

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації  
та мехатроніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Розробка математичної моделі якісних показників 3D сканування  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ІТМРТМ-21-1

Коротєєв Данило Русланович  
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 172 Телекомунікації та  
радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інтелектуальні технології  
мікросистемної радіоелектронної техніки  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Разумов-Фризюк Є.А.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАМ

\_\_\_\_\_ (підпис)

Невлюдов І. Ш  
(прізвище, ініціали)

2022 р.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАМ \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка \_\_\_\_\_  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
Освітня програма Інтелектуальні технології мікросистемної  
радіоелектронної техніки \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Коротєєву Данилу Руслановичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка математичної моделі якісних показників 3D сканування

Затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 24.10.2022 № 1391Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 21.12.2022

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_  
Середовище моделювання та реверс інженерінгу Fusion 360; параметри впливу фокусна відстань, кількість кадрів, роздільна здатність зображень; основний метод дослідження – багатофакторний експеримент.

4. Перелік витань, що потрібно опрацювати в роботі Вступ. Аналіз технологій та методів 3D-сканування. Розробка конструкції дослідного зразку 3D-сканеру. Експериментальні дослідження. Розробка математичної моделі впливу параметрів 3D-сканування на якісні показники отриманої моделі. Розрахунок штучного освітлення. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – с формату А4.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологій та методів 3D-сканування	09.11.2022	Виконано
2	Розробка конструкції дослідного зразку 3D-сканеру	11.11.2022	Виконано
3	Експериментальні дослідження	16.11.2022	Виконано
4	Розробка математичної моделі впливу параметрів 3D-сканування на якісні показники отриманої моделі.	23.11.2022	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	04.12.2022	Виконано
6	Подання роботи на перевірку інтернет сервісу Unichesk	11.12.2022	
7	Подання роботи на рецензію	9.12.2022	
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	15.12.2022	
9	Подання атестаційної роботи до ЕК	21.12.2022	

Дата видачі завдання 08.11.2022

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Коротєєв Д.Р.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. каф. КІТАМ Разумов-Фризиук Є.А.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 111 с., 8 табл., 82 рис., 26 джерела.

### 3D-СКАНЕР, ПАРАМЕТРИЗЦІЯ, MESH, РЕВЕРС ІНЖЕНІРІНГ, БАГАТОФАКТОРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є оптимізація параметрів точності в процесі 3D-сканування.

Предметом дослідження є технології 3D-сканування.

Об'єктом дослідження є вплив технологічних параметрів 3D-сканування на точність отриманих 3D-моделей.

Методи дослідження - аналіз параметрів сканеру та процесу сканування, розрахунок математичної моделі, рівня регресії, математичний аналіз, розрахунки Create Mesh Section Sketch та Fit Curves to Mesh Section, знаходження сумарної помилка сканування при різних параметрах, повний факторний експеримент, статистичний аналіз, t-критерій Ст'юдента.

В ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено конструкцію та виготовлено діючий прототип 3D-сканеру. Проведено експериментальні дослідження впливу параметрів сканування на точність отриманої моделі. Під точністю розуміється відповідність розмірів деталі, що сканується і параметризованої після реверс інженерингу 3D-моделі. За результатами експерименту розроблено математичну модель впливу обраних параметрів сканування на точність отриманої 3D-моделі.

## ABSTRACT

Explanatory note: 111 p., 8 table, 82 figure, 26 sources.

3D-SCANNER, PARAMETERIZATION, MESH, REVERSE  
ENGINEERING, MULTIFACTOR EXPERIMENT

The goal of the master's qualification is the optimization of accuracy parameters in the process of 3D-scanning.

The subject of research is 3D-scanning technology.

The object of research is the influence of technological parameters of 3D-scanning on the accuracy of the obtained 3D-models.

Research methods - analysis of scanner parameters and the scanning process, calculation of a mathematical model, regression equations, mathematical analysis, calculations of Create Mesh Section Sketch and Fit Curves to Mesh Section, finding the total scanning error at different parameters, full factorial experiment, statistical analysis, Student's t-test.

In the course of the qualification work, a design was developed and a working prototype of the 3D-scanner was manufactured. Experimental studies of the influence of scanning parameters on the accuracy of the obtained model have been carried out. Accuracy refers to the correspondence between the dimensions of the scanned part and the parameterized 3D-model after reverse engineering. According to the results of the experiment, a mathematical model of the influence of the selected scanning parameters on the accuracy of the obtained 3D-model was developed.

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки .....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз технологій та методів 3D-сканування .....	11
1.1 Аналіз методів реверс-інженерінгу .....	11
1.2 Аналіз технологій 3D-сканування .....	14
1.2.1 Принципи 3D-сканування .....	14
1.2.2 Контактні 3D сканери .....	17
1.2.3 Визначення часу проходження світлової хвилі .....	19
1.2.4 Пристрої на основі фотодіодних матриць .....	25
1.2.5 Триангуляційні лазерні сканери .....	27
1.2.6 Пасивні стереосистеми .....	30
1.2.7 Структурована підсвітка.....	38
1.2.8 Проекції точок, ліній, сіток .....	40
1.3 Постановка задач дослідження .....	43
2 Розробка конструкції дослідного зразку 3D-сканеру.....	45
2.1 Розробка кінематичної частини .....	45
2.2 Камера 3D-сканеру.....	46
2.3 Розробка 3D-моделі.....	47
2.4 Вибір компонентів та розробка механічних частин виробу .....	49
2.4.1 Вибір компонентів.....	49
2.4.2 Виготовлення механічних частин виробу .....	53
2.5 Розробка електричної частини .....	58
2.5.1 Розробка блок-схеми електричної частини .....	58
2.5.2 Вибір компонентів.....	59
2.5.3 Збірка електричної частини пристрою.....	60
2.6 Налаштування програмного забезпечення .....	62

2.6.1 Програмне забезпечення для камери Kinect 2.0.....	62
2.6.2 Налагодження програмного забезпечення для керування кроковими двигунами .....	66
2.7 Висновки до другого розділу .....	71
3 Експериментальні дослідження.....	72
3.1 Аналіз параметрів експерименту .....	72
3.2 Методика проведення експерименту .....	74
3.3 Демонстрація результатів експериментальних досліджень .....	81
3.4 Висновки до третього розділу .....	87
4 Розробка математичної моделі впливу параметрів 3D-сканування на якісні показники отриманої моделі .....	88
4.1 Повний факторний експеримент .....	88
4.2 Обробка результатів експерименту .....	94
5 Розрахунок штучного освітлення .....	103
Висновки .....	107
Перелік джерел посилань .....	109
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	112

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ІЧ – інфрачервоний;

КП – керуюча програма;

ОС – операційна система;

ПЗ – програмне забезпечення;

САПР – система автоматизованого проектування;

ЧПУ – числове програмне управління;

3D – 3 dimensional;

CAD – computer-aided design;

CAM – computer-aided manufacturing;

SDK – software development kit.

## ВСТУП

В наш час 3D-сканування стає все більш популярнішим с кожним днем. З'являються нові технології сканування, нові прилади, нове програмне забезпечення. 3D-сканування використовується як у декоративних, історичних, соціальних, будівничих і інших цілях так і у виробництві. Все популярнішими стають технології реверс інженерінгу. Отримання параметричної CAD моделі по відсканованій mesh моделі. Сам процес реверс інженерінгу на даний момент не повністю автоматизований і значною мірою залежить від оператора-інженера. Але досить значну роль відіграє і якість отриманого в процесі 3D-сканування mesh файлу (полігональної моделі). Під якістю в першу чергу розуміється її точність – відповідність розмірів та форм деталі що сканується і отриманої 3D-моделі. На ці якісні показники в першу чергу впливають параметри 3D-скануванн. Їх виявлення та оптимізація по критерію точності є вкрай важливою задачею.

Передбачається використання таких САПР, як Autodesk Fusion 360.

Autodesk Fusion 360 – комплексний інструмент для промислового дизайну і машинобудівного проектування [1].

В процесі підготовки до кваліфікаційної роботи було використано методичні вказівки, викладені в нормативних положеннях [2].

Предметом дослідження є технології 3D-сканування.

Об'єктом дослідження є вплив технологічних параметрів 3D-сканування на точність отриманих 3D-моделей.

Методи дослідження - аналіз параметрів сканеру та процесу сканування, розрахунок математичної моделі, рівня регресії, математичний аналіз, розрахунки Create Mesh Section Sketch та Fit Curves to Mesh Section,

знаходження сумарної помилка сканування при різних параметрах, повний факторний експеримент, статистичний аналіз, t-критерій Ст'юдента.

Метою роботи є оптимізація параметрів точності в процесі 3D-сканування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологій 3D-сканування;
- розробити діючий експериментальний зразок 3D-сканеру;
- провести експериментальні дослідження на розробленому 3D-сканеру;
- провести аналіз параметрів, що впливають на точність створених тривимірних моделей;
- розробити математичну модель впливу параметрів вимірювання на точність створених тривимірних моделей та провести оптимізацію цих параметрів.

Пояснювальну записку виконано згідно з [3], [4].

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МЕТОДІВ 3D-СКАНУВАННЯ

## 1.1 Аналіз методів реверс-інженерінгу

Останнім часом виробничими підприємствами, дослідними організаціями та дію розробниками все частіше використовуються методи та технології реверс-інженерінгу, або оберненого проектування. Реверс-інженерінгу (англ. reverse engineering) – дослідження деякого готового пристрою або програми, а також документації на нього з метою зрозуміти принцип роботи; наприклад, щоб виявити недокументовані можливості (у тому числі програмні закладки), зробити зміну або відтворити пристрій, програму або інший об'єкт з аналогічними функціями, але без копіювання.

Цей метод застосовується зазвичай у тому випадку, якщо творець оригінального об'єкта не надав інформації про структуру та спосіб створення (виробництва) об'єкта. Правовласники таких об'єктів можуть заявити, що проведення зворотної розробки або використання її результатів порушує їхнє виключне право згідно із законом про авторське право та патентне законодавство.

Суть цього процесу у машинобудуванні, приладобудуванні (корпуси, стойки) полягає у визначенні розмірів та форм існуючого прототипу завдяки спеціальним інструментам та у створенні на основі цих замірів формалізованої уяви про прототип у вигляді креслень або параметризованих 3D-моделей [5].

Необхідність реверс-інжинірингу може виникнути якщо:

- конструкторська документація на виріб була втрачена, і необхідне її відновлення;
- існує виріб, який необхідно доопрацювати, але ні креслень, ні 3D-моделей немає;

- потрібно провести ремонт зламаного механізму.

Ще кілька років тому єдиним методом тому для отримання такої формалізованої уяви був класичний інструментальний метод за допомогою лінійки, штанген-циркуля, радіусомера, глибиноміра та інших інструментів. Після замірів на основі отриманої інформації створюється або класичне креслення, або параметризована тривимірна модель у будь-якій САД системі.

На рис. 1.1 продемонстровано інструментальний метод реверс-інженерінгу.



Рисунок 1.1 – Інструментальний метод реверс-інженерінгу [5]

Основним недоліком даного методу є необхідність різноманітного, в залежності від об'єкту, високоточного вимірювального інструменту та висока кваліфікація спеціаліста, що проводить дослідження. Крім того провести заміри та параметризацію де-яких ребр, граней, поверхонь може бути дуже складно, а іноді не можливо.

Більш сучасним методом реверс-інженерінгу передбачає використання 3D-сканеру. На першому етапі деталь, що потрібно параметризувати, сканується за допомогою того чи іншого типу 3D-сканерів. Після сканування отримується тріангуляційна або полігональна 3D-модель. Формат таких моделей переважно .stl або .obj.

Така модель є досить гнучкою у редагуванні та у використанні, вона є ідеальною для використання в 3D-принтерах для 3D-друку за різними технологіями. Але отримана модель зовсім не підходить для створення технологічної документації з метою подальшого виготовлення чи копіювання. Справа в тому що формати .stl та .obj описують поверхні та ребра моделі не математичними формулами, а полігонами так званими mesh'ами (трикутниками) або quadro mesh'ами (чотирикутниками). Точність такої моделі в першу чергу залежить від обладнання, яким було виконано 3D-сканування та параметрів створення полігонів. Зазвичай створення моделі відбувається в автоматичному режимі за винятком, коли немає можливості відсканувати де-які елементи або поверхні виробу. Крім того формати .stl та .obj мають особливість що при імпорті їх у параметричні редактори (Fusion360, SolidWorks, PTC Creo та ін.) існує висока вірогідність втрати розмірності полігонів і модель пропорційно збільшується або зменшується.

Таким чином, для отримання параметричної моделі та створення класичного креслення кожна грань та ребро моделі повинні бути описані математично. Цей процес відбувається за допомогою різноманітних САМ (Fusion360, GeomagicDesign X) систем здебільше в ручному або напівавтоматизованому режимі. Ця робота як у інструментальному методі реверс-інженірингу залишається складною та потребує високої кваліфікації виконавця. Але трудомісткість цієї операції значно менше ніж при прямих вимірюваннях. Робота зі сканером потребує теж певних навичок. Крім того цей метод не потребує великої кількості інструментів, необхідно лише 3D-сканер. Але варто визначити що вартість якісного 3D-сканер досить велика. На рис. 1.2 продемонстровано як виглядає реверс-інженерінг із допомогою 3D-сканеру.

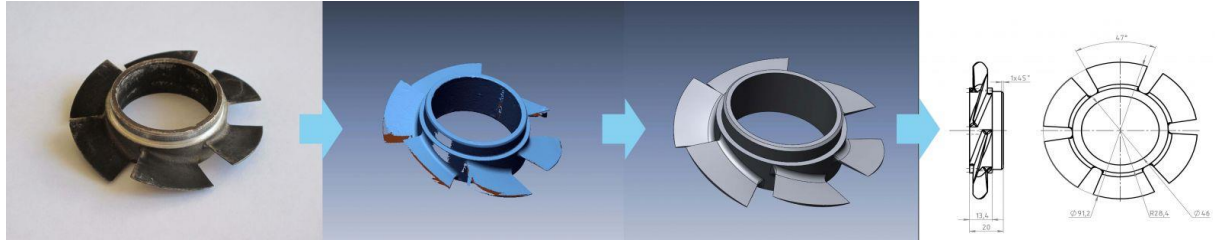


Рисунок 1.2 – Реверс-інженерінгу із допомогою 3D-сканеру [5]

Основним якісним показником 3D-сканеру є показник точності. Тобто відповідність отриманих та реальних розмірів, параметрів граней та ребер, їх взаємного розташування.

Таким чином задачами, що необхідно є:

- проаналізувати технології та методи 3D-сканування;
- розробити конструкцію експериментального зразку 3D-сканера;
- проаналізувати існуючі САМ системи, що дозволяють проводити реверс-інженерінг;
- провести експериментальне дослідження, що дозволить знайти залежність між параметрами сканування та якісними показниками отриманої параметричної моделі;
- створити математичну модель, що дозволить оптимізувати процес 3D-сканування;
- експериментально перевірити розроблену 3D-модель.

## 1.2 Аналіз технологій 3D-сканування

### 1.2.1 Принципи 3D-сканування

3D-сканер є спеціальним пристроєм, який аналізує фізичний об'єкт, щоб отримати дані про форму предмета. Зібрані дані надалі застосовуються для створення цифрової тривимірної моделі цього об'єкта. В даний час 3D-сканери застосовуються для вирішення різних прикладних завдань, таких як контроль

форми, розпізнавання, візуалізація, анімація, та використовуються у різних галузях промисловості, медицини, освіти, наукових досліджень [6].

Вибрати найбільш підходящий метод сканування – не завжди просте завдання. Створення точної та фотореалістичної моделі складного об'єкту, як і раніше, залишається складним завданням.

На сьогоднішній день розроблено досить багато технологій для цифрового 3D-сканування. Багато методів засновані на досвіді сприйняття людиною інформації про об'єкт:

- геометрична перспектива, повітряна перспектива, знання реальних розмірів об'єктів, що спостерігаються;
- тіні та відблиски;
- переміщення об'єкта або переміщення ока щодо об'єкту;
- акомодация кришталика. Фокусування зображення за допомогою зміни фокусної відстані кришталика акомодацийними м'язами;
- бінокулярність зору – мозок зіставляє зображення, котрі бачать праве і ліве око;
- тактильні відчуття.

Однак існують і методи, засновані на нових фізичних принципах:

- визначення часу проходження світла до перешкоди та назад.
- методи структурованого підсвічування.
- фазові методи, засновані на принципах інтерференції та голографії.
- використання випромінювання у розширеному діапазоні довжин хвиль (інфрачервоне, рентгенівське тощо).

Методи вимірювання 3D-об'єктів можна розділити на контактні (координатно-вимірювальні машини, механічні щупи, методи, засновані на отриманні зрізів об'єкта) і безконтактні методи (стереобінокулярні системи, лазерне та рентгенівське сканування, структурне освітлення). Контактні

методи поділяються на неруйнівні (non-destructive) та руйнівні (destructive) методи аналізу [6].

На рис. 1.3 продемонстровано всі безконтактні методи 3D-сканування.



Рисунок 1.3 – Безконтактні методи 3D-сканування

Пасивні способи сканування 3D-об'єктів:

– методи, що ґрунтуються на аналізі одного зображення. Найточніші результати досягаються на основі інтерактивних підходів. Інформація про обсяг виходить у результаті аналізу контуру, затінення, текстури, освітленості, використання методів проектованої геометрії.

– триангуляційні методи. Відновлення об'єкта набору двовимірних вхідних зображень. Порівнюються розташування однакових точок на сусідніх

кадрах. Необхідно точно знати позицію камери і потрібна велика кількість близько розташованих кадрів для узгодження різних зображень. Найбільш поширений спосіб – відновлення 3D за двома стереозображеннями. Основна складність – визначення однакових точок на різних зображеннях.

Активні способи сканування 3D-об'єктів:

- вимір тимчасової затримки проходження світла від різних частин об'єкта.

- методи структурованого висвітлення.

- фазові інтерференційні, муарові та голографічні методи.

У багатьох випадках використання одного способу неможливе, тому хороший результат дає поєднання кількох способів [7].

### 1.2.2 Контактні 3D-сканери

Контактні 3D-сканери досліджують (зондують) об'єкт за допомогою безпосереднього фізичного контакту [7]. Механізм сканера буває трьох різних форм:

- каретка з фіксованою вимірювальною рукою, розташованою перпендикулярно, а вимір по осях відбувається, доки рука ковзає вздовж каретки. Ця система оптимальна для плоских або звичайних кривих опуклих поверхонь;

- маніпулятор з фіксованими складовими та високоточними кутовими датчиками. Розташування кінця вимірювальної руки тягне у себе складні математичні обчислення, що стосуються кута обертання шарніра зап'ястя руки, і навіть кута розвороту кожного з з'єднань руки. Цей механізм ідеально підходить для зондування заглиблень чи внутрішніх просторів з невеликим входним отвором;

- одночасне використання попередніх двох методів. Наприклад, маніпулятор можна поєднати з кареткою, що дозволить отримати 3D-дані від

великих об'єктів, що мають внутрішні порожнини або перекривають один одного поверхнями [9].

На рис. 1.4 показано одну зі схем побудови координатно-вимірної машини. Координатно-вимірні машина є прикладом контактної 3D-сканера. Такі пристрої використовуються в основному у виробництві та мають бути досить точними. Переміщення вимірної руки із встановленим зондом може виявитися дуже повільним. Швидкість сканування вбирається у кількох сотень герц.

У більшості випадків використовуються напівавтоматичні системи на основі механічних чи оптичних щупів. Це найпопулярніша технологія 3D-сканування – так звана скалка (рис. 1.4). Такі системи являють собою контактний щуп, який за допомогою декількох потенціометрів, встановлених на складній арматурі з шарнірними з'єднаннями, фіксує інформацію про те, де знаходиться головка, і передає цю інформацію у вигляді координат у тривимірному просторі.



Рисунок 1.4 – Координатно-вимірні машина з двома фіксованими взаємно перпендикулярними вимірними плечима [7]

Одна з основних переваг таких систем – високий рівень контролю за процесом оцифрування з боку оператора. Причому саме цей пристрій може бути досить складним: у ньому, наприклад, застосовуються система противаг та автоматична компенсація зміни температури та відповідних розширень та стисків металу.

Пристрій 3D-сканера займається детальним дослідженням фізичних об'єктів, після чого відтворюються їх точні моделі в цифровому форматі [8].

### 1.2.3 Визначення часу проходження світлової хвилі

Рівень розвитку електроніки дозволяє зараз прямо виміряти час, що проходить світлом до об'єкта. 3D-сканери, що працюють на цьому принципі, називаються часопролітними (time-of-flight). Пристрій прольотних сканерів буває двох типів. Перший тип заснований на лазерних далекомірах, які визначають затримку проходження світла до об'єкта та назад. Другий використовує спеціальні відеокамери на фотодіодних матрицях, що вимірюють для кожного елемента матриці час затримки поширення модульованого підсвічування до об'єкта і назад [10].

Пристрої на основі лазерних дальномірів працюють наступним чином. Надсилається сигнал, який поширюється з характерною швидкістю. Він відбивається від об'єкта і повертається назад. Час проходження визначає минулу відстань. Якщо відома швидкість поширення зондуючого імпульсу в середовищі, то множення швидкості на половину часу між моментами випромінювання та прийому імпульсу дасть відстань від випромінювача до об'єкта, який відбив сигнал.

Активні сканери використовують певні види випромінювання та сканують об'єкт через відображення світла чи проходження випромінювання через об'єкт чи середовище. У таких пристроях застосовуються світло, ультразвук чи рентгенівські промені.

Виробництво компактних твердотільних лазерів дозволило створити системи вимірювання, які як зондуючий імпульс використовували світло. Той чи інший механічний спосіб орієнтування світлового променя дозволяє таким системам проводити послідовні вимірювання у просторовому секторі (або сканувати його, такі пристрої вимірювання стали називатися лазерними сканерами). Будь-який сканер видає набір тривимірних координат точок відображення лазерного променя щодо точки випромінювання. Подання в такій локальній системі координат є достатнім для вимірювань локальних розмірів об'єктів аж до розмірів будівлі.

Якщо ж забезпечити такий сканер досить точним GPS-приймачем і системою вимірювань його кутової орієнтації за трьома напрямками, його можна встановлювати на літак як аерознімальний сканер або на автомобіль як мобільний сканер.

Робочою довжиною хвилі більшості сканерів є ближнє інфрачервоне світло з довжиною хвилі близько 1 мкм для авіаційних сканерів (менше розсіювання в парах атмосфери) і більше 1 мкм для стаціонарних сканерів (безпечніше для зору).

Результатом роботи лазерних сканерів є хмара тривимірних точок.

Лазерний сканер складається з лазерного далекоміра та блоку розгортки лазерного променя. Як блок розгортки можуть використовуватися сервопривід і полігональне дзеркало або призма. Сервопривід відхиляє промінь на задану величину горизонтальній площині, при цьому повертається вся верхня частина сканера, яка називається головкою. Розгортка у вертикальній площині здійснюється за рахунок обертання чи хитання дзеркала.

Основу роботи лазерних далекомірів складають імпульсний та фазовий методи вимірювання відстаней, а також метод рямової кутової розгортки (тріангуляційний метод) [11].

Імпульсний метод вимірювання відстаней заснований на вимірюванні часу проходження сигналу від приймально-передаючого пристрою до об'єкта та назад. Знаючи швидкість поширення електромагнітних хвиль  $c$ , можна визначити відстань:

$$R = \frac{c\tau}{2}, \quad (1.1)$$

де  $\tau$  – час, що вимірюється з моменту подачі імпульсу на лазерний діод до моменту прийому відбитого сигналу (рис. 1.5).

