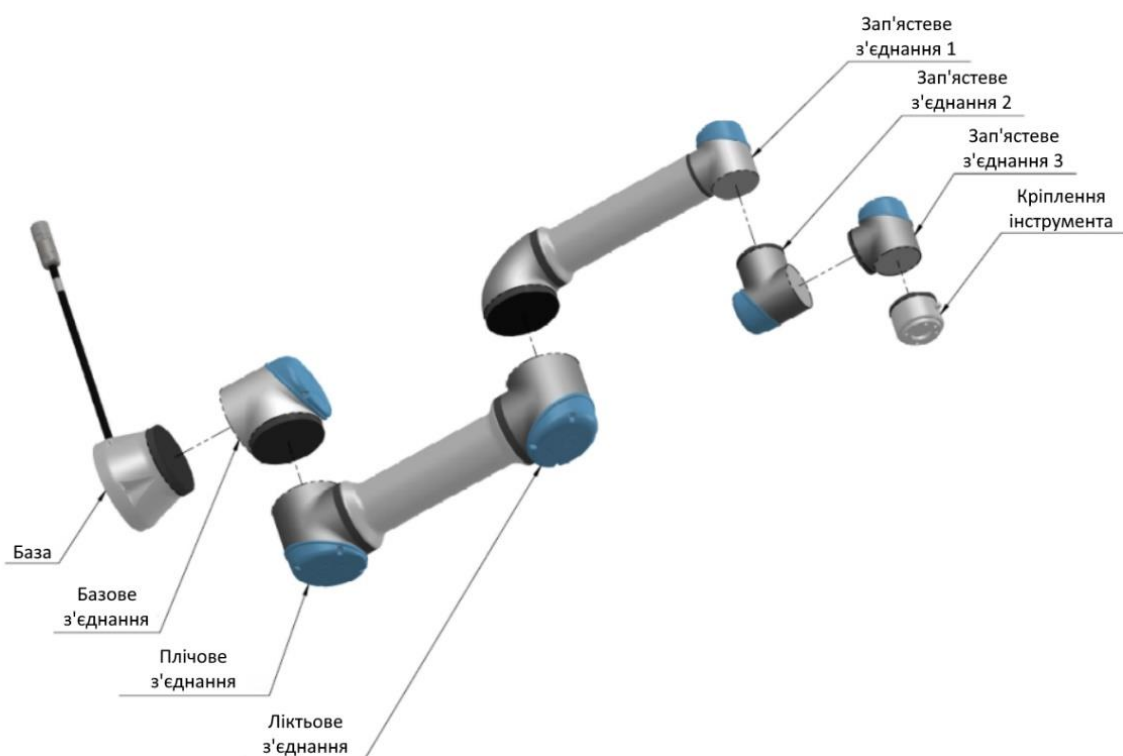


Рисунок 2.2 – Зовнішня будова робота UR10e

Обрана для проекту модель середнього розміру 10e має радіус максимальної досяжності у 1300 мм. У цьому радіусі для рухів маніпулятора не має бути встановлено ніяких перешкод, а входити в цю зону під час роботи маніпулятора заборонено (рисунок 2.3).

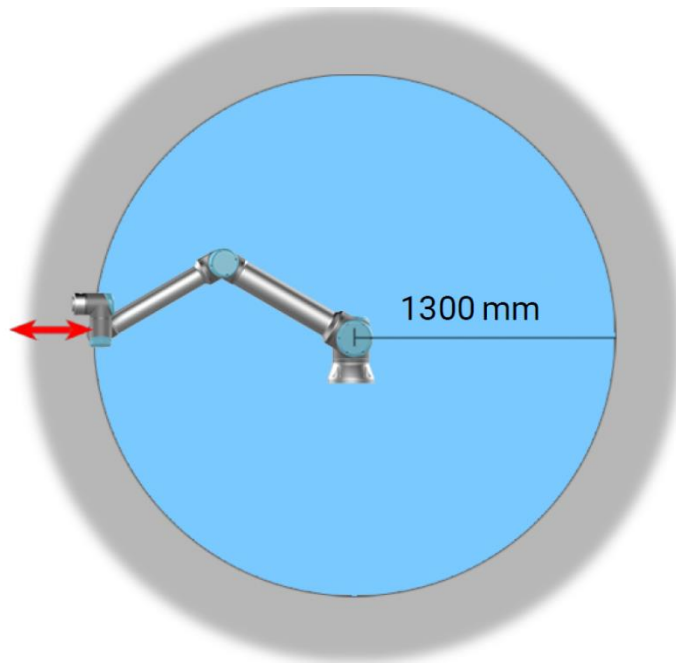


Рисунок 2.3 – Радіус зони в якій є небезпека колізії з роботом

Роботи оснащені функціями безпеки, які спеціально розроблені для забезпечення спільної роботи, коли робототехнічна система працює без огорожі або разом з людиною.

Спільна робота призначена тільки для безпечних застосувань, де вся система, включаючи інструмент, заготовку, перешкоди та інші машини, не становить значної небезпеки згідно з оцінкою ризику конкретного застосування.

Ці функції налаштовуються за допомогою конфігурації безпеки і є особливо важливими при розгляді та оцінюванні конкретних ризиків:

- використовується для зменшення сили затискання, що чиниться роботом у напрямку руху в разі зіткнення між роботом і оператором;
- обмеження обертового моменту: Використовується для зменшення високої перехідної енергії та сили удару в разі зіткнень між роботом і оператором шляхом зменшення швидкості робота;

- обмеження положення суглоба, ліктя та інструменту/кінцевого ефектора: Особливо використовується для зменшення ризиків, пов'язаних з певними частинами тіла. Наприклад, щоб уникнути руху в напрямку голови та шиї;
- обмеження орієнтації в просторі інструмента/кінцевого ефектора: Використовується, зокрема, для зменшення ризиків, пов'язаних з певними ділянками та особливостями інструмента/кінцевого ефектора та заготовки. Наприклад, щоб уникнути гострих країв, спрямованих у бік оператора;
- обмеження швидкості: Використовується, зокрема, для забезпечення низької швидкості маніпулятора робота [8].

2.2 Вибір фреймворків

Cinema 4D - це професійне програмне рішення для 3D-моделювання, анімації, симуляції та рендерингу. Робоче вікно програми можна побачити на рисунку 2.4. Його стабільний набір інструментів робить 3D-робочі процеси більш доступними та ефективними для дизайнерів, фахівців з анімації, VFX, AR/MR/VR, розробки ігор і всіх видів візуалізації [9].



Рисунок 2.4 – Робочий простір Сінема 4D

Інтерфейс програми побудований дуже просто, а її функції легкі для розуміння, що дозволяє навіть недосвідченим користувачам швидко освоїтись. Cinema 4D є ключовим елементом робочого процесу, тому розробники, додаючи нові функції, прагнуть зберегти інтуїтивну простоту та логічно інтегрувати їх в інтерфейс. При необхідності, робоче середовище можна налаштувати відповідно до особистих уподобань для комфортнішої роботи.

Cinema 4D пропонує широкий спектр можливостей для неструктурного редагування: процедурні текстури, шейдери, параметричне моделювання тощо. Система дублювання дає змогу зберігати кілька версій сцени в одному файлі та керувати ними. Інтеграція з продуктами компанії Adobe, такими як After Effects, Photoshop, Illustrator т.д. дає можливість легкого імпорту та експорту файлів між цими програмами для ще більшої свободи при виборі інструментів для роботи над проектом.

Ця програма підходить як для 3D-художників початківців, так і для професіоналів індустрії – завдяки широкому набору інструментів, що дозволяють швидко досягати бажаних результатів.

3Ds Max, розроблений компанією Autodesk – це потужне програмне забезпечення для 3D-моделювання, анімації та рендерингу, яке широко використовується в різних галузях, включаючи кіно, ігри та дизайн. Особливої популярності програма набула в архітектурній візуалізації, завдяки своїм інструментам моделювання, високоякісному рендерингу та великій бібліотеці додатків, що підтримують специфічні архітектурні робочі процеси [10].

Основне застосування 3Ds Max в архітектурі - це візуалізація. Архітектори, дизайнери інтер'єрів та розробники використовують його для створення високоякісних фотореалістичних візуалізацій будівель, інтер'єрів та міських ландшафтів.

Ці візуалізації часто використовуються для презентацій клієнтам, у маркетингових цілях або для тестування дизайнерських ідей перед початком будівництва. За допомогою 3Ds Max дизайнери можуть створювати реалістичне

освітлення та деталізовані матеріали, які допомагають клієнтам краще уявити кінцевий результат. Приклад проекту будівлі наведено на рисунку 2.5.

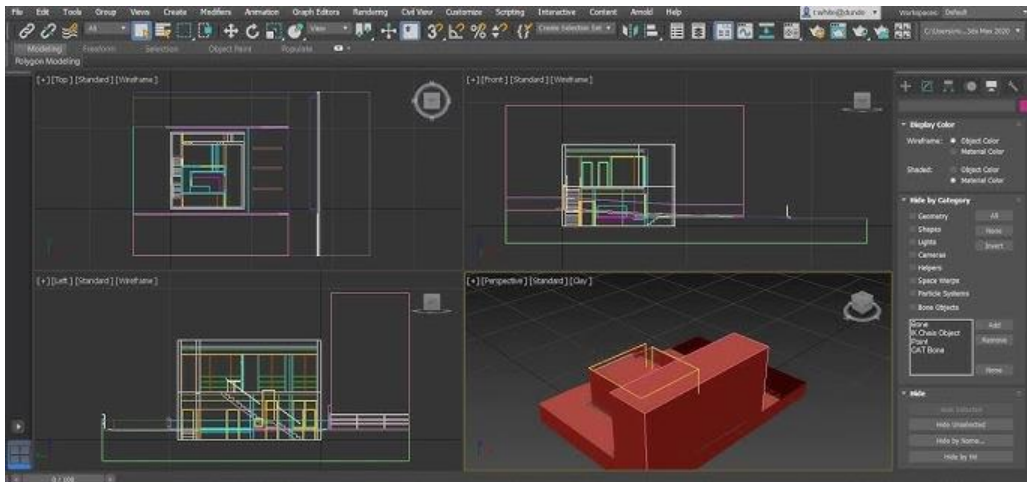


Рисунок 2.5 – Тривимірний план будівлі, розроблений у 3Ds Max

Просунуті інструменти 3Ds Max дають можливість працювати з проектами будь-якого масштабу – програма часто використовується як для моделювання інтер'єрів, меблів, освітлювальних приладів та дрібних архітектурних деталей оздоблення (рисунок 2.6), так і під час урбаністичного планування, коли потребується створити візуалізацію цілої будівлі, вулиці або частини міста.



Рисунок 2.6 – Інтер'єр, змодельований за допомогою 3Ds Max[11]

На даний момент це одна з найпопулярніших програм як серед новачків так і професіоналів, яка довго вважалася стандартом індустрії. Від концептуального моделювання до фотореалістичного рендерингу, 3Ds Max пропонує повний набір функцій, які оптимізують робочий процес, що робить його незамінним інструментом в архітектурі та дизайні.

Autodesk Maya - провідне програмне забезпечення для комп'ютерної 3D-графіки, яке широко використовується в кіно, телебаченні, ігровій та анімаційній індустрії. Відома своїми розширеними можливостями, Maya дає можливість створювати складні та високодеталізовані 3D-моделі, анімацію, візуальні ефекти та симуляції [12].

Однією з основних переваг Maya є її потужні інструменти моделювання та анімації персонажів. Розширений набір інструментів для моделювання в Maya дає творцям повний контроль над кожним аспектом їхніх моделей, від ліплення і текстурювання до уточнення деталей і топології.

Щодо анімації, Maya пропонує широкий набір інструментів, що робить її галузевим стандартом для аніматорів. Вона надає повний набір інструментів для анімації ключових кадрів, а також параметри процедурної анімації, такі як вирази обличчя та шляхи руху моделей (рисунок 2.7). Повзунок часу та графічний редактор Maya дають аніматорам точний контроль над часом і рухом, дозволяючи створювати реалістичні або стилізовані рухи персонажів. Ці можливості дозволяють імітувати рухи людини або істот з неймовірною точністю та плавністю.

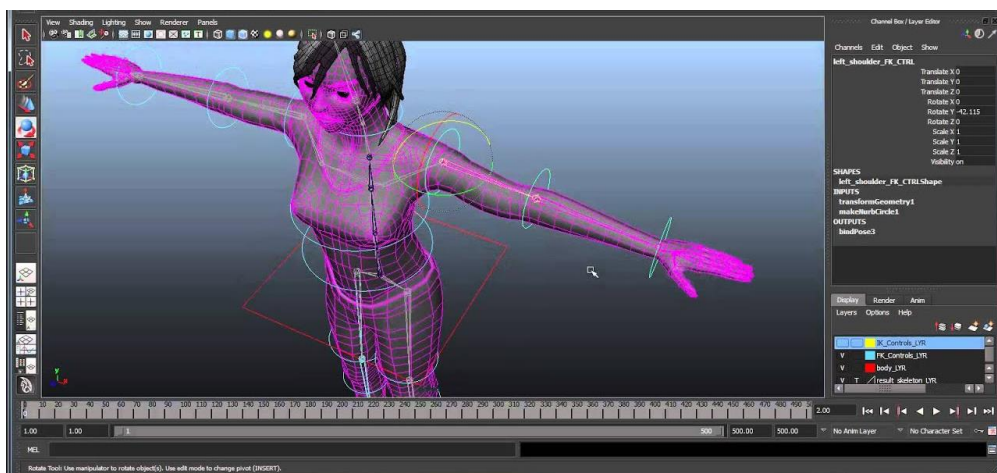


Рисунок 2.7 – Анімація персонажа у Maya

Однією з причин широкого використання Maya в анімації є її нелінійний робочий процес. Програма дозволяє художникам вносити зміни на будь-якому етапі виробництва, не порушуючи весь проект. Це особливо важливо в анімаційних конвеєрах, де коригування моделей, обладнання чи освітлення може знадобитися після того, як робота над анімацією вже розпочалася.

Blender 3D - це безкоштовна універсальна програма для роботи з 3D моделями. Окрім 3D-моделювання, дана програма підходить для широкого спектру застосувань, включаючи анімацію, візуальні ефекти, відеомонтаж, розробку ігор і навіть 2D-анімацію [13]. Вигляд інтерфейсу програми показано на рисунку 2.8. Оскільки Blender має відкритий вихідний код, програма безкоштовна для завантаження, використання та модифікації, що робить її доступною як для приватних осіб, так і для бізнесу без витрат на ліцензування. Це зробило програму популярною серед новачків, незалежних художників і навіть професіоналів будь-якої галузі, пов'язаної з 3D графікою.

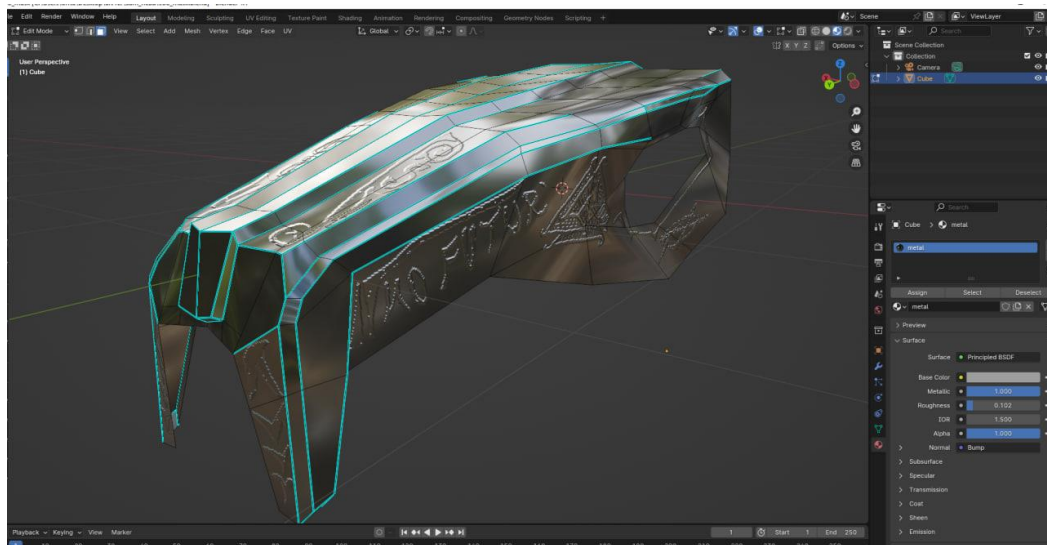


Рисунок 2.8 – Інтерфейс для полігонального моделювання у програмі Blender

Однією з визначних особливостей Blender є його всеосяжний набір інструментів, який дозволяє використовувати дану програму для будь-якого етапу роботи над проектом. Зручні інструменти дають можливість створювати високодеталізовані 3D-моделі за допомогою полігонального моделювання,

скульптингу, текстурування т.д. Програма пристосована для роботи з будь-якими типами моделей. Ознайомившись з усіма доступними інструментами, можна працювати як з архітектурою, так і над створенням персонажів, складних механізмів або спеціальних ефектів (дим, дощ, вогонь). На рисунку 2.9 наведено рендер моделі будівлі, розроблений мною під час практики на замовлення запорізької проектної організації у якості макету відновлення будівлі після руйнувань у наслідок бойових дій. Фото стану будинку в наслідок обстрілу можна побачити на рисунку 2.10.



Рисунок 2.9 – Рендер моделі будівлі, створеної в Blender



Рисунок 2.10 – Стан будівлі після обстрілу

Для аніматорів Blender надає потужний набір можливостей, включаючи анімацію ключових кадрів, інверсну кінематику для більш реалістичного руху персонажів та інструменти для малювання, які підтримують 2D анімацію всередині 3D простору. Програма має два вбудованих рушії рендерингу:

- Cycles - це рушій, що використовує систему трасування променів, для досягнення максимально реалістичного зображення;
- Eevee - це рушій, пристосований до візуалізації в реальному часі, призначений для швидкої візуалізації зображень на анімацій за рахунок відсутності складних розрахунків освітлення та матеріалів. Гнучкий у налаштуваннях, даний рушій працює аналогічно рушіям у відеоіграх, виводячи готове зображення або відео на екран з мінімальними часовими витратами на обчислення.

Інтеграція інструментів для редагування відео та композиції в Blender усуває потребу в зовнішньому програмному забезпеченні, дозволяючи користувачам вдосконалювати свої проекти, не виходячи з платформи. Він також підтримує широкий спектр форматів файлів і плагінів, забезпечуючи сумісність з іншими стандартними інструментами.

Переваги безкоштовності та відкритого вихідного коду Blender не обмежуються лише економією коштів. Оскільки вихідний код знаходиться у відкритому доступі, активна спільнота розробників та художників робить свій внесок у його постійне вдосконалення. Це забезпечує швидке оновлення, виправлення помилок і додавання передових функцій, що робить Blender конкурентоспроможним з дорогими комерційними альтернативами. При наявності навичок програмування мовами C++, C, Python користувачі також можуть налаштувати Blender під свої потреби, змінюючи його вихідний код або створюючи доповнення, що підвищує його гнучкість.

Провівши аналіз найпопулярніших програм для 3D моделювання, можна зробити висновки та обрати програму для виконання поставленої задачі.

Продукти компанії Autodesk – 3Ds Max та Maya є лідерами ринку тривимірної графіки. Вони зарекомендували себе у якості галузевого стандарту програмного забезпечення для моделювання. Основна різниця між цими двома продуктами

полягає в тому, що 3Ds Max більше підходить для моделювання архітектури, а Мауа для тривимірної анімації у мультфільмах та кіно [14]. Сінема 4D це популярна та конкурентоспроможна програма, але найкраще адаптованим для операційних систем MAC OS.

Також важливим фактором є те, що наведені вище програми потребують придбання ліцензії для використання, вартість якої може перевищувати дохід від її використання.

Blender доводить, що безкоштовне не завжди означає погане. Ця програма дуже швидко розвинулася, наздогнала платні аналоги за функціоналом та знайшла своє місце як у професійній індустрії, так і серед початківців. Універсальність програми надає багатий вибір інструментів для всіх задач.

Крім того, доступність Blender сприяє навчанню та підтримці спільноти. Численні навчальні посібники, форуми та ресурси доступні онлайн, часто надані досвідченими користувачами, що полегшує новачкам розвиток їхніх навичок. Ця екосистема розширює можливості глобальної спільноти творців, які обмінюються знаннями та співпрацюють над проектами, що сприяє подальшому зростанню популярності програми.

Таким чином, для роботи над проектом було обрано програму Blender через її широкий функціонал та повну безкоштовність у використанні. Додатково, на мій вибір вплинула наявність минулого досвіду використання Blender для роботи над проектами, що включали як 3D моделювання, так і анімацію (див. рисунок 2.9).

2.3 Розробка непрозорої моделі

Першим об'єктом моделювання стане непрозора, зовнішня модель, яка буде в подальшому використана для анімації рухів робота.

Вхідні дані. Для початку розробки моделі, необхідно знайти референси. Референс (англ. reference) – креслення, малюнки або фотографії, які слугують у

якості орієнтирів у малюванні, дизайні, 3D моделюванні, анімації тощо. Такі орієнтири необхідні для точного дотримання форми, пропорцій та інших властивостей модельованого об'єкта [15].

При створенні рухомої зовнішньої моделі робота, найкращим варіантом буде знайти креслення з точною інформацією про розміри, щоб впевнитись що модель буде відповідати задуманим властивостям. Креслення та допоміжні зображення, що були використані при моделюванні, наведено на рисунках 2.11 та 2.12.

