

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

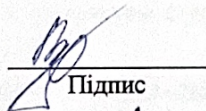
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка лазерного 3D сканера відкритого типу

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

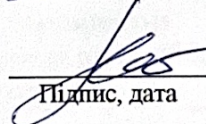
Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу групи РМ-21-1


Підпис

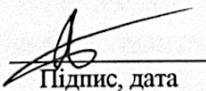
Карита В.А.
Ініціали, прізвище

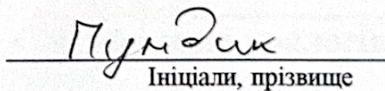
Керівник


Підпис, дата

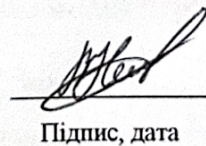
д.т.н., проф. Скиба М.Є.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата


Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 131 «Галузеве машинобудування»
Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2. 06 .2025

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Карита Володимир Андрійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка лазерного 3D-сканера відкритого типу**
керівник роботи **Скиба М.Є., д.т.н, професор**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики 3D-сканерів аналогів**

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

1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи

2 Розробка конструкції лазерного 3D сканера відкритого типу

3 Розрахунки що підтверджують працездатність 3D сканера

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Конструкції 3D сканерів. Док. оглядовий (A1). Аркуш 2. 3D сканер. Схема структурна (A1). Аркуш 3. 3D сканер. Схема електрична (A1). Аркуш 4. 3D сканер. Складальне креслення (A1). Аркуш 5. 3D сканер. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	20.05.25р.	
2 Розробка конструкції лазерного 3D сканера відкритого типу	01.06.25р.	
3 Розрахунки що підтверджують працездатність 3D сканера	07.06.25р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	15.06.25р.	

Студент

Підпис

Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Карита Володимир Андрійович**

2. Тема бакалаврської роботи **Розробка лазерного 3D-сканера відкритого типу**

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 73

5. У сучасних умовах впровадження цифрових технологій у виробництво, 3D-сканування стає ключовим інструментом реалізації концепції масової кастомізації. Його використання дозволяє підвищити продуктивність, знизити витрати і підвищити якість продукції. Таким чином, 3D-сканери стають важливим елементом інноваційної інфраструктури навчальних лабораторій, сфери побуту, виробничих підприємств тощо. Тому тема бакалаврської роботи є актуальною. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи. В другому розділі здійснено розробку конструкції лазерного 3D сканера відкритого типу. В третьому розділі виконано розрахунки що підтверджують працездатність 3D сканера.

Підпис студента _____

" 2 " 06 2025 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від "18" 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 4,5/В

Рекомендації ЕК впровадження в навчальний процес та у виробництво

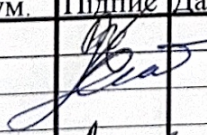
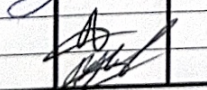

Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

" 18 " 06 2025 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	8
1.1 Загальні відомості про 3D сканер	8
1.2 Сучасний стан розробки лазерних сканерів	9
1.3 Огляд програмного забезпечення для обробки даних	12
1.4 Сфери використання лазерного сканування	13
1.5 Принцип дії 3D сканера	16
1.6 Приклади використання та різновиди 3D сканерів	17
1.7 Висновки до першого розділу	31
2 Розробка конструкції лазерного 3D сканера відкритого типу	32
2.1 Вибір способу сканування	32
2.2 Розробка структурної схеми 3D сканера	34
2.3 Підбір компонентів 3D сканера	36
2.4 Розробка електричної схеми 3D сканера	46
2.5 Розробка корпусних частин пристрою	48
2.6 Програмне забезпечення 3D сканера	50
2.7 Опис розробленого 3D сканера	55
2.8 Висновки до другого розділу	57
3 Розрахунки що підтверджують працездатність 3D сканера	59
3.1 Сканування предмета	59
3.2 Отримання геометричних координат точок у просторі	65

БРМА25.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	Нодокум.	Підпис	Дата	
Виконав		Карита			Розробка лазерного 3D сканера відкритого типу
Перевір.		Скиба			
Н.контр.					Літера
Затвер.		Неймак			Арквш
					Арквщів
					4
					73
					ХНУ гр.РМ-21-1