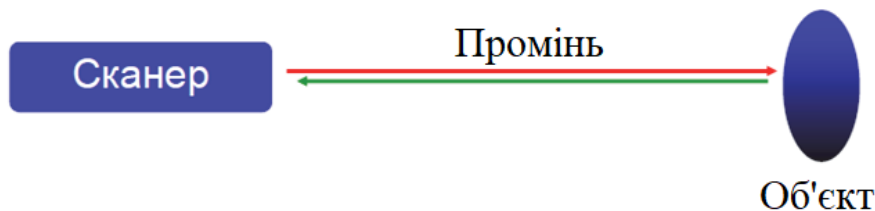


Рисунок 1.5 – Вимірювання часу відображення лазерного променя [11]

Характерні робочі частоти електронної схеми повинні бути в області гігагерц, тому обладнання, необхідне вимірювання цього малого проміжку часу, має працювати надзвичайно швидко. Це стало можливим лише при використанні останніх досягнень у сучасній електроніці та обчислювальній техніці [12].

Імпульсний метод вимірювання відстаней за точністю поступається фазовий метод. Це тому, що фактична точність кожного виміру залежить від низки параметрів, кожен із яких може вплинути на точність конкретного виміру. Такими параметрами є:

- тривалість і форма (зокрема, крутість переднього фронту) зондувального імпульсу;

- відбивні характеристики об'єкта;
- оптичні властивості атмосфери;
- текстура та орієнтація елементарної поверхні об'єкта, що викликає відображення зондуючого променя по відношенню до лінії візування.

Фазовий метод виміру відстаней. Фазовий метод вимірювання відстаней заснований на визначенні різниці фаз посилюються і приймаються модульованих сигналів. У цьому випадку відстань обчислюється за формулою:

$$R = \frac{\varphi_{2R}}{4\pi f}, \quad (1.2)$$

де  $\varphi_{2R}$  – різницю фаз між опорним та робочим сигналами;

$f$  – частота модуляції.

Лазерний промінь із синусоїдально модульованою оптичною потужністю прямує на ціль. Відстежуються відбите світло (розсіяне або дзеркально відбите) і фаза модуляції потужності в порівнянні з переданим світлом. По отриманій різниці фаз певністю прямує на мету. Відстежуються відбите світло (розсіяне або дзеркально відбите) і фаза модуляції потужності в порівнянні з переданим світлом. По отриманій різниці фаз визначається відстань. Вищі частоти модуляції дозволяють отримати більш високу точність.

Метод фазового зсуву (рис. 1.6) передбачає невизначеність у відношенні відстані, тому що зі збільшенням відстані фаза періодично змінюватиметься. Однак, періодичність набагато більша, ніж в інтерферометрі, так як частота модуляції значно нижча, ніж оптична частота. Крім того, невизначеність може бути легко видалена, наприклад шляхом вимірювання з двома різними частотами модуляції.

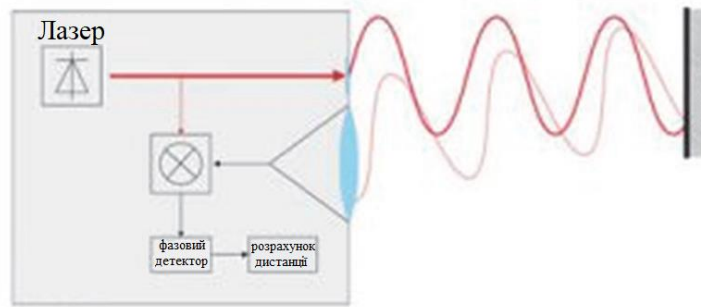


Рисунок 1.6 – Метод зсуву фаз [14]

Порівняно з інтерферометрами пристрою, засновані на техніці фазового зсуву, менш точні, але дозволяють однозначно вимірювати великі відстані. Крім того, вони підходять для цілей із розсіяним відображенням від шорсткої поверхні.

Режим роботи фазовимірювального пристрою залежить від його температури, із зміною якої незначно змінюється фаза сигналу. Внаслідок цього точно початок відліку фази визначити не можна. З цією метою фазові вимірювання повторюються на еталонному відрізку (калібрувальної лінії) усередині приладу [14].

Головна перевага фазового методу виміру – більш висока точність, яка може досягати одиниць міліметрів.

Переваги лазерного сканування:

- можливість вимірювання профілю крізь оптично прозорі шари, що використовуються. Зокрема повітряне лазерне сканування дозволяє отримувати координати рельєфу під покривом рослинності;
- висока продуктивність, що є особливо важливим для мобільних систем;
- вони ідеально підходять для сканування будівель та географічних об'єктів. Можуть працювати на дуже великих відстанях до кількох кілометрів.

Недоліки лазерного сканування:

- тривалість процесу механічного сканування вибраного просторового сектора;
- відсутність напівтонової інформації. Однак більшість сучасних моделей лазерних сканерів мають вбудовану відео- або фотокамеру, завдяки чому хмара точок може бути пофарбована в реальні кольори;
- невисока точність вимірів.

Якщо відомі параметри оптичної системи, то завдання відновлення просторового положення будь-якого променя, що прийшов на матрицю, є досить простим. Справа залишається за тим, щоб створити спалах світла на корпусі вимірювального апарату та якимось чином виміряти затримку в приході відбитого від об'єкта світла на кожен піксель цифрової матриці.

В даний час розробкою приладів для тривимірного лазерного сканування займається безліч фірм, всі фірми випускають сканери для різних цілей. Основними характеристиками сучасних наземних лазерних сканерів є:

- точність вимірювання відстані, горизонтального та вертикального кутів;
- максимальна роздільна здатність сканування;
- швидкість сканування;
- дальність дії лазерного сканера;
- розбіжність лазерного променя;
- поле зору сканера;
- засоби отримання інформації про реальний колір;
- клас безпеки лазера;
- портативність та особливості інтерфейсу.

На рис. 1.7 наведено один із лазерних сканерів сімейства Surphaser компанії Basis Software Inc. (США). Surphaser – це серія приладів, представлена декількома модифікаціями, розрахованими на різні діапазони

робочих відстаней – від 0.2 м до 70 м. У цьому приладі реалізований фазовий метод визначення відстані, за рахунок чого досягається висока швидкість сканування (до 2.2 млн. точок в секунду).

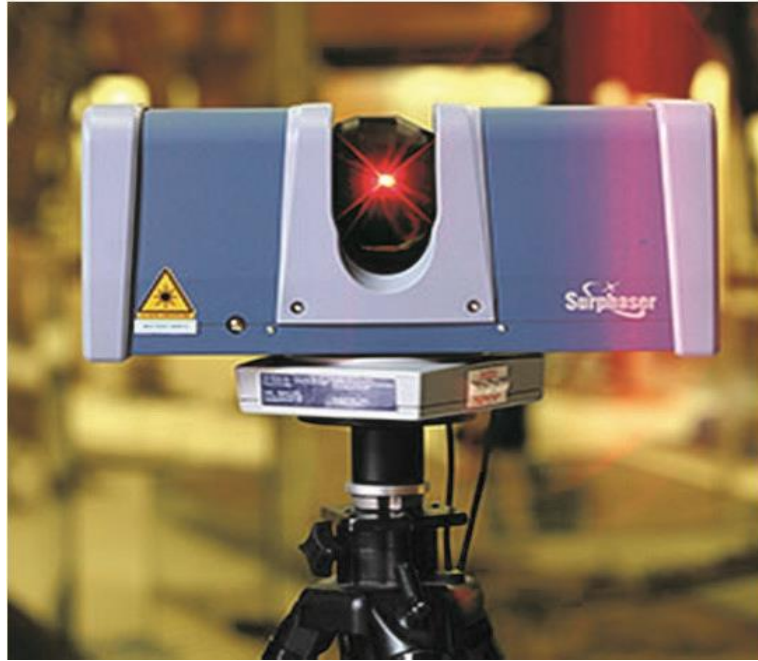


Рисунок 1.7 – Лазерний 3D-сканери Surphaser 25HSX [13]

#### 1.2.4 Пристрої на основі фотодіодних матриць

Основними вузлами пристроїв на основі фотодіодних матриць є випромінювач, оптична система, спеціальна цифрова фотодіодна матриця та електронна вимірювальна та обчислювальна система. Необхідно відзначити, що характерні розміри області вимірювань (кілька метрів) та необхідна точність (кілька сантиметрів) висувають дуже жорсткі вимоги до тимчасової точності всіх вимірювальних пристроїв [13].

Випромінювач створює дуже короткий світловий спалах (максимальна дальність камери близько 7.5 м при тривалості спалаху  $t_0 = 50$  нс ). Робоча довжина хвилі становить, найімовірніше, 1.5 мкм.

Відбите від сцени світло повертається назад і фокусується оптичною системою так, щоб падати на цифрову матрицю.

Ця матриця має спеціальний тип і складається із фотодіодів. При попаданні світла на фотодіод він починає виробляти струм, який через ключ передається накопичувальні елементи (конденсатори). У найпростішому випадку можна використовувати два конденсатори. Спочатку заряджається перший конденсатор  $S_1$ , через 50 нс після початку світлового спалаху ключ перемикається на зарядку другого конденсатора  $S_2$ . Ще через 50 нс ключ перетворюється на нейтральне становище. Через невеликий інтервал весь процес знову повторюється. Так як частота проходження спалахів досить велика і всю сцену можна вважати нерухомою, то заряди конденсаторів  $S_1$  і  $S_2$  накопичуються від спалаху до спалаху, тим самим підвищуючи рівень сигнал/шум і збільшуючи надійність розрахунку. Для нагромадження використовуються кілька тисяч циклів.

В результаті співвідношення між зарядами  $S_1$  та  $S_2$  дозволяє визначити положення фронту відбитого імпульсу щодо спалаху. Остаточно розрахувати відстань  $D$  вздовж променю, що прийшов до цього пікселя, можна за формулою:

$$D = \frac{ct_0 S_2}{2(S_1 + S_2)}, \quad (1.3)$$

Одним із прикладів таких пристроїв є контролери Kinetic першої та другої версії від компанії Microsoft. Згідно з заявленими технічними характеристиками, він підтримує робочий діапазон дальностей від 0.5 до 4.5 м і має поле зору приблизно 50 кутових градусів в обох напрямках. Роздільна здатність далекомірної матриці невелика і становить  $512 \times 426$  пікселів. Одночасно зі збором інформації про дальність звичайна цифрова матриця

виконує відеозйомку сцени з роздільною здатністю 1920 на 1080 пікселів (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Kinect 2 [20]

#### 1.2.5 Триангуляційні лазерні сканери

Триангуляційні лазерні 3D-сканери використовують лазерний промінь для того, щоб прозондувати об'єкт. Камера фіксує розташування точки, куди влучив лазер.

Теодоліт це телескоп, встановлений на двох осях обертання. Кут на об'єкт відстежується точно. Вимірюючи кутові вимірювання з різних положень, можна отримати відстань до об'єкта. Сучасні теодоліти керуються комп'ютером для автоматичного відстеження об'єкта, що вимірюється при його переміщенні (рис. 1.9).

Триангуляційний метод контролю заснований на розрахунку шуканої відстані через співвідношення трикутника з використанням відомих параметрів системи. Технологія називається триангуляція тому, що камера, лазерний випромінювач і сама лазерна точка на поверхні об'єкта утворюють своєрідний трикутник. У цій системі відома довжина однієї із сторін трикутника – це відстань між лазерним випромінювачем та камерою. Також відомий кут лазерного випромінювача, а кут камери визначається

розташування лазерної точки в полі огляду камери. Ці три характеристики повністю формують розмір трикутника та вказують на розташування кута лазерної точки [15].



Рисунок 1.9 – Теодоліт [15]

Лазерна триангуляція здійснюється шляхом проектування лазерної лінії або точки на об'єкт, а потім реєстрації її відображення за допомогою датчиків, розташованих на відомій відстані від лазерного джерела. В результаті кут відображення може бути інтерпретований як інформація про рельєф (рис. 1.10).

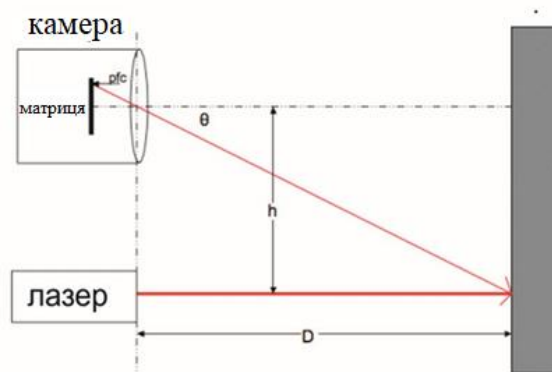


Рисунок 1.10 – Принцип роботи триангуляційного лазерного далекоміра [15]

Лазерний промінь проектується на об'єкт у поле зору камери. Цей промінь має бути ідеально паралельний оптичній осі камери. Лазерна точка захоплюється разом із рештою сцени. На зображенні необхідно знайти яскраву пляму. Передбачається, що точка лазера є яскравішою на тлі темнішого об'єкта. Далі нам потрібно розрахувати дальність до об'єкта.

Як бачимо з рис. 1.10 відстань  $D$  може бути розрахована за формулою:

$$D = \frac{h}{\operatorname{tg}\theta}, \quad (1.4)$$

де  $h$  – фіксована відстань.

Кут  $\theta$  можна визначити за формулою 2.5:

$$\theta = pfc \cdot rrc \cdot ro, \quad (1.5)$$

де  $pfc$  – номер пікселю центру світлої точки від центру зображення;

$rrc$  – радіан на піксель;

$ro$  – компенсація.

Кількість пікселів від центру площини зображення до лазерної точки може бути знайдено простим підрахунком. Для отримання інших параметрів потрібно виконати калібрування.

Для калібрування системи можна використовувати серію вимірювань, де відомі дальність до мети, а також кількість пікселів центру зображення до лазерної точки:

$$\theta_{\text{факт}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{D_{\text{факт}}}\right), \quad (1.6)$$

Тепер можна вивести розрахункові співвідношення або використовувати лінійну залежність кута від номера пікселя.

На такому принципі побудовано і роботу промислових триангуляційних вимірювачів відстані (рис. 1.11).

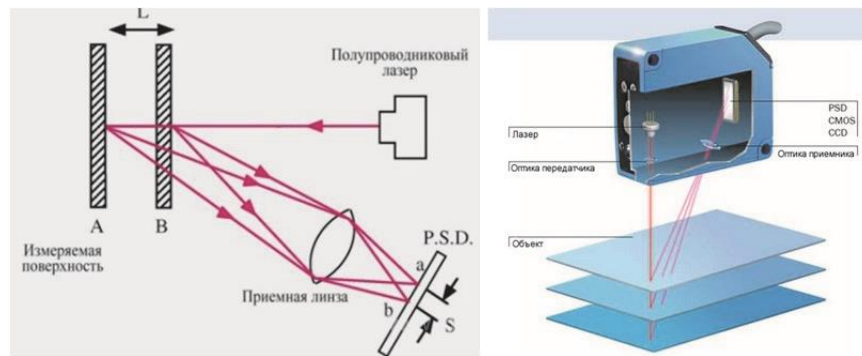


Рисунок 1.11 – Схема триангуляційного датчика вимірювань відстаней [15]

Одним з конкретних поліпшень, які можуть бути внесені в роботу цього далекоміра є проєкція горизонтальної лазерної лінії замість точки. Таким чином, можна обчислювати відстань до мети кожного ряду пікселів на зображенні.

### 1.2.6 Пасивні стереосистеми

Безконтактні пасивні сканери фіксують лише відбите природне світло. Крім уловлювання видимого спектра світла вони можуть фіксувати інфрачервоне та інші типи випромінювання. Пасивний метод сканування відносно дешевий, тому що не вимагає використання дорогого спеціалізованого обладнання, достатньо звичайної цифрової камери та спеціалізованого програмного забезпечення [17].

Фотограмметрія заснована на обробці стандартних фотографій методами проєктивної геометрії і спочатку використовувалася для

оцифрування великих об'єктів, таких як будівлі, бурові установки та склади. У фотометричних системах зазвичай використовується одна камера, яка робить зйомку декількох кадрів. Ці методи дозволяють перетворити модель об'єкта, щоб відновити поверхню кожного пікселя. Принцип фотограмметрії полягає в тому, щоб зробити кілька зображень об'єктів та вручну або автоматично знайти спільні точки на кожній фотографії. Після чого відбувається відновлення моделі об'єкта по кожному пікселю на знімках. Фотограмметрія часто використовується з іншими 3D-технологіями сканування.

Побудова моделі може виконуватися з використанням так званої силуетної техніки, в якій аналізується серія фотографій тривимірного об'єкта на контрастному тлі. Перетворюючи отримані силуети, дослідник формує оболонку об'єкта. Недоліком цього методу є можливість сканування поглиблень об'єкта. Крім того, існують методи, що ґрунтуються на тому, що користувач виявляє та ідентифікує деякі особливості форми об'єкта, спираючись на безліч різних його зображень, що дозволяє у результаті створити приблизну тривимірну модель об'єкта простої форми. Такий функціонал має ряд сучасних програмних продуктів, наприклад D-Sculptor, iModeller, Autodesk ImageModeler або PhotoModeler.

Стереоскопічні системи передбачають використання двох відеокамер, які розташовані у різних місцях. За аналізом відмінностей зображення кожної камери можна визначити відстань до кожної точки. Цей спосіб за своїм принципом схожий на стереоскопічний зір людини. Найбільш просто зняти два стереознімки, а потім перетворити їх на тривимірний об'єкт. Два зображення називаються стереопарою. Для отримання двох стереознімків можна використовувати спеціальний штатив для закріплення двох фотоапаратів або спеціалізовані камери.

Для отримання тривимірного об'єкта необхідно встановити відповідність точок на двох знімках та методами триангуляції визначити z-координату [18].

Автоматичний пошук відповідних точок (point match) – одне з найскладніших завдань у галузі машинного зору. Для цього визначаються проєкції однієї і тієї ж точки сцени (рис. 1.12). Відрізок між оптичними центрами камер називається стереобазою.

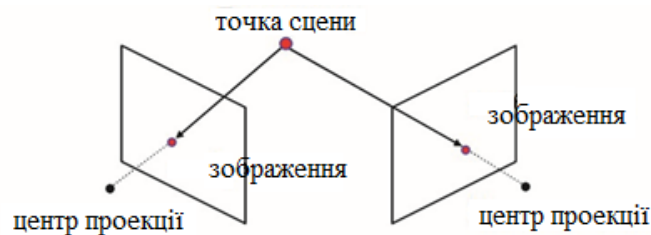


Рисунок 1.12 – Отримання двох стереозображень [18]

Стерео-реконструкція – завдання визначення координат точок у тривимірному просторі на підставі їх положення на кадрах відеоряду або кількох (не менше двох) зображень. Якщо  $B$  – базис стереозйомки,  $D$  – відстань до об'єкта, то базис вибирається з наступного виразу:

$$B = 0,03D, \quad (1.7)$$

Коефіцієнт 0.03 обумовлений кутом сходження зорових осей, що забезпечує оптимальні умови для спостереження стереоефекту.

Загалом через помилки калібрування камер або вимірювання координат проєкції промені не перетинаються. Для знаходження середньої точки знаходиться перпендикуляр до променів (рис. 1.13).

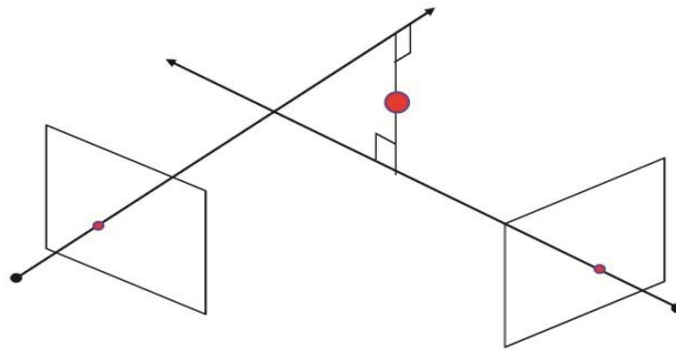


Рисунок 1.13 – Знаходження середньої точки сцени [18]

Координати довільної точки  $A$  знаходяться за її проєкціями  $m_1$  та  $m_2$  (рис. 1.14). Для цього необхідно вказати точки на кожному із зображень стереопари, які відповідають точці  $A$  (stereo matching).

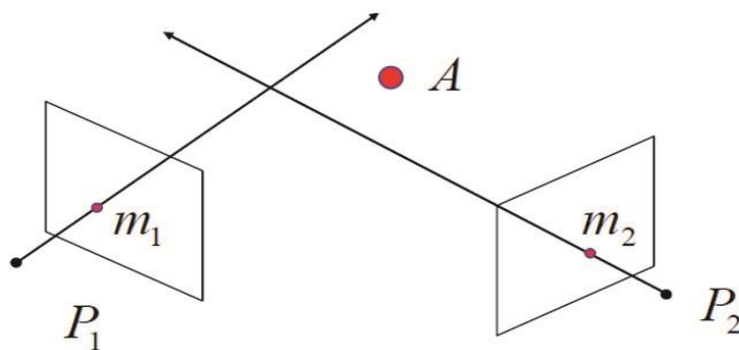


Рисунок 1.14 – Визначення координат точки за її проєкціями [18]

Це завдання можна спростити, якщо розглядати точки, що лежать на епіполярних лініях. Два центри проєкцій та точка сцени утворюють епіполярну площину. Епіполярні лінії – перетин епіполярної площини та площини зображень (рис. 1.15). У цьому випадку відповідна точка на другому зображенні має лежати на епіполярній лінії. Замість пошуку відповідної точки по всьому зображенню можна здійснювати пошук точки лише вздовж епіполярної лінії.

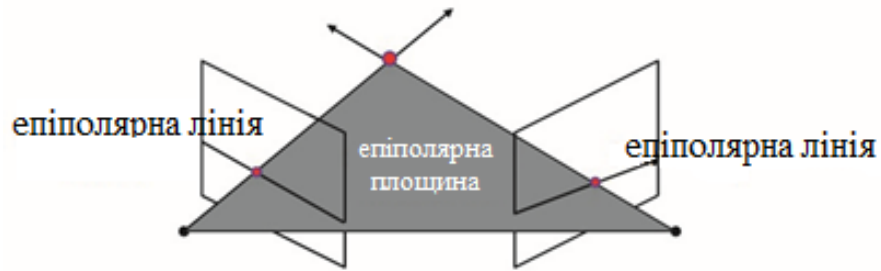


Рисунок 1.15 – Епіполярна площина [18]

Однак два зображення зазвичай довільним чином розташовуються одне щодо одного через довільність розташування камер (рис. 1.16). Епіполярні лінії проходять під довільним кутом у двох зображеннях. Тому лінії треба вирівняти.

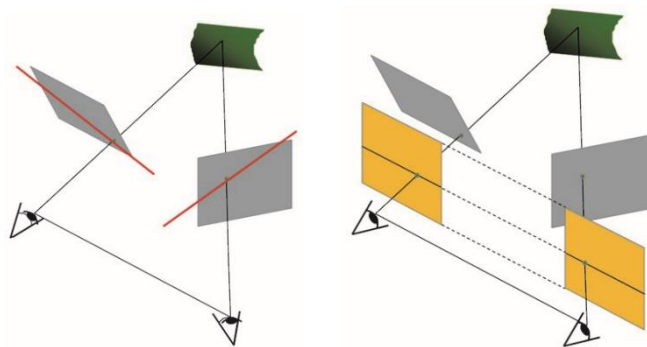


Рисунок 1.16 – Ректифікація (випрямлення) стереопари [18]

Для цього проектуємо обидва зображення на одну площину, паралельну стереобазі. Рядки зображень паралельні стереобазі.

Тепер епіполярні лінії збігаються з рядками зображень і відповідні точки лежать на тому самому рядку. Цей процес називається ректифікацією (від англ. – виправлення, вирівнювання).

Ключова проблема стереогляду полягає в тому, як на двох зображеннях можна розпізнати поєднані точки. Якщо можна сполучені точки знайти по всій

поверхні об'єкта, можна визначити диспаритет (різницю між зміщенням сполучених точок на обох кадрах).