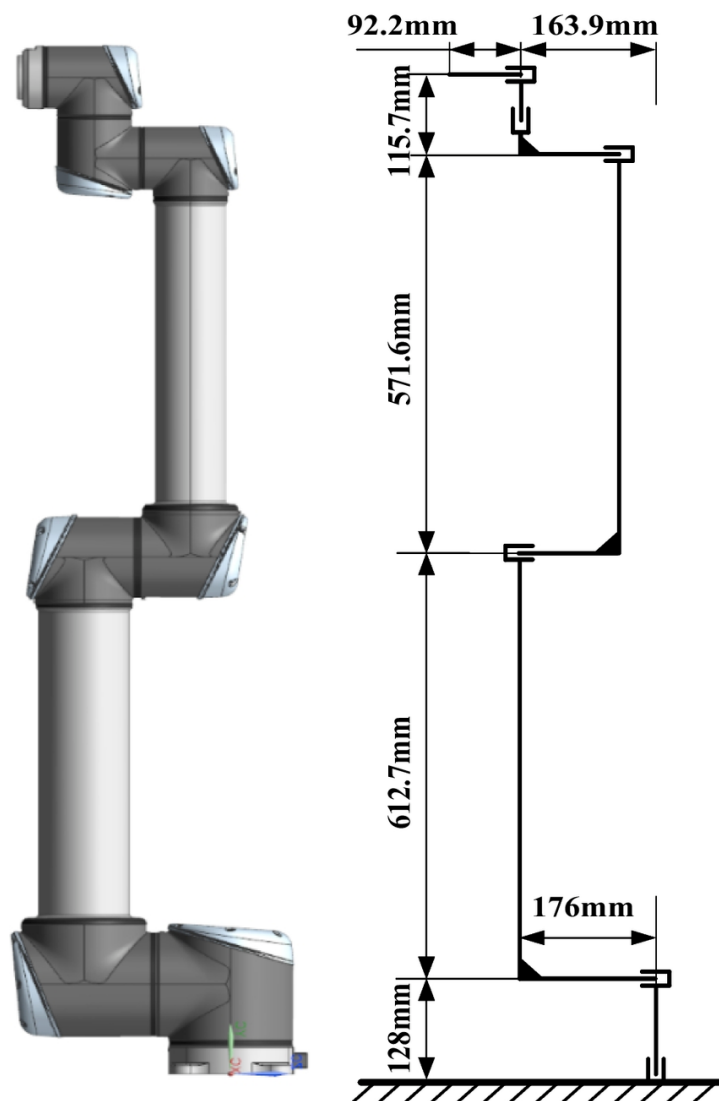


Рисунок 2.11 – Інформація про відстань між суглобами робота

UR10 working area, top view

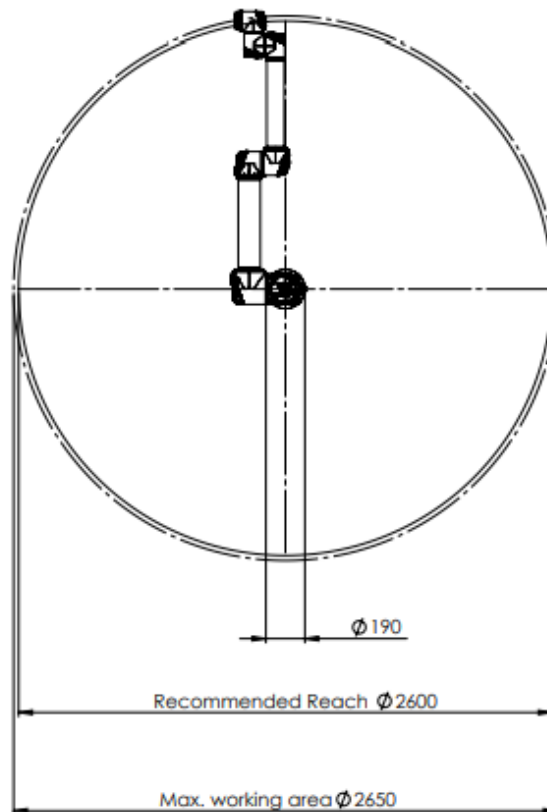


Рисунок 2.12 – Додаткова інформація про розміри та робочий простір робота

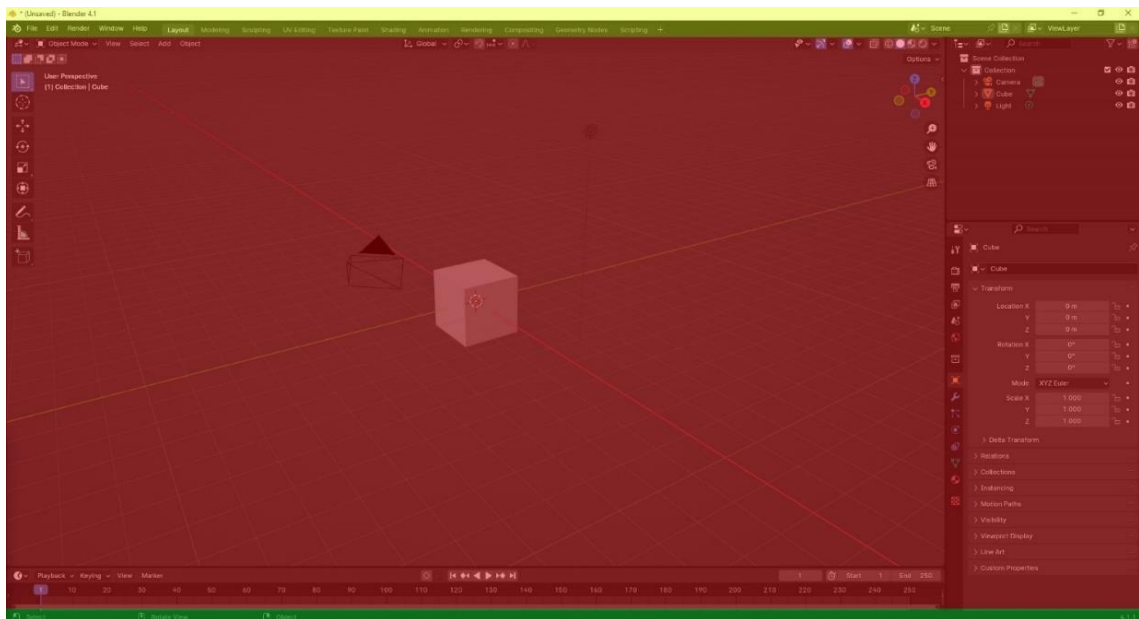
Інтерфейс програми Blender. При відкритті Blender, на екрані з’явиться вікно заставки, де можна вибрати тип проекту. Для моделювання поверхні твердого тіла найкраще підходить проект типу “General”. Вибравши тип проекту, ми побачимо у інтерфейсі такі основні елементи:

Інтерфейс Blender'a розділено на три основні частини:

- панель навігації у верхній частині (на рисунку 2.12 підсвічено жовтим), що складається з головного меню, яке використовується для збереження, імпорту та експорту файлів, налаштування параметрів та візуалізації, а також інших функцій;
- область посередині екрану (на рисунку 2.12 підсвічено червоним), яка є основним робочим простором. У стандартному проекті тут можна побачити вікно тривимірного простору зі стартовими елементами звичайного проекту (камера, 3D куб та лампа освітлення), меню елементів у правій верхній частині, де перелічено всі об’єкти, присутні в проекті та меню властивостей у правій нижній частині, де

можна контролювати як властивості проекту (наприклад якість візуалізації), так і властивості кожного окремого об'єкта. Загалом, центральна робоча зона інтерфейсу програми Blender не є фіксованою і може змінюватися як при перемкненні набору інструментів (моделювання, скульптинг, текстурування тощо), так і за бажанням користувача;

- панель стану внизу (на рисунку 2.13 підсвічено зеленим), де відображаються пропозиції щодо швидкого доступу та відповідна статистика.



Рисунк 2.13 – Інтерфейс стандартного проекту в Blender

Інструменти моделювання твердого тіла, які знадобляться при роботі:

- Select (Вибір об'єкта) – потрібен для вибору конкретного об'єкта для подальших маніпуляцій та для контролю властивостей об'єкта;
- Extrude (Витискання) – Інструменти витискання дублюють вершини, зберігаючи при цьому зв'язок нової геометрії з оригінальними вершинами. Вершини перетворюються на ребра, а ребра формують грані. Цей інструмент має першорядне значення для створення нової геометрії;
- Loop Cut (Циклічний розріз) – цей інструмент розділяє контур граней, вставляючи новий замкнений реберний ланцюг, що перетинає вибрану грань;

- Add (Додавання нових об'єктів) – інструмент що дозволяю створювати прості двовимірні та тривимірні фігури, які в подальшому можуть бути використані як окремі об'єкти або приєднані до вже існуючих для пришвидшення роботи при створенні нової геометрії;
- Bevel (Скошення кута) – інструмент дозволяє створювати скошені або закруглені кути на геометрії. У реальному світі краї та кути дуже рідко бувають ідеально гострими, більшість країв навмисно скошені з механічних або практичних причин. Скоси також корисні для надання реалістичності неорганічним моделям. У реальному світі неідеально гострі краї об'єктів ловлять світло і змінюють затінення по краях: це надає об'єктам цілісного, реалістичного вигляду, на відміну від об'єктів без скосів, які можуть виглядати надто ідеальними;
- Knife (Ніж) – інструмент «Ніж» можна використовувати для інтерактивного поділу (розрізання) геометрії шляхом малювання ліній або замкнутих контурів для створення отворів;
- Move, Rotate, Scale (Переміщення, Обертання, Масштабування) – інструменти простої трансформації, що дозволяють переміщувати, обертати та змінювати масштаб об'єктів у тривимірному просторі;
- Fill (Заповнення) – інструмент створює трикутні грані з будь-якої групи виділених ребер або вершин, якщо вони утворюють один або більше повних периметрів. Також існує опція “Заповнення сіткою”. Дана опція використовує пару з'єднаних крайових петель або одну замкнену крайову петлю для заповнення простору сіткою з чотирикутників, яка повторює навколишню геометрію. Найкращого передбачуваного результату можна досягти, якщо вибрати два протилежні крайові контури з однаковою кількістю вершин. Якщо вибрано один замкнутий контур, за допомогою параметрів Span/Offset(Розкид/Зсув) можна налаштувати спосіб визначення двох протилежних контурів з одного замкнутого контуру;
- Bridge (Міст) – інструмент, схожий по функціоналу на Fill(Заповнення), який слугує для створення граней між двома окремими та непов'язаними частинами об'єкта (утворює “міст”, що поєднує окрему геометрію);

- **Modifiers (Модифікатори)** – це автоматичні операції, які впливають на геометрію об'єкта недеструктивним способом. За допомогою модифікаторів ви можете автоматично виконувати багато операцій над об'єктами, які б інакше були занадто трудомісткими (наприклад, створення масиву), не впливаючи на базову геометрію вашого об'єкта. Модифікатори змінюють спосіб відображення та візуалізації об'єкта, але не його геометрію, яку ви можете редагувати безпосередньо. Ви можете додати кілька модифікаторів до одного об'єкта, щоб сформувати стек модифікаторів, і застосувати модифікатор, якщо бажаєте зробити його зміни постійними.

Хід роботи. Після запуску програми Blender та вибору проекту типу “General” на екрані заставки, потрібно зберегти проект. Потрібно обрати у верхній панелі опцію File > Save, зазначимо ім'я проекту та виберемо пусту папку, в якій буде збережено файли проекту. Далі, для оптимізації навантаження на комп'ютер при рендері зображень з реалістичним світлом, можна переназначити задачу обробки та візуалізації моделей з процесора на відеокарту. Для цього потрібно у верхній панелі обрати Edit > Preferences > System та у верхній частині вікна “Cycles Render Devices” зняти галочку з процесора і поставити її на відеокарту.

Також потрібно обрати технологію рендеру:

- якщо комп'ютер оснащений відеокартою з технологією трасування променів RTX, то варто обрати OptiX;
- в усіх інших випадках, включаючи комп'ютери без окремої відеокарти, в яких навантаження буде припадати на процесор та вбудовану в нього відеокарту, слід обрати CUDA [16].

Примітка: для роботи над моделлю знадобляться додаткові прості фігури, що знаходяться в офіційному безкоштовному аддоні для Blender – Extra Objects. Для активації аддону потрібно у верхньому меню обрати Edit > Preferences > Addons та поставити галочку у списку навпроти всіх аддонів, підписаних як Extra Objects.

Спочатку видалимо зайві об'єкти – куб та лампу освітлення, виділивши їх лівою кнопкою миші (далі ЛКМ) та натиснувши клавішу Delete. Камера

знадобиться пізніше при рендері анімацій та тестових фото рендерів, тому її можна або видалити, або приховати, клікнувши на іконку ока навпроти камери в списку об'єктів проекту.

Першим етапом при моделюванні буде розміщення референсу в просторі для 3D моделювання. Потрібно закріпити обзор камери на осі Y – для цього перемістимо камеру в потрібне положення, натиснувши клавіші Num1, потім Num9. Далі, натискаємо Shift+A (відкриття меню додавання об'єктів Add) та у з'явившомуся меню обираємо Image > Reference. Після цього слід перемістити доданий референс вбік, щоб він не пересікався з моделлю.

Тепер необхідно за розмірами, вказаними на референсі, створити допоміжний каркас з точок, що слугуватиме для розміщення трубок та суглобів робота. У меню Add додаємо точку обравши пункт Single Vert > Add Single Vert та впевнюємось, що точку було створено в центрі координат.

У моделей в Blender є два режими – режим об'єкта та режим редагування. У режимі об'єкта модель можна рухати, змінювати за розміром та обертати. Режим редагування потрібен, щоб редагувати модель – її полігональну сітку, ребра, грані тд. Перехід між режимом об'єкта та режимом редагування здійснюється клавішею Tab.

Далі, натискаємо на точку в меню об'єктів або у 3D просторі, щоб обрати її та натискаємо E (інструмент Extrude). Дана маніпуляція створить ще одну точку, яку поєднує з оригінальною точкою ребро. Натискаємо праву кнопку миші (далі ПКМ), щоб точка перестала слідувати за курсором миші, та у меню налаштувань інструмента Extrude, що з'явиться у нижньому лівому куті, в метрах вписуємо відстань, вказану на кресленні. Через це меню, нову точку можна перемістити по вісі координат XYZ, вводячи у відповідні поля як позитивні так і негативні значення. Після цього, натискаємо ЛКМ на новостворену точку, та повторюємо операцію Extrude для створення нової точки під майбутній суглоб. Орієнтуючись на креслення, аналогічно додаємо по одній точці на кожний наступний суглоб моделі. В кінці маємо отримати 9 точок, поєднаних одним ланцюгом. Готовий каркас можна побачити на рисунку 2.14.

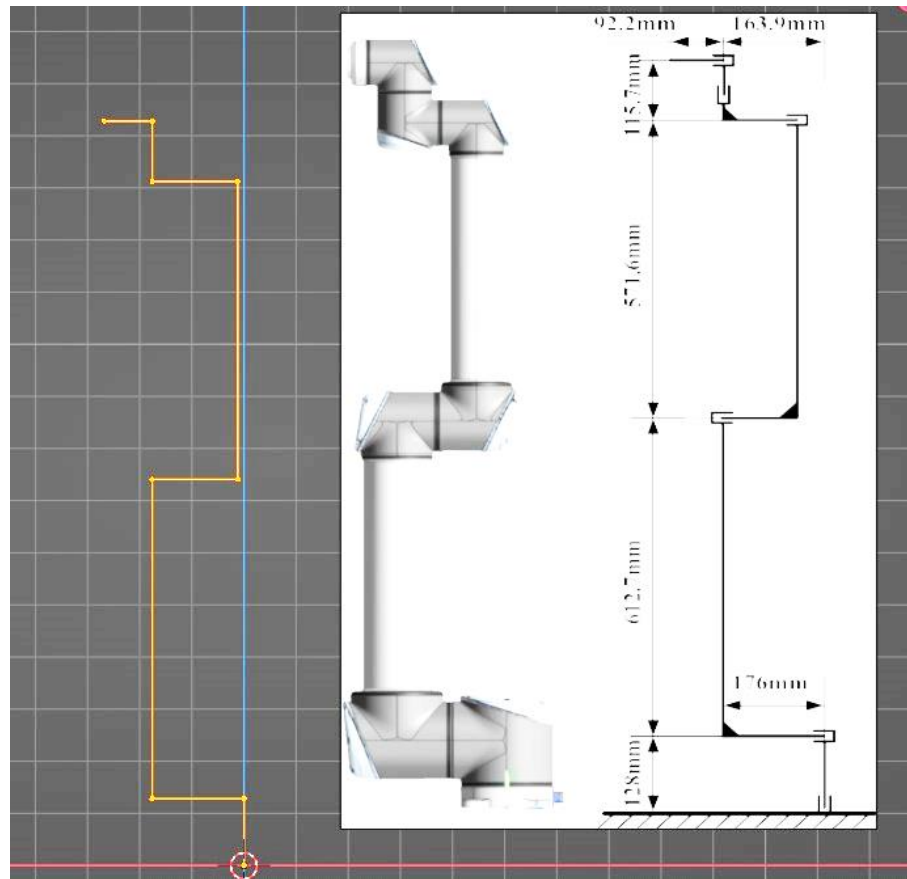


Рисунок 2.14 – Каркас з точок та ліній, створений за кресленням

Тепер почнемо моделювати безпосередньо суглоби та трубки, з яких зібраний робот. Найбільш підходячою фігурою для нашого випадку буде циліндр. Створюємо його через меню Add > Cylinder та у меню створення фігури вказуємо розміри суглоба з креслення та кількість граней. В нашому випадку, оптимальним вибором між зовнішнім виглядом та економією ресурсів стане 12 граней. Циліндр буде простим у редагуванні через низьку кількість полігонів, в подальшому їх кількість буде збільшено за допомогою модифікаторів.

Перша точка буде слугувати вказівкою для деталі, що відповідає за кріплення робота до поверхні. Закріпимо циліндр на другій точці скелета за допомогою 3D курсору: виділивши скелет моделі натисканням ЛКМ, переходимо у режим редагування. Оберемо другу точку та відкривши меню 3D курсору комбінацією клавіш Shift+S, оберемо Cursor to Selected (переміщення курсору до вибраного об'єкту). Далі, вийшовши з режиму редагування, обраємо циліндр та через меню 3D курсору виберемо Selected to Cursor (переміщення вибраного

об'єкту до курсору). Таким чином ми будемо розміщувати всі коліна моделі на точках скелету, після чого помістимо в необхідних місцях між ними металеві трубки, що теж будуть утворені з циліндрів.

Тепер можна приступити до придання циліндру форми суглоба робота. Перемістимо та змінимо розмір референса так, щоб ширина першого суглоба робота співпадала з шириною циліндра (рисунок 2.15).

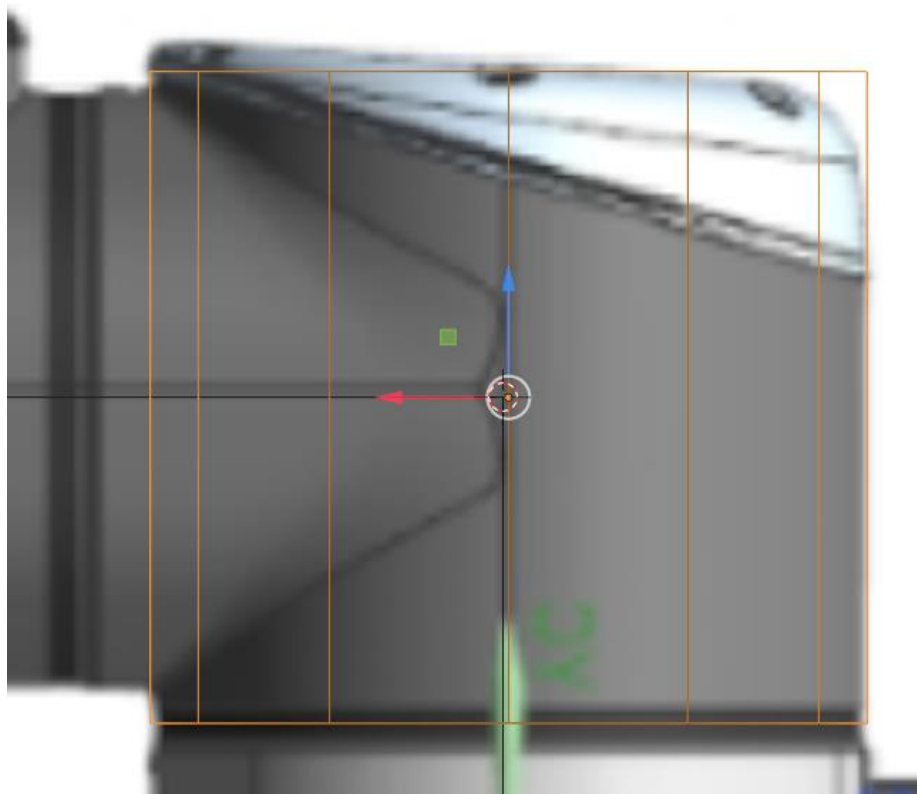


Рисунок 2.15 – Вирівнювання референсу під модель

Уявимо, що один суглоб робота являє собою перетин двох циліндрів. Додамо ланцюг граней посередині нашого циліндра, перейшовши в режим редагування та натиснувши Ctrl+R (Loop Cut). Після цього дублюємо даний циліндр комбінацією Shift+D, переносимо його вліво по осі X (щоб переміщувати об'єкти чітко по осям, можна після натискання G обрати вісь для переміщення\трансформації, натиснувши клавішу X, Y або Z). Потім повертаємо його на 90 градусів по осі Y, натиснувши R та рухаючи мишку, утримуючи клавішу Ctrl для інкрементного

повертання об'єкта по інтервалам у 5 градусів. Поєднуємо два циліндри у один об'єкт комбінацією Ctrl+L.

Тепер почнемо процес об'єднання двох циліндрів для повторення форми суглоба. Додамо до оригінального циліндра ще два ланцюжки граней: один нижче центрального та один вище. У верхній центральній панелі ввімкнемо примагнічування до точок (Snap with > Vertex) та вирівняємо два новостворених ланцюжка граней по границям нового циліндра (рисунок 2.16).