3.3 Висновки до третього розділу	67
Висновки	69
Перелік джерел посилання	71
Додаток А	

ВСТУП

3D-сканування - це високоточна технологія просторового вимірювання, яка полягає у безконтактному зчитуванні координат точок, що формують поверхню фізичного об'єкта, з метою створення його цифрової тривимірної моделі. Отримані дані обробляються в CAD/CAM-системах, де вони можуть бути використані для моделювання, редагування, виготовлення або цифрового аналізу об'єкта. Сучасні 3D-сканери забезпечують надзвичайно високу точність, швидкість і достовірність результатів, дозволяючи точно відтворити навіть найдрібніші деталі форми, структури поверхні або текстури матеріалу [1].

Технологія 3D-сканування вже знайшла широке застосування в таких сферах, як машинобудування, медицина, архітектура, кіноіндустрія, реставрація культурної спадщини, освіта та наукові дослідження. Проте особливу актуальність вона набуває саме в легкій промисловості, де точність, персоналізація та цифрова трансформація процесів мають вирішальне значення.

У легкій промисловості 3D-сканування використовується насамперед для цифрового зняття мірок з людини або предметів гардеробу [2]. Це дозволяє створювати повністю персоналізовані вироби - як для повсякденного вжитку, так і для спеціального призначення. Йдеться про спецодяг, медичні ортопедичні вироби, спортивну форму або модельні речі преміум-класу. За допомогою тривимірного сканера фіксується вся геометрія тіла людини, включаючи рельєфні ділянки, що суттєво підвищує якість посадки одягу.

Ще однією важливою сферою застосування є автоматизоване проєктування лекал. Отриману 3D-модель можна імпортувати у програмне забезпечення для конструювання одягу, де відбувається автоматичне генерування викрійок. Це прискорює процес розробки виробу, дозволяє уникнути помилок на етапі проєктування та оптимізує витрати матеріалу.

Також 3D-сканування відіграє важливу роль у контролі якості готової

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

продукції [3]. Після виготовлення взуття, одягу чи аксесуарів, їх можна зіставити з цифровими еталонами, щоб переконатися у відповідності розмірів, симетрії та конструкційних параметрів. Це особливо важливо в умовах автоматизованих виробництв і при виготовленні високоточних технічних текстильних виробів.

У музейній практиці та реставраційних майстернях 3D-сканери дозволяють фіксувати форму та орнаментику історичних тканин і швейних виробів [4]. Отримані моделі застосовуються як для створення копій, так і для аналізу структури плетіння, кольорових переходів, розташування вишивки тощо.

Крім того, тривимірне сканування знаходить своє застосування у створенні цифрових каталогів і віртуальних примірочних. За його допомогою можна не лише візуалізувати виріб, а й накласти його на 3D-аватар покупця, що істотно покращує досвід онлайн-шопінгу та знижує кількість повернень товарів.

Перевагами використання 3D-сканування є його безконтактність, висока швидкість, точність, зручність, можливість сканування рухомих і делікатних об'єктів, а також точна передача текстури і кольору. Завдяки цьому технологія дає змогу ефективно працювати з широким спектром матеріалів: від тонких шовкових тканин до жорстких армованих текстилів.

У сучасних умовах впровадження цифрових технологій у виробництво, 3D-сканування стає ключовим інструментом реалізації концепції масової кастомізації. Його використання дозволяє не тільки підвищити продуктивність, знизити витрати і підвищити якість, а й створити умови для індивідуального підходу до кожного клієнта без втрати ефективності серійного виробництва. Таким чином, 3D-сканери стають важливим елементом інноваційної інфраструктури навчальних лабораторій, сфери побуту, виробничих підприємств тощо.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Загальні відомості про 3D сканер

D-сканер - це пристрій для створення цифрової тривимірної моделі реального об'єкта з точним відтворенням його форми, розмірів і текстури (рис. 1.1). Отримані дані використовуються в CAD/CAM системах, 3D-візуалізації, інженерному аналізі та адитивному виробництві.



Рисунок 1.1- 3D сканер

Більшість сучасних 3D-сканерів працює за принципом стереозору, аналогічно до людського біноклярного зору: дві камери фіксують об'єкт з різних кутів, а програмне забезпечення визначає координати точок у просторі. Для підвищення точності застосовують активне освітлення - структуроване світло або лазерний промінь. Отримані дані обробляються у вигляді хмари точок або полігональної сітки, яку можна редагувати, об'єднувати та готувати до друку чи аналізу. Завдяки простоті й точності, 3D-сканери широко використовуються в інженерії, виробництві, дизайні, медицині та легкій промисловості [4].