Диспаритет є для отримання карт глибини. Розглянемо задачу, коли одна з точок знаходиться на оптичній осі однієї з камер (рис. 1.17).

З рис. 1.17 видно, що що далі точка від камери, то її зміщення менше.

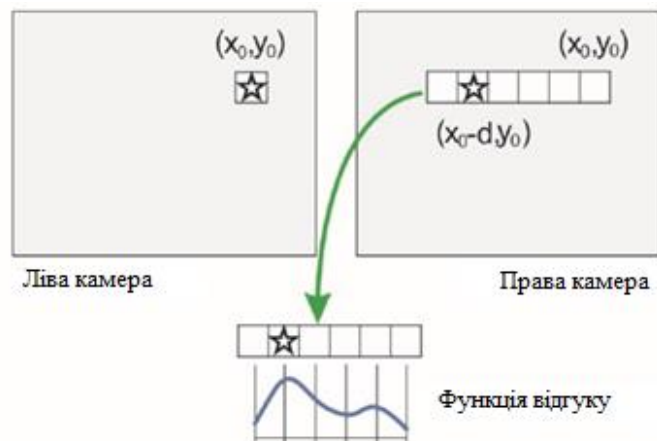


Рисунок 1.17 – Знаходження диспаритету [18]

Диспаритет є для отримання карт глибини. Розглянемо завдання, коли одна з точок знаходиться на оптичній осі однієї з камер (рис. 1.18).

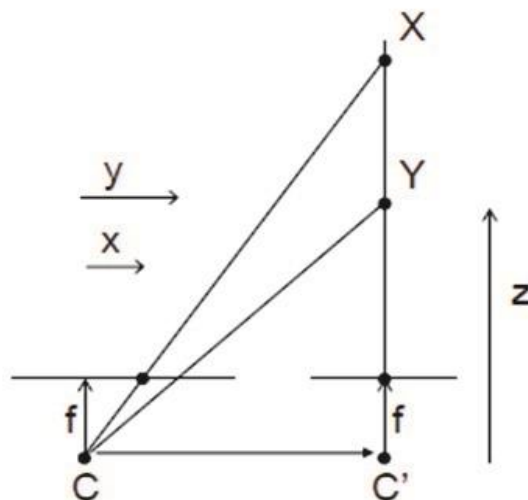


Рисунок 1.18 – Зміщення двох точок [18]

Для загального випадку можна отримати такий вираз:

$$\text{disparity} = x - x' = \frac{B}{z}, \quad (1.7)$$

де  $B$  – базис стереозйомки,  
 $f$  – фокусна відстань камер (рисунок 1.19).

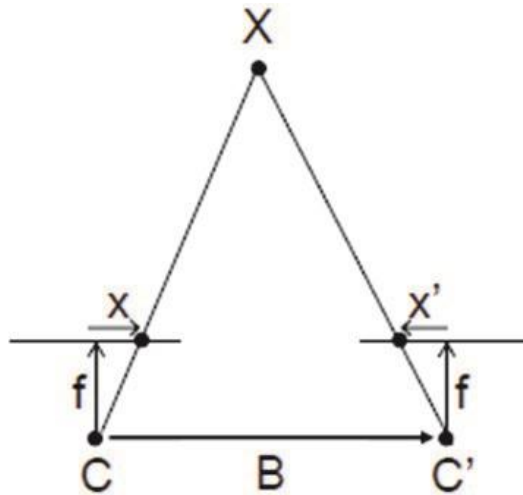


Рисунок 1.19 – Визначення z-координати з різними значеннями z за диспаратетом [18]

Можна виділити такі етапи визначення глибини за стереозображеннями:

- відкалібрувати камери;
- одержати знімки об'єкта (стереопари);
- ректифікувати зображення;
- здійснити пошук сполучених точок;
- відокремити об'єкт від фону;
- обчислити диспаратет (різниця між усуненням точки на обох кадрах);
- оцінити глибину;
- вивести результати у вигляді 3D-моделі.

Пошук точок на відповідних епістолярних лініях – досить складне завдання. У літературі описано безліч підходів та алгоритмів. Для полегшення цього завдання використовуються активні лазерні системи.

Лазерні 3D-сканери, що використовують принцип тріангуляції, відносяться до типу активних сканерів, які використовують лазерний промінь. Як і часопротитні 3D-сканери, тріангуляційні пристрої посилають на сканований об'єкт лазерний промінь, а камера, що окремо стоїть, фіксує точки на поверхні, куди падає лазер. Переміщуючи лазерний промінь об'єктом, камера фіксує точки рельєфу поверхні. Зазвичай для прискорення процесу сканування в сканерах цього типу замість лазерної точки використовують лазерну смугу.

Ручні лазерні сканери працюють за принципом тріангуляції, описаним вище. Сенсор вимірює відстань до поверхні об'єкта, тоді як лазерний промінь або смуга проектується на об'єкт із ручного випромінювача. У ролі сенсора часто використовується прилад із зарядним зв'язком або координатно-чутливий детектор. Так як під час сканування сканер часто знаходиться в русі, а дані фіксуються щодо внутрішньої системи координат сканера, для визначення точного положення пристрою в просторі найчастіше використовуються спеціальні мітки або використовують природні особливості фону для подальшого приведення результатів сканування до єдиної системи координат.

3D-сканер UNIScan (ZScanner 600) знайшов свою популярність завдяки простоті експлуатації та портативності (рис. 1.20).



Рисунок 1.20 – Ручний портативний 3D-сканер ZScanner 600 [18]

### 1.2.7 Структурована підсвітка

Стереоскопічні методи пов'язані з принциповими обмеженнями, зокрема, складністю пошуку відповідних точок на об'єктах, що не мають яскраво вираженої текстури або мають великі однорідні області. Щоб подолати ці недоліки стереоскопічного методу можна доповнити систему проєктором для нанесення на поверхню набору точок або ліній (рис. 1.21).

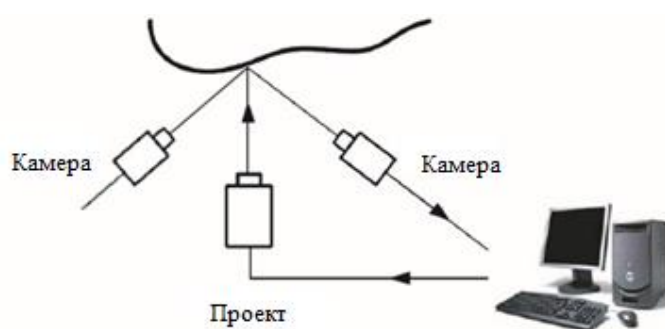


Рисунок 1.21 – Загальний вигляд системи проєкції із двома відеокамерами [18]

Перевагою цієї схеми є те, що не потрібне калібрування проєкційного пристрою, тому що для тріангуляції не потрібно знати, куди на об'єкт потрапляють ті чи інші точки підсвічування. Для визначення профілю

поверхні використовуються ті ж вирішальні рівняння, що і пасивних триангуляційних систем.

Однак, друга камера є надмірною. Можна замінити одну з камер стереопари на проектор. Схема системи, побудованої цьому принципі, показано на рис. 1.22. На об'єкт проектується деяка картина (структуроване підсвічування); її спотворення, спричинені формою об'єкта, реєструються камерою.

3D-сканери, що працюють за технологією структурованого світла, є проєкцією відомої картини (частіше світлової сітки) безпосередньо на об'єкт, деформація цього малюнка і являє собою модель сканованого предмета.

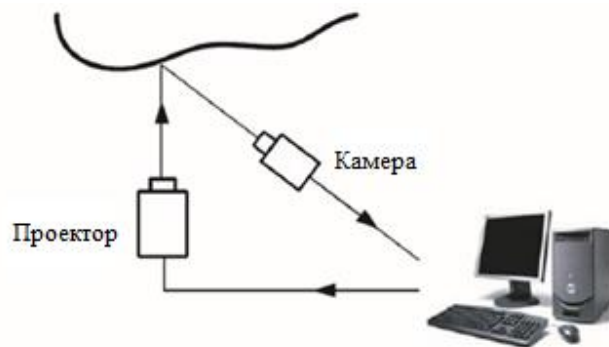


Рисунок 1.22 – Загальний вигляд системи проєкції структурованих зображень [18]

Метод Гартмана був одним із найбільш ранніх способів визначення кривизни оптичного хвильового фронту за допомогою принципів структурованого висвітлення [6]. Перші датчики Гартмана являли собою плоскі пластини з невеликими отворами, які працювали як лінзи, що збирають. Зображення плям у фокальній площині називається гартманогою. За її виглядом можна будувати висновки про викривленості хвильового фронту. Пізніше, Роланд Шак та Бен Платт модифікували цю технологію, замінивши набір отворів на безліч лінз (лінзовий растр).

Принцип роботи датчика Шака-Гартмана у тому, що випромінювання проходить через лінзовий растр – матрицю мікролінз – і падає фотоприймач. Мікролінзи розбивають падаючий фронт на малі потоки та фокусують їх на матриці фотоприймачів. Коли хвильовий фронт, що приходить, плоский, всі сфокусовані зображення розташовані в правильній сітці, обумовленої розташуванням лінз. Якщо хвиля, що падає, має якісь спотворення, то зображення зміщуються зі своїх номінальних значень. Такі датчики використовуються в лабораторіях для вимірювання форми оптичних елементів, а також 3D-реконструкції хвильового фронту, спотвореного атмосферою.

Датчики Шака-Гартмана мають значний недолік: перехресні перешкоди на фотоматрицях. Вони виникають, коли точки фокусування виходять за межі свого підмасиву. Для збільшення роздільної здатності необхідно збільшити кількість лінз, але це призведе до зменшення динамічного діапазону.

Використання кодованого структурованого освітлення є одним із найнадійніших методів для відновлення поверхні об'єктів. Цей метод ґрунтується на проектуванні світлового шаблону та перегляді освітленої сцени з однієї або більше позицій. Оскільки шаблон кодується, відповідності між точками зображення і точками шаблону, що проектується, можуть бути легко знайдені.

### 1.2.8 Проецювання точок, ліній, сіток

Сучасні методи, засновані на структурованому висвітленні, проектують спеціальні картини, спотворення яких визначають форму поверхні. Найбільш прості картини: набір точок, лінії, сітки.

Можна проектувати лінії за допомогою спеціальних лазерних указок, слайд-проекторів, але найпростішим способом є проекція ліній на об'єкт за допомогою звичайного рідкокристалічного проектора. Камера, розташована

трохи осторонь від проєктора, фіксує форму мережі та обчислює відстань до кожної точки в полі зору [16].

Приклади сканерів із проєкцією лінії показані на рис. 1.23.

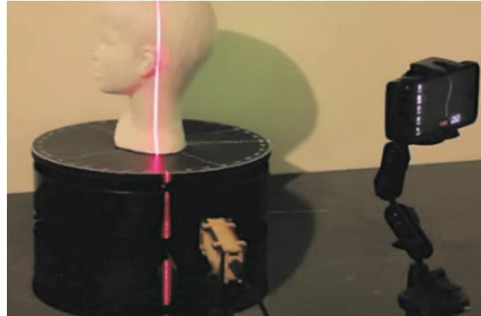


Рисунок 1.23 – Визначення 3D-профілю за допомогою проєкції вертикальної лінії [16]

Перевага 3D-сканерів, що використовують структуровану двовимірну картину, у їх швидкості та точності роботи. Замість сканування однієї точки в один момент часу або однієї лінії структуровані сканери одночасно сканують все поле зору відразу. Як підсвічування вибираються геометричні форми, які легко розпізнаються під час проєкції на об'єкт. На рис. 1.24 наведено приклад структурованого підсвічування у вигляді регулярної сітки.

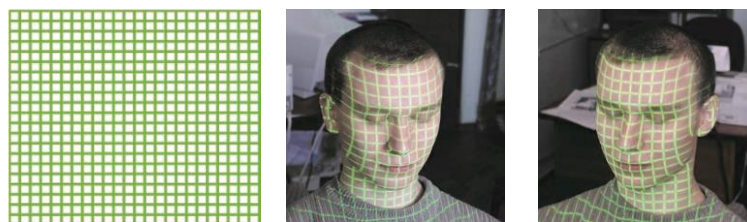


Рисунок 1.24 – Структуроване підсвічування та два зображення об'єкта під різними кутами [16]

Вузлові точки у вузлах ґрат виділяються автоматично. Для кожної точки отриманого масиву може бути визначена z-координата в вузлових точках.

Однак набір точок, які ми отримали сильно розріджений. Для отримання 3D-моделі необхідно обчислити полігональну модель об'єкта, тобто необхідно з'єднати всі точки в багатокутники. Цей процес у геодезії називається триангуляцією. Існує багато алгоритмів. Найкращою для представлення 3D-об'єктів є триангуляція Делоне (рис. 1.25).

Сканування всього поля зору займає частку секунди, а профілі, що згенеровані, є більш точними, ніж лазерні триангуляції. Це також вирішує проблему спотворення даних, спричиненого рухом. Крім того, деякі існуючі системи здатні сканувати навіть об'єкти, що рухаються в режимі реального часу.

Використання інфрачервоного світла дозволяє не заважати іншим завданням комп'ютерного зору.

В даний час розроблено безліч різних варіантів картин для використання в системах структурованого підсвічування, що являють собою як серії картин, що змінюються (картини з тимчасовим мультиплексуванням), так і незмінні картини з використанням різних варіантів колірної кодування.



Рисунок 1.25 – Побудова триангуляції Делоне [16]

Система структурованого освітлення, що кодується, заснована на проєкції одного шаблону або набору шаблонів на вимірювальну сцену, яка потім переглядається однією або декількома камерами. Зразки розроблені спеціально таким чином, щоб кодові слова надавали набору пікселів. Кожен закодований піксель має своє власне кодове слово, так що існує пряма

відповідність кодових слів і відповідних координат пікселя в шаблоні. Кодові слова – це просто числа, які відображені у шаблоні за допомогою рівнів сірого кольору чи геометричних уявлень. Чим більше точок, які мають бути закодовані, тим більше кодових слів, і, таким чином, відображення таких кодових слів на шаблоні стає більш складним [19].

Методи проекції шаблону відрізняються тим, яким чином шаблоні визначена кожна точка, тобто які кодові слова використовуються і чи кодує він одну або дві просторові осі.

### 1.3 Постановка задач дослідження

В ході дослідження існуючих технологій 3D-сканування було проаналізовано основні методи отримання тривимірних моделей та 3D-сканерів що працюють за цими технологіями.

У зв'язку із тим що для продовження роботи необхідне проведення експериментальних досліджень виникає необхідність розробки діючого експериментального зразку 3D-сканеру. У якості технології 3D-сканування обрано метод фотодіодних матриць. Цей вибір обґрунтовано досить невеликою собівартістю компонентів системи та достатніми характеристиками точності.

Таким чином для виконання задач дослідження необхідно:

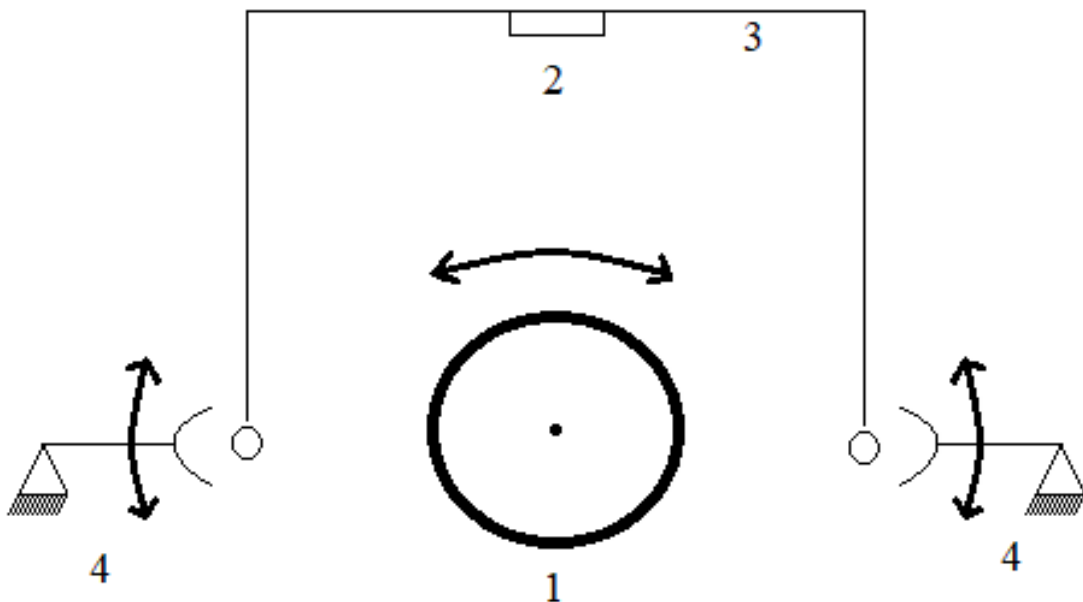
- розробити експериментальний зразок 3D-сканеру;
- провести експериментальні дослідження на розробленому 3D-сканеру;
- провести аналіз параметрів, що впливають на точність створених тривимірних моделей;

– розробити математичну модель впливу параметрів вимірювання на точність створених тривимірних моделей та провести оптимізацію цих параметрів.

## 2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКУ 3D-СКАНЕРУ

### 2.1 Розробка конструкції 3D-сканеру

Для проведення подальших досліджень виконано аналіз існуючих 3D-сканерів, їх кінематики, було запропоновано наступний варіант рис. 2.1.



1 – стіл круглої форми; 2 – 3D-камера;

3 – П-образна ланка; 4 – жорстко закріплена вісь.

Рисунок 2.1 – Кінематика 3D-сканеру з сферичною системою координат з постійним радіусом

Згідно з запропонованою схемою об'єкт, що сканується розміщується на предметному столі круглої форми 1, який обертається навколо своєї осі на 360°. Таким чином 3D-сканер буде задавати координату (кут)  $X$  сферичної

системи координат. Обертання здійснюється за допомогою крокового двигуна, вал якого жорстко з'єднаний з предметним столом.

Камера 3D-сканеру 2, жорстко фіксується на П-образній ланці 3. П-образна ланка може повертатися на кут  $90^\circ$  відносно жорстко закріпленої осі 4. Таким чином 3D-сканер буде задавати координату (кут)  $Y$  сферичної системи координат. Обертання П-образної ланки здійснюється за допомогою двох крокових двигунів, що передають обертання осі на ланку за допомогою редуктора для зменшення навантаження на двигуни.

Передбачається використання камери зі змінним фокусом, таким чином не буде необхідності переміщення камери відносно осі обертання П-образної ланки.

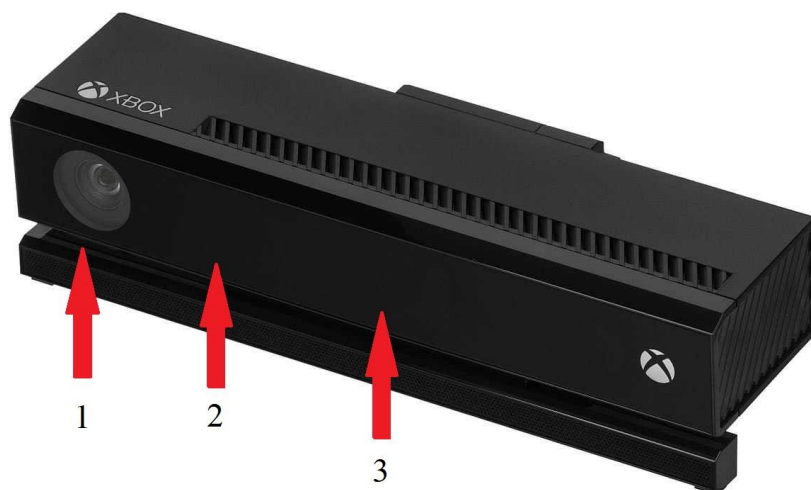
Для подальшої розробки механічної частини необхідно обрати камеру 3D-сканера для визначення фокусних відстаней та як наслідок мінімальної та максимальної фокусної відстані та подальшої розробки механічної частини 3D-сканера.

## 2.2 Камера 3D-сканеру

Вибір камери проведено на основі обґрунтуванні розробленої кінематичній схемі з сферичною системою координат з постійним радіусом та проведенні чіткого аналізу вибору комплектуючих для сканеру, що розробляється, та обрано за основу брати камеру від Microsoft Kinect 2.0 (рис. 2.2).

Робоча область сканера матиме наступні параметри – 200 мм x 200 мм x 200 мм.

Оскільки ІЧ камера є одночасно і приймачем датчика глибини, то можна використовувати ІЧ кадри для калібрування, а потім результати калібрування використовувати для усунення спотворень з кадрів глибини.



1 – RGB камера; 2 – ІЧ камера, датчик глибини;

3 – ІЧ прожектор.

Рисунок 2.2 – Вигляд Microsoft Xbox One Kinect 2.0 [20]

Таблиця 2.1 – Характеристики Kinect 2.0 [20]

Роздільна здатність RGB камери, пікс.	1920 x 1080
Роздільна здатність інфрачервоної (ІЧ) камери, пікс.	512 x 424
Кути огляду RGB камери, °	84.1 x 53.8
Кути огляду ІЧ камери, °	70.6 x 60.0
Діапазон вимірювань дальності, м.	0.4 - 8.01
Частота зйомки RGB камери, Гц.	30
Частота зйомки ІЧ камери, Гц.	30

### 2.3 Розробка 3D-моделі 3D-сканеру

В рамках роботи створено 3D-моделі конструкції і комплектуючих, здійснено 3D-моделювання сканера (рис. 2.3).

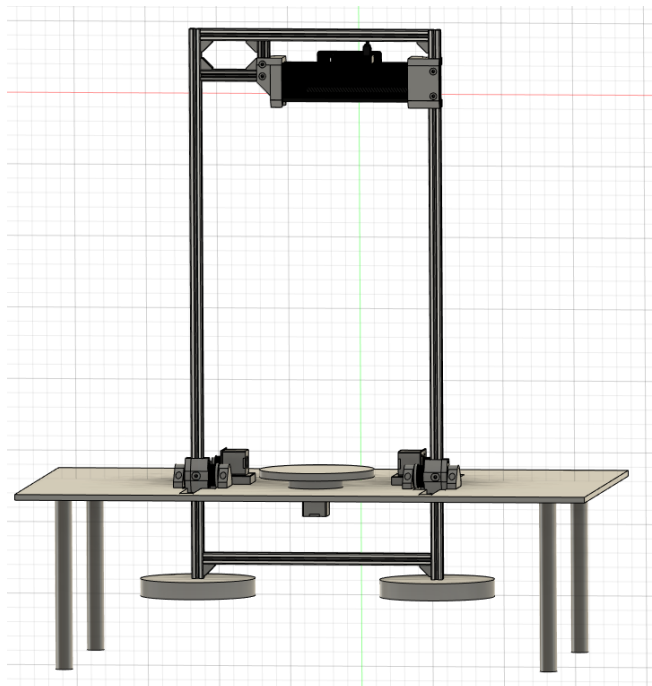


Рисунок 2.3 – 3D-модель механічної конструкції сканеру

Після проведеного 3D-моделювання маємо наступні габаритні розміри сканеру в цілому – 1110 мм x 1000 мм x 600 мм та вагу 9.5 кг (рис. 2.4 – 2.6).