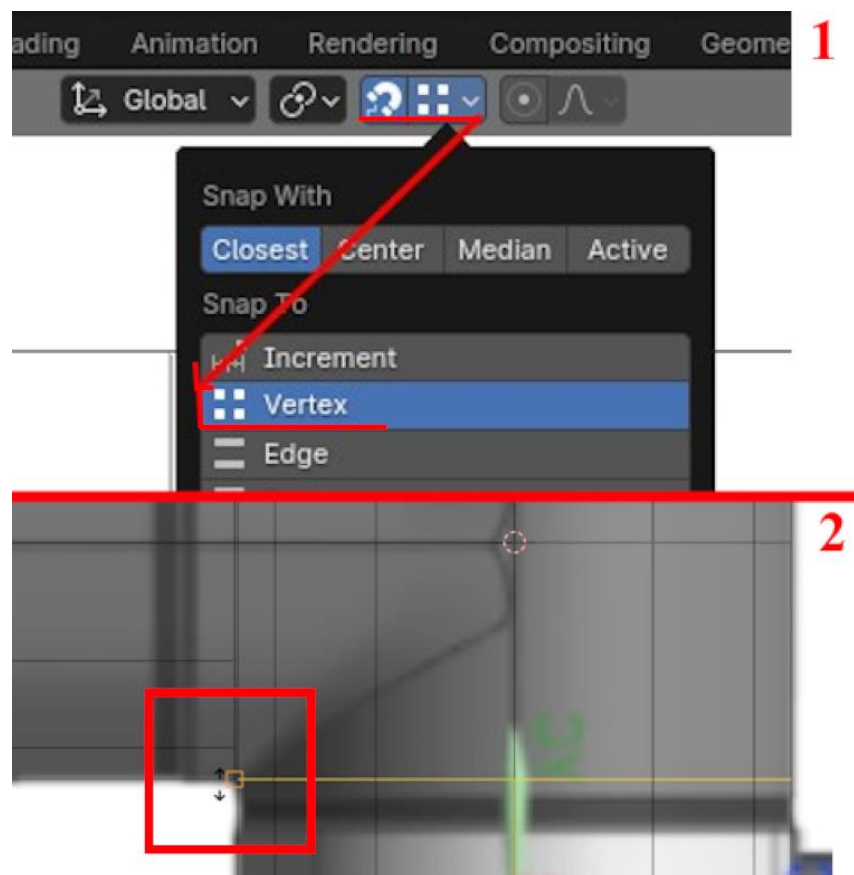


Рисунок 2.16 – Вирівнювання положення циліндрів за допомогою магніту

Далі, оберемо інструмент Knife клавшею K та, орієнтуючись на референс на фоні, виріжемо частину оригінального циліндра, де він має перетікати в новий. Видалимо непотрібні грані та вирівняємо положення по осі Z точок старого циліндра з точками нового за допомогою примагнічування (рисунок 2.17-1), після чого поєднуємо об'єкти в одну деталь інструментом Bridge (виділяємо два ланцюга ребер комбінацією ALT+Shift, та натискаємо ПКМ > Bridge Edge Loops).

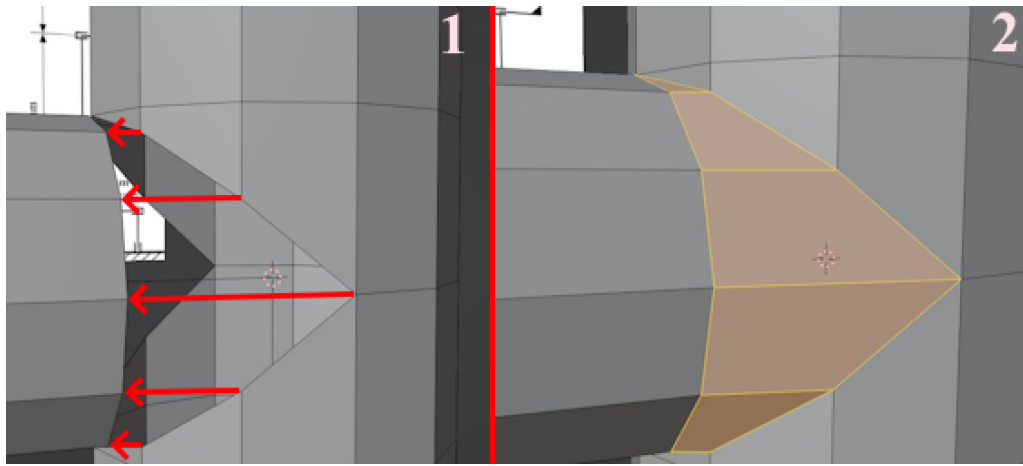


Рисунок 2.17 – Вирівнювання точок окремих частин об'єкта (1) та поєднання двох циліндрів (2)

Поєднавши два циліндри (рисунок 2.17-2), треба збільшити кількість ребер на границях об'єднання за допомогою інструмента Bevel (виділяємо ребра, які поєднують два циліндри, натискаємо Ctrl+B) для того щоб запобігти утворення візуальних артефактів на моделі. Тепер необхідно прибрати зайву геометрію з границь об'єднання. Виділимо ланцюжок ребер та “розчинимо” його, обравши ПКМ > Dissolve Edges. Об'єднаємо зайві точки для спрощення геометрії об'єкта та запобігання появи артефактів при збільшенні деталізації, викликавши клавішею M функцію Merge > (At center\at last\at first). Аналогічно виправляємо геометрію у нижній та верхній частинах моделі. Процес вирішення зайвих точок на місцях стику двох циліндрів після операції Bevel продемонстровано на рисунку 2.18.

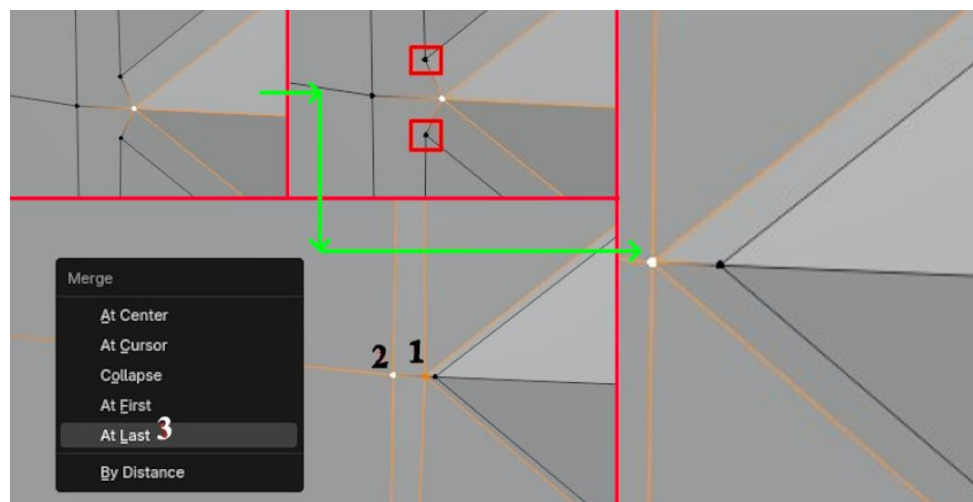


Рисунок 2.18 – Прибирання зайвих точок на стику циліндрів

Далі, орієнтуючись на референс, використовуємо вже відомі інструменти для утворення кришки суглоба: вирізаємо форму для кришки суглоба за допомогою Knife, додаємо нову геометрію через Extrude та підганяємо її під необхідну форму інструментами трансформації. Пласку поверхню кришки заповнюємо за допомогою Bridge faces, після чого поділяємо отримані грані навпіл через Loop Cut та підтягуємо отримані точки до країв кільця, виконавши Merge by Last. Процес моделювання кришки суглоба коротко продемонстровано на рисунку 2.19.

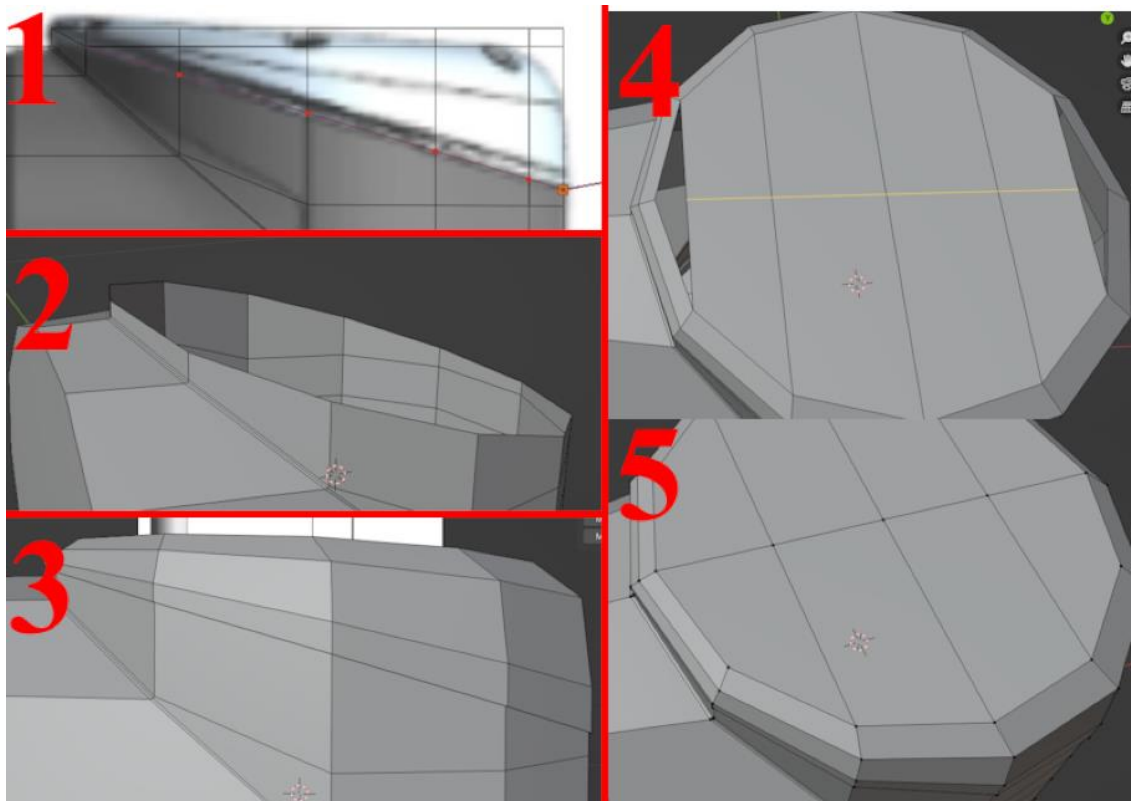


Рисунок 2.19 – Етапи моделювання кришки суглоба

В наступну чергу потрібно задати форму труби, яка поєднує суглоб з наступним. Щоб не втратити форму труби при моделюванні невеликого потовщення на ній, необхідно спочатку виконати Extrude по ланцюгу ребер труби, а потім виконати потовщення труби через Extrude, але обравши не ребра, а новоутворені грані. Таким чином, на іншій стороні труби залишиться кільце з ребер, що зберегло оригінальний радіус труби. Виділяємо ці ребра і продовжуємо трубу після потовщення ще одним викликом команди Extrude.

Тепер додамо деталізації за допомогою модифікатора Subdivision. Модифікатор поверхні Subdivision (часто скорочено Subdiv) використовується для розбиття граней полігональної сітки на менші грані, надаючи їй більш гладкого вигляду. Він дозволяє створювати складні гладкі поверхні при роботі з моделлю низької деталізації. Це дозволяє уникнути необхідності зберігати і підтримувати величезні обсяги даних, а також надає об'єкту плавного та реалістичного вигляду.

Тримаючи модель суглоба виділеною, у правому нижньому меню властивостей знаходимо підменю модифікаторів (іконка гаєчного ключа) та знаходимо у випадаючому меню Subdivision Surface. Для нашої моделю достатньо буде виставити рівень деталізації на 2. Тепер необхідно задати моделі гострі кути. Для цього підійде інструмент Crease (Складки). Виділяємо ланцюги ребер, з яких потрібно прибрати плавність, натискаємо Shift+E та тягнемо мишку вниз\вверх, доки кут не стане гострим. На рисунку 2.20 наведено всі кути, які довелося загострити інструментом Crease.

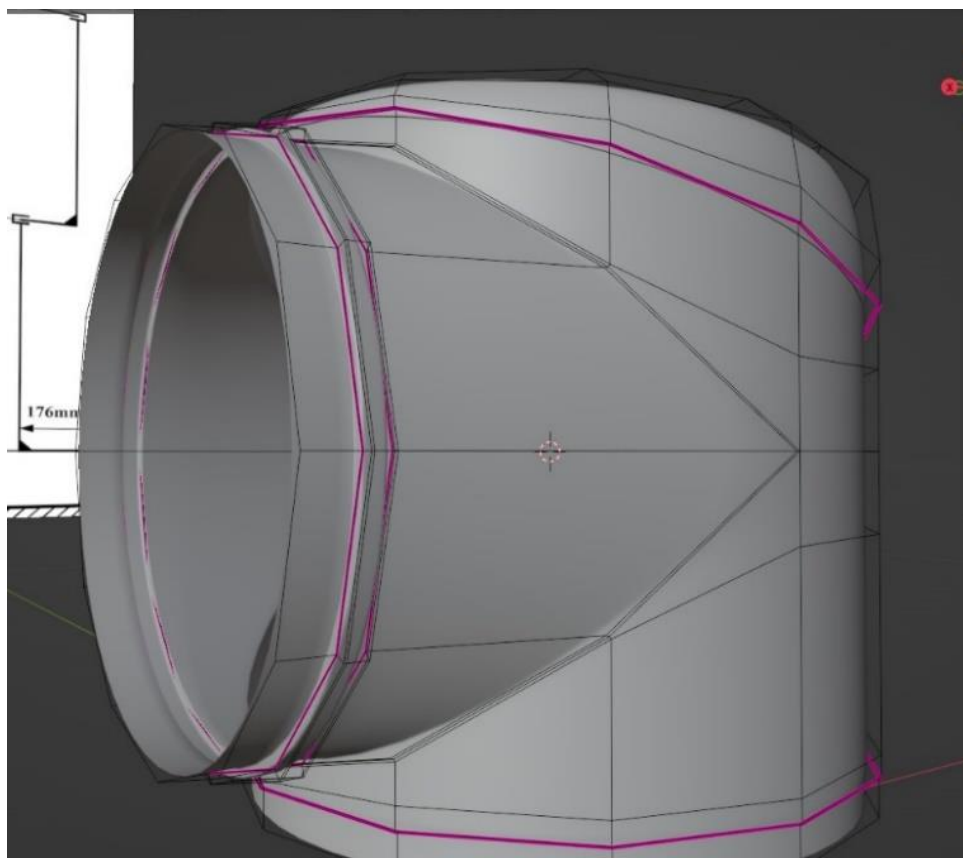


Рисунок 2.20 – Кути моделі, загострені інструментом Crease після підвищення деталізації

Тепер, модель суглоба готова, створимо та накладемо на неї матеріали. Суглоб ззовні виглядає полімерним та має три основних кольори – блакитний, сірий та чорний. В меню матеріалів об’єкта (іконка червоного кола внизу) додаємо нові матеріали, натиснувши “+”, для зручності назвемо їх “Polymer_(колір)”. Поле Base Color дає можливість задати колір для матеріала, а Roughness – блискучість або матовість. Додатково, для металевих трубок, які буде змодельовано на наступному етапі, та кріплення інструмента знадобиться ще один матеріал. Для надання поверхні металевого вигляду, виставляємо Base Color сірим, а параметр Metallic – на максимальне значення.

Можна почати збирати робота. Копіюємо перший суглоб комбінацією Shift+D, та орієнтуючись по референсу, переносимо копію на місце наступного суглоба та інструментами повороту приводимо деталь в потрібне положення. Суглоби в різних сегментах робота мають різний розмір, орієнтують на креслення та референси, надаємо новим суглобам потрібний розмір та положення в просторі. Дві металеві трубки, що знаходяться між групами суглобів, моделюються зі звичайних циліндрів інструментами, використаними раніше при створенні суглобів. На останньому суглобі знаходиться кріплення для інструмента – його було створено аналогічно трубкам з використанням інструментів Extrude та Scale. Кнопка на верхівці кріплення являє собою простий малий циліндр. Останньою створеною деталлю стала база, на якій робот закріплюється до поверхні. Дана деталь теж була утворена з циліндра, деталізацію було покращено модифікатором Subdivision, а щоб не моделювати отвори для болта 4 рази, три четверті моделі було видалено та віддзеркалено по осям X та Y за допомогою модифікатора Mirror.

Останнім етапом роботи над непрозорою моделлю є найменування об’єктів для спрощення орієнтування в проекті. Модель робота складається з бази (C_0_Base), семи суглобів (C_(1-7)_(shoulder/elbow/hand)), кнопки, що розташована на останньому суглобі (C_7_hand_button) та двох металевих трубок (Tube_lower/upper). Готову модель можна побачити на рисунку 2.21.

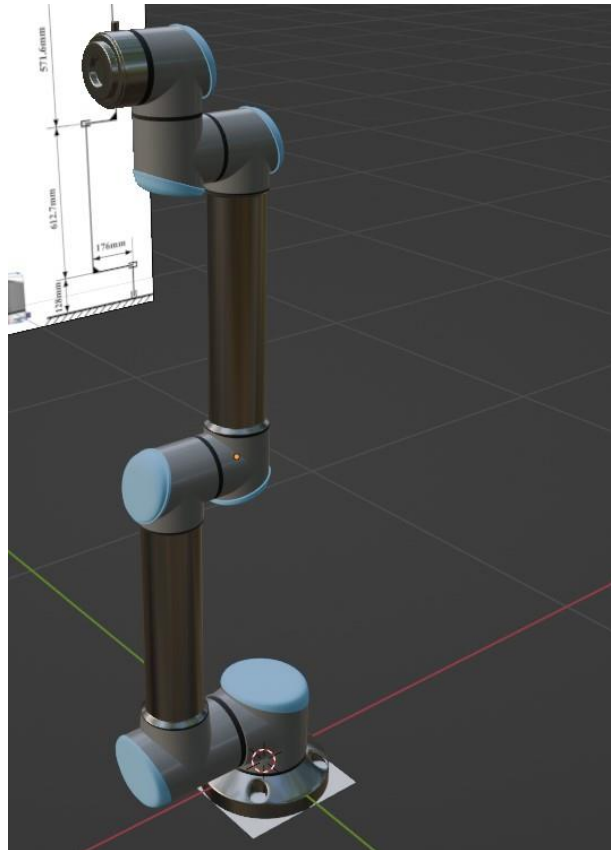


Рисунок 2.21 – Непрозора модель робота

На цьому етапі роботи краще створити копію проекту, для цього у верхньому меню обираємо File > Save As та зберігаємо файл під іншим ім'ям.

2.4 Розробка прозорої моделі

Другим об'єктом моделювання стане внутрішній механізм, який відповідає за рухи суглобів робота. Ця модель в подальшому буде поміщена всередину моделі робота, що була розроблена в минулому розділі та використана при демонстрації роботи внутрішніх механізмів маніпулятора. Даний розділ описує процес моделювання механізму для суглобів “плеча” робота, яке знаходиться в самому низу. При необхідності, модель двигуна можна змінити за розмірами та помістити в інше суглоби моделі або змоделювати інший механізм аналогічним способом.

У якості референсу було використано схему конструкції двигуна для суглоба, представлену на рисунку 2.22.

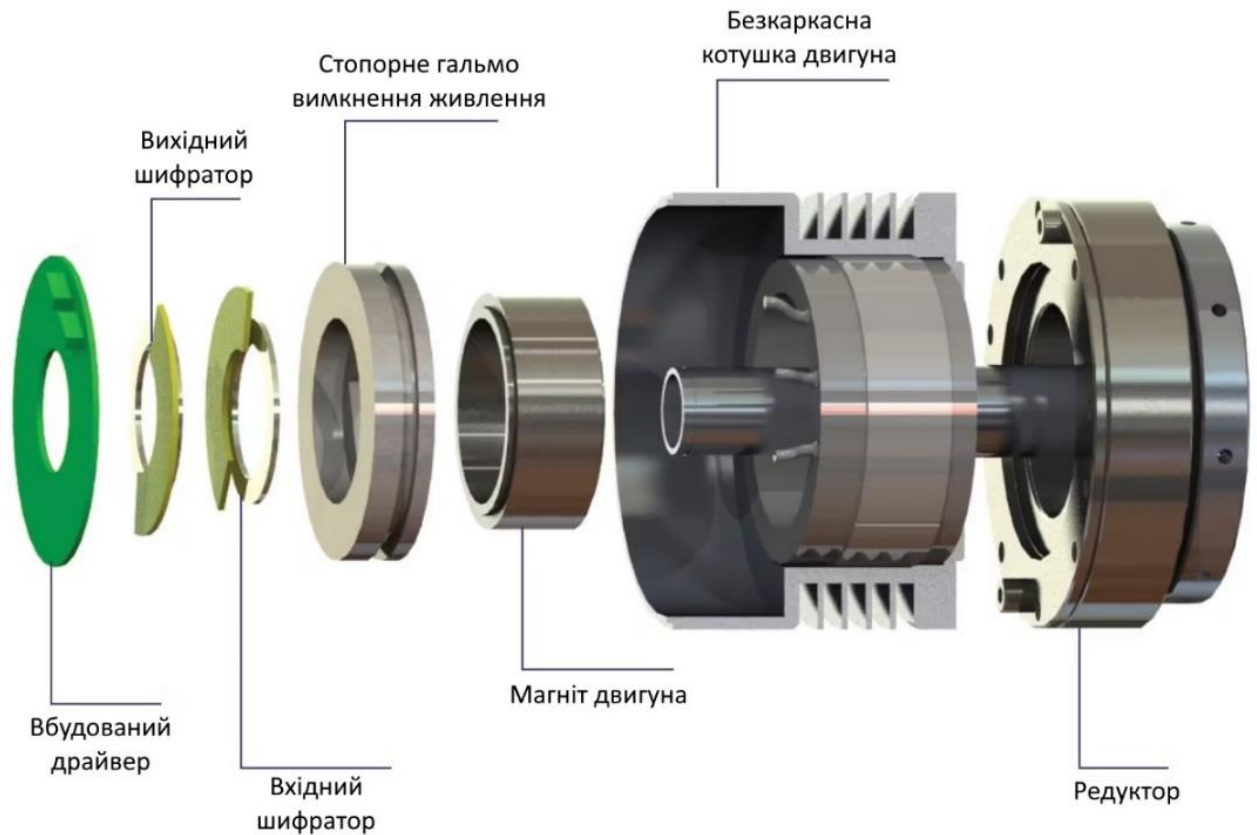


Рисунок 2.22 – Конструкція механізму суглоба робота-маніпулятора[17]

Інструменти. При розробці прозорої моделі ми будемо використовувати техніки та інструменти, які вже було описано у минулому розділі.