1.2 Сучасний стан розробки лазерних сканерів

У сучасних умовах виробництвом 3D-сканерів займаються провідні компанії геодезичного приладобудування, зокрема Artex Group, Z Corporation, Roland та інші.

Artex Group є одним з лідерів у сфері тривимірного сканування, впроваджуючи інноваційну технологію структурованого підсвічування [5]. Її суть полягає у проектуванні спеціальної решітки на об'єкт під паралаксом кутом, що дозволяє фіксувати геометричні спотворення та розраховувати точне положення точок у просторі за принципом триангуляції. У результаті формується полігональна поверхня 3D-моделі. Унікальністю технології є можливість відновлення тривимірних об'єктів у режимі реального часу без використання маркерів. Сканери Artex Group забезпечують високу точність, швидкість та адаптивність до мобільних і ручних систем.

Z Corporation пропонує сканери, орієнтовані на зручність та інтуїтивне використання. Їхні пристрої не вимагають складної інсталяції чи спеціальних навичок [6]. Сканування здійснюється у реальному часі, що дозволяє контролювати процес і коригувати його без затримок. Дані експортуються безпосередньо у формат STL, готовому для подальшого використання у CAD-середовищах. Ручний Z-Scanner вирізняється мобільністю та можливістю сканувати у складних умовах, включно з важкодоступними поверхнями або під час руху об'єкта, що забезпечує повноцінну і точну цифрову реконструкцію в динаміці (рис.1.2).

Ці системи активно використовуються в інженерії, архітектурі, дизайні, цифровій реставрації та освіті, завдяки поєднанню точності, простоти та функціональної гнучкості.



Рисунок 1.2 – Процес сканування

Сканер Z-Scanner не потребує зовнішніх трекерів чи маркерів, працює з об'єктами будь-якого розміру та кольору, ефективно обробляє різні матеріали - від пластику до блискучих і прозорих поверхонь (рис.1.3). Це дозволяє уникнути узгодження сканів, заощаджуючи час і підвищуючи точність. У порівнянні з традиційними сканерами пристрій має доступну ціну та зручність сканування з будь-якого ракурсу. Завдяки компактності все обладнання поміщається у кейс, що робить сканер мобільним і придатним для роботи як у приміщенні, так і в польових умовах.



Рисунок 1.3 - Ручні сканери Z-Scanner

3D-сканери Z-Corporation вирізняються високою швидкістю обробки

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
10

даних у режимі реального часу, що усуває потребу в повторному аналізі або узгодженні частин моделі. Результати можна одразу зберігати у форматі STL, що суттєво пришвидшує інженерні й виробничі процеси. Завдяки алгоритмам оптимізації поверхні точність сканування підвищується з часом: чим довше сканується зона, тим детальніша модель. Компанія пропонує моделі з різною точністю: Z-Scanner 600 і 700 - до 100×250×250 мкм, а Z-Scanner 800 - до 50×50×50 мкм, що забезпечує високу деталізацію для інженерії, реставрації, медицини й ювелірного виробництва (рис.1.4).



Рисунок 1.4 – Процес сканування сканером Z-Scanner 600

3D-сканери Z-Corporation поєднують високу швидкість сканування з простотою використання: підключення до ПК через FireWire, базова калібровка та наклеювання маркерів займають кілька хвилин. Програмне забезпечення дозволяє в реальному часі контролювати якість моделі, змінювати роздільну здатність сітки під час сканування, що зручно для задач реставрації, медицини та промисловості.

Z-Scanner 600 - доступна модель для освіти та прототипування. Z-Scanner 700 - повністю портативний, зручно підключається до ПК і підходить для виробничих потреб. Модифікація 700 SX додає сканування кольору для

культурної спадщини та візуалізації. Модель 700 PX використовує фотограмметрію для підвищеної точності при скануванні великих об'єктів. Z-Scanner 800 - флагман з підвищеною роздільною здатністю, придатний для контролю якості, реверс-інжинірингу та точного моделювання.