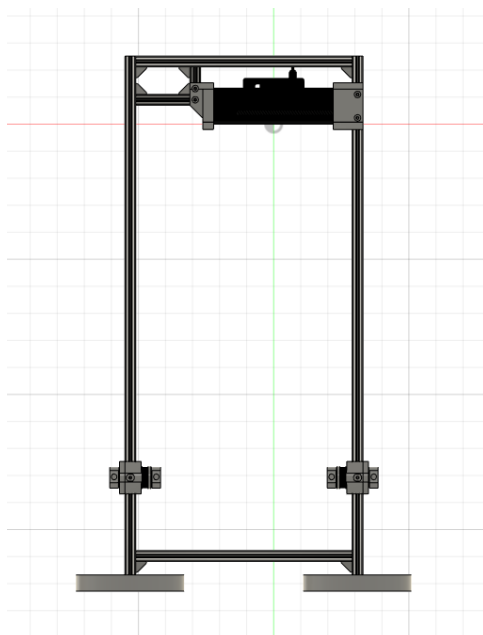


Рисунок 2.4 – 3D-модель П-ланки з закріпленою камерою, зубчастими шківками з валом всередині та противагою на кінцях алюмінієвих профілів

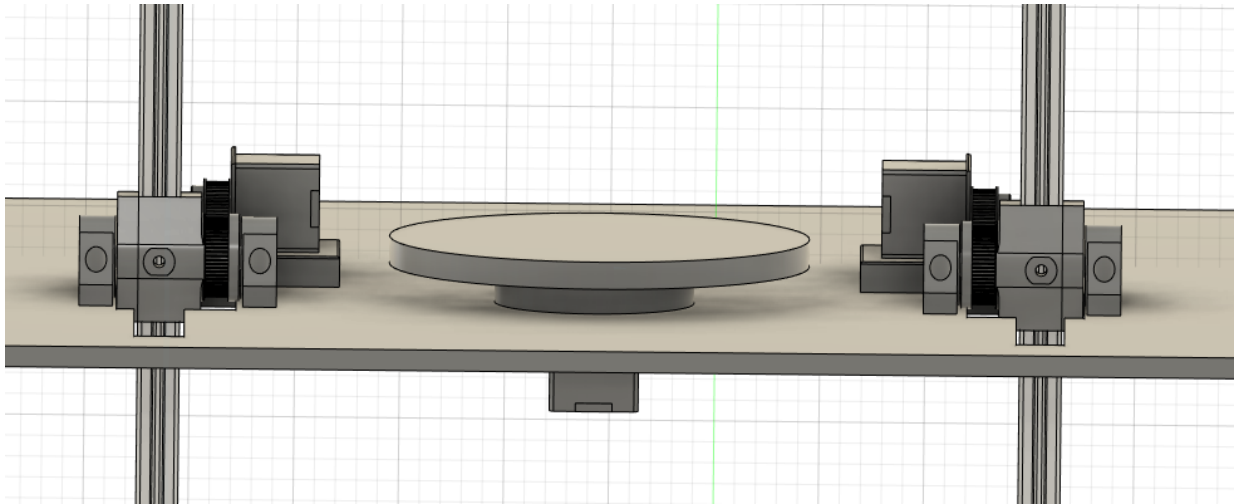


Рисунок 2.5 – 3D-модель механічної конструкції робочої поверхні

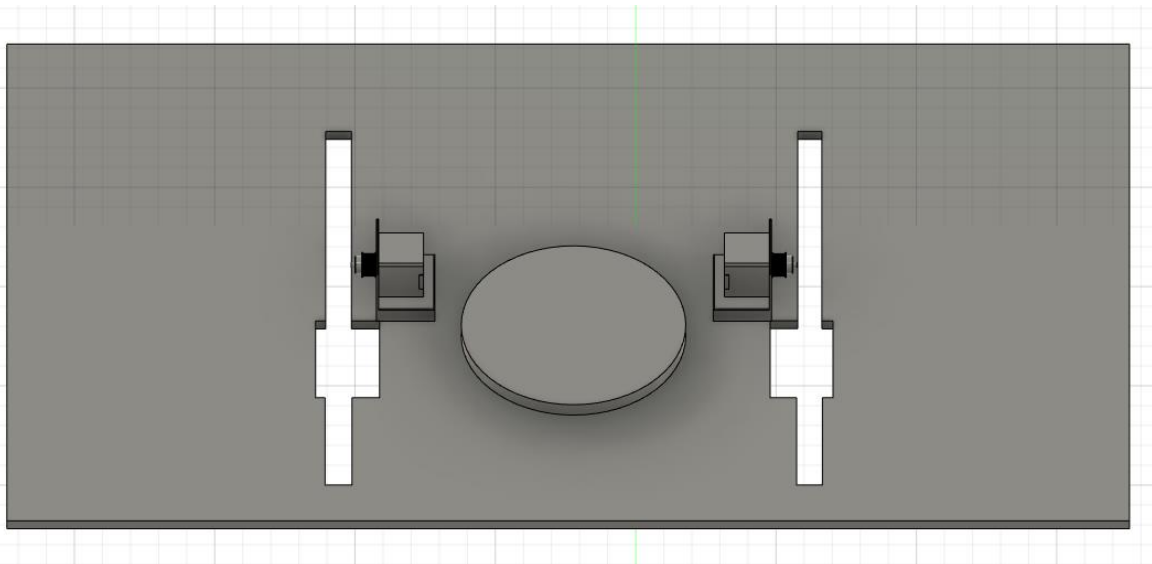


Рисунок 2.6 – Інший вид на 3D-модель механічної конструкції робочої поверхні

## 2.4 Вибір компонентів та розробка механічних частин виробу

### 2.4.1 Вибір компонентів

Для створення механічної частини платформи згідно обраної кінематики проведемо вибір компонентів відповідно вимог та параметрів.

П-образна ланка та робоча область сканування (стіл) буде рухатися за допомогою трьох крокових двигунів NEMA 17 17HS4401S [21]. Для руху камери сканеру використовуються крокові двигуни із планетарними редукторами.

Таблиця 2.2 – Характеристики крокового двигуна NEMA17 17HS4401S

Модель	17HS4401S
Крок кута	1.8°
Діаметр вала	5мм
Довжина двигуна	40мм
Номинальний струм	1.7А
Опір	1.5Ом
Індуктивність	2.8Мh
Утримувальний момент	45Нсм
Крутний момент	2.65Нсм
Момент інерції	65Гсм <sup>2</sup>
Вага двигуна	300 грам

Для створення корпусу необхідно наступний верстатний алюмінієвий профіль 20 мм x 20 мм.

Верстатні алюмінієві профілі – це універсальні комплектуючі для створення конструкції платформи.

Невелика вага і простота збірки робить профілі доступними. Паз розміром в 6 мм забезпечує надійну фіксацію елементів конструкції, виключає вивертання гвинтів, гайок, і робить профіль стійким до скручування і заломів.

Переваги алюмінієвого профілю:

- досить легкий в порівнянні з іншими металами;
- надійність, витримує великі навантаження;

- висока якість;
- матеріал не схильний до корозії;
- має достатню жорсткість для конструкції;
- є екологічно чистим і абсолютно нешкідливий для здоров'я.

Для забезпечення рівномірного переміщення та зменшення тертя в процесі обертання столу між поверхньою сканера та кріпленням-перехідником столу розташовано підшипник з внутрішнім діаметром 70 мм [22]. Сам двигун знаходиться на отворі в підставі (рис. 2.13), закріплений за допомогою кріплення яке надруковане на 3D-принтері з соРЕТ пластику. Розроблено 3D-модель кронштейн кріплення-перехідника столу к робочій області та під'єднання валу, зовнішній вигляд якого продемонстрований далі на рис. 2.10 – 2.11.

У конструкції П-образної ланки використовується шків з елементом кріплення, який виготовляється з соРЕТ пластику методом 3D-друку. Сам шків прикручується до алюмінієвого профіля за допомогою 6 гвинтів М5. Через шків і отвір в профілі протягується вал діаметром 6 міліметрів. З двох сторін вал центрується в 2 парах підшипників типу 626ZZ, які знаходяться в обіймах (рис. 2.7), які в свою чергу кріпляться до основи сканера.

З'єднання та ескізи наведено на рис. 2.8 та 2.9 – 2.12 відповідно.

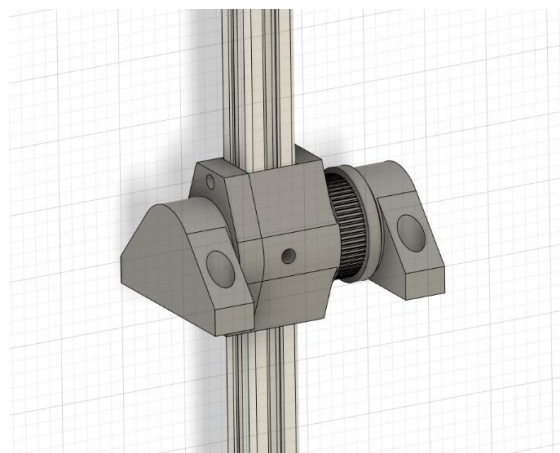


Рисунок 2.7 – З'єднання зубчатого шківа, валу та підшипників

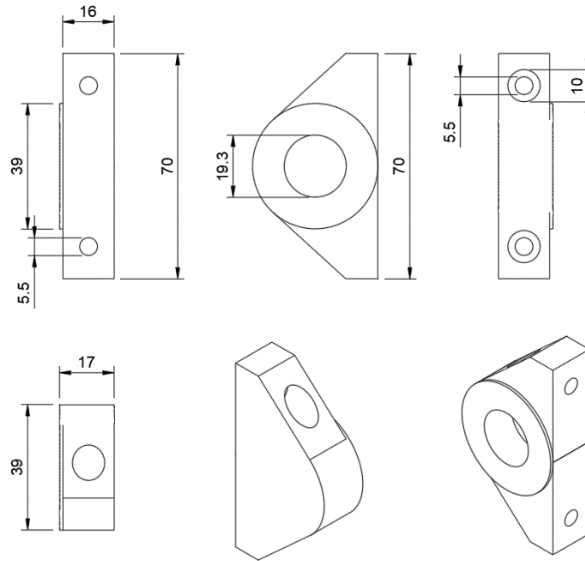


Рисунок 2.8 – Ескіз кріплення з'єднання зубчастого шківа, валу та підшипників

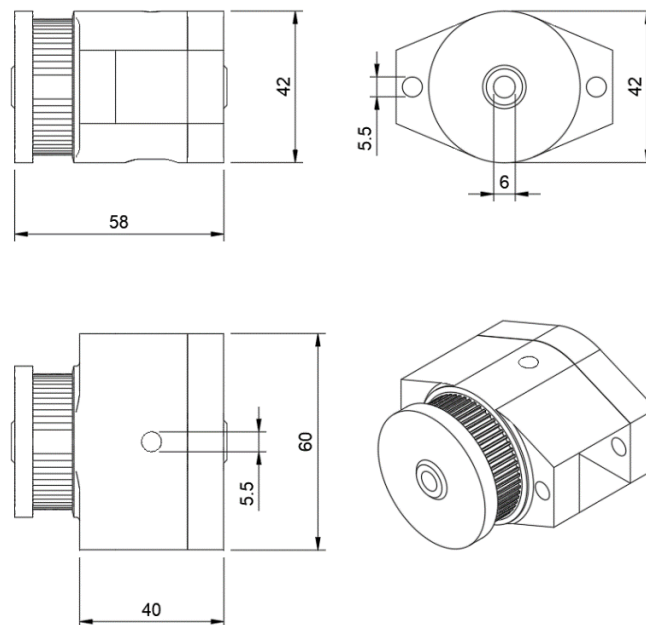


Рисунок 2.9 – Ескіз зубчастого шківа

Переміщення відбувається за допомогою двох крокових двигунів по бокам, які закріплені на підставі всього сканера, до яких з'єднані два шківа, у яких по 16 зубів, та двох ременів GT2 з шириною 10 мм та довжиною в 260 мм

кожний які в свою чергу з'єднані з двох боків з зубчастим шківом з 60 зубами, який кріпиться на рамці сканеру.

#### 2.4.2 Виготовлення механічних частин виробу

Всі розроблені комплектуючі конструкції виконані методами адитивною 3D-друку, окрім підстави та противаги.

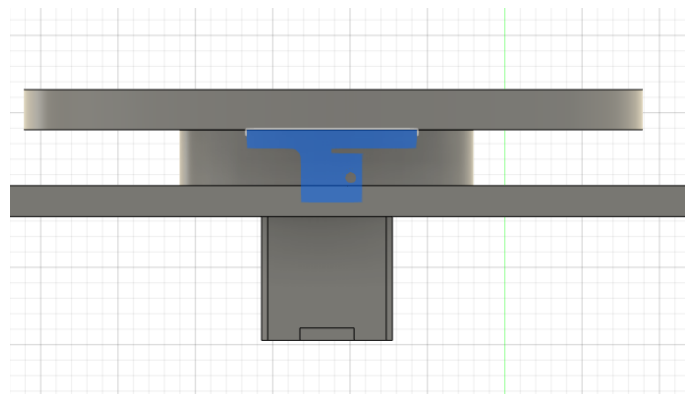


Рисунок 2.10 – З'єднання робочої області з кріпленням-перехідником столу та підшипником з внутрішнім діаметром 70 мм



1 – різьба під М3 гвинт для закріпленні конструкції;

2 – різьба під М4 гвинт для закріплення крокового двигуна та підстави сканера;

3 – отвір для розташування валу крокового двигуна

Рисунок 2.11 – Інший вид на 3D-кріплення-перехідника столу

Ескіз кріплення-перехідника столу продемонстровано на рис. 2.12.

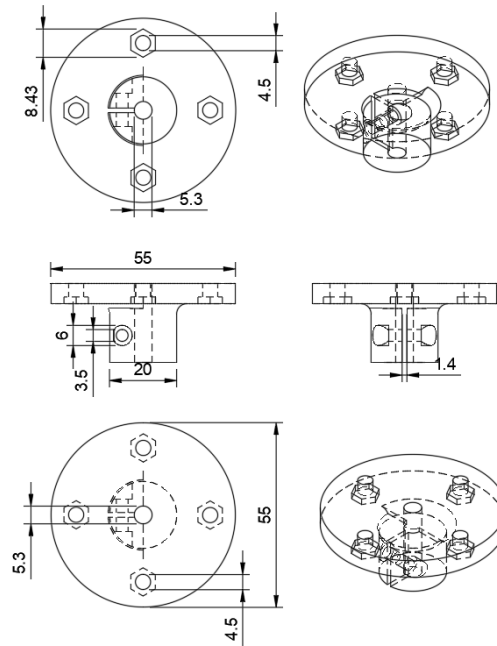


Рисунок 2.12 – Ескіз кріплення-перехідника

Кроковий двигун закріплений знизу кріплення-перехідника к столу в отворі, він буде двигати стіл незалежно від руху П-ланки.

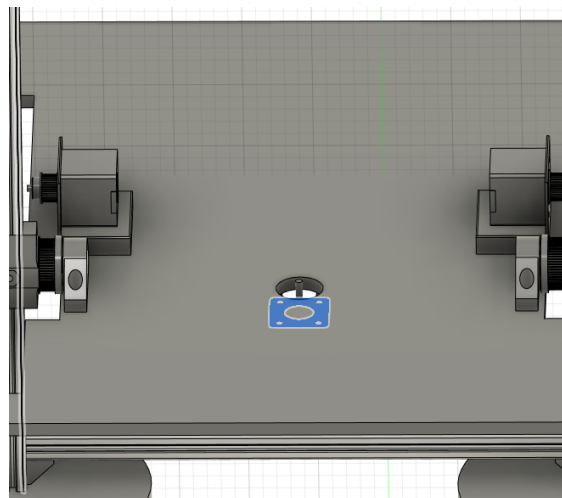


Рисунок 2.13 – Кроковий двигун в отворі

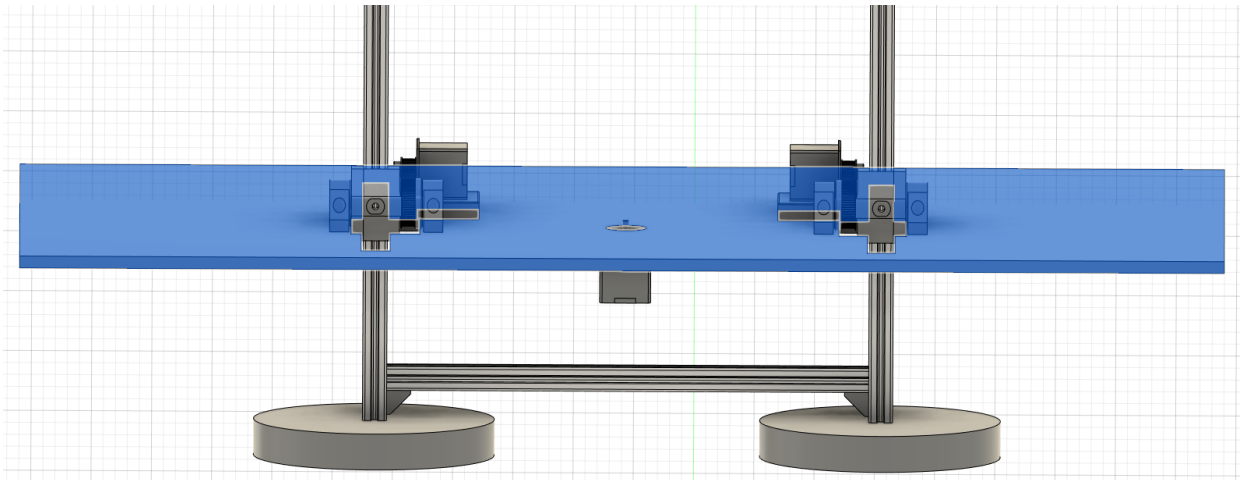


Рисунок 2.14 – Підстава під сканер

Установка камери на корпусі здійснюватиметься кріпленням для Кінест (рис. 2.15).

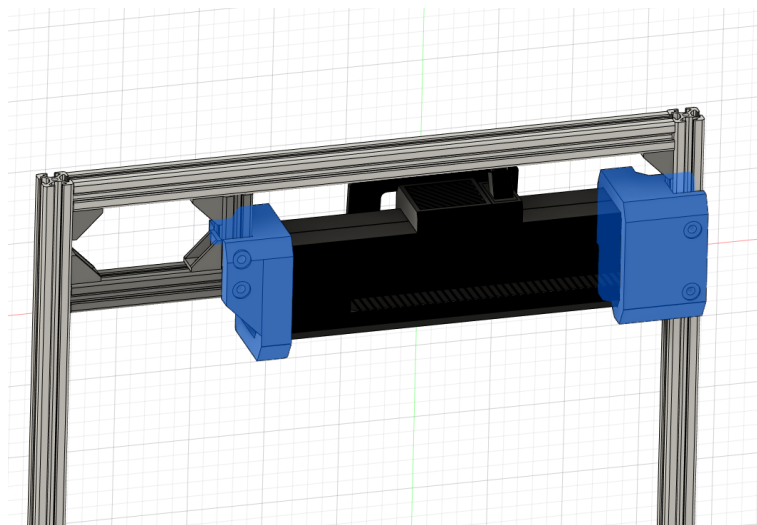


Рисунок 2.15 – Кріплення камери на корпусі

Кріплення надруковане на 3D-принтері з PET пластику.

Характеристики PET пластику:

- по механічними властивостями перевершує ABS пластик;
- висока міцність;

- стійкість до згинання і утворення тріщин;
- не мутніє при згині;
- низька усадка при друку (порівняно з пластиком ABS).

Ескіз цього кріплення показан на рис. 2.16 – 2.17.

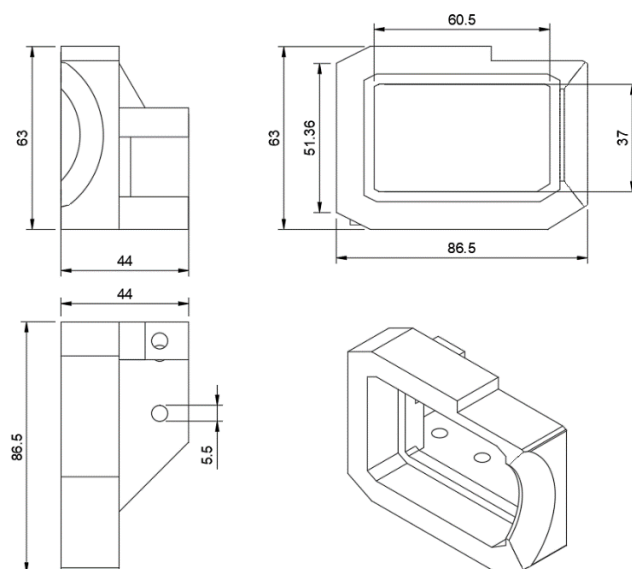


Рисунок 2.16 – Ескіз лівого кріплення Kinect 2.0

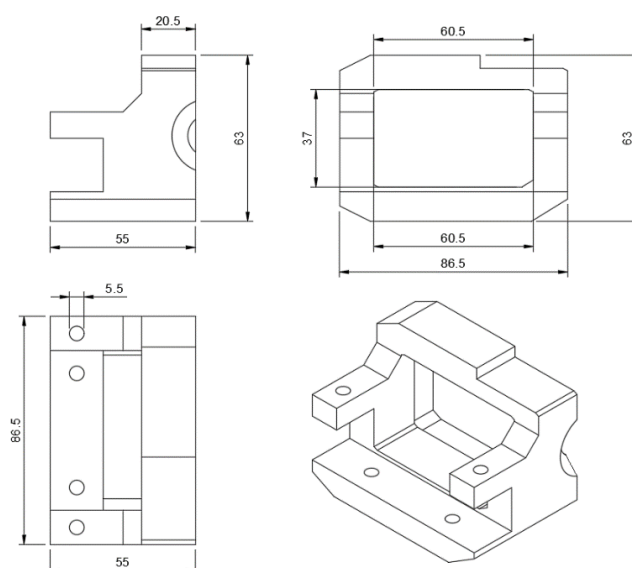


Рисунок 2.17 – Ескіз правого кріплення Kinect 2.0

Виходячи з проведеного аналізу 3D-моделювання, вага конструкції вимагає наявності противаги. Вироблено кріплення у вигляді дисків з двох сторін П-ланки (рис 2.18).

Для визначення маси противаги необхідно провести наступні розрахунки:

$$m * g * l_{\text{підвіс}} = Mk;$$

де  $m$  – це маса Kinect 2.0;

$g$  – прискорення вільного падіння ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ );

$Mk$  – це момент Kinect 2.0.

$$Mk = 1 * 9,82 * 800 = 7856 \text{ (Н * м)}.$$

$$m_{\text{противаги}} = Mk/g * l_{\text{противаги}};$$

$$m_{\text{противаги}} = \frac{7856}{9,82 * 150} = 5,3 \text{ (кг)}.$$

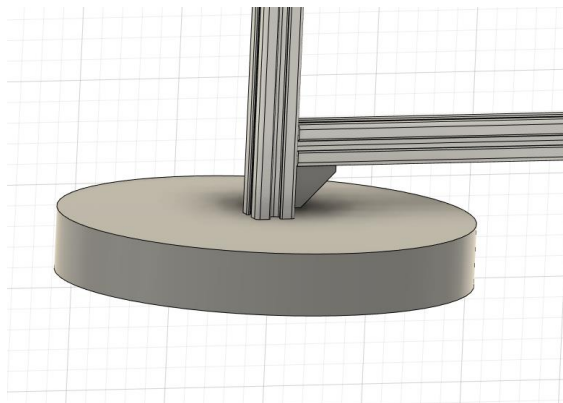


Рисунок 2.18 – Противага для конструкції

## 2.5 Розробка електричної частини

### 2.5.1 Розробка блок-схеми електричної частини

Перед тим як починати розробку електричної частини 3D-сканера, необхідно розробити блок схему керування електричними компонентами.

Основа блок схеми – це плата керування, яка буде забезпечувати розрахунок переміщень і управління кроковими двигунами.

Безпосередньо на платі керування підключені: 3 крокових двигуна (X1, X2 та Y), 2 з яких з'єднані послідовно для переміщення П-образної ланки (X1 і X2), 1 для обертання робочої поверхні (Y). Для збільшення точності позиціонування і точності сканування крокові двигуни підключені через драйвера (D1 та D2), які дозволяють забезпечити мікро-крок для більш точного переміщення. Сам Kinect 2.0 і плата керування підключені до персонального комп'ютера, через який здійснюється контроль переміщень і процес отримання фотозображень для подальшого перетворення їх в 3D-модель. На рис 2.19 продемонстровано блок-схему електричної частини.