З нових інструментів варто зазначити Модифікатор “Масив” та Інструмент “Обертання”.

Модифікатор “Масив” (англ. Array Modifier) створює копії базового об’єкта, причому кожна копія зміщується відносно попередньої у будь-який з можливих способів. Вершини у сусідніх копіях можуть бути об’єднані, якщо вони знаходяться поруч, що дозволяє створювати правильну полігональну поверхню, ніби копії, що перетинаються, є цілісним об’єктом.

Цей модифікатор може бути корисним у поєднанні з тайловими об’єктами для швидкої розробки великих сцен (тайлові об’єкти – моделі, края яких формують

“пазл”, даючи ставити їх один біля одного без редагування та підгону границь об’єктів). Він також корисний для створення складних форм, що повторюються. Кілька копій даного модифікатора можуть бути активними для одного об’єкта одночасно [18].

Інструмент Обертання (англ. Spin) – видавлює (або дублює, якщо виділено багато елементів) виділені елементи, обертаючи їх навколо певної точки та осі.

Цей інструмент використовується для створення об’єктів, подібних до тих, які можна виготовити на токарному верстаті. Фактично, він виконує своєрідне кругове видавлювання вибраних елементів, центром якого є 3D-курсор та вісь, перпендикулярна до робочого вигляду:

- точка зору визначатиме, навколо якої осі обертається новостворена геометрія;
- положення 3D-курсору буде центром обертання при створенні нової геометрії [19].

Хід роботи. Першим кроком буде відкрити копію проекту, створену раніше, та накласти на модель робота всі модифікатори. Для цього заходимо в меню модифікаторів кожної деталі робота і натискаємо “Apply”. Оригінальний проект моделі робота з ненакладеними модифікаторами залишаємо збереженим окремо, на випадок якщо модель потрібно буде відредагувати або змінити.

Приховаємо всі елементи робота, окрім одного суглоба, у який плануємо помістити механізм, виділивши непотрібні деталі та натиснувши H. Для того, щоб зробити деталі знову видимими, натискаємо на іконку заплющеного ока у вікні елементів проекту або натискаємо ALT+H, щоб відобразити всі приховані об’єкти. Як і у минулому розділі, додаємо у робочий простір всі необхідні референси. Розмір референса підбираємо, орієнтуючись на деталь моделі, в яку його буде поміщено. Також рекомендується створити у вікні елементів проекту нову папку та назвати її наприклад “Motor”, щоб об’єкти моделі механізма не знаходилися в одній папці та не перемішувалися з частинами робота.

Оскільки всі моделі двигуна мають циліндричну та симетричну форму, буде описано два методи, які можна використати для моделювання таких деталей.

В першу чергу, створимо модель котушки двигуна за допомогою інструменту Обертання. Додаємо нову точку, та інструментом Extrude витягуємо з неї інші точки, повторюючи форму деталі в розрізі.

Тепер перемістимо 3D курсор у центр суглоба, обравши найвищчу та найнижчу точки труби, та виконавши переміщення курсора між ними за допомогою Cursor to Selected. Курсор буде слугувати як центральний орієнтир для інструменту Обертання. Тепер необхідні виставити ракурс камери в правильне положення – в нашому випадку це вісь X з мінусом. У режимі редагування, виділяємо всі створені точки натиснувши A, обираємо інструмент Spin, виставляємо у правому верхньому меню вісь обертання X та починаємо обертати об'єкт. На цьому етапі у лівому нижньому краю вікна з'явиться меню роботи з інструментом. В меню виставляємо Angle 360 та ставимо галичку навпроти Auto Merge, щоб створити ідеально круглу та замкнену саму на себе деталь. Параметр Steps контролює, скільки разів інструмент скопіює оригінальну форму, таким чином контролюючи деталізацію та округлість отриманого об'єкта. В даному випадку Steps було виставлено на 36 (рисунок 2.23).

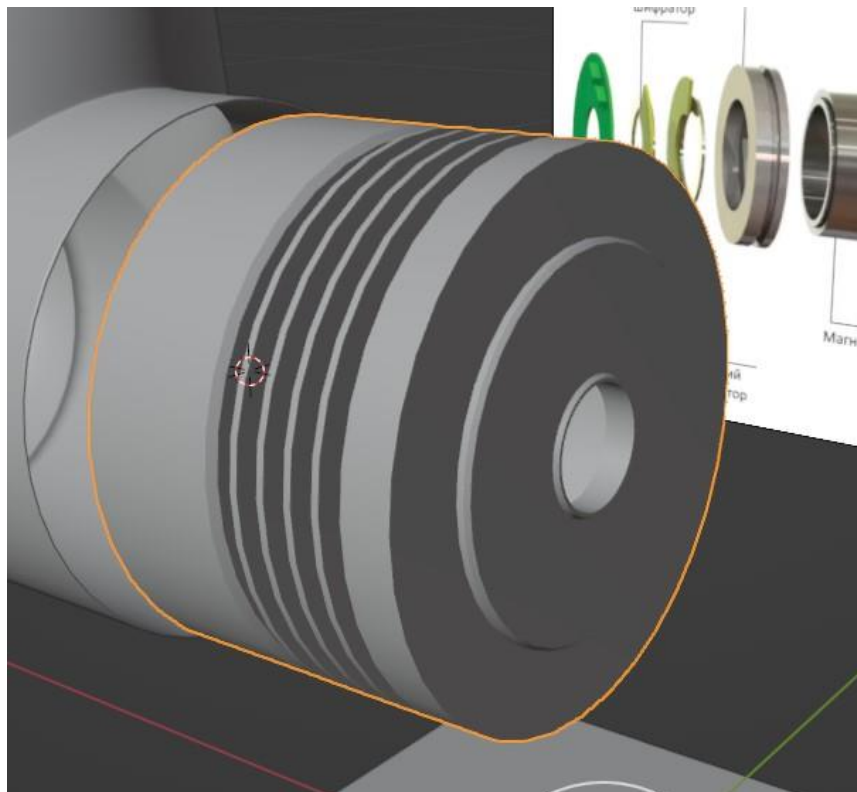


Рисунок 2.23 – Модель котушки двигуна

Тепер використаємо другий метод - Радіальний Массив. Принцип даного методу моделювання буде продемонстровано при створенні підшипників редуктора. Переставимо 3D курсор на центр котушки та створимо пустий елемент (Shift+A > Empty > Plain Axes). Дана фігура не має тривимірної форми та буде слугувати у якості центру обертання нашого масиву. Створимо об'єкт Icosphere, зменшимо його та перемістимо вниз чітко по осі Z, орієнтуючись на референси або креслення. Також додамо куб, інструментами редагування створимо з нього деталь підтримки підшипників та помістимо її біля кулі. Поєднаємо ці два об'єкти в один, натиснувши Ctrl+J. Підшипник даного робота складається з 23 металевих кульок. У властивостях об'єкту додамо до нього модифікатор масиву Array. Зміщення Relative Offset по осям X,Y,Z поставимо 0.

Почнемо налаштування масиву: Перемістимо 3D курсор на центр координат (Shift+S > Cursor to World Origin), далі перенесемо пусту фігуру Plain Axes та наш підшипник до 3D курсору. Тепер у режимі редагування виберемо всю геометрію підшипника та перенесемо його вниз по координаті Z. Таким чином, “центр маси” підшипника залишиться в центрі пустої фігури, а геометрія об'єкта буде зміщеною відносно нього. Вийшовши з режиму редагування підшипника, виділимо пусту фігуру Plain Axes та почнемо повертати її по осі X (рисунок 2.24).

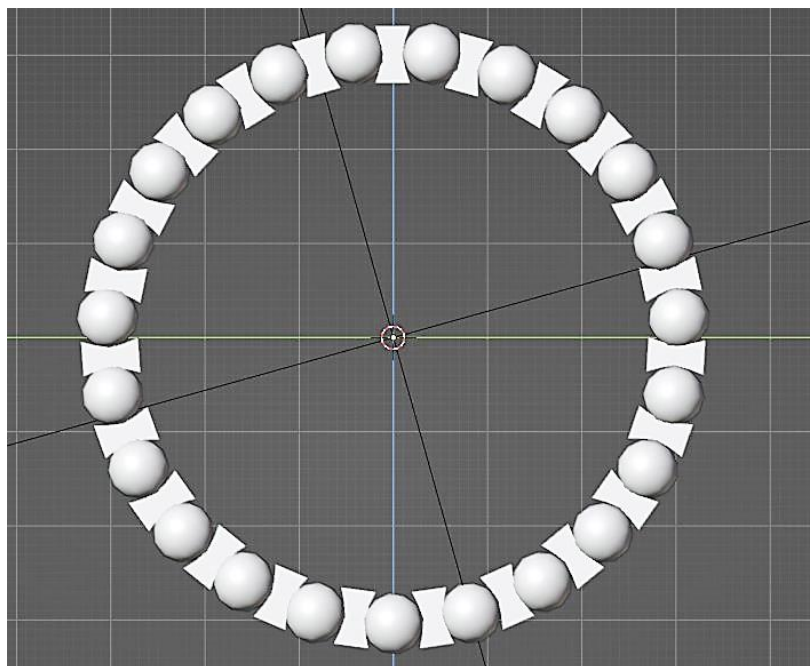


Рисунок 2.24 – Модель підшипників, створена круговим масивом

Копії підшипника, створені масивом почнуть проворачуватись навколо пустої фігури. Для того, щоб зсунути підшипники ближче до центра, переміщуємо оригінальний підшипник у режимі редагування. Так само у режимі редагування можна контролювати і градус, під яким повернуто деталь. Провертаємо пусту фігуру та підганяємо позицію підшипника, поки не вийде ідеальне коло. Коли деталі було підігнано одна до одної, накладаємо модифікатор на модель, щоб копії створені масивом стали реальною геометрією, видаляємо пусту фігуру та переміщуємо підшипники до катушки через 3D курсор, щоб їх центри співпадали.

Метод кругового масиву можна використовувати і для круглих деталей як катушка, поєднуючи геометрію після повороту.

Решту деталей механізму було розроблено по аналогічним методикам, продемонстрованим при моделюванні катушки двигуна та кільця підшипників. Результат роботи можна побачити на рисунку 2.25.

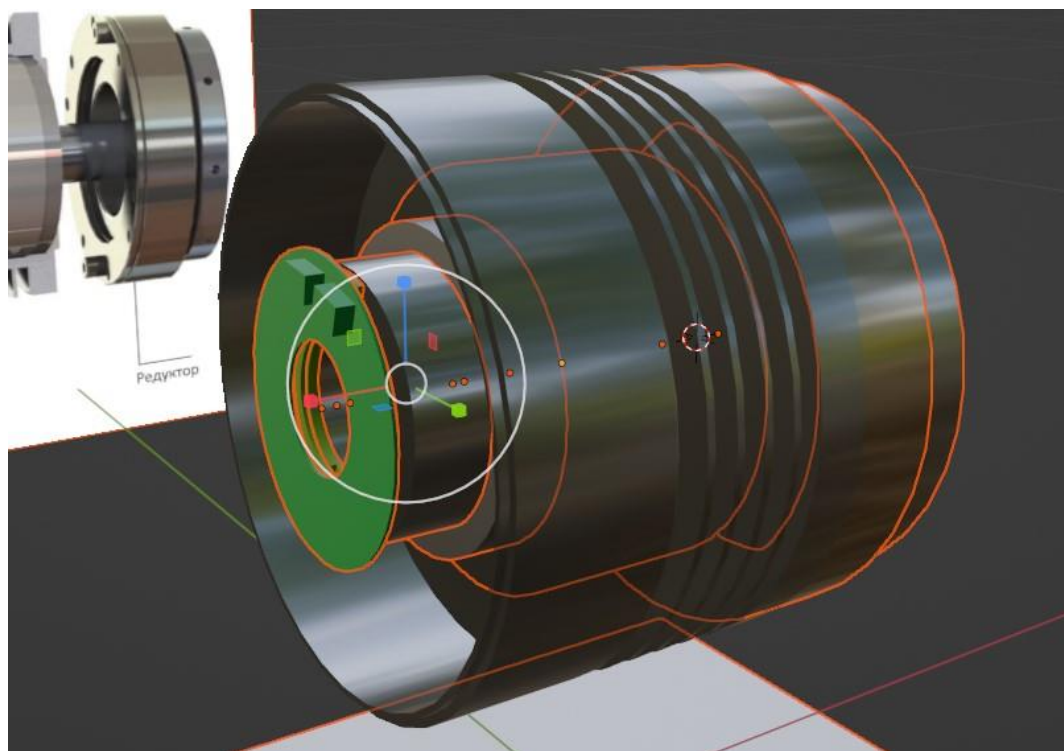


Рисунок 2.25 – Модель механізму суглоба робота

Останнім етапом у моделюванні механізму стане розміщення його між суглобами робота. Через меню елементів проекту робимо найперший суглоб

видимим та виділяємо всі деталі двигуна. Необхідно підставити двигун так, щоб рухома його частина виходила за межі суглоба у місці, де він стикується з наступним суглобом. На данному етапі можна зробити ще одну копію проекту, яка в подальшому буде використана для анімації.

3 РОЗРОБКА АНІМАЦІЇ

3.1 Основні етапи підготовки моделі та розробки анімації

Останнім етапом буде створення анімації рухів робота та його внутрішніх механізмів. Підготовка моделі до анімації буде комплексним процесом, що складається з таких кроків:

- Object Parenting – моделюючи складний об'єкт, наприклад, годинник, ви можете моделювати різні частини як окремі об'єкти. Однак, деякі частини мають рухатися разом або бути приєднані одне до одного. Рух, обертання або масштабування батьківського об'єкта також впливає на дочірні об'єкти;
- Rigging, або створення “рігу” (рухомого скелету моделі) – це загальний термін, який використовується для опису процесу додавання елементів керування до об'єктів, як правило, з метою анімації;
- створення ефекту прозорості суглобів та ефекту розрізання деталей механізму суглоба;
- анімація – процес задання певних параметрів або проведення певних маніпуляцій над скелетом моделі, що змушують об'єкт рухатися або змінювати форму з часом. Під анімацією мають на увазі рух цілого об'єкта, окремих його частин, трансформація або деформація об'єкта з часом, такі як зміна форми або кольору. Також анімації можуть бути успадковані, коли рух одного об'єкта залежать від рухів іншого;
- Rendering (Рендер) – це процес перетворення тривимірної сцени на двовимірне зображення. Вигляд вихідного зображення або відео визначається

камерами, світлом і матеріалами. Візуалізацію можна розбивати на шари, які потім можна компонувати разом для творчого контролю або об'єднувати з зображеннями реального світу. Blender підтримує інтерактивний 3D-рендеринг у вікні перегляду для всіх рушіїв візуалізації, що дозволяє приблизно зрозуміти, як буде виглядати кінцевий результат, не витрачаючи час на візуалізацію тестових зображень чи відео.

3.2 Підготовка моделі: закріплення деталей та створення скелету

Спочатку необхідно закріпити всі деталі моделі, які мають слідувати за іншими, рухомими деталями. У якості прикладу буде показано кнопку, що має бути закріплена до найвищого коліна моделі. Виділяємо спочатку дочірній об'єкт, потім зажавши Shift, виділяємо батьківський об'єкт та натискаємо Ctrl+P. У меню закріплення об'єктів обираємо опцію “Object”, щоб розмір та орієнтація у просторі дочірнього об'єкта слідували батьківському. Якщо якийсь об'єкт було закріплено невірною наслідування можна відмінити, обравши об'єкт та натиснувши ALT+P.

Закріплюємо всі деталі двигуна, окрім кільця підшипників та рухомої частини, до суглоба, всередині якого вони знаходяться (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Закріплення частин двигуна

Рухому частину та підшипник варто закріпити на наступний суглоб, щоб вони наслідували його обертання.

Тепер створимо для моделі робота рухомий скелет. Для спрощення процесу анімації, скелет буде побудовано за принципом інверсної кінематики (англ. Inverse Kinematics). Принцип зворотної кінематики полягає в тому, що на самому кінці моделі створюється “контролююча” кістка, що дозволяє автоматично позиціонувати всі кістки, закріплені за нею. Це схоже на те, як рух пальця призводить до того, що рука слідує за ним.

При використанні звичайної техніки позиціонування, потребується почати з кореневої кістки і послідовно встановлювати всі наступні кістки одна за одною. Коли кожна батьківська кістка переміщується, її дочірня кістка успадковує її розташування і поворот. Таким чином, вносити крихітні точні зміни в позу стає важче, оскільки доводиться спочатку відрегулювати всі батьківські кістки. Таким чином, інверсна кінематика спрощує процес анімації і дозволяє створювати більш складні анімації з меншими зусиллями.

Зробимо модель мотору невидимою через меню колекцій, щоб вона не заважала при створенні скелету та перемістимо ракурс камери на координату Y.

Тепер розмістимо курсор знизу по центру найпершого суглоба, обравши дві найнижчі протилежні точки труби, та перемістивши 3D курсор між ними. Додаємо найпершу кістку, натиснувши Shift+A та обравши Armature. Кістка повинна розміститися рівно по центру трубки суглоба, щоб при русі деталі не виникало зміщень. Крайні “кульки” кістки є точками, які будуть поєднувати деталі робота і навколо яких буде відбуватися рух та обертання деталей, тому важливо користуватися 3D курсором або опцією Вирівнювання по Точкам (англ. Snap to Vertex) для чіткого позиціонування кожної кістки. Для переміщення крайніх точок кістки, на них треба натискати у режимі редагування кістки (обравши кістку та натиснувши TAB). Орієнтація кістки в просторі теж є важливою: для коректної роботи скелету необхідно щоб більш затуплені кінці кісток шйли у кореневу точку, а загострені кінці – до останньої, крайньої кістки моделі.

Тепер, в режимі редагування, витягнемо з першої кістки наступну за допомогою Extrude. Шукаємо ребро або точку, які йдуть ідеально по центру наступної моделі, та переміщуємо туди гострий край нової кістки горизонтально по осі X. Повторюємо цей процес, поки не додамо по одній кістці для кожного суглоба. Дві перших кістки, правильно центровані та розміщені відносно суглобів робота, можна побачити на рисунку 3.2.

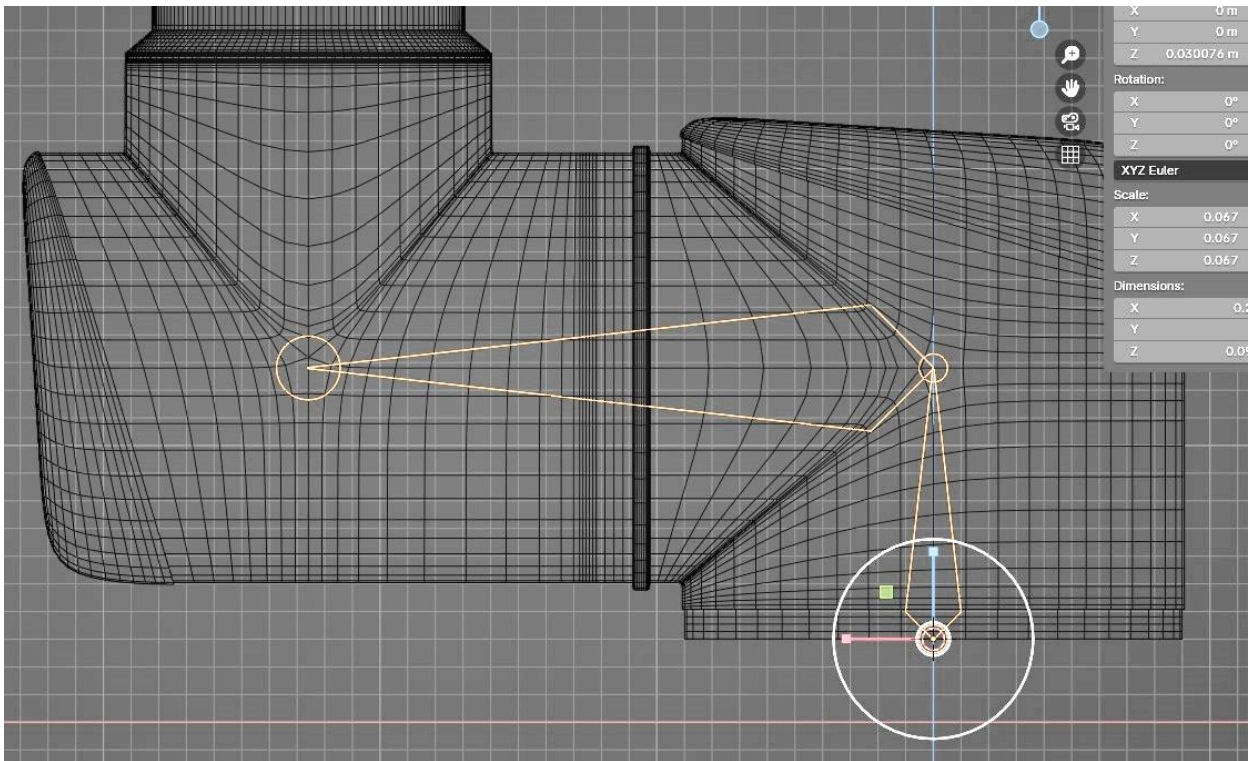


Рисунок 3.2 – Коректне положення кісток відносно суглобів

Далі назначимо кожний суглоб до відповідної йому кістки. Спочатку обираємо найперший суглоб, потім зажавши Shift обираємо скелет моделі, після чого комбінацією Ctrl+Tab переходимо у режим позування моделі. У режимі позування, впевнюємося що суглоб все ще вибрано та зажавши Shift обираємо кістку, що необхідно до нього закріпити. Далі, натискаємо Ctrl+P та обираємо Parent to > Bone. Таким чином, обираємо кожний суглоб та закріплюємо його до відповідної кістки. Після закріплення кожної деталі, можна перевірити коректність закріплення, рухаючи кістки моделі. Готовий скелет моделі з семи кісток можна побачити на рисунку 3.3.