Сканери Roland (серії MDX-20/15) поєднують функції 3D-сканування та фрезерування, сумісні з CAD-системами, застосовуються в ювелірній справі, макетуванні та швидкому прототипуванні, скорочуючи терміни розробки та мінімізуючи витрати [8].

Загалом 3D-сканери поділяються на контактні та безконтактні. Контактні забезпечують високу точність через фізичний дотик, але не підходять для крихких об'єктів. Безконтактні зчитують геометрію на відстані, діляться на активні (використовують лазер, структуроване світло, тощо) та пасивні (працюють із природним освітленням). Результати сканування легко інтегруються в CAD/CAM/CAE-системи й можуть використовуватися для 3D-друку або ЧПК-обробки.

1.3 Огляд програмного забезпечення для обробки даних

Програмне забезпечення є критично важливим компонентом у технології високоточного цифрового сканування (HDS), оскільки забезпечує керування сканером, обробку хмар точок і побудову точних 3D-моделей. Від його функціональності залежить точність, швидкість і якість цифрової реконструкції. Сучасні програми підтримують автоматичне фільтрування шумів, створення сіток, вимірювання площ і об'ємів, моделювання поверхонь та експорт у формати CAD/CAM/CAE [4].

Для ефективної роботи з великими обсягами тривимірних даних програмному забезпеченню потрібне відповідне апаратне забезпечення. У таблиці 1.1 подано мінімальні параметри робочих комп'ютерів,

науці, техніці та культурі, забезпечуючи точне цифрове відтворення фізичних об'єктів для подальшого аналізу, моделювання та виробництва. Незалежно від моделі, головним завданням 3D-сканера залишається створення геометрично точної цифрової копії об'єкта.

У галузі інженерного аналізу 3D-сканування дозволяє швидко інтегрувати моделі в CAD-системи, виконувати симуляції, перевірки та оптимізацію виробів, що скорочує терміни розробки і знижує ризик помилок. Технологія також незамінна для копіювання мистецьких виробів або елементів архітектурної спадщини.

У сфері контролю якості 3D-сканери дають змогу порівнювати фактичну геометрію виробів із проєктною документацією, виявляти дефекти й відхилення ще до завершення виробництва, що значно підвищує точність і надійність кінцевої продукції (рис. 1.5) [10].



Рисунок 1.5 - Цифровий аналіз об'єкта 3D сканером

Цифрова архівація є важливим напрямом застосування 3D-сканерів. Вони дозволяють створювати тривимірні моделі старих деталей без цифрової документації, замінюючи застарілі 2D-креслення сучасними 3D-форматами. Це спрощує модернізацію, розробку та зберігання виробів.

Використання 3D-сканерів оптимізує виробничі процеси: скорочує час,

знижує витрати на документацію та забезпечує компактне електронне зберігання даних.

Особливо ефективними такі сканери є для фіксації складних архітектурних об'єктів - скульптур, фасадів, колон - що дозволяє створювати точні копії для реставрації або реконструкції (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 - Сканування архітектури

3D-сканування широко застосовується в дизайні для фіксації форми об'єктів з подальшою цифровою обробкою. У музейній справі та археології воно дозволяє зберігати артефакти в цифровому вигляді, використовувати їх у віртуальних виставках, реставрації чи 3D-друці.

У медицині технологія забезпечує виготовлення персоналізованих протезів, ортопедичних виробів та моделей для планування операцій і навчання, особливо в ортодонтії.

У цифрових розвагах, VR/AR та геймдизайні 3D-сканери застосовуються для створення контенту на основі реальних об'єктів (рис. 1.7).

У реверсивному інжинірингу вони забезпечують точне відтворення геометрії виробів для подальшого аналізу, модифікації чи виробництва.

Сканування людини з отриманням кольорової 3D-моделі активно використовується у кіно, ігровій анімації, VR/AR для створення реалістичних персонажів і сцен.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



Рисунок 1.7 - Сканування моделей іграшок

У промисловості 3D-сканери забезпечують точний контроль геометрії складних деталей, оцінку зношування, відповідність кресленням і оптимізацію виробничих процесів. Це дозволяє скоротити час проєктування та цикл виготовлення нових виробів.