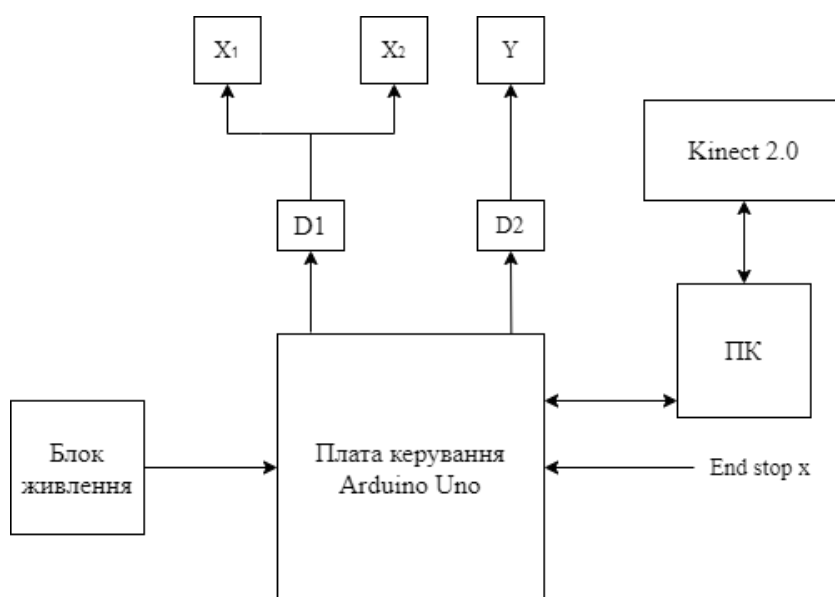


Рисунок 2.19 – Блок-схема електричної частини

### 2.5.2 Вибір компонентів

Згідно проведеного аналізу блок-схеми, прийнято рішення взяти за основу плату правління Arduino Uno.

Arduino Uno контролер побудований на ATmega328. Платформа має 14 цифрових вхід / виходів, 6 аналогових входів, кварцовий генератор 16 МГц, роз'єм USB, силовий роз'єм, роз'єм ICSP і кнопку перезавантаження.

Таблиця 2.3 – Характеристика плати Arduino Uno V3.0 [23]

Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5В
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12В
Цифрових входів/виходів	14
Аналогових входів	6
Сила струму на входах/виходах	40 мА
Сила струму для виходу 3.3В	50 мА

Використання крокових двигунів для Arduino буде здійснюватися за допомогою драйверу DRV8825 (рис. 3.3).

DRV8825 – це компактний і простий в управлінні драйвер крокових двигунів з максимальним струмом 2.5 А.

Для керування двома кроковими двигунами на П-образній ланці, буде використовуватись ЧПК плата. В якості керування кроковиками двигунами має три роз'єми для підключення драйверів крокових двигунів DRV8825 [24].

Коли сканер закінчить виконання в 90° оборот – буде використаний кінцевий вимикач (датчик) (рис 3.5). Вимикач спрацьовує на натискання. Всього буде використовуватися 1 датчик. Також цей датчик буде використовуватися щоб повернути сканер в домашнє положення, іншими словами точку повернення.

Блок живлення обрано з наступними параметрами: напруга 220 вольт, потужність 150 Вт.

### 2.5.3 Збірка електричної частини пристрою

Зроблені з'єднання крокових двигунів до Arduino Uno за допомогою ЧПК плати та драйверів DRV8825. Два двигуни (X1 та X2) з'єднані послідовно на 1 драйвер. Третій двигун підключений до 2 драйверу, він відповідає за обертання столу (Y). Для настройки та роботи функції повернення до дому – підключений кінцевий датчик (рис. 2.21). Вигляд всіх з'єднань до плати керування продемонстрований на рис. 2.20.

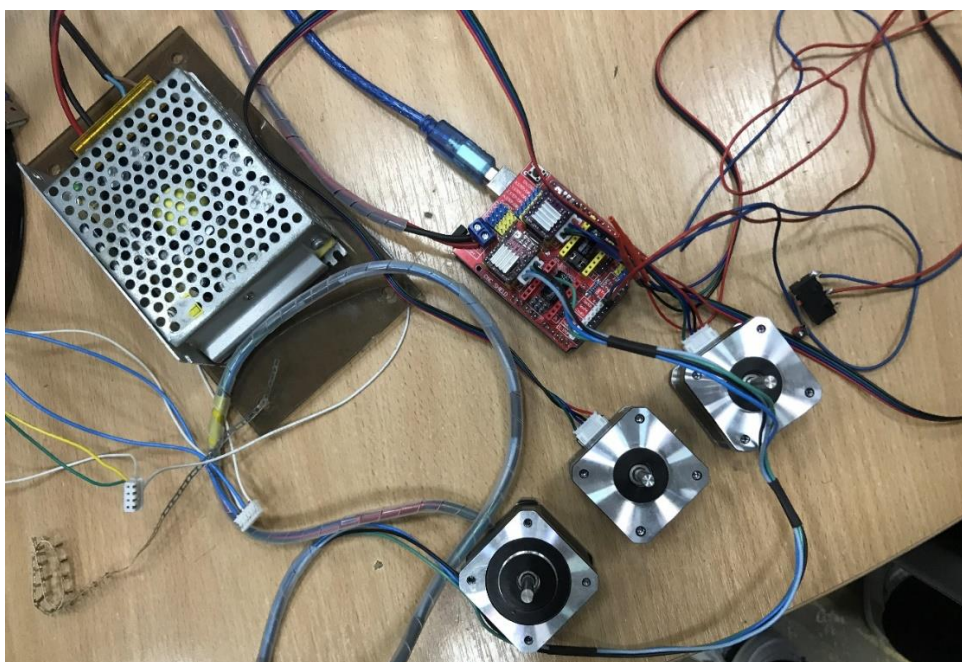


Рисунок 2.20 – Збірка електричної частини

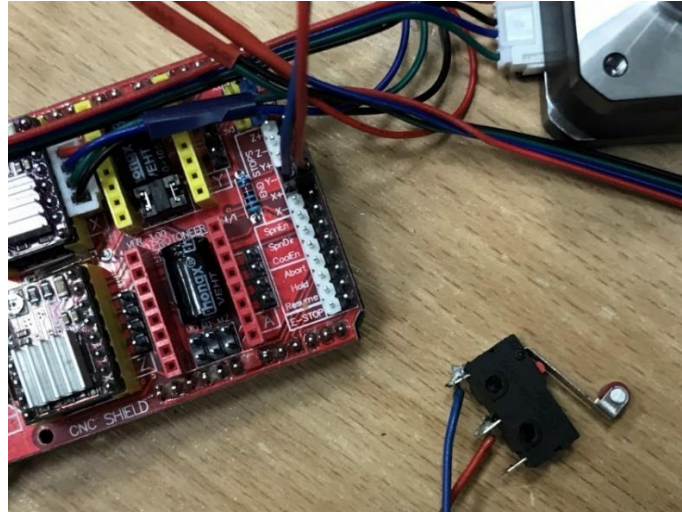


Рисунок 2.21 – Підключення кінцевого датчику к ЧПК платі

Для найкращого пересування камери за допомогою крокових двигунів, треба розрахувати шаги (step).

Кроковий двигун NEMA 17 з кроком  $1.8^\circ$ , робить повний оборот в  $360^\circ$  за 200 кроків. Сканер повинен пройти  $90^\circ$  з початковою позиції  $0^\circ$ , та назад з  $90^\circ$  до  $0^\circ$ . За 1 період, двигун зробить 50 кроків, але з використанням драйвера відбувається дроблення кожного кроку на 32, і тоді виходить 1600 мікро-кроків.

Візьмемо за основу пересування сканеру за 1 оборот  $10^\circ$ , тоді розрахуємо повний оборот двигуна в 200 кроків, дроблений на 32, та поділений на  $360^\circ$ :

$$\frac{200 * 32}{360^\circ} = 17,7 \text{ мік. крок.}$$

Виходить 17,7 мікро-кроків робить двигун за  $1^\circ$ . Тепер коли відомо скільки мікро-кроків робить двигун для  $1^\circ$ , то можна розрахувати для  $10^\circ$ :

$$17,7 * 10^\circ = 177 \text{ мік. крок.}$$

## 2.6 Налаштування програмного забезпечення

### 2.6.1 Програмне забезпечення для камери Kinect 2.0

В якості програмного забезпечення для Kinect 2.0 використовуватиметься Windows Software Development Kit 2.0 (SDK), Kinect Fusion, 3D Scan та 3D Builder від Microsoft.

SDK дозволяє розробникам створювати додатки, що підтримують розпізнавання жестів і голосу, використовуючи сенсорну технологію Kinect.

Потрібно зробити настройку цієї програми так, щоб в процесі сканування, в проходженні з 0° до 90° і назад, камера весь час робила фотографії з мінімальною затримкою.

Щоб налаштувати якість сканування, і відкалібрувати камеру, потрібно використовувати Kinect Studio (рис. 2.22 – 2.23).



Рисунок 2.22 – Інтерфейс програми Kinect Studio та виведення фотозображення з камери



Рисунок 2.23 – Захоплення руху в Kinect Studio

В Kinect Fusion та в 3D Scan відбуватиметься сканування об'єкта (рис. 2.24 – 2.25, та рис. 2.26 – 2.27).

В 3D Builder (рис. 2.4) утворюватися 3D-модель тільки з програми 3D Scan, яку в майбутньому можна буде відредагувати, переформатувати в інший формат, а також можна буде відразу підготувати модель до друку на 3D-принтері.

Microsoft рекомендує використовувати 3D Builder з Kinect 2.0 для забезпечення найкращих результатів при скануванні в ОС для Windows.

Після сканування в Kinect Fusion можна одразу зберегти файл для таких програм як Cinema 4D, ZBrush і Blender, та для інших програм які підтримують розширення об'єкта в форматі stl., obj. та ply.

Для роботи Kinect 2.0 на Windows необхідний обов'язково порт USB 3.0.

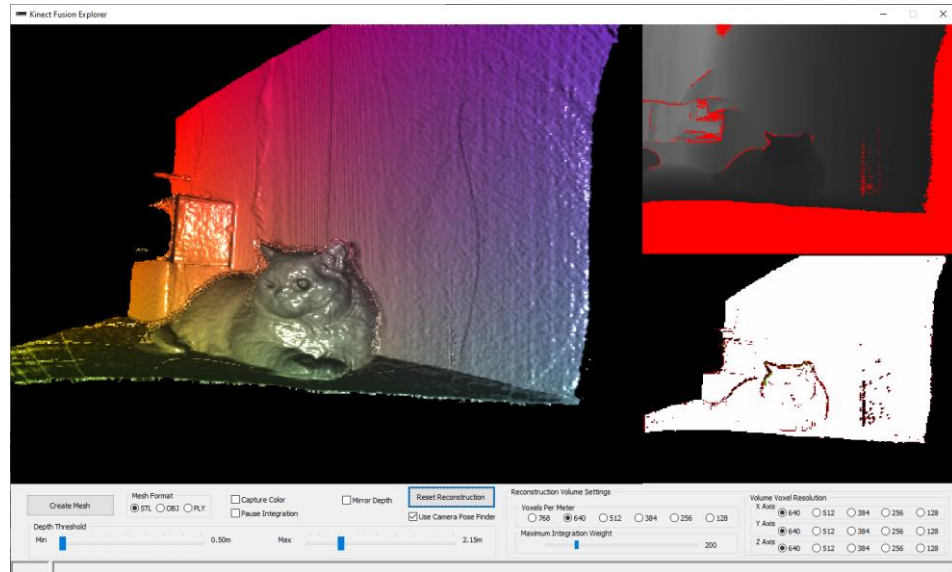


Рисунок 2.24 – Інтерфейс Kinect Fusion та виведення зображення з камери

Виходячи з отриманої інформації, в Kinect Fusion можна буде додатково налаштувати параметри датчика глибини, зону охоплення камери, колір картинки, її якість та кількість вокселей.

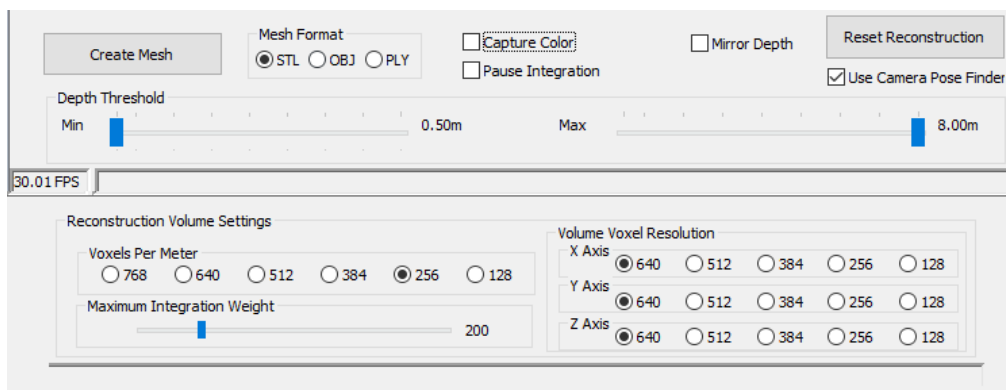


Рисунок 2.25 – Вид налаштувань в програмі Kinect Fusion

У подальшій роботі в розділі про проведення експериментального дослідження, буде розглянуті ці 2 програми для сканування, для того щоб порівняти в якій програмі найкраще сканувати об'єкти.

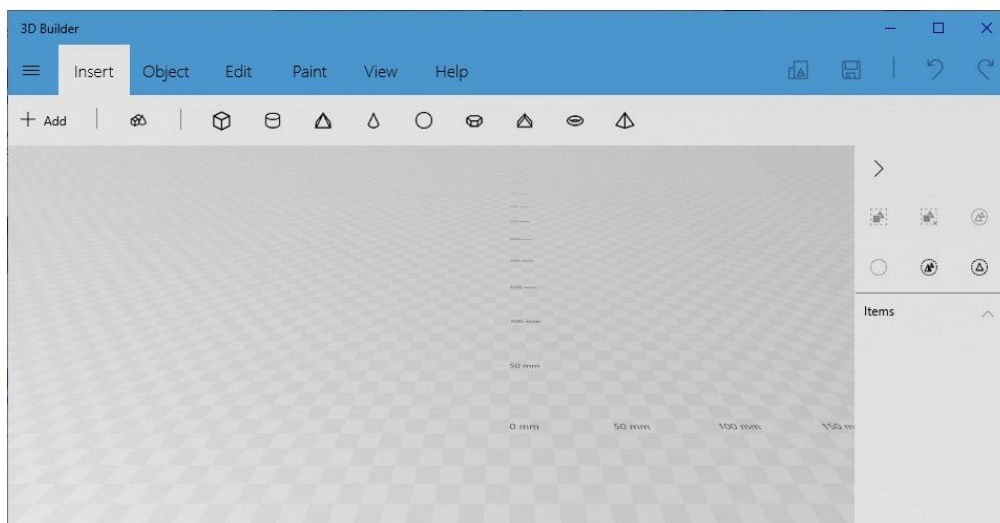


Рисунок 2.26 – Інтерфейс ПЗ 3D Builder

Вигляд інтерфейсу та налаштування ПЗ 3D Scan продемонстровані на рис. 2.27 – 2.28.

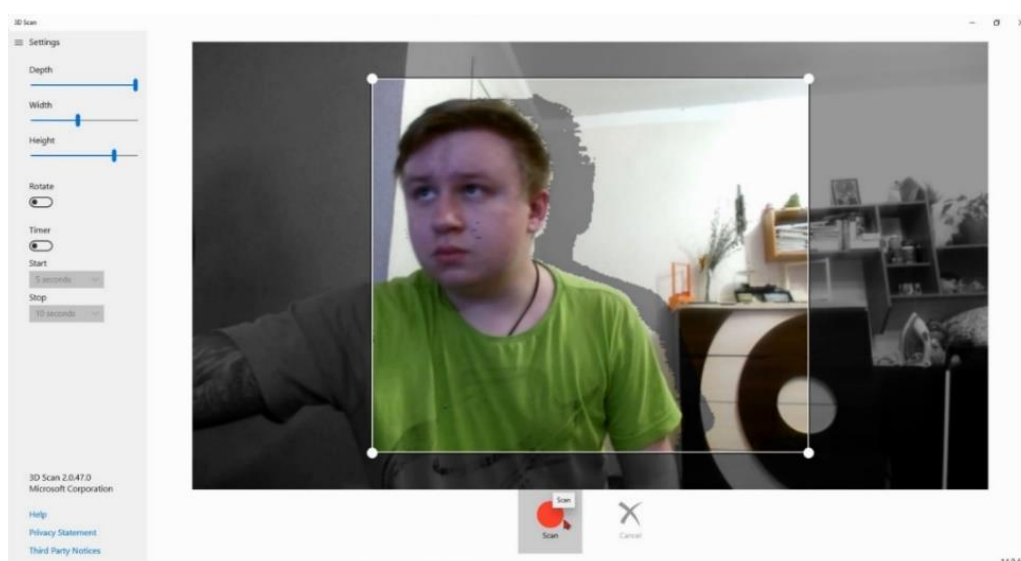


Рисунок 2.27 – Інтерфейс ПО 3D Scan та процес сканування обличчя

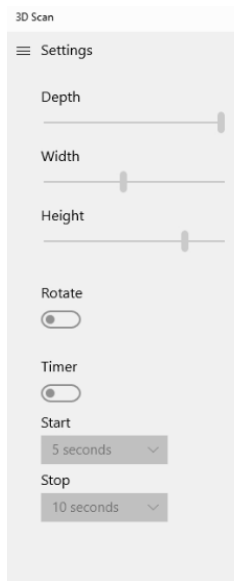


Рисунок 2.28 – Налаштування програми 3D Scan

У порівнянні параметрів сканування 3D Scan поступається Kinect Fusion. В цій програмі можна налаштовувати лише глибину, ширину та висоту камери, також в ній є таймер початку та кінця сканування.

Виключно після аналізу інтерфейсів і проведення налаштувань самих програм – Kinect Fusion виглядає набагато краще на фоні 3D Scan.

### 2.6.2 Налагодження програмного забезпечення для керування кроковими двигунами

Управлінням кроковими двигунами буде відбуватися за допомогою програмного забезпечення під назвою GRBL Controller.

GRBL Controller – найбільш популярна програма для трансляції КП в GRBL-верстат.

Переваги:

- безкоштовна;
- багатоплатформенна (Windows, Linux);

- проста у вивченні і експлуатації;
- має елементи візуалізації керуючої траєкторії.

Недоліки:

- остання версія розроблялася під GRBL 0.9;
- некоректно працює з настройками \$ s GRBL 1.1;
- не сприймає м'які кордони робочої зони верстата.

Для роботи цього ПЗ, треба установити на Arduino GRBL прошивку – це стандартизована бібліотека для завантаження в різні контролери.

Налаштування зводиться до підстроювання фізичних параметрів і крокових двигунів. Це наприклад приведення кроків двигунів до відстані переміщення П-образної ланки сканера та столу сканування по кожній осі в міліметрах. В цій програмі можна повернути і прогнати двигуни по всіх осях окремо, щоб налаштувати механіку.

GRBL працює на Arduino платформі на базі 328p процесора (Uno, Duemilanove, Nano, Micro).

Вигляд інтерфейсу GRBL Controller продемонстрований на рис. 2.29.

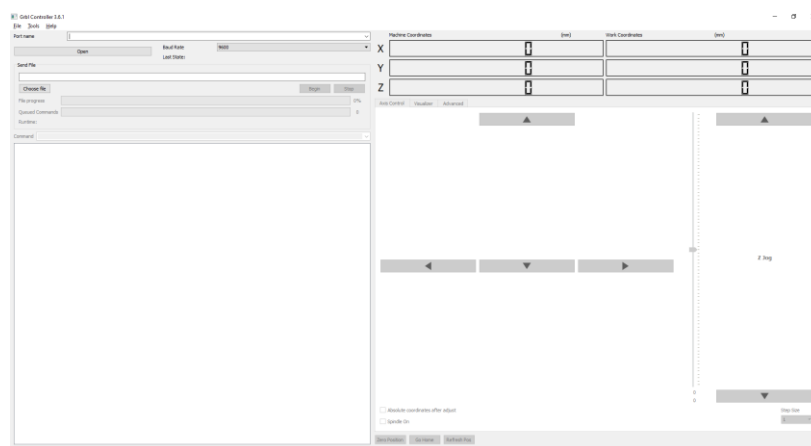


Рисунок 2.29 – Інтерфейс GRBL Controller

Для управління кроковими двигунами в цій програмі, буде задаватися готовий G-code. Він буде створений за допомогою ПЗ Constructorgcode3.3. Вигляд цієї програми продемонстрований на рис. 2.30.

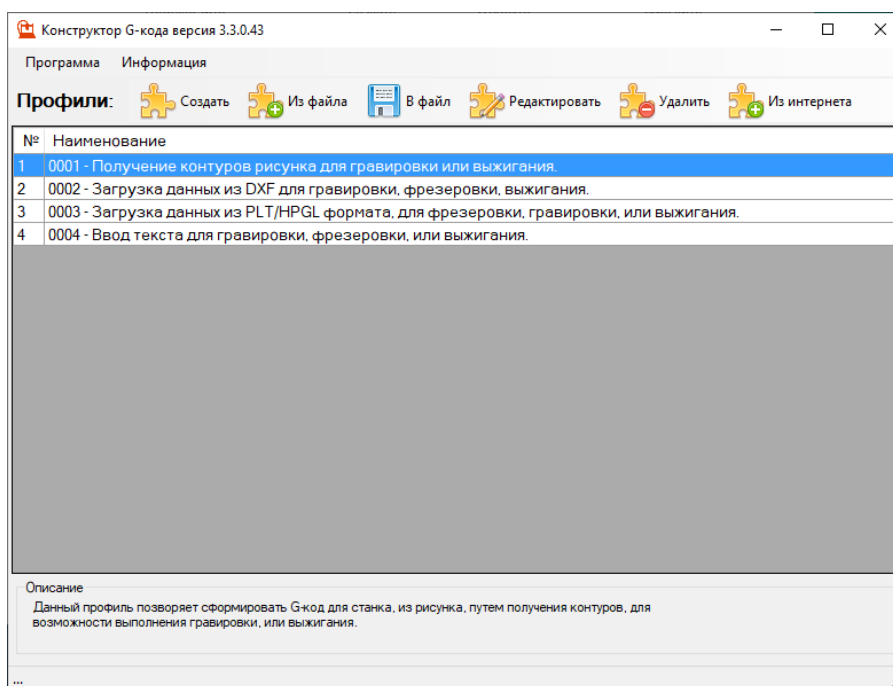


Рисунок 2.30 – Интерфейс Constructorgcode3.3

Дана програма розроблена для можливості генерації G-code, для різних ЧПК верстатів. Наявний функціонал дозволяє програмі адаптувати ЧПК верстат, щоб одержуваний G-code можна було відразу використовувати на верстаті, в нашому випадку це буде кінематика сканеру.

Програма представляє собою подобу конструктора, що складається з набору блоків, які можна зібрати в певну послідовність. Можна також довантажити з інтернету готовий набір профілів які вже містять всі необхідні настройки, для швидкого отримання G-code, з різних файлів, типу: bmp, jpg, png, gif, DXF, PLT, Drill, Gerber.

Приклад виконання програми продемонстрований на рис. 2.31.