Наразі, у нас є готовий скелет моделі звичайного типу. Він цілком підходить для анімації, тому за бажанням можна зупинитися тут.

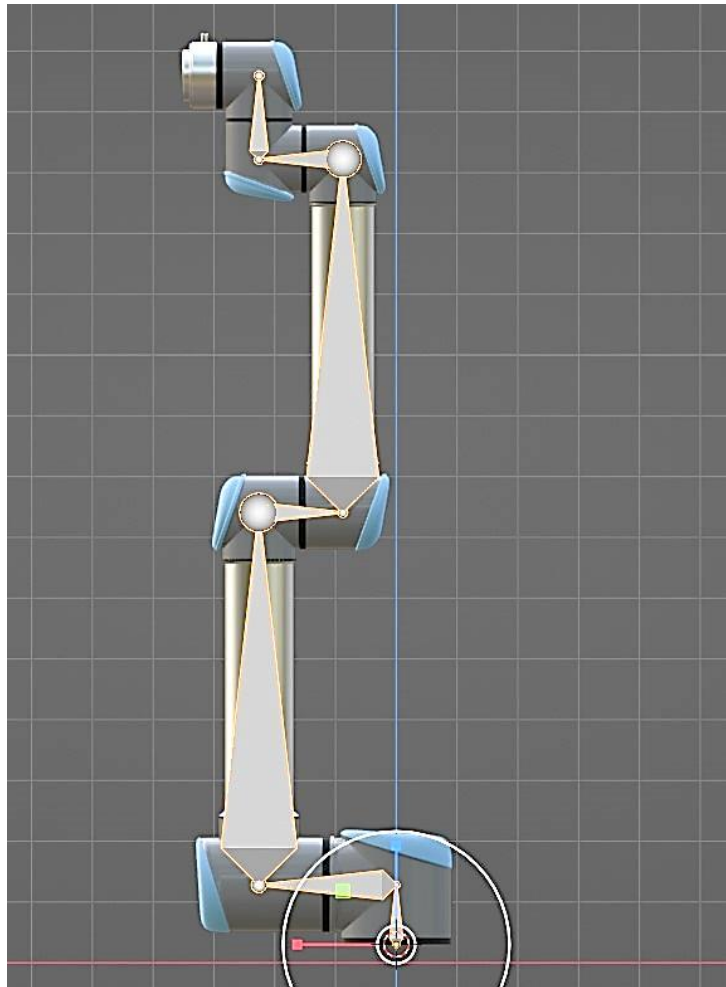


Рисунок 3.3 – Рухомий скелет моделі робота

Далі буде описано процес додання інверсної кінематики. Спочатку у режимі позування (обираємо скелет моделі та натискаємо Ctrl+Tab) додамо управляючу кістку, що буде використовуватись для контролю робота. У режимі редагування скелета, перемістимо 3D курсор до останньої точки останнього суглоба, після чого, прибравши виділення з кістки (ЛКМ у пустоту) створимо ще одну кістку комбінацією Shift+A. Тепер, у режимі позування виберемо спочатку нову кістку, потім останню кістку в нашому скелеті робота, та додамо інверсну кінематику натиснувши Shift+i > To active bone (Рисунок 3.4). Тепер, рухаючи нову кістку, можна контролювати всього робота.

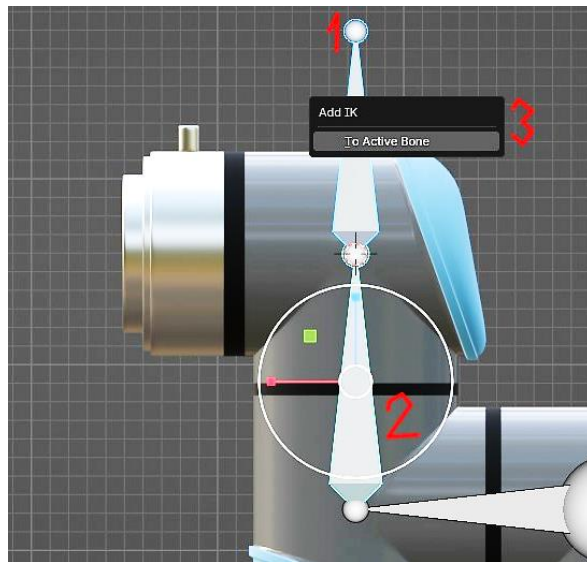


Рисунок 3.4 – Процес додавання кістки для інверсної кінематики

Наразі, якщо спробувати перемістити цю кістку, то деталі робота будуть рухатися неприродньо та під неможливими для конструкції кутами. Щоб це виправити, необхідно задати кісткам обмеження по осям обертання. Обираємо найпершу кістку, у правому нижньому меню властивостей переходимо у властивості кістки (іконка зеленої кістки), та у підменю Inverse Kinematics знаходимо опції для блокування обертань за осями – Lock IK X/Y/Z (рисунок 3.5). У цьому меню, осі XYZ є локальними для кожної деталі, а не глобальними відносно осей всього тривимірного простору, тому потрібно перевіряти, які саме осі ми маємо блокувати. Для того, щоб бачити локальні координати для кожної кістки, в меню даних скелету (іконка зеленого чоловічка) ставимо галичку навпроти опції Axes.

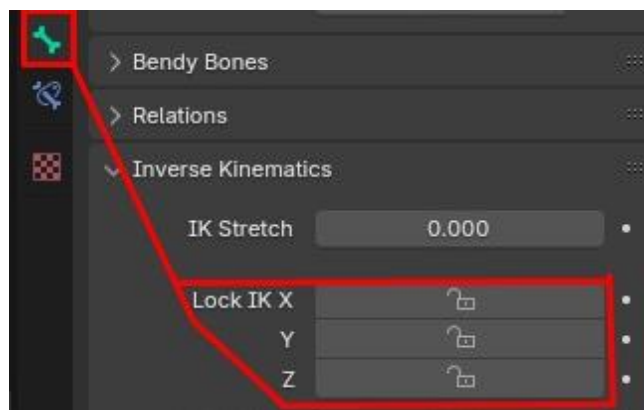


Рисунок 3.5 – Меню для обмеження осі обертання кісток

Для найпершої кістки що знаходиться в суглобі, який кріпиться до бази, опираючись на локальні координати, було заблоковано обертання по осям X та Z, щоб суглоб обертався, як від нього очікується по його конструкції. Аналогічно обираємо кожну кістку та блокуємо всі непотрібні осі обертання. В ході роботи, можна рухати кістку інверсної кінематики (клавіша переміщення G) щоб перевірити, чи коректно було заблоковано осі обертання всіх кісток. Щоб повернути інверсну кістку в початкове положення, оберіть її та натисніть Alt+G. На рисунку 3.6 можна побачити результат обмеження осей обертання кісок робота.

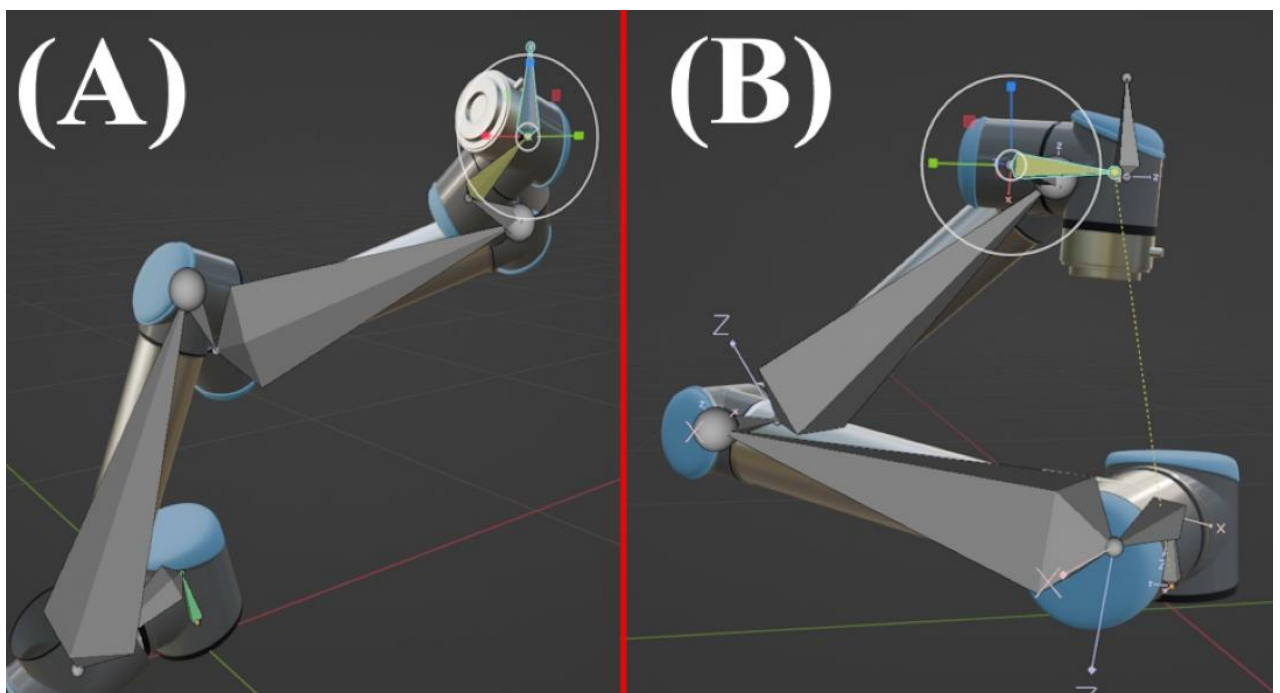


Рисунок 3.6 – Положення моделі при переміщенні ІК кістки до (А) та після (В) обмеження осей обертання

Якщо виникне необхідність коррегувати ротацію окремих кісток, це можна зробити клавішею R, обравши потрібну кістку. Очистити обертання кістки можна комбінацією Alt+R. Щоб кістки не заважали у подальшій роботі та не відображалися при візуалізації, у меню елементів проекту можна вимкнути їх відображення, аналогічно тому як ми до цього вимикали відображення інших об'єктів проекту.

3.3 Підготовка ефекту прозорості та внутрішнього механізму

Анімація внутрішнього механізму буде реалізована за допомогою двох ефектів: прозорість суглобів та ефект “розрізу” частини механізму для демонстрації руху внутрішніх деталей.

Ефекту розрізу можна досягти за допомогою модифікатора Булевих операцій. Даний модифікатор виконує над полігонами моделі певні операції, які інакше були б надто складними, щоб виконати їх за кілька кроків, редагуючи модель вручну. Модифікатор використовує одну з трьох доступних булевих операцій для редагування двох тривимірних об'єктів: Об'єднання, Пересічення та Різниця. Додамо до сцени новий об'єкт, який буде слугувати для “розрізання” механізму – куб, за розмірами зробимо його трохи більшим за механізм. Для зручності зробимо куб прозорим: у властивостях об'єкта (іконка оранжевого квадрата > Viewport Display > Display As > Wire) та помістимо куб так, щоб він перетинав 1/4 механізму. Тепер обираємо корпус катушки, відкриваємо меню модифікаторів та знаходимо Boolean. Вибираємо операцію Difference, а у якості об'єкту (поле Object) для вирахування різниці обираємо наш новий прозорий куб. Аналогічно виставляємо даний модифікатор для всіх деталей, які необхідно “розрізати”. Результат Булевих операцій можна побачити на рисунку 3.7.

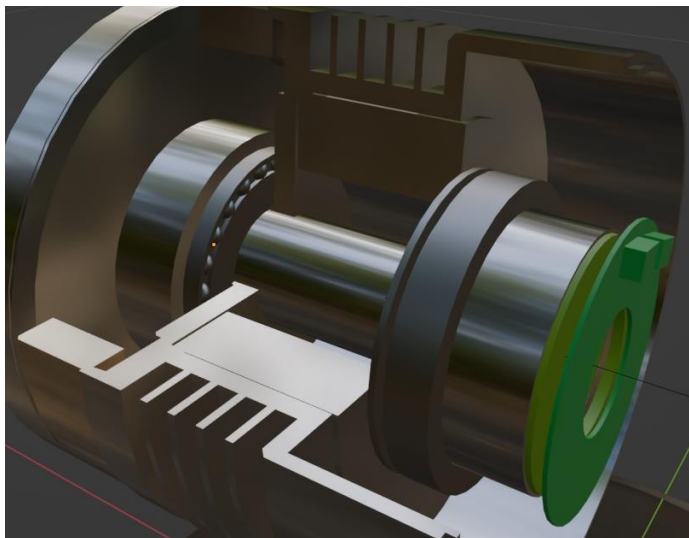


Рисунок 3.7 – Результат застосування Булевої операції “Різниця”

Не приміняємо модифікатор, щоб не розрізати моделі назавжди. Надалі, у ході анімації, ми будемо рухати цей куб для створення ефекту розрізу у реальному часі.

Ефект прозорості суглобів буде контролюватися за допомогою параметру Alpha у властивостях матеріалів суглоба. Параметр Alpha відповідає за прозорість об'єкту, де 0 – повністю прозорий, а 1 – повністю непрозорий. Процес закріплення значень цього параметру до часового проміжку буде пояснено на етапі створення анімації. На рисунку 3.8 можна побачити, як виглядає механізм робота через прозорий суглоб.

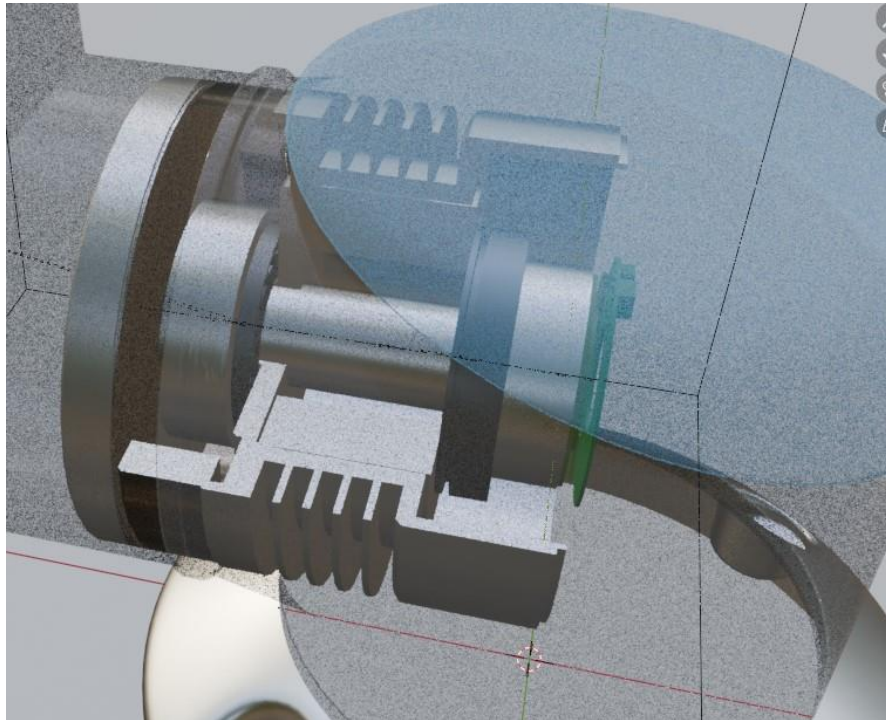


Рисунок 3.8 – Демонстрація прозорості при значенні Alpha 0.5

3.4 Анімація моделі

Для анімації спочатку необхідно підготувати сцену та освітлення. Створимо фоновий об'єкт для сцени. Для цього додаємо куб та збільшуємо його. Потім обираємо нижнє ребро грані, яка буде знаходитись за нашим роботом та

згладжуємо кут за допомогою інструменту **Bevel** (комбінація **Ctrl+B**). Колесом миші збільшуємо кількість доданих ребер, в нашому випадку до 12. Тепер підганяємо нижню грань об'єкта так, щоб вона слугувала підлогою для робота. Далі можна збільшити розмір фонового об'єкта по ширині або довжину окремих граней. Далі, видаляємо зайві грані, які будуть заважати камері. Моделювання фонового об'єкта сцени показано на рисунку 3.9.

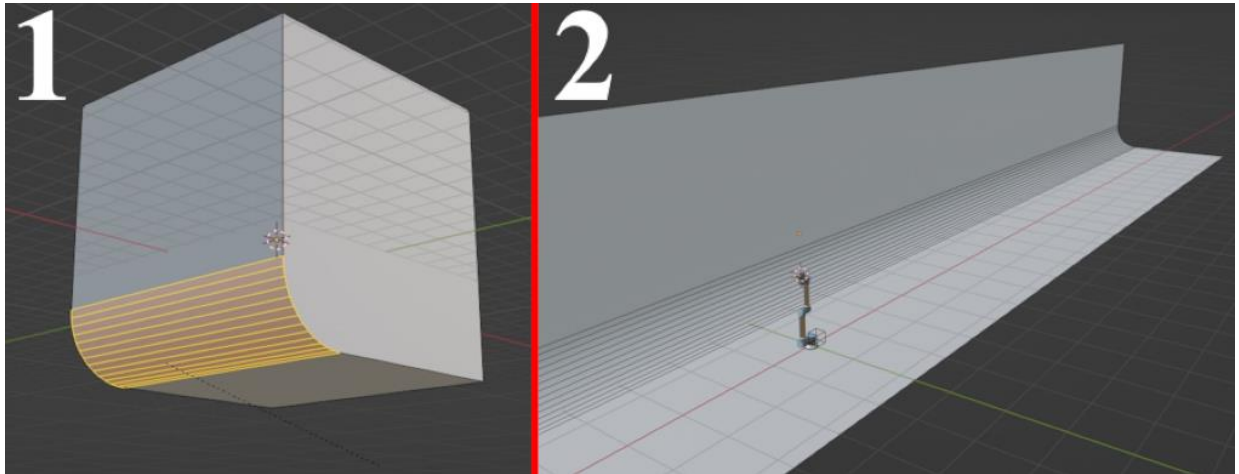


Рисунок 3.9 – Моделювання фонового об'єкта сцени

Далі налаштуємо світло. Додамо нову лампу комбінацією **Shift+A > Light > Point**. Найбільш поширений варіант налаштування світла сцени це три лампи: по діагоналі спереду ліворуч, по діагоналі спереду праворуч та високо позаду. Лампа що знаходиться позаду, має мати вищу потужність тому що слугує для заповнення сцени світлом. Колір лампи (**Color**) та кількість випромінюваного світла (**Power**) можна налаштувати, обравши одну з ламп та перейшовши до її властивостей у меню праворуч (зелена іконка лампочки).

Тепер додамо до сцени віртуальну камеру (комбінація **Shift+A > Camera**), ракурс та положення якої буде контролювати ракурс кінцевої візуалізації. Щоб перемістити свій погляд в камеру, натискаємо **Num0**. Для того, щоб перемістити віртуальну камеру в положення, в якому знаходиться камера користувача, натискаємо комбінацію **Ctrl+Shift+Num0**. Камеру також можна переміщувати

звичайними інструментами трансформації, натиснувши G. Налаштовану сцену можна побачити на рисунку 3.10.

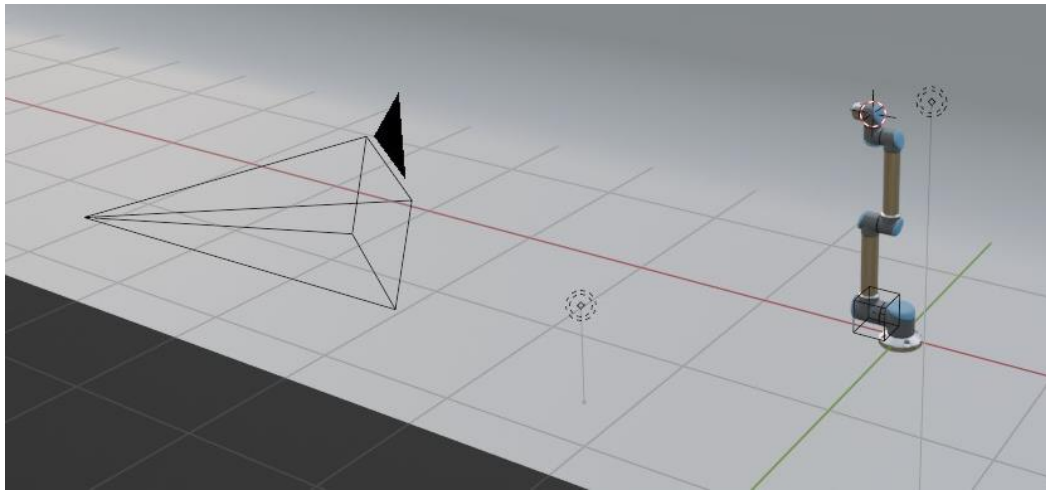


Рисунок 3.10 – Налаштована віртуальна сцена проекту

Для зручності виставлення ракурсу камери, можна потягнути за правий верхній край вікна тривимірного простору, щоб “дістати” ще одне вікно тривимірного простору. Тепер можна натиснути Num0 на одному з вікон, щоб бачити ракурс камери та керувати її положенням з другого вікна. Щоб прибрати додаткове вікно, треба знову зажати ЛКМ на правому верхньому куті одного з вікон та перетягнути його поверх іншого. Кількість таких додаткових вікон необмежена двома, робочий простір можна “розділяти” скільки завгодно разів.

Наступним кроком буде створення самої анімації. Для економії ресурсів, анімацію буде виконано у частоті 24 кадри в секунду. У властивостях проекту оберемо вкладку Output, в підменю Format у полі Framerate виставимо 24 fps. Тепер необхідно розробити план анімації, щоб точно знати її довжину. Для демонстративної анімації робота було придумано такий план:

- 192 кадри, демонстрація руху робота;
- 96 кадрів, підльот камери до нижнього суставу;
- 48 кадрів, перехід суглобів робота у прозорий стан;
- 48 кадрів, на появу розрізу на механізмі;
- 144 кадри, демонстрація рухів механізму в розрізі.