Сьогодні 3D-сканери стали доступними не лише для великих компаній, а й для малого бізнесу, дизайнерів та лабораторій. Вибір пристрою залежить від технології, точності, швидкості та рівня автоматизації, що дозволяє адаптувати рішення до конкретних потреб.

1.5 Принцип дії 3D сканера

Принцип дії 3D-сканера полягає у визначенні просторових координат точок на поверхні об'єкта за допомогою лазерного променя, що відбивається і фіксується датчиком. Вимірюються відстань, горизонтальний і вертикальний кути, що дозволяє обчислити координати XYZ кожної точки. Результатом є хмара точок - цифрове представлення об'єкта, яке використовується для створення 3D-моделей, креслень і подальшого аналізу. Технологія широко застосовується у будівництві, промисловості, архітектурі та реставрації завдяки точності та швидкості сканування (рис. 1.8) [11].

Популярність лазерного сканування зростає завдяки високій точності,

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

швидкості вимірювань та зручній інтеграції з CAD/GIS-системами. Метод дозволяє отримати повну просторову інформацію про об'єкт без повторного виїзду на місце, а зібрані дані можна багаторазово використовувати в різних проєктах. Уже на початкових етапах сканування забезпечує візуально наочні та точні результати, що сприяє своєчасному виявленню відхилень і підвищенню ефективності робіт.



Рисунок 1.8 - Лазерні сканери Z-F IMAGER

1.6 Приклади використання та різновиди 3D-сканерів

1.6.1 Застосування лазерного сканування в різних сферах

Сучасні технології 3D-сканування застосовуються на всіх етапах проєктування, будівництва, виробництва й реконструкції. Вони забезпечують швидке і точне вимірювання геометрії об'єктів, виявлення відхилень, моніторинг стану конструкцій, створення технічної документації, а також розрахунок об'ємів і площ. Сканери використовують для безпечного дистанційного контролю в складних умовах.

Ці пристрої ефективно працюють у машинобудуванні, медицині, реставрації, ювелірному виробництві, архівації та дизайні. Вони дозволяють

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

автоматизувати процеси, зменшити ручну працю та підвищити точність. Сканери поділяються на ручні й стаціонарні, з можливістю роботи з об'єктами різних розмірів і складності. Точність коливається від десятків до сотень мікрометрів, а результатом сканування є "хмара точок" — цифрове зображення об'єкта з точними координатами.

Такі дані застосовуються в CAD/CAM/CAE-системах для аналізу, редизайну або виготовлення копій за допомогою 3D-принтерів чи верстатів ЧПК. Особливо цінним є зворотне інжиніринг — створення цифрової моделі об'єкта без креслень. Для задоволення різних вимог існують різні типи сканерів, класифіковані за технічними та функціональними ознаками (рис. 1.9). У наступних підрозділах буде детальніше розглянуто їх особливості.



Рисунок 1.9 - Класифікація 3D сканерів [12]

1.6.2 Наземні 3D-сканери

Одним із зручних критеріїв класифікації лазерних 3D-сканерів є спосіб їх розміщення або транспортування під час зчитування даних. За цим принципом прилади поділяють на авіаційні, мобільні (транспортні) та наземні. Цей підхід

враховує як умови експлуатації, так і технології сканування та позиціонування [12].

Авіаційні сканери встановлюються на літаках, вертольотах або дронах і охоплюють великі території з висоти 500–1500 м. Вони потребують інтегрованої навігаційної системи, що враховує положення й швидкість апарата. Такі системи ефективні для топозйомки, моніторингу ландшафту та картографування.

Автомобільні сканери монтуються на транспортні засоби та здійснюють сканування в русі. Завдяки поєднанню GPS та інерціальних датчиків вони забезпечують високу точність при охопленні великих обсягів даних, зберігаючи переваги як авіаційних, так і наземних систем.

Наземні сканери використовуються для високоточних вимірювань на малих відстанях. Їх класифікують:

- за способом розміщення - стаціонарні або портативні;
- за станом об'єкта - нерухомий або в русі;
- за типом технології - лазерне сканування, структуроване світло, фотограмметрія тощо.

Стаціонарні сканери (наприклад, КВМ або ЧПК) забезпечують найвищу точність у фіксованих умовах. Портативні сканери зручні для польових умов і роботи з об'єктами складної форми. Вибір типу приладу визначає точність, гнучкість і область застосування системи.