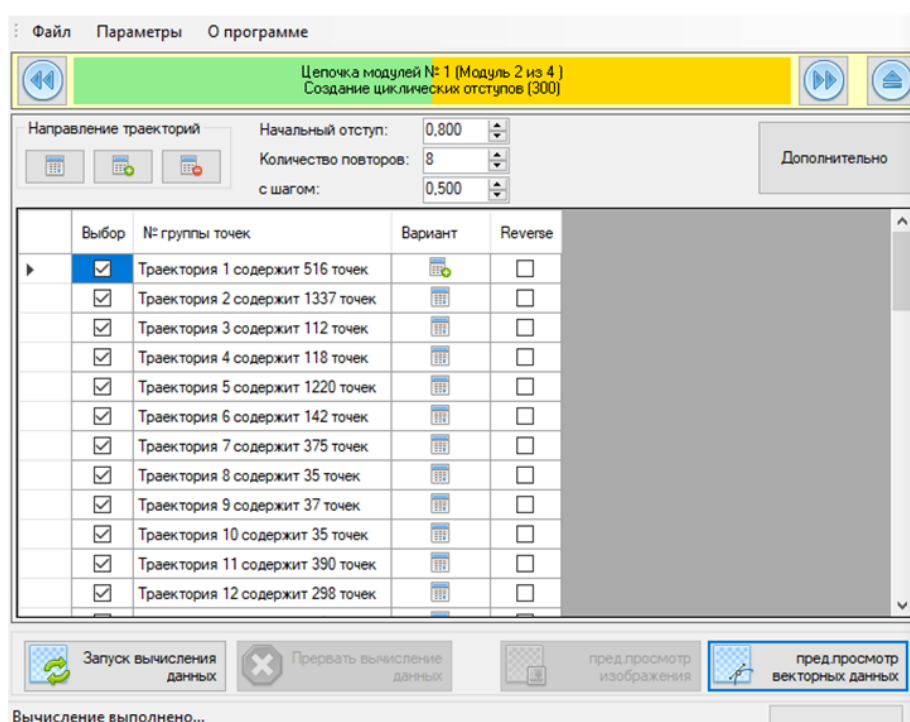


Рисунок 2.31 – Приклад виконання програми

Задавання G-code в ПЗ GRBL Controller відбувається таким чином, треба загрузити в поле файлу (рис. 2.32) файл с розширенням ps. або txt. вже з ГОТОВИМ КОДОМ для конструкції сканера.



Рисунок 2.32 – Поле для завантаження G-code

Зроблено управління кроковими двигунами для 3D-сканеру через GRBL Controller (рис. 2.33).

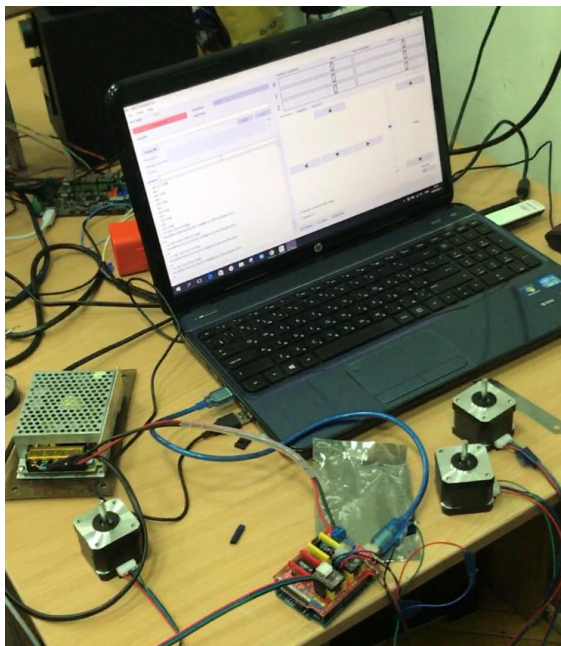


Рисунок 2.33 – Управління кроковими двигунами через GRBL Controller

Виведення виконання G-code в ПЗ показано на рис. 2.34.

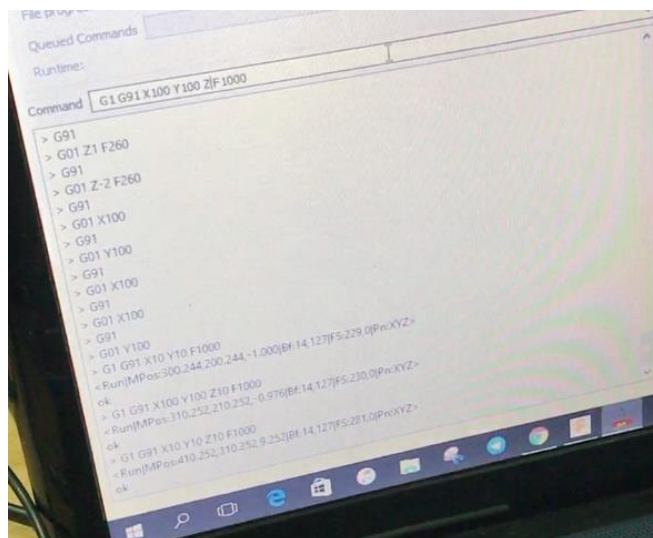


Рисунок 2.34 – Виконання G-code в ПЗ

Налагодження програмного забезпечення для керування кроковими двигунами зроблено успішно.

## 2.7 Висновки до другого розділу

В ході виконання другого розділа роботи було розроблено конструкцію 3D-сканеру, виготовлено діючий прототип та налаштовано програмне забезпечення для його керування та обробки отриманих зображень.

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 3.1 Аналіз параметрів експерименту

Основною задачею реверс інженерінгу є перехід від mesh моделі у форматі .stl або .obj у якій форма моделі описується трикутниками або чотирикутниками до параметричної моделі, у якій кожна грань та ребро якої описується математичними формулами. Таким чином можна отримати можливість подальшої параметричної зміни отриманою після перетворення моделі.

Основним якісним показником реверс інженерінгу є відповідність форми та розмірів отриманої параметричної моделі до справжніх розмірів фізичної моделі, що було відскановано. Сам перехід від mesh моделі до параметричної відбувається у різноманітних CAD системах у напівавтоматичному режимі, насправді більшу частину роботи виконує інженер-оператор і якість самого «переходу» залежить лише від здібностей та навичок людини. Цей людський фактор майже не можливо математично проаналізувати. Таким чином основним факторами що впливають на якісні показники реверс інженерінгу, які можна описати математично, є параметри 3D-сканування, за допомогою якого ми отримуємо початкову mesh модель.

Експериментальні дослідження проводяться на 3D-сканері, розробку якого описано у попередньому розділі. Необхідно провести аналіз параметрів сканеру та процесу сканування, які впливають на якість отриманої моделі.

По-перше це кількість кадрів. Тобто кількість зображень, які отримуються для створення одного mesh файлу. При недостатній кількості кадрів інформація про об'єкт буде не повною, а при надлишку – значно збільшиться час сканування і кількість кадрів може стати надмірною. У зв'язку

з тим, що при скануванні 3D-сканер змінює своє положення відносно об'єкту по двох кутах сферичної системи координат, то кількість отриманих зображень мусить бути достатньо велика. На основі попереднього досвіду кількість необхідних кадрів знаходиться у межах 400-500 штук.

По-друге це фокусна відстань. З одного боку збільшення фокусної відстані збільшує обсяг поверхні об'єкту, що потрапляє в один кадр і таким чином збільшується взаємний перетин елементів об'єкту у різних кадрах. Але з іншого боку збільшення фокусної відстані збільшує лінійну відстань між кадровими положеннями ПЗЗ-матриці (прибор із зарядовим зв'язком) 3D-сканеру – системою Kinect. До того ж збільшення фокусної відстані ускладнить балансування 3D-сканеру для швидкого переміщення між кадрами. Базуючись на технічних характеристиках системи Kinect 2.0 та власному досвіді роботи з розробленим 3D-сканером фокусну відстань слід обирати у межах 0,4 – 0,5 м. Під фокусною відстанню мається на увазі відстань від об'єктиву Kinect до середнього значення відстані до поверхні об'єкту, що сканується.

По-третє це роздільна здатність отриманих кадрів. В процесі сканування існує можливість зменшити роздільну здатність кадрів отриманих 3D-сканером використовуючи програмне забезпечення, що було описано у попередньому розділі. З одного боку використання максимально можливої роздільної здатності збільшить якість отриманих кадрів, але з іншого при сканування об'єктів без дрібних деталей може збільшити кількість шумів, що з'являються на зображенні. Ця гіпотеза вимагає перевірки і цей параметр буде змінюватися у досить невеликому діапазоні від 400 до 600 dpi по вертикалі.

Крім вище названих параметрів на якість отриманих mesh моделей будуть впливати швидкість та прискорення переміщення ПЗЗ матриці відносно об'єкту а також параметри штучного освітлення об'єкту сканування. Але швидкості та прискорення це параметри, які занесено у програмне

забезпечення 3D-сканеру, що розроблено і вони були обрані ще на етапі розробки. Освітлення має значний вплив на якість отриманих кадрів та як наслідок на отриману mesh модель. Але по-перше у Kinect 2.0 є система інфрачервоної сітки, а крім того для ПЗЗ матриці необхідний постійний рівень освітлення. Таким чином для коректної роботи 3D-сканеру необхідно забезпечити постійний рівень освітлення і змінювати цей параметр під час сканування не має сенсу.

Таким чином у даному підрозділі визначено якісний показник 3D-сканування та реверс інженерінгу в цілому, а також основні параметри що мають на нього вплив. В ході експериментальних досліджень ці параметри будуть змінюватися у вказаних діапазонах, а потім за результатами експериментів буде побудовано математичну модель на основі трьохфакторного експерименту.

### 3.2 Методика проведення експерименту

У якості моделі для експериментальних досліджень обрано циліндр із матовою поверхньою висотою 50 мм та діаметром основи 50 мм. Форма циліндра є достатньо простою для подальшого аналізу та реверс інженерінгу. Вона містить як плоскі елементи так і поверхні, отримані шляхом обертання, що дозволить провести аналіз сканування різних форм поверхонь. Крім того циліндрична форма завдяки своїй простоті дозволить майже уникнути людського фактору в процесі реверс інженерінгу в CAD системі. Матова поверхня необхідно для того щоб позбавитись відблисків на поверхні зображення, що дозволить позбавитись впливу освітлення на якість отриманої параметричної моделі. Насправді вплив відблисків на глянцевоїй поверхні зведено до мінімуму через те що використовується розсіяне освітлення. Зовнішній вигляд моделі, що досліджується наведено на рис. 3.1.

Експериментальні дослідження проводяться із зміною параметрів і діапазонах, що наведено у попередньому підрозділі. Отримані результати сканування представлені у вигляді triple mesh файлів у форматі .stl. Отримані mesh сітки досить сильно відрізняються для різних параметрів експериментального дослідження. На рисунках 3.2 – 3.10 наведено результати сканування при наступних параметрах: фокусна відстань 0,5 м, роздільна здатність 600 dpi, а кількість кадрів 400, 450 та 500 штук.

Зображення інших результатів експериментів в даному розділі не наведено через одноманітність зображень.



Рисунок 3.1 – Модель для експериментальних досліджень

Отримані mesh моделі (рис. 3.2 – 3.10) наведено у середовищі Fusion 360, де і буде проводитись їх подальший аналіз.

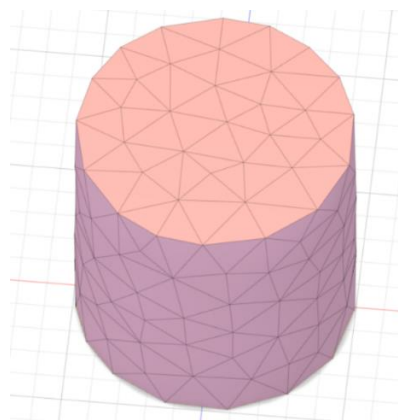


Рисунок 3.2 – Mesh модель, отримана при кількості кадрів 400

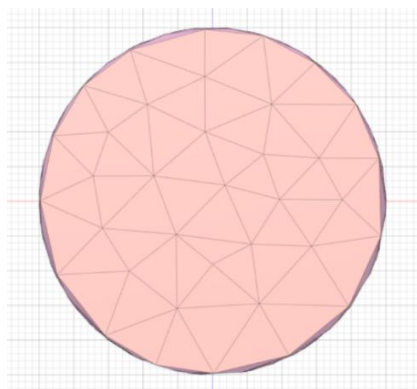


Рисунок 3.3 – Mesh модель (вид згори), отримана при кількості кадрів 400

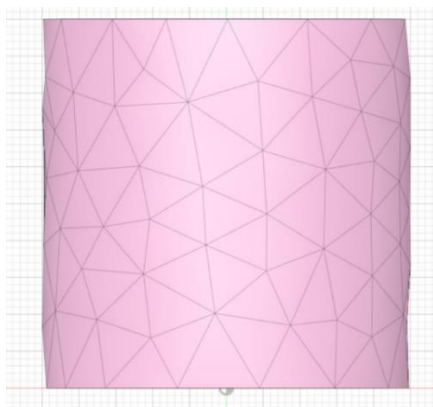


Рисунок 3.4 – Mesh модель (вид збоку), отримана при кількості кадрів 400

Як можна побачити із зображень mesh моделі вже неозброєним оком можна побачити відмінності від початкового об'єкту, що сканувався. На

рисунках навмисно наведено декілька варіантів розташування mesh моделі для кращого розуміння помилок сканування, які з'явилися.

На подальших рисунках наведено аналогічні проекції отриманих моделей для інших параметрів сканування.

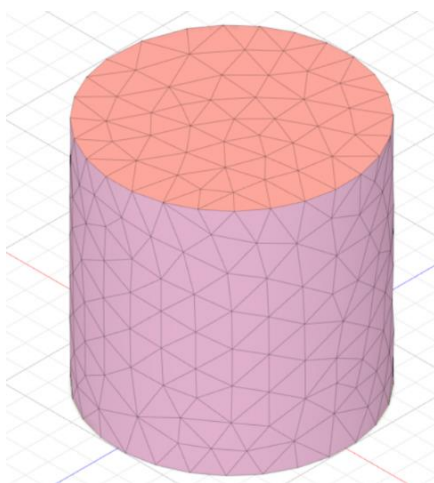


Рисунок 3.5 – Mesh модель, отримана при кількості кадрів 450

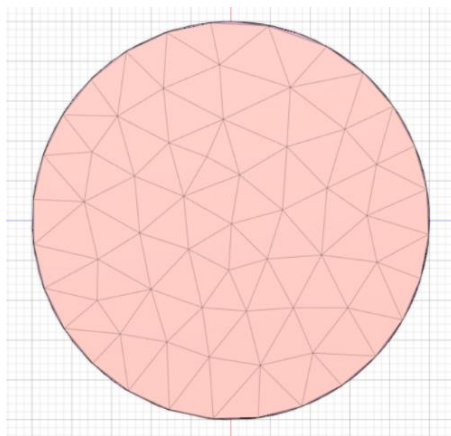


Рисунок 3.6 – Mesh модель (вид згори), отримана при кількості кадрів 450

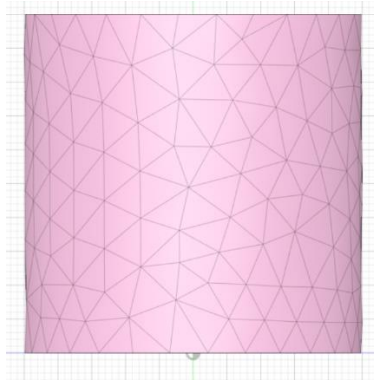


Рисунок 3.7 – Mesh модель (вид збоку), отримана при кількості кадрів 450

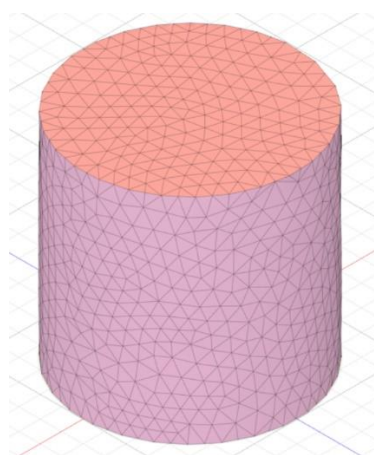


Рисунок 3.8 – Mesh модель, отримана при кількості кадрів 500

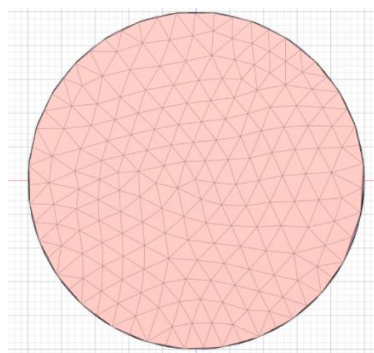


Рисунок 3.9 – Mesh модель (вид згори), отримана при кількості кадрів 500

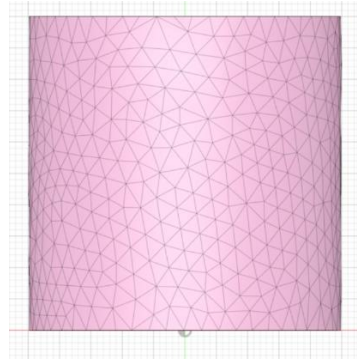


Рисунок 3.10 – Mesh модель (вид збоку), отримана при кількості кадрів 500

Якщо провести візуальний аналіз отриманих моделей, то може здатися, що збільшення кадрів значно покращує якісні показники отриманих mesh моделей. Це обґрунтовується збільшеною кількістю полігонів (triple mesh), які вдалося створити завдяки більшій кількості кадрів, тому поверхні здаються більш коректними. Але чи дійсно це так необхідно перевірити провівши аналіз із допомогою інструментів реверс інженерінгу, які є у CAD системі Fusion 360. Справа у тому, що збільшення кількості полігонів може призвести до збільшення рівня шумів і загальному відхиленню поверхонь моделі від еталону.

Для реверс інженерінгу у Fusion 360 є два основних інструмента: Create Mesh Section Sketch та Fit Curves to Mesh Section. Але ці два інструменти повністю задовольняють потреби користувача при параметризації mesh моделей.

Інструмент Create Mesh Section Sketch (рис. 3.11) дозволяє створювати ескізи з перетинів mesh моделей обраними площинами. Таким чином можна отримувати ескізи контурів відсканованих моделей і зі ескізи вже мають певні описані геометричні параметри.

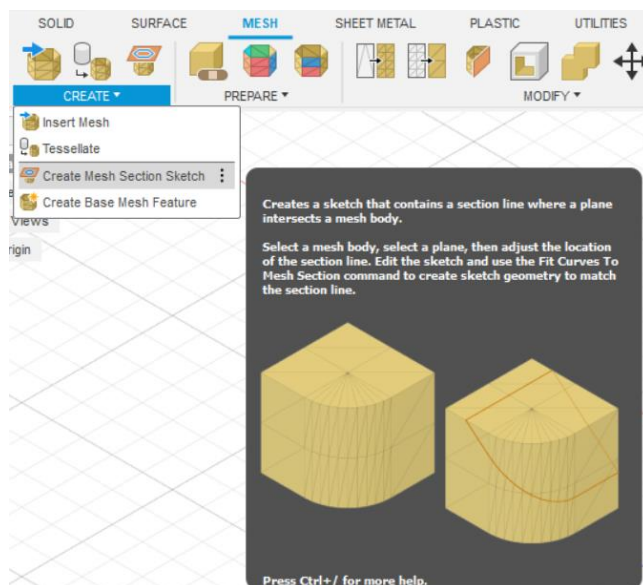


Рисунок 3.11 – Create Mesh Section Sketch

Інструмент Fit Curves to Mesh Section (рис. 3.12) дозволяє аналізувати створені в режимі Create Mesh Section Sketch ескізи та демонструє їх відхилення від повністю параметризованих скетчів.

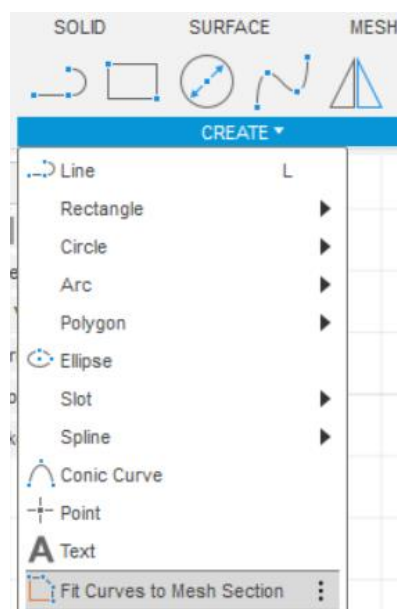


Рисунок 3.12 – Fit Curves to Mesh Section

Таким чином, ці два інструменти дозволяють математично порівняти відскановані mesh моделі із еталонним об'єктом і отримати значення відхилень у міліметрах, що будуть використані у як показник якості 3D-сканування і результату реверс інженерінга в цілому.

### 3.3 Демонстрація результатів експериментальних досліджень

Для більш повного аналізу якості відсканованих моделей необхідно розглядати пласкі поверхні та поверхні тіл обертання. Таким чином пропонується розглядати параметр якості – відхилення розмірів відсканованої моделі від еталону як сума відхилень розмірів верхньої пласкої поверхні циліндру і бокової поверхні циліндру, що розглядається у його середині. Вибір середини циліндру обґрунтовано тим, що на верхньому ребри циліндру можуть виникнути крайові дефекти, які вже аналізуються при розгляді пласкої поверхні циліндру.

На рис. 3.13 – 3.15 наведено результати роботи з інструментом Create Mesh Section Sketch.

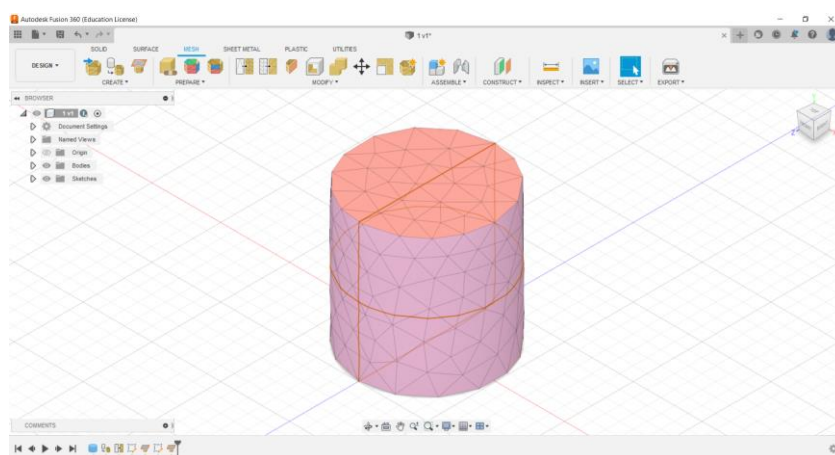


Рисунок 3.13 – Create Mesh Section Sketch mesh моделі, отриманої при кількості кадрів 400

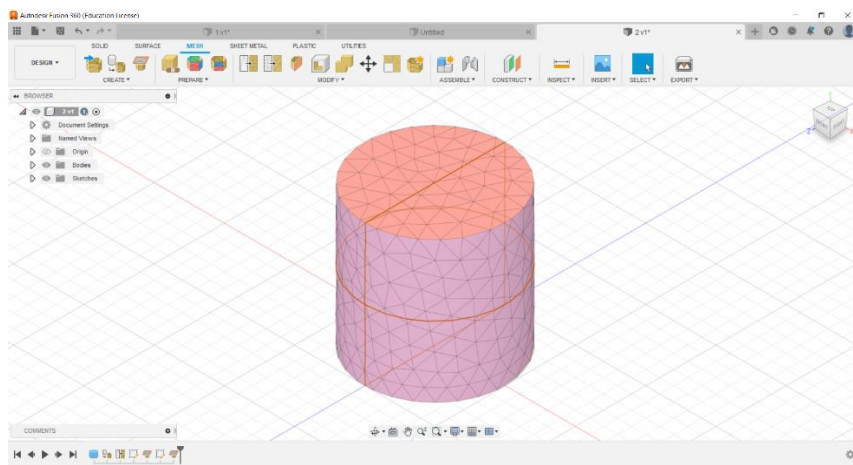


Рисунок 3.14 – Create Mesh Section Sketch mesh моделі, отриманої при кількості кадрів 450

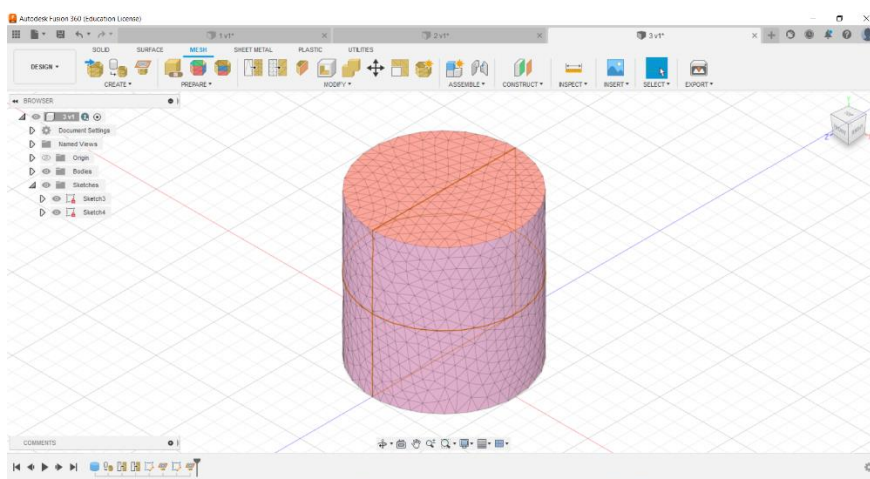


Рисунок 3.15 – Create Mesh Section Sketch mesh моделі, отриманої при кількості кадрів 500

Для роботи з кожним з пар перетинів використовується інструмент Fit Curves to Mesh Section. Результати аналізу наведено на рисунках 3.16 – 3.21.