Кількість кадрів у кожному пункті ділиться на 24. Таким чином, повна довжина анімації – 528 кадрів або 22 секунди. У вкладці Output в підменю Frame Range занесемо число 528 у поле End.

Сама анімація буде виконана за допомогою ключових кадрів. Ознайомимось з цим методом анімації у Blender на прикладі рухів камери. За допомогою повзунка у нижній частині робочого вікна переходимо на нульовий кадр. Виставляємо камеру так, щоб було видно всього робота. Тримавши камеру виділеною, створюємо ключовий кадр, натиснувши клавішу I (англ. i). Таким чином, ми створили ключовий кадр для положення, орієнтації та розміру камери. За час анімації, камера переміщується один раз – між кадрами 196 та 288. Переходимо до кадру 196, та не міняючи положення камери, ставимо ще один ключовий кадр. Це закріпить камеру, щоб вона не рухалася перші 8 секунд. Далі, перейдемо на кадр 288, переміщуємо камеру до першого суглобу, щоб було добре видно внутрішній механізм та створюємо ще один ключовий кадр. Тепер можна переміститись на нульовий кадр та натиснути Пробіл, щоб подивитись, як рухається камера між 8 та 12 секундами анімації (рисунок 3.11).

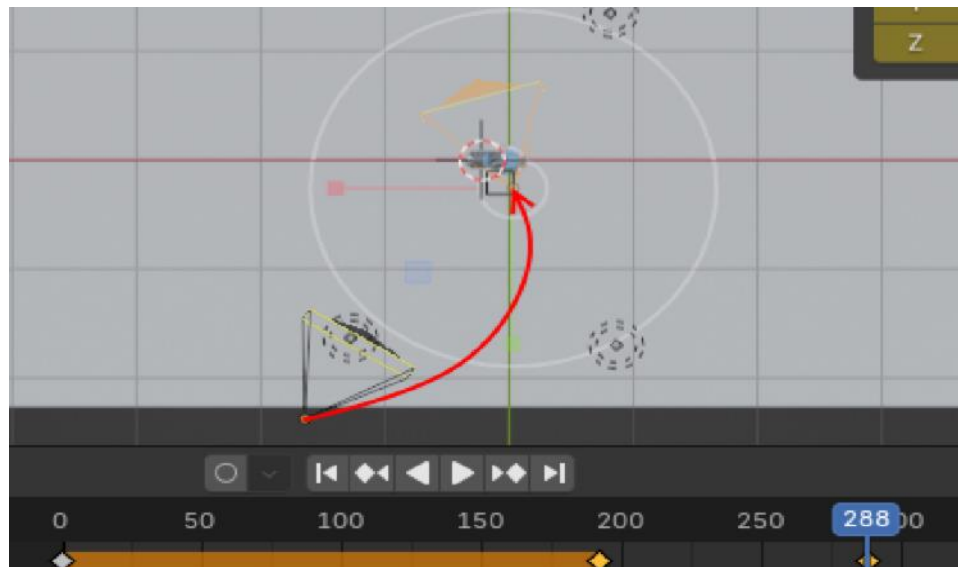


Рисунок 3.11 – Траекторія руху камери та її ключові кадри

Перейшовши в режим позування кісток (Ctrl+Tab), аналогічним чином створюємо довільну анімацію для робота. Можна створювати ключові кадри як для

кістки інверсної кінематики, так і для окремих його кісток, щоб підкорегувати положення суглобів та траєкторію рухів. Важливо згадати, що на кадрі 288 робот має прийняти початкове положення. Потрібно врахувати це при створенні його анімації впродовж перших 288 кадрів.

Внутрішній механізм не потребує анімування, тому що його деталі закріплено до суглобів робота.

Тепер необхідно анімувати плавний перехід суглобів робота у прозорий стан. Перехід стається між кадрами 288 та 336. Перейшовши повзунком на кадр 288, виділяємо суглоб, переходимо в список його матеріалів, обираємо один з них та у вкладинці Surface обираємо параметр Alpha та натискаємо I, створюючи ключовий кадр параметра. Тепер переходимо на кадр 336, виставляємо Alpha на 0.5 та створюємо ключовий кадр. Повторюємо даний процес для всіх матеріалів суглоба. Тепер суглоби робота будуть плавно переходити у прозорий стан впродовж двох секунд, демонструючи механізм всередині (рисунок 3.12).

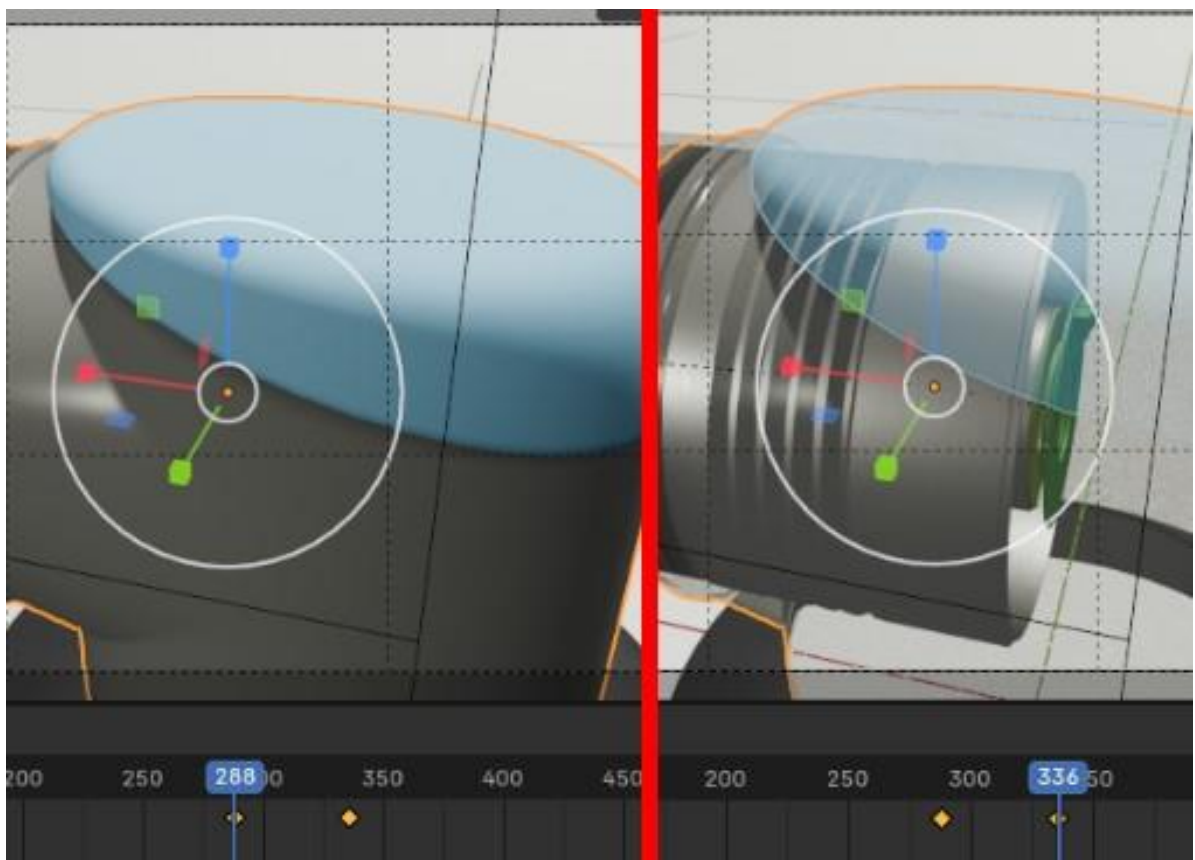


Рисунок 3.12 – Результат прив’язування параметру прозорості до часового проміжку (від 288 до 336 кадру) за допомогою ключових кадрів

Далі, анімуємо появу розрізу на механізмі з 336 по 384 кадр. Виділимо невидимий куб, який потрібен для булевої операції над механізмом, та зробимо його дочірнім елементом будь-якої деталі двигуна, що закріплена за першим суглобом. Це потрібно, щоб при рухах суглобу куб рухався разом з ним. Тепер перейдемо на кадр 384, і зробимо ключовий кадр, поки куб ще знаходиться всередині механізму та прорізає його. Тепер повернемося назад на 336 кадр, та перемістимо куб по осі Y так, щоб він не перетинався з роботом (рисунок 3.13).

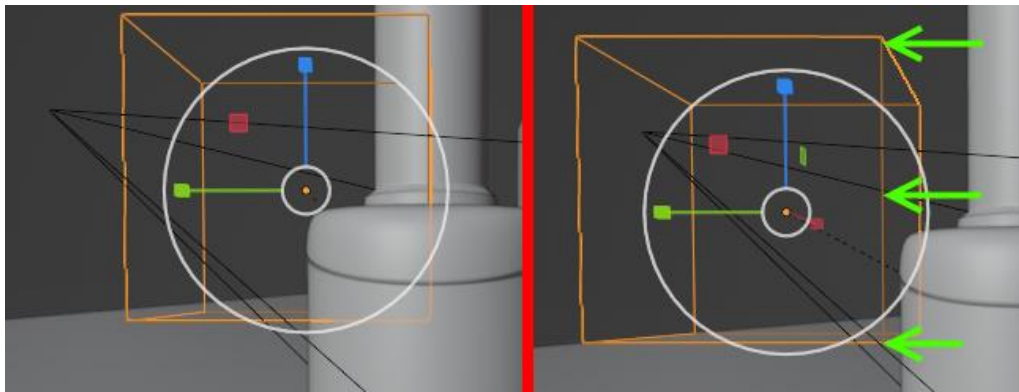


Рисунок 3.13 – положення куба на кадрі 384 (ліворуч) та на кадрі 336 (праворуч)

Останнім кроком в анімації стане демонстрація руху деяких деталей всередині механізму під час руху суглоба. Оскільки механізм є дочірньою деталлю робота, достатньо просто ще раз анімувати суглоб робота. Загальний план рухів робота в ході демонстраційної анімації наведено на рисунку 3.14.

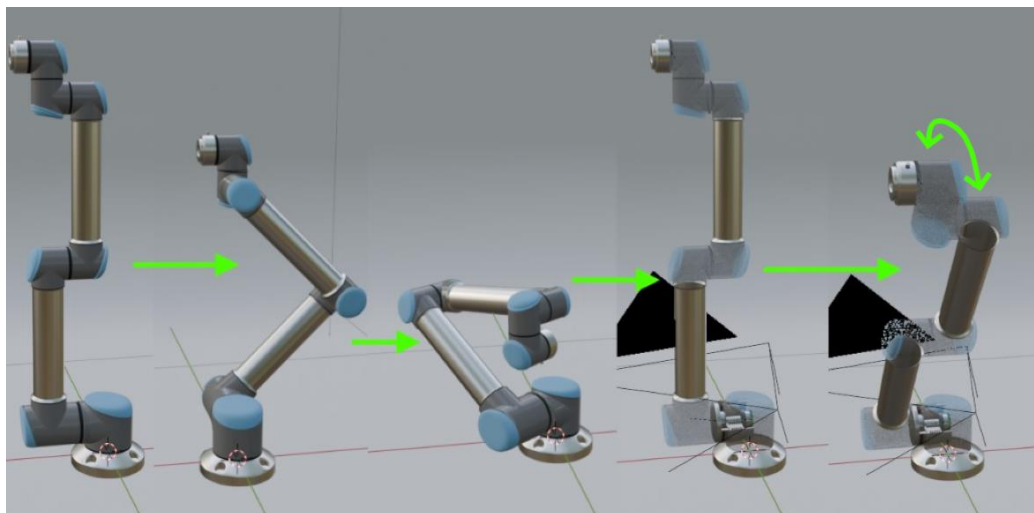


Рисунок 3.14 – Загальний план анімації робота

3.5 Рендер анімації

Тепер, коли модель та анімація готова, можна приступати до налаштувань візуалізації. Налаштування параметрів рендеру у меню інтерфейсу Blender показано на рисунку 3.15.

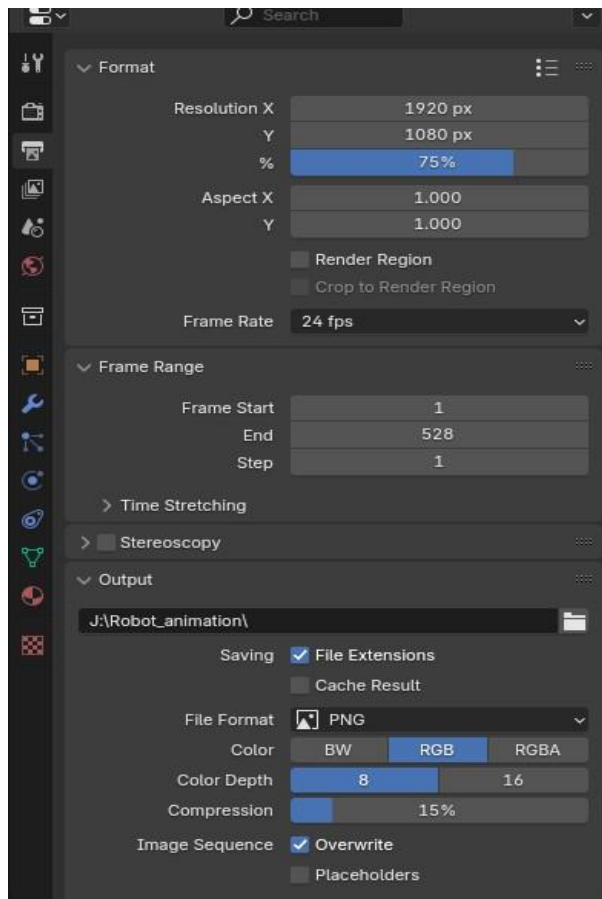


Рисунок 3.15 – Параметри рендеру проекту анімації

Спочатку перейшовши у нижньому правому меню до вкладки властивостей вихідних зображень (Output), перевіримо правильність всіх налаштувань:

- у вікні Format, в опції Resolution, роздільна здатність має бути 1920(X) на 1080(Y). Також за бажанням можна встановити параметр “%” на 75%. Зниження якості на на 25% призведе до пришвидшення процесу рендеру, а втрати якості будуть незначні;

- у вікні Frame Range, початковий кадр (Start) має бути 1, кінцевий (End) має бути 528, а крок (Step) перемикання кадру – 1. Кількість кадрів у секунду (Frame Rate) має бути 24;

- у вікні Output ми налаштуємо формат файлів візуалізації та обираємо папку, в яку вони будуть збережені. Створимо нову пусту папку та назначимо збереження результатів рендеру в неї. Формат файлу слід обрати PNG, Color – RGB, Color Depth – 8, Compression – 15%.

Тепер налаштуємо рушій рендеру. В правому нижньому меню, переходимо до вкладки Render. Для нашої анімації не потрібна черезмірна фотореалістичність, тому в полі Render Engine обираємо рушій EEVEE. Даний рушій не прораховує промені світла в реальному часі та швидко справляється з візуалізацією як зображень, так і відео. У полі Render ставимо кількість Samples на 512. Це буде оптимальним варіантом між якістю відео та швидкістю обробки. Далі потрібно прибрати галочку навпроти тіней (Shadows) та всіх інших додаткових ефектів, що знаходяться нижче.

Тепер можна перейти на будь-який кадр анімації, натиснути F12 та отримати візуалізацію у вигляді зображення формату PNG. Візуалізувати відео ми будемо не міняючи формат, у якості послідовності кадрів (зображень) PNG формату. Це не тільки дає можливість зберегти найкращу якість зображення, а також допомагає запобігти втраті результатів рендера у випадку непередбачених проблем. Наприклад, у випадку коли програма або комп'ютер припиняє роботу через збій, якщо візуалізація у форматі відео не була завершена, весь файл буде втрачено, і рендер доведеться почати зпочатку. У випадку рендеру зі збереженням кожного кадру в якості зображення, процес візуалізації можна в будь-який момент спинити та продовжити з необхідного кадру.

Для початку переведення тривимірної анімації у формат колекції зображень, у верхньому меню оберіть опцію Render > Render Animation. Завдяки оптимізованій налаштуванням рендеру, процес покадрового виводу анімації не повинен зайняти багато часу. В ході роботи над проектом, рендер анімації було виконано на

комп'ютері з графічним процесором Nvidia RTX 3060 з об'ємом відеопам'яті 12Гб. Рендер кожного з 528 кадрів займав від 1.2 до 2 секунд.

Коли рендер буде завершено, необхідно перевести отриману колекцію зображень у формат відео. Для цього перейдемо у відеоредактор програми Blender: у верхній частині робочого простору, натиснемо на "+" та оберемо вкладинку Video Editing > Video Editing (рисунок 3.16).

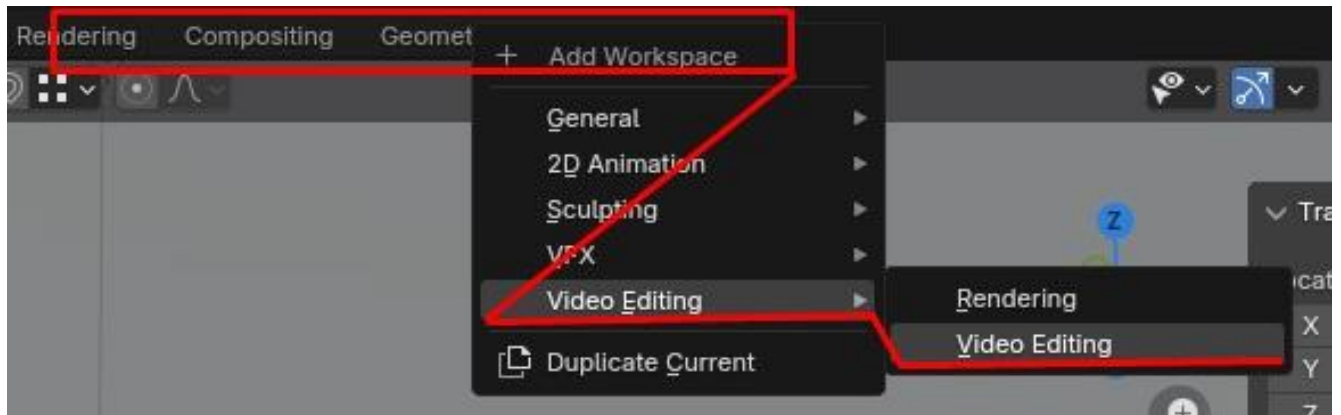


Рисунок 3.16 – Перехід до відеоредактору програми Blender

Перед нами відкриється робочий простір вбудованого у Blender відеоредактору. Натискаємо комбінацію Shift+A та обираємо опцію Image Sequence. Переходимо в папку, де збережені наші кадри анімації, відфільтруємо файли за іменем (всі зображення-кадри пронумеровані програмою від 1 до 528), натискаємо клавішу A, щоб обрати всі кадри в папці та додаємо їх у проект. Тепер у налаштуваннях рендеру в правому верхньому меню програми впевнюємося, що роздільна здатність, частота кадрів та кількість кадрів співпадають з аналогічними налаштуваннями з нашого проекту.

Також необхідно змінити формат файлу на FFmpeg Video, щоб перетворити кадри у відеоролик та правильно налаштувати даний формат. У вкладинці Encoding обираємо MPEG-4. У вкладинці Video виставляємо Video Codec – H.264, Output Quality – Medium Quality, Encoding Speed – Good. За бажанням можна додати до проекту аудіофайл, але якщо цього робити не планується то у вкладинці Audio – Audio Codec обираємо варіант No Audio. Тепер через верхню панель обираємо

опцію Render > Render Animation та чекаємо поки обробиться відео. Параметри рендеру відео в інтерфейсі Blender продемонстровано на рисунку 3.17.

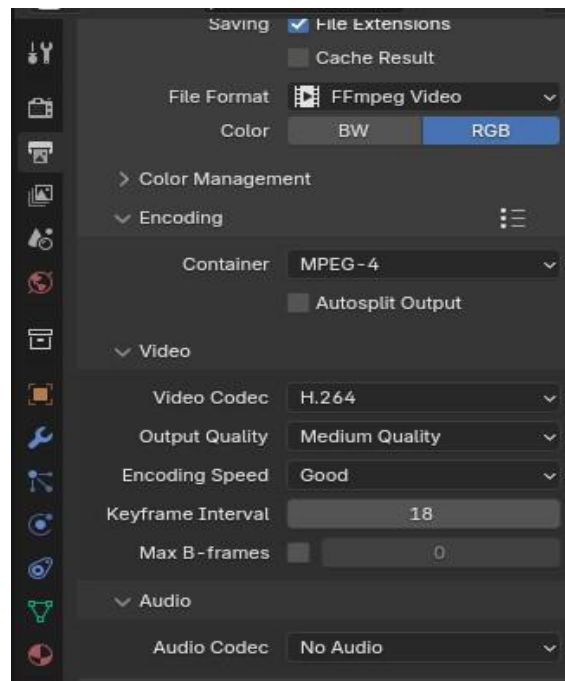


Рисунок 3.17 – Параметри рендеру проекту відео

По завершенню рендера переходимо у обрану в налаштуваннях проекту папку та перевіряємо результат. Отримане відео можна побачити на рисунку 3.8 або за посиланням на YouTube [20].