Класифікація наземних сканерів за способом встановлення наведена на рис. 1.10.

Серед стаціонарних координатно-вимірювальних машин (КВМ), які застосовуються як 3D-сканери, виділяють чотири основні типи, що відрізняються за схемою переміщення вимірювальної головки:

- горизонтальні КВМ - мають горизонтальну напрямну, зручні для сканування довгих або осьових деталей (вали, труби);

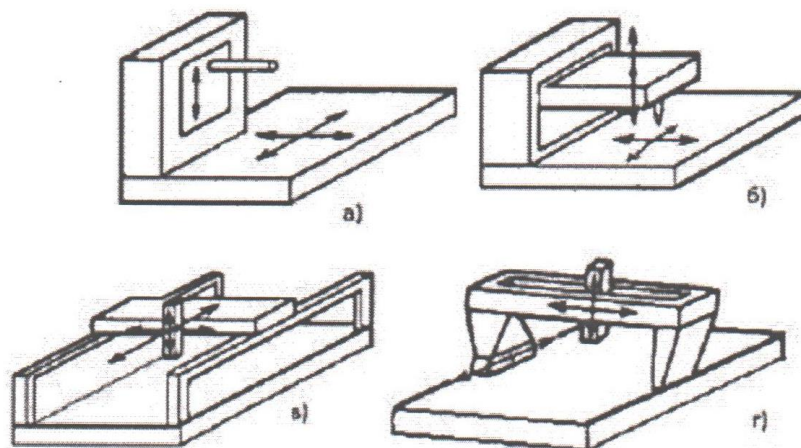
- вертикальні КВМ - з вертикальною віссю переміщення, оптимальні для деталей середнього розміру;
- мостові КВМ - універсальні системи з високою точністю, що використовуються для сканування великих і важких об'єктів;
- порталні КВМ - забезпечують роботу з великими об'єктами безпосередньо на підлозі, типові для авіаційної та автомобільної промисловості [12].



Рисунок 1.10 - Класифікація наземних 3D сканерів за способом встановлення сканера [12]

Схеми цих типів показано на рис. 1.11. Вибір конфігурації залежить від розмірів, точності та умов експлуатації [12].

Горизонтальні та вертикальні КВМ переважно застосовуються для сканування об'єктів малого й середнього розміру, тоді як мостові та порталні системи — для великогабаритних конструкцій. Спільною рисою стаціонарних моделей є необхідність транспортування об'єкта до місця встановлення сканера, що не завжди зручно в умовах виробництва чи при роботі з нерухомими об'єктами культурної спадщини.



а - горизонтальної; б - вертикальної; в - мостової; г -- порталної

Рисунок 1.11 - Схеми роботи КВМ:

Альтернативою є портативні 3D-сканери, зокрема ручні пристрої (рис.1.12) [13] та координатно-вимірювальні машини типу «рука», як-от FARO Edge (рис.1.13) [14]. У таких системах координати вимірюються відносно положення сегментів конструкції, що дозволяє сканувати в обмеженому просторі та з об'єктами складної форми.

FARO Edge забезпечує робочий діапазон до 3,7 м із точністю до 0,34 мм, що робить його ефективним для технічного контролю, реверсивного інжинірингу й цифрового виробництва [14].



Рисунок 1.12 - Ручний лазерний сканер Creaform RaptorX [13]

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
21

На рисунку 1.14 представлено класифікацію наземних 3D-сканерів за способом розміщення об'єкта під час сканування. Такий поділ дозволяє враховувати розміри об'єктів та умови вимірювання.



Рисунок 1.13 – Координатно-вимірювальна рука FARO Edge

Для сканування дрібних об'єктів (до 10 см) використовуються високоточні настільні сканери, як-от Delcam iMetric з точністю до 0,02 мм, що активно застосовується в стоматології, ортодонції та ювелірній справі.

Частково закриті сканери, наприклад від «Дизель-тест-комплект», дозволяють сканувати деталі до 800×350×350 мм із точністю 0,01 мм, що особливо актуально для машинобудування та автомобільної промисловості.