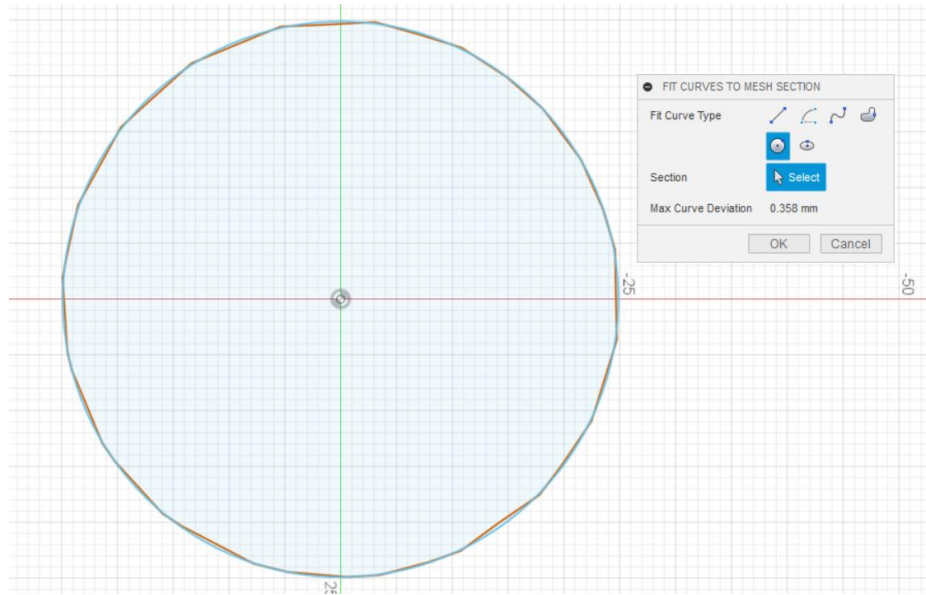


Рисунок 3.16 – Fit Curves to Mesh Section циліндричної поверхні моделі, отриманої при кількості кадрів 400

Результат середніх значень відхилень циліндричної поверхні 0,358 мм.

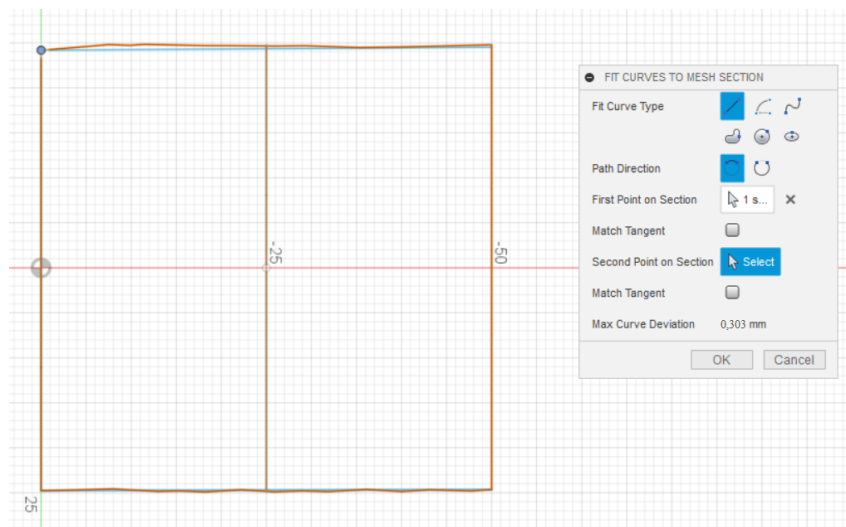


Рисунок 3.17 – Fit Curves to Mesh Section циліндричної поверхні моделі, отриманої при кількості кадрів 400

Результат середніх значень відхилень плоскої поверхні 0,303 мм.

Таким чином сумарна помилка сканування для варіанту експерименту 400 кадрів, 0,5 м фокусна відстань, 600 дрі роздільна здатність кадрів становить 0,661 мм.

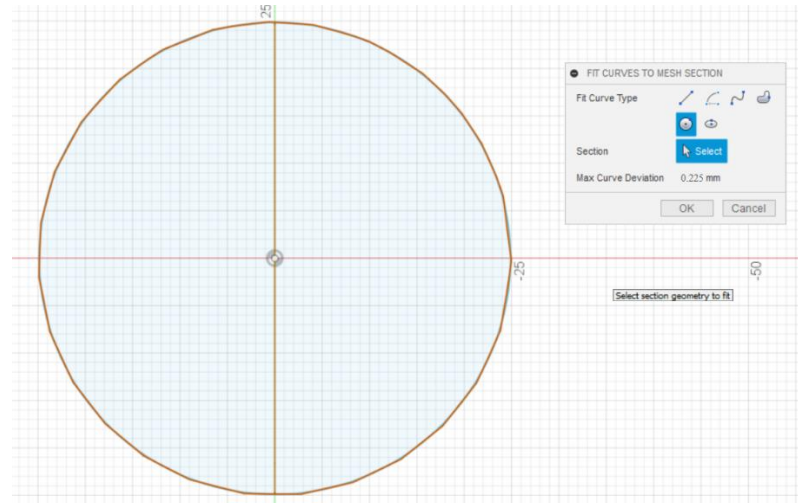


Рисунок 3.18 – Fit Curves to Mesh Section циліндричної поверхні моделі, отриманої при кількості кадрів 450

Результат середніх значень відхилень циліндричної поверхні 0,225 мм.

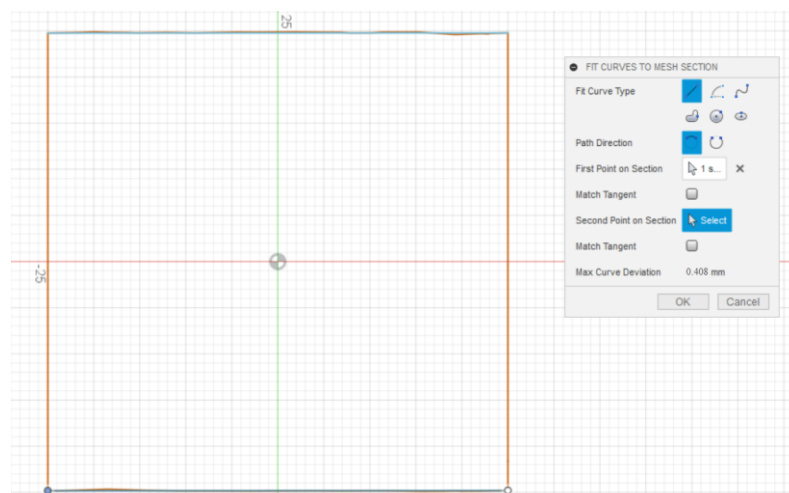


Рисунок 3.19 – Fit Curves to Mesh Section циліндричної поверхні моделі, отриманої при кількості кадрів 450

Результат середніх значень відхилень плоскої поверхні 0,408 мм.

Таким чином сумарна помилка сканування для варіанту експерименту 450 кадрів, 0,5 м фокусна відстань, 600 dpi роздільна здатність кадрів становить 0,633 мм.

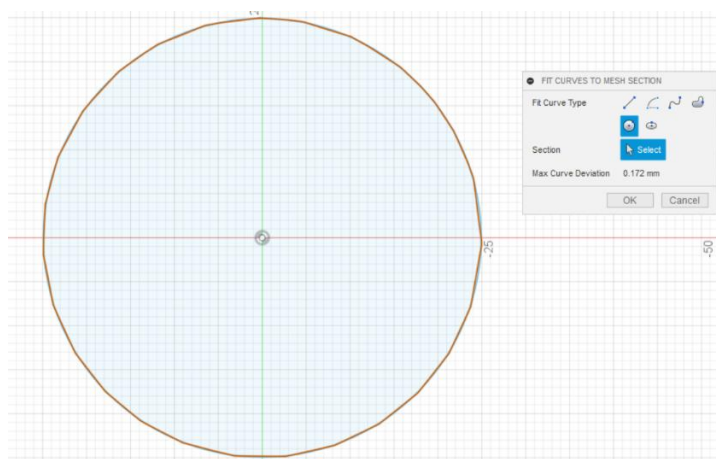


Рисунок 3.20 – Fit Curves to Mesh Section циліндричної поверхні моделі, отриманої при кількості кадрів 500

Результат середніх значень відхилень циліндричної поверхні 0,172 мм.

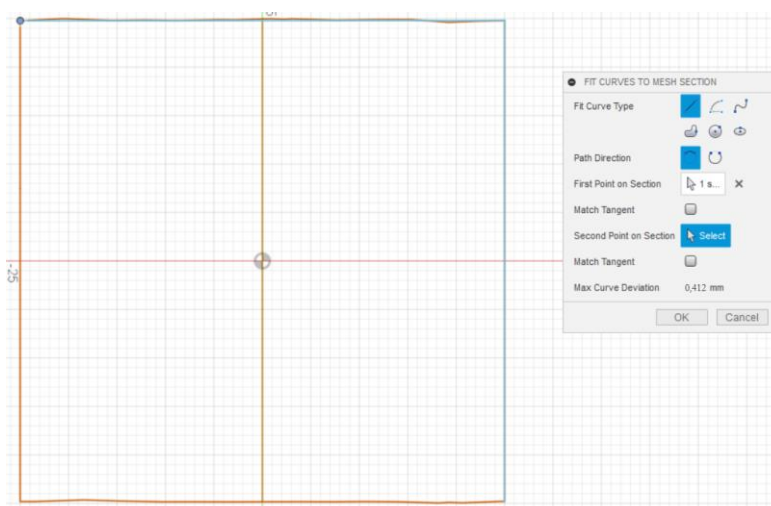


Рисунок 3.21 – Fit Curves to Mesh Section циліндричної поверхні моделі, отриманої при кількості кадрів 500

Результат середніх значень відхилень плоскої поверхні 0,412 мм.

Таким чином сумарна помилка сканування для варіанту експерименту 500 кадрів, 0,5 м фокусна відстань, 600 dpi роздільна здатність кадрів становить 0,584 мм.

Таким чином на прикладі цих досліджень можна прийти до висновку що не дивлячись на те що роздільна здатність впливає на точність отриманих mesh моделей не однаково, в цілому із підвищенням роздільної здатності відбувається покращення отриманих завдяки 3D-скануванню моделей. Також можна прийти до висновку, що роздільна здатність має більший вплив на складні форми поверхонь, а саме циліндричну у даному випадку.

Для більшої наочності, а саме максимізації показника якості запропоновано варіант коли показник якості моделі розраховується як:

$$k_{\text{я}} = 100 - 10p, \quad (3.1)$$

де  $p$  – сумарна помилка сканування, мм;

$k_{\text{я}}$  – коефіцієнт якості.

Введення цього коефіцієнту обумовлено по-перше більшою зрозумілістю максимізації вагової функції при математичному моделюванні, а також спрощенням розрахунків при позбавленні дрібних значень помилки.

Таким чином отримано наступні значення коефіцієнтів якості для наведених результатів експерименту:

–  $k_{\text{я}} = 33,9$ . 400 кадрів, 0,5 м фокусна відстань, 600 dpi роздільна здатність кадрів;

–  $k_{\text{я}} = 36,7$ . 450 кадрів, 0,5 м фокусна відстань, 600 dpi роздільна здатність кадрів;

–  $k_{\text{я}} = 41,6 \cdot 500$  кадрів, 0,5 м фокусна відстань, 600 dpi роздільна здатність кадрів.

Інші варіанти результатів експериментальних досліджень наведено у наступному розділі даної роботи.

### 3.4 Висновки до другого розділу

В результаті виконання третього розділу роботи запропоновано методику проведення експериментальних досліджень, проведено експеримент та отримані первинні результати для подальшої математичної обробки.

## 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ 3D-СКАНУВАННЯ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ОТРИМАНОЇ МОДЕЛІ

### 4.1 Повний факторний експеримент

Роботу з планування експерименту починають із збору апріорної інформації. Аналіз цієї інформації дозволяє отримати уявлення про параметри оптимізації, про фактори, про найкращі умови ведення дослідження, про характер поверхні відгуку тощо. Апріорну інформацію можна отримати з літературних джерел, з опитування фахівців шляхом виконання однофакторних експериментів. В даному випадку як джерело апріорної інформації виступають експериментальні дані, описані в попередньому розділі. На основі аналізу апріорної інформації робиться вибір експериментальної області факторного простору, який полягає у виборі основного (нульового) рівня та інтервалів варіювання факторів.

Основний рівень є вихідною точкою для побудови плану експерименту, а інтервали варіювання визначають відстані по осях координат від верхнього та нижнього рівнів до основного рівня [25].

При плануванні експерименту значення факторів кодуються шляхом лінійного перетворення координат факторного простору з перенесенням початку координат в нульову точку та вибором масштабів по осях одиницях інтервалів варіювання факторів.

Виходять значення факторів, рівні  $+1$  (верхній рівень) та  $-1$  (нижній рівень).

Розташування експериментальних точок у факторному просторі для повного факторного експерименту при  $k=3$  показано на рисунку 4.1. Цей варіант відповідає експерименту, описаному у попередньому розділі.

Як бачимо, точки  $2^3$  плану задаються координатами вершин куба. За аналогічним принципом розташовуються експериментальні точки при  $k > 3$ .

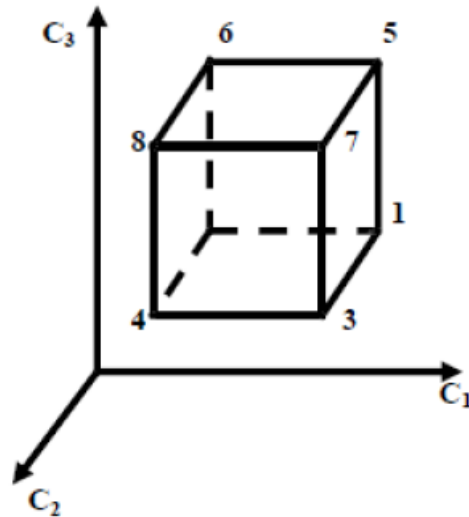


Рисунок 4.1 – Розташування точок у факторному просторі для ПФП при  $k=3$ .

Перший етап планування експерименту для отримання лінійної моделі ґрунтується на варіюванні на двох рівнях. У цьому випадку, за певної кількості факторів, можна знайти кількість дослідів, необхідну для реалізації всіх можливих поєднань рівнів факторів.

Експеримент, у якому реалізуються всі можливі поєднання рівнів факторів, називається повним факторним експериментом (ПФП). Якщо кількість рівнів факторів дорівнює двом, маємо ПФП типу  $2^k$ .

Умови експерименту зручно записувати як таблиці, яку називають матрицею планування експерименту. Матриця планування для двох факторів наведена у таблиці 4.1.

Кожен стовпець у матриці планування називають вектор-стовпцем, а кожен рядок – вектор-рядком. Таким чином, у таблиці 4.1 ми маємо три

вектори-стовпчики незалежних змінних і один вектор-стовпчик параметра оптимізації.

Те, що записано в формі алгебри, можна зобразити графічно. В області визначення факторів знаходиться точка, що відповідає основному рівню, і проводять через неї нові осі координат, що паралельні осям натуральних значень факторів. Далі вибирають масштаби по нових осях так, щоб інтервал варіювання для кожного фактора дорівнював одиниці. Тоді умови проведення дослідів відповідатимуть вершинам куба, при  $k=3$ . Центрами цих фігур є основний рівень, а кожна сторона дорівнює двом інтервалам (рис. 4.1). Номери вершин куба відповідають номерам дослідів у матриці планування. Площа, обмежена цими фігурами, називається областю експерименту.

Таблиця 4.1 – Матриця планування

№ досліду	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$
1	-	-	+	$y_1$
2	+	-	-	$y_2$
3	-	+	-	$y_3$
4	+	+	+	$y_4$
5	-	-	+	$y_5$
6	+	-	-	$y_6$
7	-	+	-	$y_7$
8	+	+	+	$y_8$

Повний факторний експеримент належить до планів, які є найбільш ефективними при побудові лінійних моделей. Ефективність, або оптимальність, повного факторного плану досягається за рахунок нижче перерахованих його властивостей.

Дві властивості впливають безпосередньо з побудови матриці. Перше з них – симетричність щодо центру експерименту – формулюється наступним чином: алгебраїчна сума елементів вектора-стовпця кожного фактора дорівнює нулю, або:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0, \quad (4.1)$$

де  $i = 1, 2, \dots, k$  – номер фактора,

$N$  – кількість дослідів.

Друга властивість – так звана умова нормування – формулюється так: сума квадратів елементів кожного стовпця дорівнює числу дослідів, або:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^2 = N, \quad (4.2)$$

Це наслідок того, що значення факторів у матриці задаються  $+1$  та  $-1$ .

Ми розглянули характеристики окремих стовпців матриці планування.

Розглянемо властивості сукупності шпальт.

Сума почлених творів будь-яких двох вектор-стовпців матриці дорівнює нулю, або:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{ju} = 0, \quad (4.3)$$

при  $i \neq u$  а також  $i, u = 0, 1, \dots, k$ . Ця важлива властивість називається ортогональністю матриці планування.

Останнє, четверте властивість називається ротатабельністю, тобто. точки в матриці планування підбираються так, що точність прогнозу значень

параметра оптимізації однакова на рівних відстанях від центру експерименту і не залежить від напрямку.

Виконання цих умов забезпечує мінімальну дисперсію коефіцієнтів регресії, а й рівність дисперсії. Це полегшує статистичний аналіз результатів експерименту.

Побудувавши матрицю планування, здійснюють експеримент. Отримавши експериментальні дані, розраховують значення коефіцієнтів регресії.

Значення вільного члена ( $b_0$ ) беруть як середнє арифметичне всіх значень параметра оптимізації в матриці:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N} \quad (4.4)$$

де  $y_j$  значення параметра оптимізації в  $j$ -му досвіді;

$N$  – кількість дослідів у матриці.

Лінійні коефіцієнти регресії розраховують за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{N} \quad (4.5)$$

де  $x_{ij}$  – кодоване значення фактора  $x_i$  в  $j$ -му досвіді.

Розглянемо рівняння регресії для  $k=3$ .

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_{123}, \quad (4.6)$$

де  $b_0$  – вільний член;

$b_1, b_2, b_3$  – лінійні коефіцієнти;

$b_{12}, b_{13}, b_{23}$  – коефіцієнти подвійної взаємодії;

$b_{123}$  – коефіцієнт потрійної взаємодії.

Повне число всіх можливих коефіцієнтів регресії, включаючи  $b_0$ , лінійні коефіцієнти та коефіцієнти взаємодій всіх порядків, дорівнює кількості дослідів повного факторного експерименту.

Властивості матриці ПФП спрощують як розрахунок коефіцієнтів регресії, а й статистичний аналіз регресійної моделі, отриманої за результатами його реалізації.

Коефіцієнти регресії визначаються незалежно один від одного і відповідає необхідність у перерахунку їх величин після відкидання членів у рівнянні регресії.

Дисперсії всіх коефіцієнтів регресії рівні між собою та визначаються за формулами:

При рівномірному дублювання дослідів:

$$s^2\{b_i\} = \frac{s^2\{y\}}{nN}, \quad (4.7)$$

де  $s^2\{y\}$  – оцінка дисперсії відтворюваності;

$N$  – число основних дослідів, що заплановано матрицею, тобто число серій дослідів, кожний з яких містить  $n$  дубльованих дослідів;

При відсутності дублюючих дослідів:

$$s^2\{b_i\} = \frac{s^2\{y\}}{N}, \quad (4.7)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів регресії, знайдених за результатами ПФП, використовується  $t$ -критерій Стьюдента.

## 4.2 Обробка результатів експерименту

Параметром оптимізації вибрано відхилення одержаної при скануванні mesh моделі від справжніх розмірів об'єкта – Max Curve Deviation.

Точність отриманої моделі залежить від різних факторів: фокусної відстані, кількості отриманих зображень (змінюється кут між положеннями сканера при зміні кадру), роздільної здатності зображень.

Для встановлення залежності точності моделі від перерахованих факторів запланована реалізація ПФП 23.

У ході експериментальних досліджень виділено для подальшого дослідження такі фактори:

- фокусна відстань –  $\Phi$ , м;
- роздільна здатність зображень –  $n$ , точок по вертикалі;
- кількість отриманих зображень –  $K$ , шт.

Інші фактори зафіксовані:

- освітленість;
- швидкості;
- прискорення.

Значення рівнів та інтервалів варіювання факторів наведено у таблиці 4.2.

В третьому розділі роботи наведено опис проведених експериментальних досліджень  $2^3$  де число факторів  $k=3$ , число рівнів  $p=2$ , число дослідів  $N=8$ , число повторних дослідів  $n=3$ . Матриця планування наведена у таблиці 4.2, вона була реалізована під час проведення експерименту.

Таблиця 4.2 – Значення рівнів та інтервалів варіювання факторів

Фактор		Рівні варіювання			Інтервал варіювання	Значення фактору	
Найменування	Позначення		+1	0			-1
	Натуральне	Кодове					
Фокусна відстань, Ф	X <sub>1</sub>	x <sub>1</sub>	0.5	0.45	0.4	0.05	$x_1 = (Ф-0,45)/0,05$
Кількість кадрів, К	X <sub>2</sub>	x <sub>2</sub>	500	450	400	50	$x_2 = (К - 450)/50$
Роздільна здатність, РЗ	X <sub>3</sub>	x <sub>3</sub>	600	500	400	100	$x_3 = (РЗ - 500)/100$

В третьому розділі роботи наведено опис проведених експериментальних досліджень  $2^3$  де число факторів  $k=3$ , число рівнів  $p=2$ , число дослідів  $N=8$ , число повторних дослідів  $n=3$ . Матриця планування наведена у таблиці 4.3, вона була реалізована під час проведення експерименту.