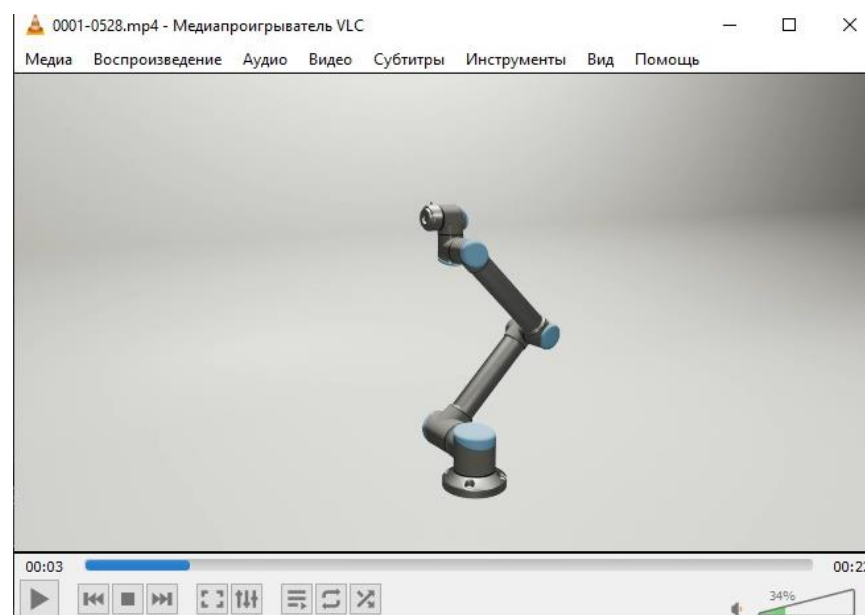


Рисунок 3.18 – Відео візуалізація анімації робота

3.6 Алгоритм та практичні рекомендації щодо розробки системи візуалізації робота

Правильна послідовність процесу розробки системи має вирішальне значення. Це гарантує, що тривимірні моделі пройдуть шлях від ескізів до фінальної візуалізації у вигляді зображення або анімації з мінімальними зусиллями. Для цього потрібно визначитись з основними етапами процесу та створити впорядкований алгоритм роботи над проектом. Цей алгоритм розроблено і практично протестовано в даних дослідженнях на моделі робота-маніпулятора.

Алгоритм, за яким було проведено робота над системою, наведено на рисунку 3.19.

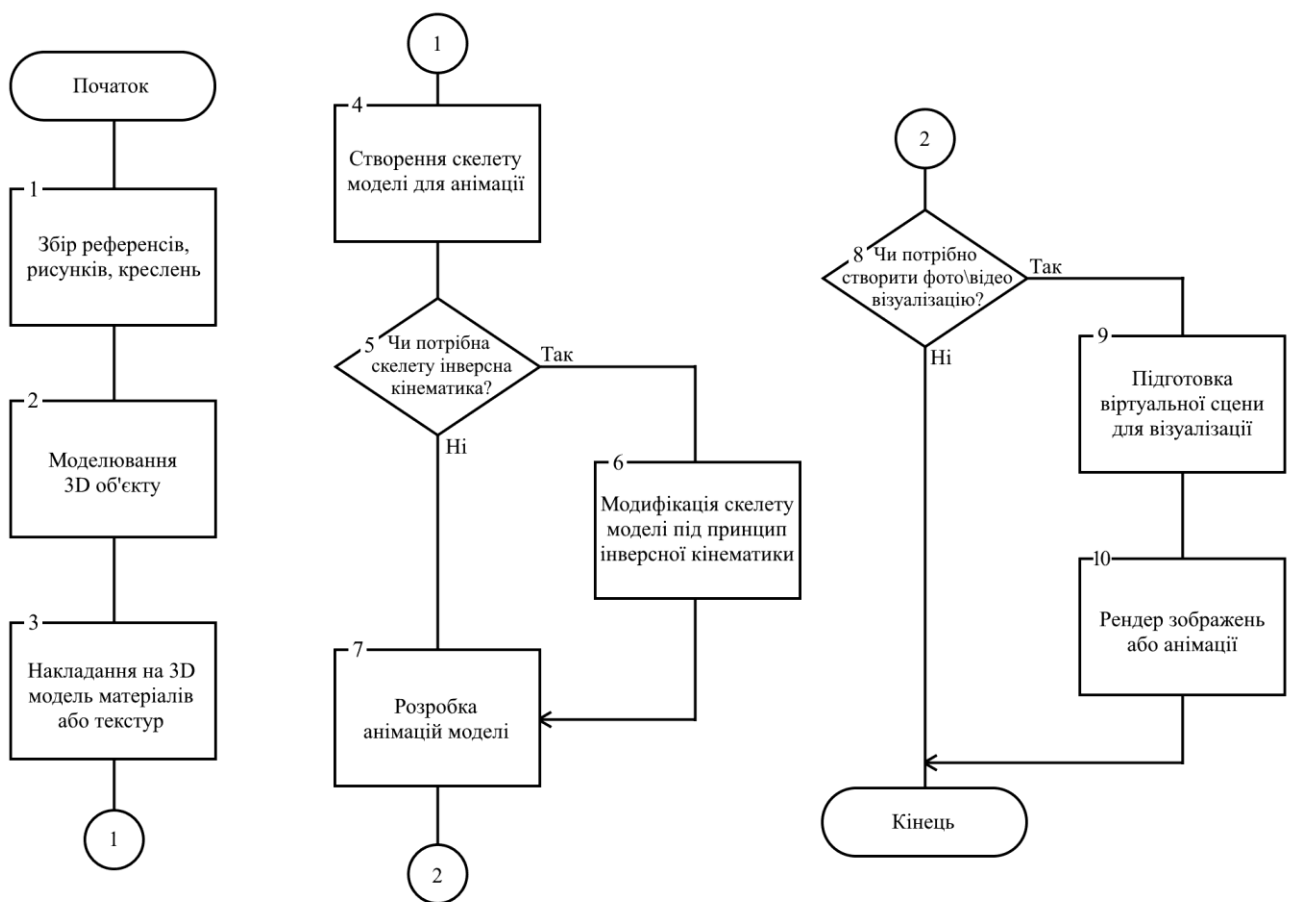


Рисунок 3.19 – Блок-схема алгоритму розробки системи візуалізації та контролю робота-маніпулятора

Робота над проектом починається з ідеї – потрібно зібрати референси об'єкта розробки або створити креслення. При зборі референсів найбільш зручним варіантом будуть самостійно розроблені креслення та концепти. Якщо стоїть задача побудувати віртуальну модель вже існуючого робота, то варто пошукати його специфікації в інтернеті та на офіційних ресурсах компанії-виробника.

Наступним кроком є безпосередньо моделювання, текстурування моделі. Після цього етапу рекомендується створити копію проекту, щоб мати можливість повернутися до неї у випадку якщо потрібно буде переробити або відредагувати модель. Далі необхідно підготувати модель до анімації – створити анімаційний скелет та визначитись із типом скелету, який краще підходить для моделі. У випадку руки-маніпулятора найкращим варіантом буде звичайний скелет анімації без інверсної кінематики, тому що він дозволяє окремо контролювати кожний сегмент робота, аналогічно до того як працюють всі програми для управління подібними маніпуляторами. На етапі анімації ми використовуємо розроблений скелет, щоб контролювати віртуальну модель робота, виставляти її в певні пози або анімувати за допомогою ключових кадрів, посилаючи скелету моделі команди на зміну положення з плином часу. Таким чином, ми отримуємо систему для контролю віртуальної моделі робота.

Через загальну схожість сучасних фреймворків, для створення 3D моделі, текстур та роботи над її анімуванням можна обрати будь-який з безлічі популярних варіантів, або комбінувати їх для більшої зручності, обираючи специфічно заточені під певну роботу програми. Для моделювання можна обрати Blender, 3Ds MAX, Maya, Cinema 4D а у випадку промислового моделювання складних механізмів за кресленнями та формулами, можна звернутись до таких програм як SolidWorks та AutoCAD. Прості текстури та матеріали можна накласти на модель у будь-які з вище перерахованих програм, але якщо необхідно намалювати складну текстуру, то має сенс скористатися спеціально створеною для цього програмою Zbrush. Для анімування отриманої моделі підійде більшість перерахованих програм (Blender, 3Ds MAX, Maya, Cinema 4D), але серед них, найкраще заточеною під задачу анімації є Maya.

За необхідності, можна створити для розробленої системи демонстраційні матеріали: підготовлюємо модель до рендеру, обставляючи навколо неї віртуальну сцену, камеру та освітлення. Фінальним кроком стає візуалізація готової 3D моделі у вигляді 2D зображення чи колекції зображень, які можна зібрати в анімацію. Всі сучасні програми для роботи з 3D мають вбудовані рушії для рендеру, але у випадку якщо візуалізація в одній з програм не відповідає потребам, можна підготувати модель та експортувати її у іншу програму, та створити візуалізацію там.

В даній роботі, на всіх етапах проекту було використано програму Blender. Дану програму було обрано у зв'язку з багатьма факторами. Вона розповсюджується на повністю безкоштовній основі, має зручні інструменти для 3D моделювання, створення простих матеріалів для моделі, створення скелету моделі та його анімування за допомогою ключових кадрів. Два вбудовані рушії для рендеру дають можливість зробити вибір між простою та швидкою візуалізацією за допомогою Eevee, або більш часозатратною, але фотореалістичною візуалізацією за допомогою Cycles. Також важливим фактором універсальності Blender є наявність в програмі власного відеоредактору, що дозволяє перевести анімацію в формат відео, не звертаючись до сторонніх програм.

4 ПРИКЛАД ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ АЛГОРИТМА РОБОТА

4.1 Приклад алгоритму функціонування робота-маніпулятора

В заключному розділі буде наведено принцип роботи з системою контролю робота. Для виконання практичних задач необхідно скласти алгоритм дій робота-маніпулятора. Використання алгоритму у вигляді блок-схеми для керування роботом-маніпулятором є важливим через складність завдань і необхідність точного, покрокового виконання в робототехніці. Блок-схема забезпечує

систематизований спосіб представлення процесів, пропонуючи чіткий і наочний план послідовності дій, яких повинен дотримуватися маніпулятор, таких як переміщення, захоплення або регулювання. Такий структурований підхід гарантує, що кожен крок буде врахований і виконаний у правильному порядку.

Роботизовані системи часто передбачають прийняття рішень на основі входів датчиків, таких як виявлення об'єктів або зворотний зв'язок. Блок-схеми наочно ілюструють ці моменти прийняття рішень, показуючи, як маніпулятор повинен реагувати в різних сценаріях. Крім того, вони безцінні для включення механізмів обробки помилок і відновлення, що дозволяє роботу безпечно і передбачувано впоратися з несподіваними ситуаціями, такими як перешкоди або апаратні несправності. Така відмовостійкість особливо важлива в додатках, де безпека і надійність мають першорядне значення. Приклад алгоритму рухів робота-маніпулятора наведено на рисунку 4.1.

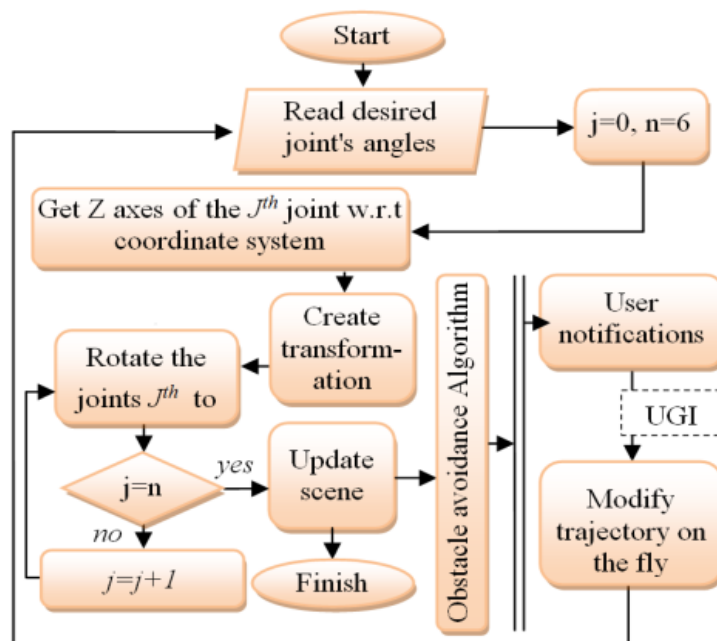


Рисунок 4.1 – Приклад алгоритму рухів робота-маніпулятора з 6 суглобами[21]

Розбиваючи систему управління на керовані компоненти, можливо спростити інтеграцію нових функціональних можливостей та зробити систему адаптивною до майбутніх вимог. Також це надає можливість розробляти алгоритми

управління в реальному часі, забезпечуючи ефективно і детерміноване реагування робота-маніпулятора на вхідні дані під час роботи. Побудований для задачі алгоритм контролю наведено на рисунку 4.2. Відштовхуючись від даного алгоритму, буде створено демонстраційну анімацію.

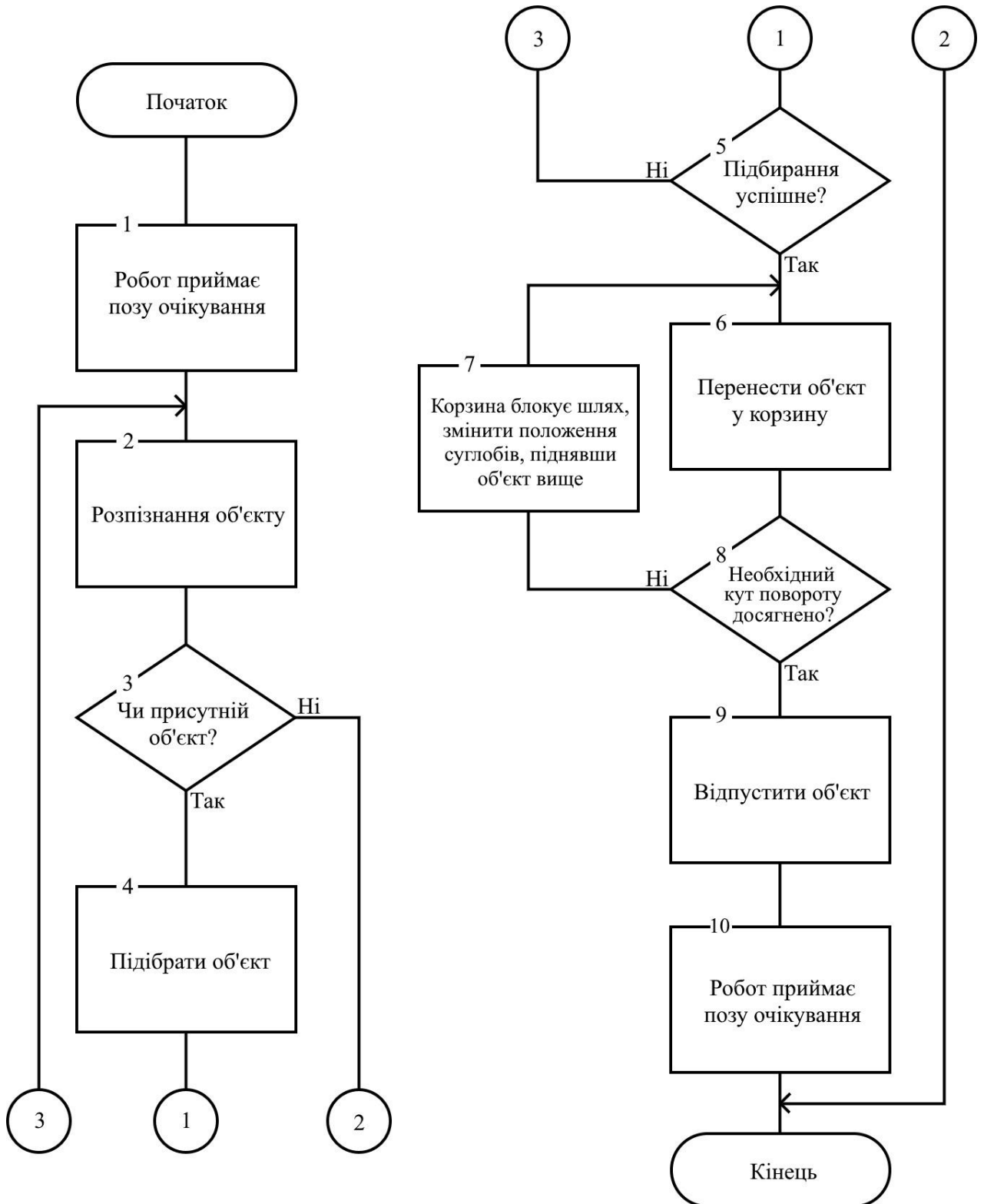


Рисунок 4.2 – Алогритм вибору та розміщення для робота-маніпулятора

Розроблюваний в даному розділі алгоритм призначено для виконання задачі “вибору та розміщення” (англ. “pick and place”). Цей алгоритм слугує для виконання простих, але важливих завдань у різних галузях промисловості, насамперед на виробничих і складальних лініях шляхом ефективного та точного переміщення об'єктів з одного місця в інше. Це дозволяє оптимізувати виробничі процеси, зменшити втручання людини та підвищити загальну якість продукції.

4.2 Приклад анімації рухів робота

Роботу над анімацією починаємо зі створення нової копії проекту та видалення всіх ключових кадрів з моделі робота, щоб вони не конфліктували з новими рухами.

Для демонстрації роботи необхідно буде допрацювати сцену. Всі нові об'єкти можна побачити на рисунку 4.3.

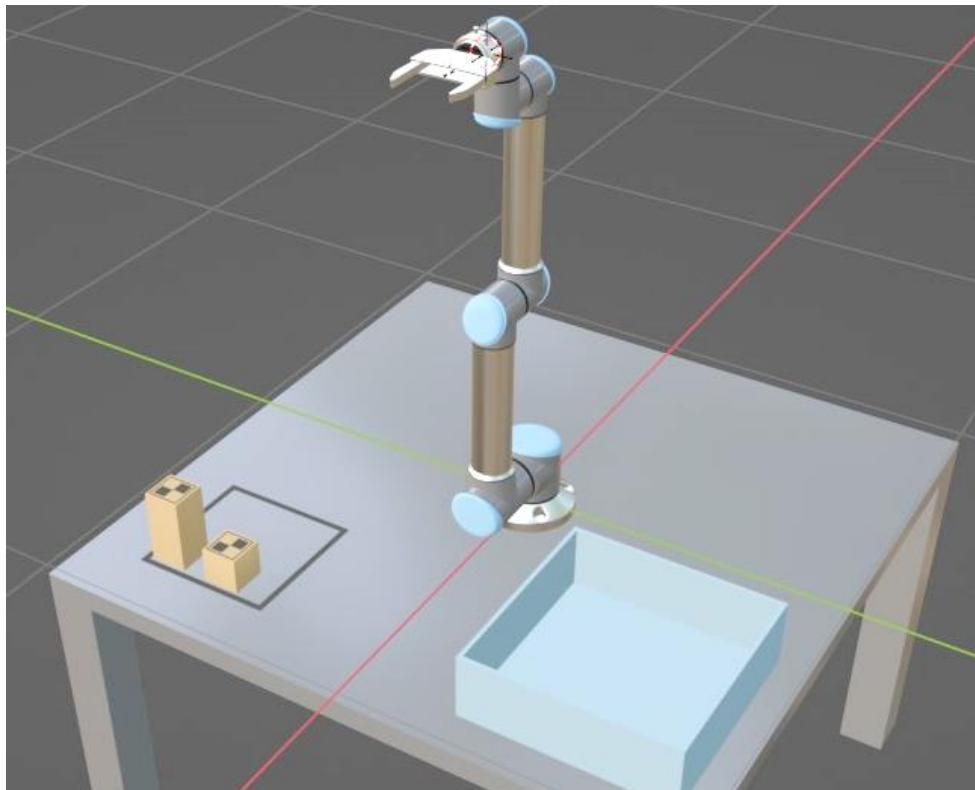


Рисунок 4.3 – Сцена з новими об'єктами

Було змодельовано кілька додаткових об'єктів:

- стіл, на якому буде встановлено робота та інші об'єкти;
- кінцевий маніпулятор-клешню, якою робот буде підіймати об'єкти;
- об'єкти, які необхідно перемістити зі стола в коробку;
- коробка, в яку робот має перемістити об'єкти.

Використовуючи методи моделювання, розглянуті раніше, розроблюємо всі необхідні моделі та розставляємо їх навколо робота.

Для більшої точності в рухах, цього разу робота буде анімовано без використання інверсної кінематики. Анімація робота та камери виконується аналогічно процесу створення першої анімації, за допомогою ключових кадрів.

Анімація буде складатися з двох основних частин – перенесення в синю коробку спочатку короткого об'єкту, а потім довгого. При перенесенні довгого об'єкту буде продемонстровано роботу частини алгоритму, що відповідає за уникання зіткнень з коробкою.

Слідуючи алгоритму, виставляємо робота в позицію очікування (рисунок 4.4). Робот залишається в цьому положенні, коли сканує робочу область на присутність об'єктів.

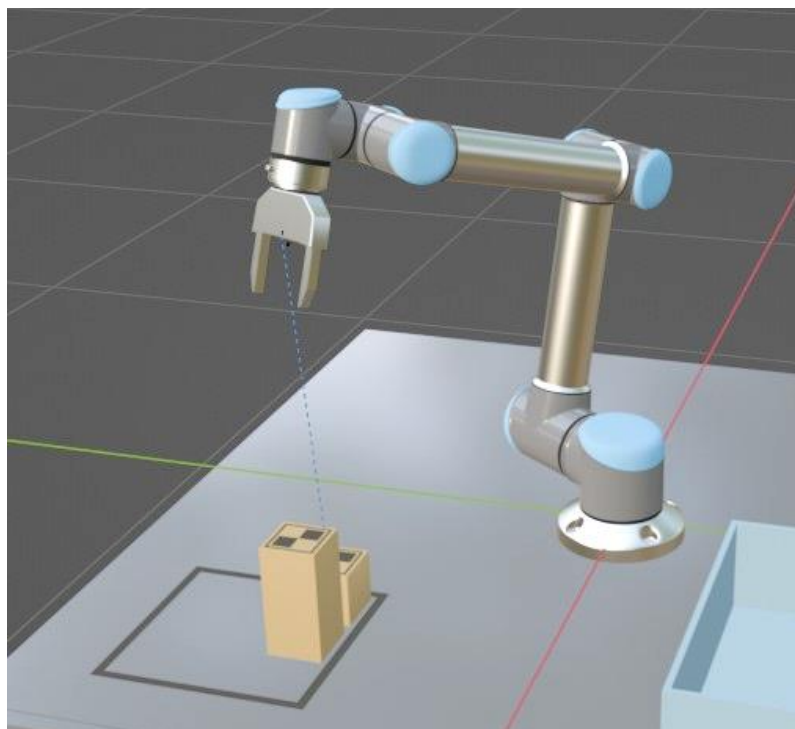


Рисунок 4.4 – Робот в положенні очікування

Далі, робот має розпізнати об'єкт та змінити положення так, щоб кінцевий маніпулятор опинився над ним. Після цього клешня “зажимає” об'єкт. Взявши об'єкт, робот підіймає його, переносить у синю коробку, відпускає та повертається у положення для сканування робочої області (рисунок 4.5).