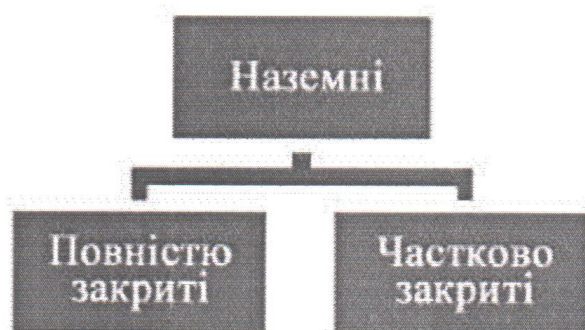


Рисунок 1.14 - Класифікація наземних 3D сканерів за способом встановлення досліджуваного об'єкта

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Також поширені портативні сканери на штативах, які поєднують мобільність і високу точність, зручні як у лабораторії, так і в польових умовах (рис. 1.15) [15].



Рисунок 1.15 – Високоточний портативний сканер на штативі
Revopoint Mini Standard Edition

Запропонована класифікація 3D-сканерів базується на аналізі їхньої конструкції та мобільності. Проте для повного поділу важливо враховувати також метод збору просторової інформації, оскільки саме він визначає точність і сферу застосування пристрою.

Доцільно розрізняти два поняття: "сканування" — процес із активним джерелом випромінювання (лазер, структуроване світло), та "оцифрування" — фіксація наявного випромінювання без його генерації. Ця відмінність є ключовою при визначенні типу пристрою та його функціональних можливостей [12].

1.6.3 Контактні і безконтактні 3D сканери

Залежно від характеру взаємодії з об'єктом, усі 3D-сканери поділяються на контактні та безконтактні (рис.1.16) [12].

обробці зображень, отриманих цифровими фотокамерами, що робить цей метод менш енерговитратним, але залежним від умов освітлення.



Рисунок 1.17 – Контактний 3D-сканер Renishaw SP25M у процесі оцифрування [16]

Основні підходи:

- стереоскопічне сканування - імітація біноклярного зору з двома камерами для обчислення глибини;
- фотограмметрія - побудова хмари точок з серії знімків під різними кутами;
- сканування за контуром силуету - виділення форми на контрастному фоні [12].

Пасивні методи актуальні в анімації, біометрії, медицині та культурній спадщині. Точність моделі залежить від роздільної здатності камери, оптики й алгоритмів обробки. У деяких пристроях фотограмметрія поєднується з лазерними технологіями. Наприклад, MAXscan забезпечує точність до 50 мкм при роздільній здатності 0,1 мм, поєднуючи обидві технології.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
25



Рисунок 1.19 - Комп'ютерний томограф Somatom Definition Flash

Окрему категорію становлять пристрої, що працюють за принципом коноскопічної голографії. Їхня особливість - повернення лазерного променя по ідентичній траєкторії після відбиття, що дозволяє точно сканувати складні ділянки, зокрема вузькі отвори, заломи, западини та кути. Це відкриває нові можливості для аналізу геометрично складних об'єктів (рис. 1.20) [4, 12].



Рисунок 1.20 - Сканер коноскопічної голографії (NobelProsega)

Сканер на основі коноскопічної голографії виробництва NobelProsega дозволяє з високою точністю сканувати складні ділянки об'єктів — отвори, заломи та западини.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

27

Принцип дії проєкційних 3D-сканерів полягає в проєкції структурованого світла (смуг, решіток тощо) на поверхню об'єкта. Деформації візерунка, зумовлені рельєфом, фіксуються камерами, а обчислювальні алгоритми формують просторову модель.

Цей оптичний метод часто базується на лазерних або галогенових джерелах світла і реалізується через проєктори чи перехресні промені. Сучасним удосконаленням стало застосування структурованого синього світла, що дозволяє досягти роздільної здатності 0,01–0,61 мм та точності до 0,5 мм (рис. 1.21) [12].

Технологія ефективна для сканування складних форм, глянцевих матеріалів і в умовах нестабільного освітлення.



Рисунок 1.21 – Оптичний сканер ATOS Triple Scan [18]

Оптичні 3D-сканери з білим світлом, зокрема з галогеновими лампами, безпечні для зору, тому активно застосовуються для сканування людей [12]. Наприклад, Breuckmann faceSCAN-III забезпечує точність до 0,2 мм при щільності 0,43 мм між точками, що дозволяє створювати детальні анатомічні моделі для медицини, косметології та біометрії.