Таблиця 4.3 – Матриця планування

№ дослідів	Матриця			Натуральні значення змінних			Вихідне значення
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	Ф	К	РЗ	
1	-1	-1	-1	0,4	400	400	31,3
2	-1	1	-1	0,4	500	400	40,6
3	1	-1	-1	0,5	400	400	22,9
4	1	1	-1	0,5	500	400	32,4
5	-1	-1	1	0,4	400	600	47,4
6	-1	1	1	0,4	500	600	53,9
7	1	-1	1	0,4	400	600	33,9
8	1	1	1	0,5	500	600	41,6

Результати восьми серій дубльованих дослідів наведено у стовпцях 5 – 7 таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати експериментальних досліджень

№ досліджу	Значення факторів			Результати експериментів			Результати розрахунків		
	Ф	К	РЗ						
1	0,4	400	400	32,3	30,2	31,4	31,3	1,11	31,25
2	0,4	500	400	39,7	41,3	40,7	40,6	0,66	40,65
3	0,5	400	400	23,1	22,8	22,9	22,9	0,025	22,95
4	0,5	500	400	31,2	33,4	32,7	32,4	1,25	32,35
5	0,4	400	600	46,4	47,7	48,0	47,4	0,725	47,1
6	0,4	500	600	54,7	53,3	53,6	53,9	0,545	54,2
7	0,4	400	600	34,0	33,6	34,2	33,9	0,095	34,2
8	0,5	500	600	41,0	42,6	41,3	41,6	0,725	41,3

У 8 стовпці наведено значення відгуку, усереднені з кожної серії.

$$\tilde{y}_j = \frac{(\sum_{u=1}^5 y_{ju})}{3}, j = 1, 2, 3 \dots, 8. \quad (4.8)$$

Одинадцятий стовпець містить результати розрахунку дисперсії по кожній серії дослідів.

$$S_j^2 = \frac{[\sum_{u=1}^5 (y_{ju} - \tilde{y}_j)^2]}{2}, j = 1, 2, 3 \dots, 8. \quad (4.9)$$

Проведено перевірку однорідності дисперсії дослідів. В даному експерименті є рівномірне дублювання, використано критерій Корхена. Максимальною з дисперсій виявилася дисперсія сьомого дослідів  $S_4^2 = 1.25$ .

$$G_{\text{розр}} = \frac{S_7^2}{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_8^2} = \frac{1.25}{5.135} = 0.37 \quad (4.10)$$

З таблиць розподілу Кохрена для  $q=0,01$ ,  $f=n-1=4$  (кількість ступенів свободи кожної вибірки),  $m=8$  (кількість виборок), знаходимо:  $G_{\text{табл}} = 0,6152$ . Отримане співвідношення  $G_{\text{розн}} < G_{\text{табл}}$  дозволяє прийняти гіпотезу про однорідність дисперсій дослідів. Знаходимо оцінку дисперсії відтворюваності експерименту як середнє арифметичне дисперсій дослідів:

$$S^2\{y\} = \frac{(\sum_{j=1}^8 S_j^2)}{8} = \frac{5,135}{8} = 0.64, \quad (4.11)$$

Регресійну модель об'єкта знаходимо як неповного многочлена третього порядку, тобто. у вигляді, що дозволяє врахувати поряд з лінійними членами всі взаємодії факторів:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.12)$$

Таблиця 4.5 – Обчислення коефіцієнтів регресії

№ досліду	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$K_{\text{точн}}$
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-31,3	-31,3	-31,3	31,3	31,3	31,3	-31,3	31,3
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	40,6	-40,6	-40,6	-40,6	-40,6	40,6	40,6	40,6
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-22,9	22,9	-22,9	-22,9	22,9	-22,9	22,9	22,9
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	32,4	32,4	-32,4	32,4	-32,4	-32,4	-32,4	32,4
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-47,4	-47,4	47,4	47,4	-47,4	-47,4	47,4	47,4
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	53,9	-53,9	53,9	-53,9	53,9	-53,9	-53,9	53,9
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-33,9	33,9	33,9	-33,9	-33,9	33,9	-33,9	33,9
8	1	1	1	1	1	1	1	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6
$\Sigma$	0	0	0	0	0	0	0	33	-42,4	49,6	1,4	-4,6	-9,2	1,0	304

$$b_0=38, \quad b_1=4,125, \quad b_2=-5,3, \quad b_3=6,2, \quad b_{12}=0,175, \quad b_{13}=-0,575, \quad b_{23}=-1,15, \\ b_{123}=0,125.$$

Рівняння регресії у нормалізованих позначеннях факторів має вигляд:

$$y = 38 + 4,125x_1 - 5,3x_2 + 6,2x_3 + 0,75x_1x_2 - 0,575x_1x_3 - 1,15x_2x_3 + 0,125x_1x_2x_3. \quad (4.13)$$

Для спрощення отриманої математичної моделі та виявлення незначущих коефіцієнтів регресії необхідно провести статистичний аналіз отриманого рівняння регресії.

Необхідно знайти коефіцієнти регресії, всі вони однакові та дорівнюють:

$$s^2\{b_i\} = \frac{s^2\{y\}}{nN}, \quad (4.14)$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{10,64}{3 \cdot 8} = 0,03. \quad (4.15)$$

Середнє квадратичне відхилення для кожного коефіцієнту регресії становить:

$$s\{b_i\} = \sqrt{s^2\{b_i\}} = 0,16. \quad (4.16)$$

Для оцінки значимості коефіцієнтів регресії необхідно перевірити для кожного з них співвідношення:

$$|b_i| \leq t_{\text{табл.}} \cdot s\{b_i\} \quad (4.17)$$

Розмір  $t_{\text{табл.}}$  знаходиться з таблиць t-розподілу Стюдента при рівні значущості  $q = 0,01$  та числі ступенів свободи  $f_y$ . так як має місце рівномірне дублювання, величина  $f_y$  визначається за формулою:

$$f_y = N(n-1) = 8(3-1) = 16 \quad t_{\text{табл.}} = 2,92 \quad t_{\text{табл.}} \cdot s\{b_i\} = 2,92 \cdot 0,16 = 0,47. \quad (4.18)$$

Умова незначущості коефіцієнтів регресії:

$$|b_i| \leq t_{\text{табл.}}\{b_i\}, \quad (4.19)$$

$$b_1 = |4,125| > 0,47,$$

$$b_2 = |-5,3| > 0,47,$$

$$b_3 = |6,2| > 0,47,$$

$$b_{12} = |0,175| < 0,47,$$

$$b_{13} = |-0,575| > 0,47,$$

$$b_{23} = |-1,15| > 0,47,$$

$$b_{123} = |0,125| < 0,47.$$

Коефіцієнти  $b_{12}$  і  $b_{123}$  визнаємо незначущими, а відповідні члени  $b_{12}x_1x_2$  і  $b_{123}x_1x_2x_3$  виключені з рівняння регресії. Всі інші коефіцієнти регресії виявились значущими. Регресійну модель після відкидання незначних членів одержано у вигляді:

$$y = 38 + 4,125x_1 - 5,3x_2 + 6,2x_3 - 0,575x_1x_3 - 1,15x_2x_3 \quad (4.20)$$

Необхідно визначити довірчий інтервал для кожного із значущих коефіцієнтів:

$$b_i - t_{\text{табл.}}\{b_i\} \leq \beta_i \leq b_i + t_{\text{табл.}}\{b_i\} \quad (4.21)$$

$$3,655 \leq \beta_1 \leq 4,595$$

$$-1,045 \leq \beta_{13} \leq 0,105$$

$$-5,77 \leq \beta_2 \leq -4,83$$

$$-1,62 \leq \beta_{23} \leq -0,68$$

$$5,73 \leq \beta_3 \leq 6,67$$

Далі необхідно провести перевірку адекватності математичної моделі.

$$s_{ад}^2 = \frac{s_{ад}}{f_{ад}} = n \sum \frac{(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{(N-p)}, \quad (4.22)$$

де  $p$  – число коефіцієнтів регресії моделі, що оцінюється.

$$s_{ад}^2 = 2,22. \quad (4.23)$$

Знаходимо значення  $F_{розр}$ :

$$F_{розр} = \frac{s_{ад}^2}{s^2\{y\}} = \frac{2,2}{0,64} = 3,44. \quad (4.24)$$

Із стандартних табличних значень F-розподілу для  $q = 0.01$  і чисел ступенів свободи:

– чисельник:

$$f_{ад} = N - p = 8 - 7 = 1, \quad (4.25)$$

– знаменник:

$$f_{ад} = N(n - 1) = 32. \quad (4.26)$$

Таким чином знайдено значення  $F_{табл} = 3,63$ .

Так як розраховане значення менше табличного  $F_{розра} < F_{табл}$ , то гіпотезу про адекватність моделі прийнято.

Регресивна модель із натуральними позначеннями факторів має наступний вигляд:

$$K_{точн} = 560,95 + 25 \Phi - 1,26K - 1,023 P3 + 0,115 \Phi \cdot P3 + 0,0023K \cdot P3 \quad (4.27)$$

Отримана модель має наступний фізичний сенс: вона демонструє вплив кількості кадрів при скануванні об'єкту, обраної роздільної здатності зображень та фокусної відстані на точність отриманих mesh моделей. На параметр оптимізації перераховані фактори впливають пропорційно, на що вказують лінійні коефіцієнти. Найбільший вплив має фокусна відстань, кількість кадрів і роздільна здатність окремих кадрів мають значно менший на результат сканування.

Для того щоб отримати уяву про вплив і взаємодію на відгук необхідно побудувати графіки взаємозв'язків. Розглянемо вплив на відгук фактору P3 і взаємодію  $\Phi$  P3. Вибір фактору  $\Phi$  обумовлено його більшою значущістю на результативну функцію. Розглянемо  $K_{точн} = f(P3)$ .

$x_1 = x_2 = 0$ . Фактори  $\Phi$  та  $K$  фіксуються на основному рівні.

Отримуємо:

$$K_{\text{точн}} = 38 + 6,2x_3, \quad (4.28)$$

це пряма 1 на рис. 4.2.

$x_1 = 0, x_2 = +1$ . Фактор К вже фіксується на верхньому рівні.

Отримаємо:

$$K_{\text{точн}} = 43,3 + 5,05x_3, \quad (4.29)$$

це пряма 2 на рис. 4.2.

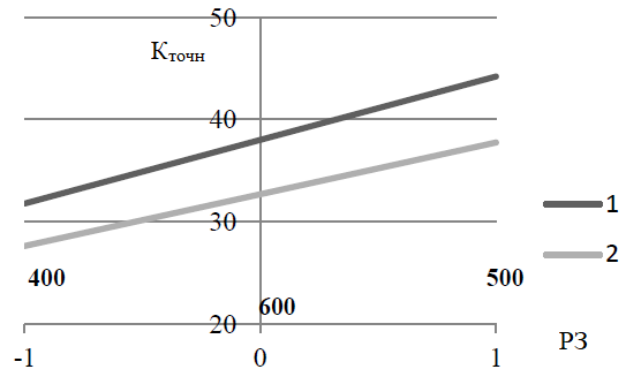


Рисунок 4.2 – Графік залежності  $K_{\text{точн}} = f(PЗ)$

Так як із ростом фактору К відгук зменшується ( $b_3 < 0$ ), то пряма 2 знаходиться нижче прямої 1. Ці прямі не паралельні так як  $b_{23} > 0$ , пряма 2 нахилена під більшим кутом до осі абсцис чим пряма 1. З цього можливо зробити висновок, що при більшій зміні параметру  $\Phi$  відношення зміни роздільної здатності PЗ має більший вплив на точність відсканованих mesh моделей.

## 5 РОЗРАХУНОК ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Якісне освітлення вкрай необхідне для 3D-сканування. Не дивлячись на те, що розроблений у попередніх розділах 3D-сканер має інфрачервону ПЗЗ матрицю, наявність освітлення значно впливає на якість 3D-сканування.

Виробниче штучне освітлення характеризується певними кількісними і якісними показниками.

До кількісних показників освітлення відносяться:

- світловий потік  $\Phi$ , вимірюваний у люменах (лм);
- інтенсивність або сила світла  $I$ , вимірювана в канделах (кд);
- освітленість  $E$ , вимірювана в люксах (лк);
- яскравість  $B$ , вимірювана в канделах, ділених на квадратний метр ( $\text{кд}/\text{м}^2$ ).

Кількісну оцінку досконалості виробничого освітлення проводять по освітленості робочої поверхні.

Освітленістю  $E$  називається відношення світлового потоку  $\partial\Phi$ , що падає на елемент поверхні, до площі цього елемента  $\partial S$  [26].

$$E = \frac{\partial\Phi}{\partial S}. \quad (5.1)$$

Всі джерела світла, у тому числі й освітлювальні прилади, випромінюють світловий потік у простір нерівномірно. Тому вводиться величина щільності світлового потоку – сила світла  $I$ .

Сила світла  $I$  – відношення світлового потоку  $\partial\Phi$ , що виходить від джерела й поширюється рівномірно усередині тілесного кута  $\partial\omega$ , до величини цього кута.

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \omega}. \quad (5.2)$$

При розрахунку штучного освітлення було використано наступну методику.

Визначити висоту підвісу світильника над робочою поверхнею по виразу

$$H_p = H - h_p - h_c, \quad (5.3)$$

де  $H$  – висота приміщення, м;

$h_p$  – висота розташування робочої поверхні від рівня підлоги, м;

$h_c$  – відстань від стелі до світильника, м;

Визначити індекс приміщення по виразу

$$i = \frac{A \cdot B}{H_p (A + B)}, \quad (5.4)$$

де  $A$  – довжина приміщення, м;

$B$  – ширина приміщення, м;

Вибрати тип світильника.

Визначити потрібний світловий потік лампи по виразу

$$\hat{O}_i = \frac{100 \cdot \hat{A} \cdot \hat{A} \cdot \hat{A} \cdot z \cdot k_3}{n \cdot N \cdot \eta}, \quad (5.5)$$

де  $E$  – значення освітленості, що рекомендується, лк;

$z$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення ( $z = 1,15$  – для ламп розжарювання і ДРЛ;  $z = 1,1$  – для люмінесцентних ламп);

$k_3$  – коефіцієнт запасу лампи, що враховує забруднення і старіння лампи в процесі експлуатації;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку лампи, що враховує тип світильника, коефіцієнти відбиття стелі  $\rho_n$ , стін  $\rho_c$ , робочої поверхні  $\rho_{p,n}$  й індекс  $i$  приміщення;

$N$  – число світильників;

$n$  – число ламп у світильнику.

Виходячи з умови  $0,9 \cdot \Phi_{\Pi} < \Phi_{\lambda} < 1,2 \cdot \Phi_{\Pi}$  підібрати лампу зі світловим потоком  $\Phi_{\lambda}$  і потужністю  $W_{\lambda}$  (у практиці допускається відхилення світлового потоку  $\Phi_{\lambda}$  обраної лампи від розрахункового  $\Phi_{\Pi}$  до  $-10\%$  і  $+20\%$ , у протилежному випадку вибирають іншу схему розташування світильників).

Визначити сумарну потрібну потужність освітлювальної установки по виразу

$$W_{\Sigma} = W_{\lambda} \cdot N \cdot n. \quad (5.6)$$

Освітленість  $E$  дорівнює  $E = E_{\min} = 220$  лк.

Розраховуємо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею по виразу (5.3):

$$H_p = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0 = 2,5 \text{ м},$$

де  $H$  – висота приміщення,  $H = 3,5$  м;

$h_p$  – висота розташування робочої поверхні від рівня підлоги,  $h_p = 1$  м;

$h_c$  – відстань від стелі до світильника,  $h_c = 0$ ;

Розраховуємо індекс приміщення по виразу (5.4):

$$i = \frac{A \cdot B}{H_p (A + B)} = \frac{9 \cdot 5,5}{2,5 \cdot (9 + 5,5)} = 1,4,$$

де  $A$  – довжина приміщення,  $A = 9$  м;

$B$  – ширина приміщення,  $B = 5,5$  м;

$H_p$  – висота підвісу світильника над робочою поверхнею,  $H_p = 2,5$  м.

Визначити потрібний світловий потік лампи по виразу (5.5):

$$\hat{O}_i = \frac{100 \cdot \hat{A} \cdot \hat{A} \cdot \hat{A} \cdot z \cdot k_\epsilon}{n \cdot N \cdot \eta} = \frac{100 \cdot 220 \cdot 9 \cdot 5,5 \cdot 1,1 \cdot 1,5}{2 \cdot 6 \cdot 64} = 2340 \text{ лк},$$

де  $E$  – значення вимірної освітленості,  $E = 220 \text{ лк}$ ;

$z$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення,  $z = 1,1$  – для люмінесцентних ламп;

$k_3$  – коефіцієнт запасу лампи, що враховує забруднення і старіння лампи в процесі експлуатації  $k_3 = 1,5$  – для люмінесцентних ламп;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку лампи, що враховує тип КСС світильника (ЛПО02 тип Д), коефіцієнти відбиття стелі  $\rho_n = 70 \%$ , стін  $\rho_c = 50 \%$ , робочої поверхні  $\rho_{p,n} = 30 \%$  та індекс приміщення  $i = 1,4$ ,  $\eta = 64 \%$ .

$N$  – кількість світильників,  $N = 6 \text{ шт}$ ;

$n$  – кількість ламп у світильнику,  $n = 2$ .

Світловий потік лампи типу ЛД –  $\Phi_l = 2500 \text{ лм}$ , що практично збігається з розрахованим значенням світлового потоку, необхідного для освітлення даного приміщення  $\Phi_{\Pi} = 2340 \text{ лм}$ .

Визначаємо сумарну потужність освітлювальної установки по виразу (6):

$$W_{\Sigma} = W_l \cdot N \cdot n = 40 \cdot 6 \cdot 2 = 480 \text{ Вт} = 0,48 \text{ кВт},$$

де  $W_l$  – потужність лампи ЛД-40,  $W_l = 40 \text{ Вт}$ .

## ВИСНОВКИ

В рамках атестаційної роботи було вирішено такі задачі:

- проведено аналіз технологій 3D-сканування;
- розроблено та виготовлено діючий експериментальний зразок 3D-сканеру;
- проведено експериментальні дослідження на розробленому 3D-сканеру;
- проведено аналіз параметрів, що впливають на точність створених тривимірних моделей;
- розроблено математичну модель впливу параметрів вимірювання на точність створених тривимірних моделей та провести оптимізацію цих параметрів.

Діючий експериментальний зразок 3D-сканеру дає змогу проводити сканування об'єктів розмірами до 200x200x200мм. У якості системи отримання зображення обрано Kinect v2.

Проведено експериментальні дослідження для виявлення впливу технологічних параметрів 3D-сканування на точнісні параметри отриманих mesh моделей. Під точнісними параметрами мається на увазі відхилення розмірів і форм отсканованих моделей від еталонного об'єкту. Реверс інженерінг для оцінки відхилень розмірів проводився у CAD системі Fusion 360.

На основі отриманих експериментальних даних, трьохфакторного експерименту, розроблено математичну модель впливу параметрів сканування на точність отриманих моделей.

Згідно з отриманою моделлю найбільш значущим є параметр фокусної відстані, якій бажано максимізувати. Це викликано явищем перспективи, який

має найбільше значення при мінімальній відстані . Кількість кадрів та роздільна здатність мають значно менший вплив на точність отриманих моделей.

## ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ. 2019. 366 с.
2. Невлюдов, І.Ш. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти, спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка, освітньо-професійної програми «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки». / І.Ш. Невлюдов, Н.П. Демська, В.В. Євсєєв, Ю.М. Олександров, Р.В. Артюх, Є.А. Разумов-Фризюк, О.О Чала – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 51 с.
3. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
4. Положення про організацію проведення практики здобувачів вищої освіти Харківського національного університету радіоелектроніки. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 13 с.
5. Akbar Eslami. Integrating Reverse Engineering and 3D Printing for the Manufacturing Process / Dr. Akbar M. Eslami, Elizabeth City State University. ASEE Annual Conference & Exposition – 2017.
6. Gary Confalone. 3D Scanning: Metrology for Advanced Manufacturing / Gary Confalone, Brett Ellis, John Belding – Wiley, 2022. – 224 p.
7. Коротєєв Д.Р. V Міжнародна Конференція ВИРОБНИЦТВО & МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ 2021. Огляд і аналіз технологій 3D сканування. Фотограмметрія. / Д.Р. Коротєєв, Є.А. Разумов-Фризюк – Харків, 2021. – 121-124 с.

8. Коротєєв Д.Р. Збірник студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування» «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2020 (Випуск 2). Огляд і аналіз методів 3D сканування і 3D сканерів. – Харків, 2020. – 240-245 с.
9. Коротєєв Д.Р. Збірник студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування» «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2022 (Випуск 2). Огляд і аналіз методів 3D сканування. Аналіз методів реверс-інженерінгу. – Харків, 2022. – 15-19 с.
10. Mr. Aditya Gaykar. Design and Analysis of 3D Scanning System for Scanning an Object / Mr. Aditya Gaykar, Ms. Advyta Jujaray, Ms. Shalmali Mutalik, Ms. Prachi Waghmode // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) – 2020. – pp. 768-773.
11. Mostafa A-B. Ebrahim 3D laser scanners: history, applications, and future / Mostafa A-B // King Abdulaziz University – 2018. – 100 p.
12. Dirk Rieke-Zapp. Santiago Royo Structured Light 3D Scanning / Dirk Rieke-Zapp // Cambridge University Press – 2021. – pp. 247 – 252.
13. 3D Laser Scanning for Heritage. English Heritage – 2017. – 119 p.
14. Michael G. Uva. The Grip Book, Fourth Edition, Elsevier / Michael G. Uva – 2019. – Pages 297-309.
15. Bhandari, V.B. Design of Machine Elements, Tata McGraw Hill / Bhandari, V.B. // – 2018
16. AlaaAbd-Raheem. Design of an Automated 3D Scanner / AlaaAbd-Raheem, Farah AlDeiri, Musa Alyaman // International Arab Conference on Information Technology (ACIT), Werdanye, Lebanon – 2018.
17. Suchada Rianmora. Applying Scanning Techniques to Create 3D Model / Suchada Rianmora, Kittiphan Nuamchit, Natthakarn Vanasrivilai, Pornpim Tantipiched, Apisit Rammbuth // IECON2015-Yokohama. – 2019.

18. Yu-Cheng Lin. Error Analysis of a 3D Scanning System Digital / Yu-Cheng Lin, Mao-Jiun J. Wang // Human Modelling for Design and Engineering Symposium – 2021.
19. Романишин, І. Класифікація та основні характеристики наземних 3D-сканерів [Текст] / І. Романишин, А. Маліцький, В. Лозинський // Журн. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2019. – Т.6, №2. – С. 69-74.
20. Калібровка Kinect v2 за допомогою OpenCV на Python [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/ URL: http://news.shamcode.ru/blog/kalibrovka-kinect-v2-s-pomoschu-opencv-na-python-1/](http://news.shamcode.ru/blog/kalibrovka-kinect-v2-s-pomoschu-opencv-na-python-1/) - 16.01.22р. – Загол. з екрана.
21. Кроковий двигун Nema 17 (17HS4401S) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/ URL: https://u3df.com.ua/ua/p575673687-shagovyj-dvigatel-nema17.html](https://u3df.com.ua/ua/p575673687-shagovyj-dvigatel-nema17.html) - 02.12.22р. – Загол. з екрана.
22. Підшипник 8114 (51114) (шт) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/ URL: https://motor-agro.com/ru/podshipniki/6046-podshipnik-8114-51114sht.html](https://motor-agro.com/ru/podshipniki/6046-podshipnik-8114-51114sht.html) / - 02.12.22р. – Загол. з екрана.
23. Arduino Uno [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/ URL: https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno/](https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno/) - 02.12.22р. – Загол. з екрану.
24. Драйвер крокового двигуна DRV8825 [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www/ URL: https://uareprap.store/drv8825?search=drv/](https://uareprap.store/drv8825?search=drv/) - 02.12.22р. – Загол. з екрана.
25. Thomas Elser. Factorial Design: Understanding Design of Experiments (DoE) and Applying it in Practice 1st Edition [Текст] / Thomas Elser // Probability & Statistics – 2018.– 142 p.
26. Дослідження та розрахунок штучного освітлення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/ URL https://infopedia.su/7xb280.html](https://infopedia.su/7xb280.html) / - 02.12.22р. – Загол. з екрану.