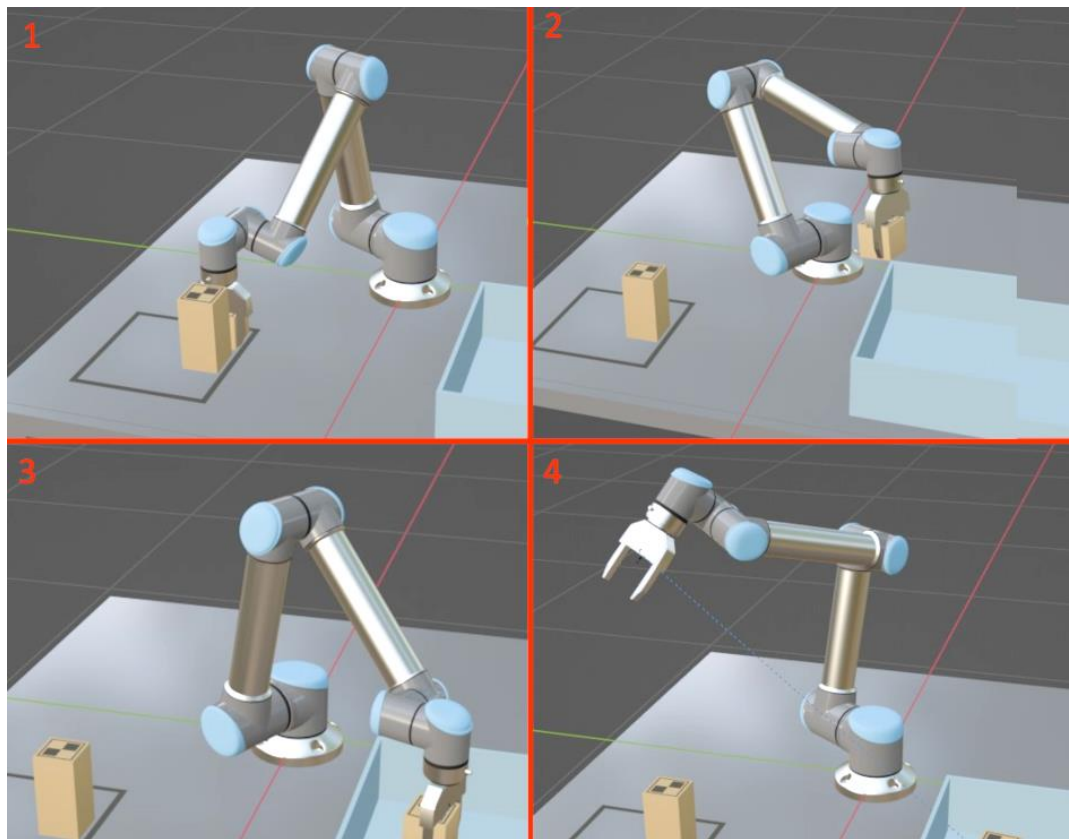


Рисунок 4.5 – Процес підбирання та перенесення об'єкту в коробку

Повернувшись в положення очікування, процес повторюється з довгим об'єктом. Але цього разу робот має “застрягнути”, коли об'єкт зіштовхнеться з коробкою (рисунок 4.6). Далі робот підійме об'єкт вище, успішно перенесе його у коробку та повернувшись в положення очікування. Повернувшись у початкове положення очікування, робот готується до підбору наступного об'єкту. При спробі перемістити об'єкт, він стикається з коробкою, що викликає ситуацію, у якій робот умовно “застрягає”.

На цьому етапі в алгоритмі робота активується функція розпізнавання перешкод, яка дозволяє йому виявити зіткнення та адаптувати свої дії. Робот підіймає довгий об'єкт на більшу висоту, щоб уникнути повторного зіткнення з

коробкою. Завдяки цьому маневру він успішно долає перешкоду і продовжує виконання завдання. Далі робот точно позиціонує об'єкт над коробкою та акуратно поміщає його всередину. Таким чином, система демонструє ефективність своєї роботи навіть у випадках зіткнення чи виникнення непередбачених ситуацій.

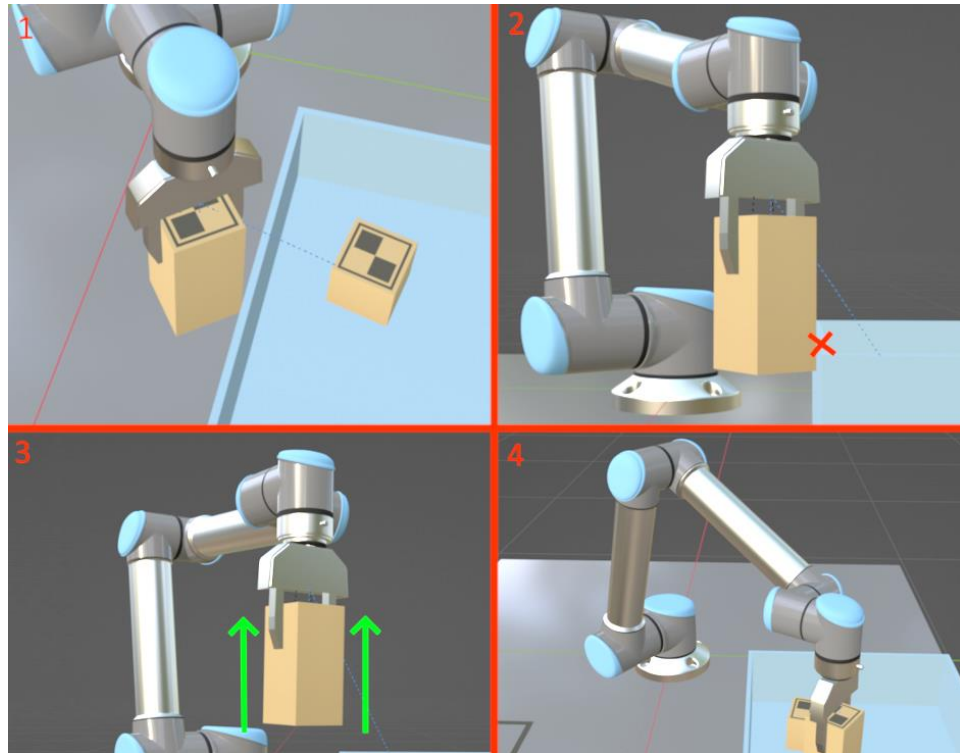


Рисунок 4.6 – Робота алгоритму в разі зіткнення об'єкту з коробкою

Завершивши перенесення, робот повертається у початкове положення очікування, готовий до наступного завдання або до повторення циклу, якщо це необхідно. Об'єкти, які переносить робот в ході анімації, проходять через комплексний процес – вони мають спочатку залишатися в робочій області, під час перенесення слідувати за клешнею робота, а після відпускання залишатися у новому положенні всередині коробки. Подібна взаємодія між 3D моделями завжди було складною задачею, і в даному випадку, її було вирішено за допомогою методу наслідування анімацій. При налаштуванні наслідування рекомендується час від часу запускати анімацію та перевіряти, чи рухається модель за задуманою траєкторією та чи зупиняється вона у необхідних проміжках.

Наслідування анімацій слід налаштувати окремо для кожної моделі, яка має слідувати за іншою моделлю. Обравши об'єкт, який переносить робот, на часовому просторі анімації переходимо до кадру, на якому об'єкт перестає бути статичним та починає “слідувати” за клешнею робота. У властивостях об'єкта відкриваємо вкладинку Constraints (Обмеження) та додаємо нове обмеження під назвою “Child Of”. Меню обмежувача Child Of з параметром Influence можна побачити на рисунку 4.7.

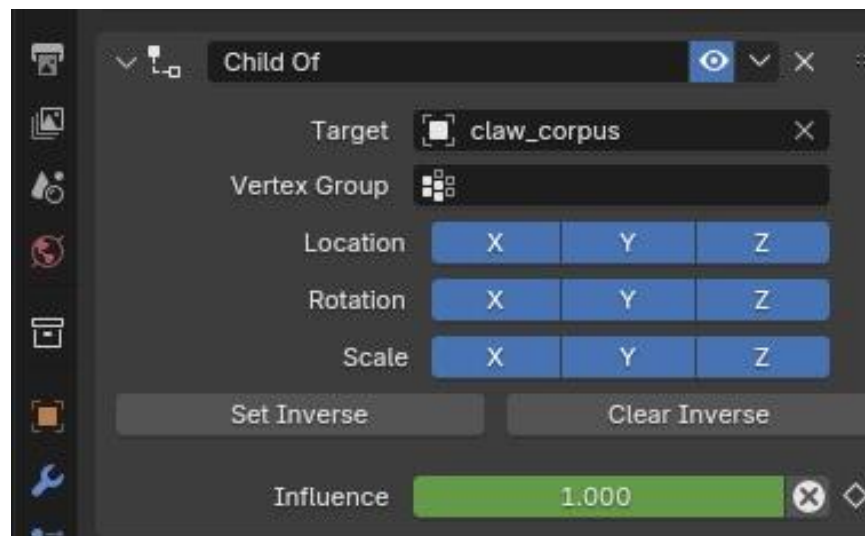


Рисунок 4.7 – Вікно властивостей обмежувача Child Of

Залишаючись на кадрі, який ми виставили раніше, в налаштуваннях обмеження натискаємо Set Inverse, щоб об'єкт наслідував рухи клешні саме з цього кадру, а не з найпершого. Тепер натискаємо на пустий ромб біля властивості Influence, створюючи таким чином ключовий кадр для наслідування рухів моделі. Параметр Influence має бути виставлено на 1.

Далі, переходимо на один кадр назад, змінюємо Influence на 0 та створюємо ще один ключовий кадр для цього параметра. Таким чином, наш об'єкт буде статично залишатися на столі від початку анімації і до кадру, на якому ключовий кадр Influence змінюється на 1.

Після перенесення в коробку, об'єкт має залишатися в ній та перестати слідувати за роботом. Зупинка моделі в новій точці після переміщення виконується трохи складніше. Переходимо в режим анімації, обираємо об'єкт та переходимо до

кадру, під час якого об'єкт має “зупинитися” – відразу після розжимання клешні робота. Натискаємо К щоб відкрити меню ключових кадрів, та обираємо опцію Location & Rotation. Таким чином, ми збережемо для об'єкта нове положення у просторі, не руйнуючи наслідування анімації. Тепер потрібно відкрити меню положення об'єкта в анімації (Object Transform зліва від часового простору анімації) та виділити в ньому шість підпунктів положення (три для Location та три для Rotation). Виділивши дані підпункти, переносимо їх на один кадр назад (натиснути G та повести мишкою вліво). Тепер, повернувшись на один кадр вперед, знову натискаємо К та обираємо в меню опцію Visual Location & Rotation. Дана опція створює ключовий кадр положення для об'єкта на основі його поточного положення. Тепер необхідно виділити всі шість підпунктів положення як для кадру, який ми тільки що створили, так і для кадру, який ми пересунули на одне ділення вліво. Тепер перенесемо ці ключові кадри положення на одне ділення праворуч, натиснувши клавішу G та потягнувши мишку в праву сторону.

Для останнього кадру, який відповідає за статичне положення об'єкта в коробці, у властивостях обмеження створимо ключовий кадр для параметру Influence зі значенням 0, аналогічно тому, як ми це робили при підбирання об'єкту. Таким чином, ми відділили об'єкт від клешні робота, та задали йому нове положення в коробці. Операції над підпунктами кадрів положення показано на рисунку 4.8.

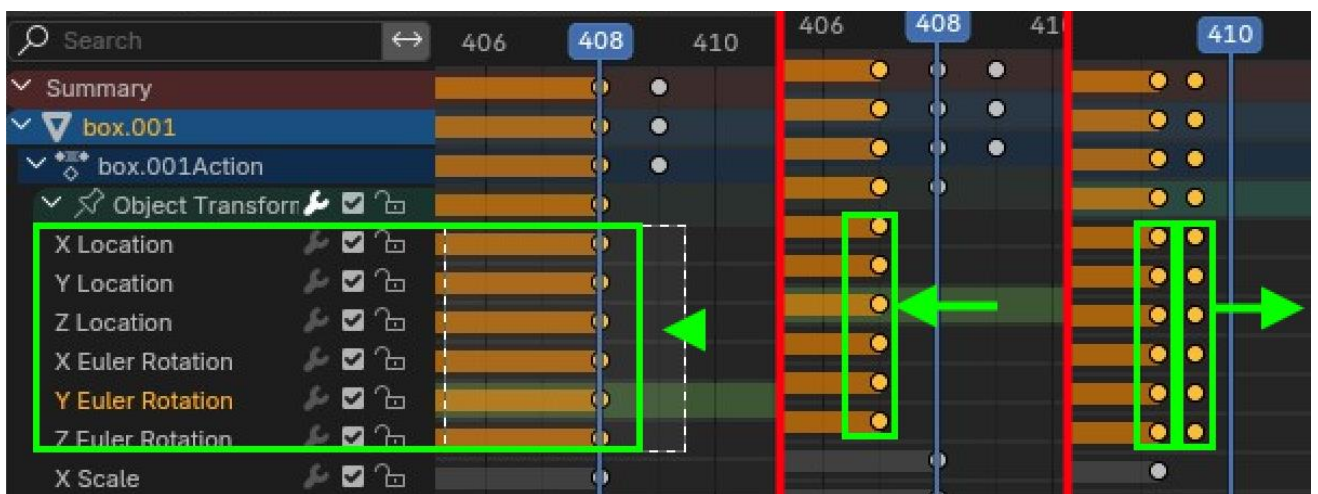


Рисунок 4.8 – Операції над ключовими кадрами положення об'єкта

Аналогічно налаштуємо наслідування анімації для другого, подовженого об'єкту.

Кінцевий маніпулятор робота (клешня) складається з корпусу та двох щипців, у якості окремих моделей, які наслідують положення суглоба номер 7, до якого і має кріпитися маніпулятор. Управління зтисканням та розтисканням щипців здійснюється за допомогою ключових кадрів, які рухають щипці по локальній координаті Y . Рухати модель по локальній координаті можна, натиснувши на необхідну координату двічі в ході використання інструментів трансформації. Наприклад, викликаємо інструмент переміщення клавішею G , потім задаємо переміщення по глобальній координаті Y , натиснувши клавішу Y , та перемикаємо його на переміщення за локальною координатою Y , натиснувши клавішу Y другий раз.

Коли анімація за алгоритмом повністю готова, візуалізуємо її у вигляді колекції зображень та переводимо колекцію зображень у формат відео. Процес перетворення анімації у відео було виконано за інструкцією по візуалізації з Розділу 3. Скріншот готової анімації можна побачити на рисунку 4.9. Повне відео анімації можна подивитися на платформі YouTube[22].

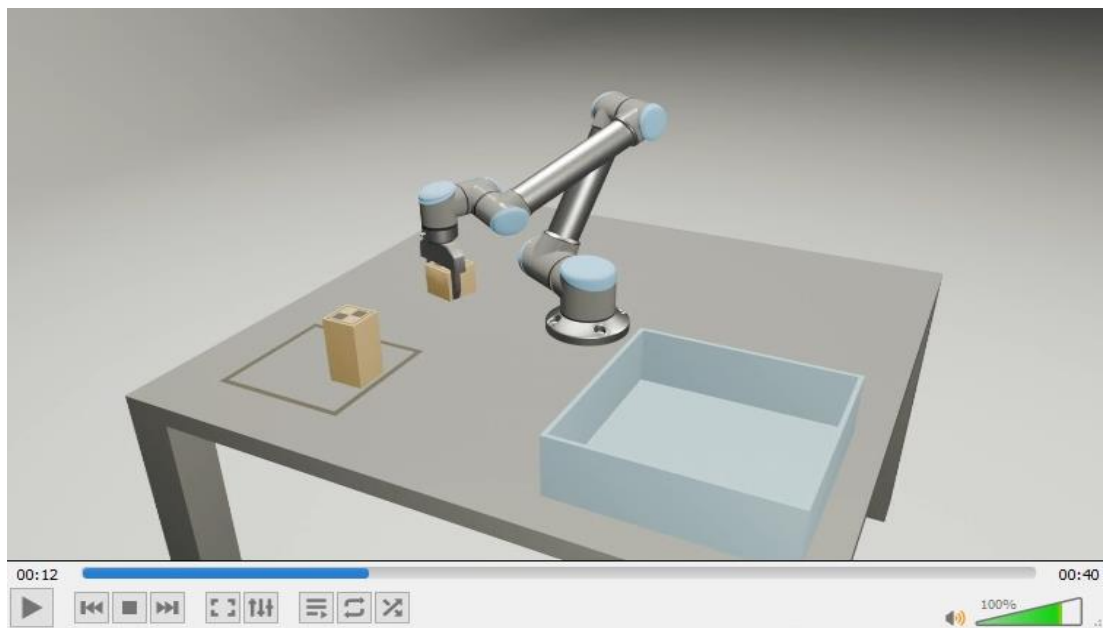


Рисунок 4.9 – Готова анімація контролю робота-маніпулятора за алгоритмом

ВИСНОВКИ

За останні роки сфера використання галузі 3D моделювання значно розширилась, що свідчить про актуальність розробленого проекту в робототехніці та прототипуванні. У рамках виконаної практичної роботи реалізовано систему, що дозволяє, слідуючи алгоритму та інструкціям, створити тривимірну віртуальну візуалізацію для контролю робота-маніпулятора.

Було розглянуто та вивчено різні методи 3D моделювання, види та способи анімації для контролю розроблених тривимірних моделей та визначено програму для роботи з тривимірною графікою. У якості фреймворку для системи було обрано програму Blender. Завдяки своїй універсальності, Blender дає змогу пройти повний шлях розробки системи: від 3D моделювання робота та накладання на нього матеріалів, створення скелету анімації та контролю робота за допомогою інструментів анімування, до візуалізації демонстративних матеріалів у якості зображень та відео. Результатом розробки є система контролю тривимірної моделі робота, яка включає поетапну інструкцію та чіткий алгоритм, слідуючи якому можливо розробити власний віртуальний прототип робота, контролювати його інструментами анімації та створити ефектну презентацію моделі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Polygon and Spline Modeling: Know The Difference // 3D-Ace. URL: <https://3d-ace.com/blog/polygon-and-spline-modeling-know-the-difference/> (дата звернення: 19.09.2024).
- 2 What is 3D sculpting? // Adobe Substance 3D. URL: https://www.adobe.com/il_en/products/substance3d/discover/what-is-3d-sculpting.html (дата звернення: 19.09.2024).
- 3 Keyframe animation // O'Reilly Media, Inc. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/learning-autodesk-maya/9781897177556/sec015.html> (дата звернення: 19.09.2024).
- 4 Поліщук М.М., Ткач М.М. Робототехнічні системи: проєктування і моделювання // КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 9-13.
- 5 Trajectory planning and control algorithm of industrial robot manipulator // Extrica. URL: <https://www.extrica.com/article/23274> (дата звернення: 28.09.2024).
- 6 Complete guide to manipulator robots // Robotnik. URL: <https://robotnik.eu/complete-guide-to-manipulator-robots-benefits-and-applications> (дата звернення: 28.09.2024).
- 7 UR10e, Medium-sized, versatile cobot // URL: <https://www.universal-robots.com/products/ur10-robot/> (дата звернення: 28.09.2024).
- 8 Universal Robots Automation Company. Universal Robots e-Series User Manual // Universal Robots A/S, 2009–2020. – С. 1-89
- 9 What is Cinema 4D // Maxon Computer GMBH. URL: <https://www.maxon.net/en/cinema-4d> (дата звернення: 30.09.2024).
- 10 3Ds Max overview // Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/customer-value/me/3ds-max> (дата звернення: 30.09.2024).
- 11 Project Ideas for Students Learning 3Ds Max // CAD Training Institute. URL: <https://www.cadtraininginstitute.com/popular-project-ideas-for-students-learning-3ds-max-from-a-training-centre/> (дата звернення: 30.09.2024).

- 12 Maya overview // Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/products/maya/> (дата звернення: 30.09.2024).
- 13 About Blender 3D // Blender Team. URL: <https://www.blender.org/about/> (дата звернення: 30.09.2024).
- 14 When to choose Maya or 3ds Max // Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/compare/3ds-max-vs-maya> (дата звернення: 30.09.2024).
- 15 What is 3D Render // CGaward. URL: <https://cgaward.com.ua/publikacii/novosti/chtotakoe-render-ili-rendering.html> (дата звернення: 06.10.2024).
- 16 OptiX or CUDA: Which one is faster in Blender? // iRender. URL: <https://irendering.net/is-cuda-or-optix-faster-in-blender-cycles/> (дата звернення: 06.10.2024).
- 17 What Makes a Good Robot Joint for Cobots? // MachineDesign. URL: <https://www.machinedesign.com/markets/robotics/article/21271952/akribis-systems-what-makes-a-good-robot-joint-for-cobots> (дата звернення: 04.10.2024).
- 18 Array Modifier // Blender Manual. URL: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/modifiers/generate/array.html> (дата звернення: 18.10.2024).
- 19 Spin Extrusion Tool // Blender Manual. URL: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/meshes/tools/spin.html> (дата звернення: 18.10.2024).
- 20 UR10e Test Animation // YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ku9T0IHkG6k>
- 21 K. Baizid, A. Meddahi Industrial Robotics Platform for Simulation Design, Planning and Optimization based on Off-line CAD Programming // ICIEA, 2016. С. 4
- 22 UR10e Algorithm Animation // YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ctJqYtmbMQE>