Такі пристрої належать до сканерів, що працюють у видимому спектрі, однак сучасні технології дозволяють використовувати невидимі діапазони:

- ISL – високочастотне структуроване освітлення;
- IRSL – інфрачервоне світло для роботи в темряві або з біологічними

об'єктами;

- FSL – оптичні фільтри для відсіювання шумів.

Окремо виділяють лазерні 3D-сканери, які використовують когерентне випромінювання й реалізують:

- імпульсний метод (ToF) – вимір часу проходження променя;

- фазовий метод – вимір зсуву фази безперервного сигналу;

- триангуляцію – визначення координат за геометрією променя та зображення.

Імпульсні й фазові методи забезпечують точне сканування на великих відстанях і застосовуються в геодезії, архітектурі та топографії.

Принцип триангуляційного методу ілюструє рисунок 1.22 [4].

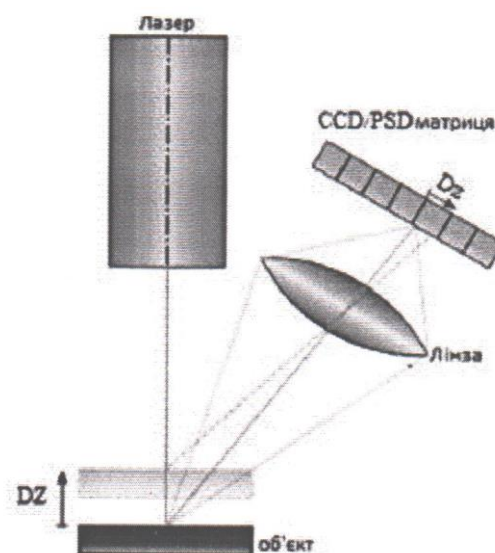


Рисунок 1.22 – Схема визначення відстані за триангуляційним методом

Принцип триангуляційного методу полягає в побудові трикутника між джерелом лазерного випромінювання, точкою на поверхні об'єкта та сенсором (CCD або PSD). Після відбиття променя світлова пляма фокусується на матриці, і її зсув дозволяє визначити відстань до об'єкта.

Метод забезпечує високу точність, але обмежений за дальністю через

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

зниження якості відбитого сигналу. Тому триангуляційні сканери зазвичай застосовуються для ближнього сканування дрібних або деталізованих об'єктів.

Розподіл лазерних сканерів за дальністю дії:

- до 1,5 м – для точного близького сканування;
- 1,5–150 м – для технічного моніторингу будівель та фасадів;
- понад 150 м – для геодезії, картографування та великих об'єктів.

1.6.4 Контактний тривимірний віртуальний сканер

Серед доступних контактних 3D-сканерів варто виділити серію MicroScribe компанії Immersion, відому своїми технологіями зворотного тактильного зв'язку. Сканери цієї серії належать до механічних контактних пристроїв: багатоланковий маніпулятор («рука») зчитує координати точок, до яких торкається стилус. Положення кожного сегмента фіксується з високою точністю, а координати передаються до програмного забезпечення для формування 3D-моделі [12].

Сканери MicroScribe використовують у ювелірній справі, археології, освітніх цілях, а також для оцифрування дрібних об'єктів. Робота з пристроєм вимагає фіксації об'єкта та сканера для мінімізації похибок. Дані обробляються у 3D Studio MAX, Rhino, SolidWorks тощо. Часто наносять розмітку на об'єкт для полегшення структурування моделі.

Серія MicroScribe G2 включає чотири моделі з інтерфейсами RS-232 або USB 1.1 [19]. Моделі «X» мають точність до $\pm 0,3$ мм, а «L» – розширену робочу зону до 1,67 м. Доступні й вживані пристрої, що робить їх привабливими для малого бізнесу та освіти.

1.7 Висновки до першого розділу

У результаті проведеного аналізу типів, принципів дії та класифікацій 3D-сканерів, для реалізації моделі пристрою, що буде застосовуватись у навчальному процесі, доцільно обрано безконтактний активний наземний портативний лазерний сканер, оснащений поворотним столом. Така конструкція забезпечує поєднання зручності у використанні, достатньої точності вимірювання, мобільності та функціональності, що є критично важливими для освітніх і демонстраційних цілей.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ЛАЗЕРНОГО 3D СКАНЕРА ВІДКРИТОГО ТИПУ

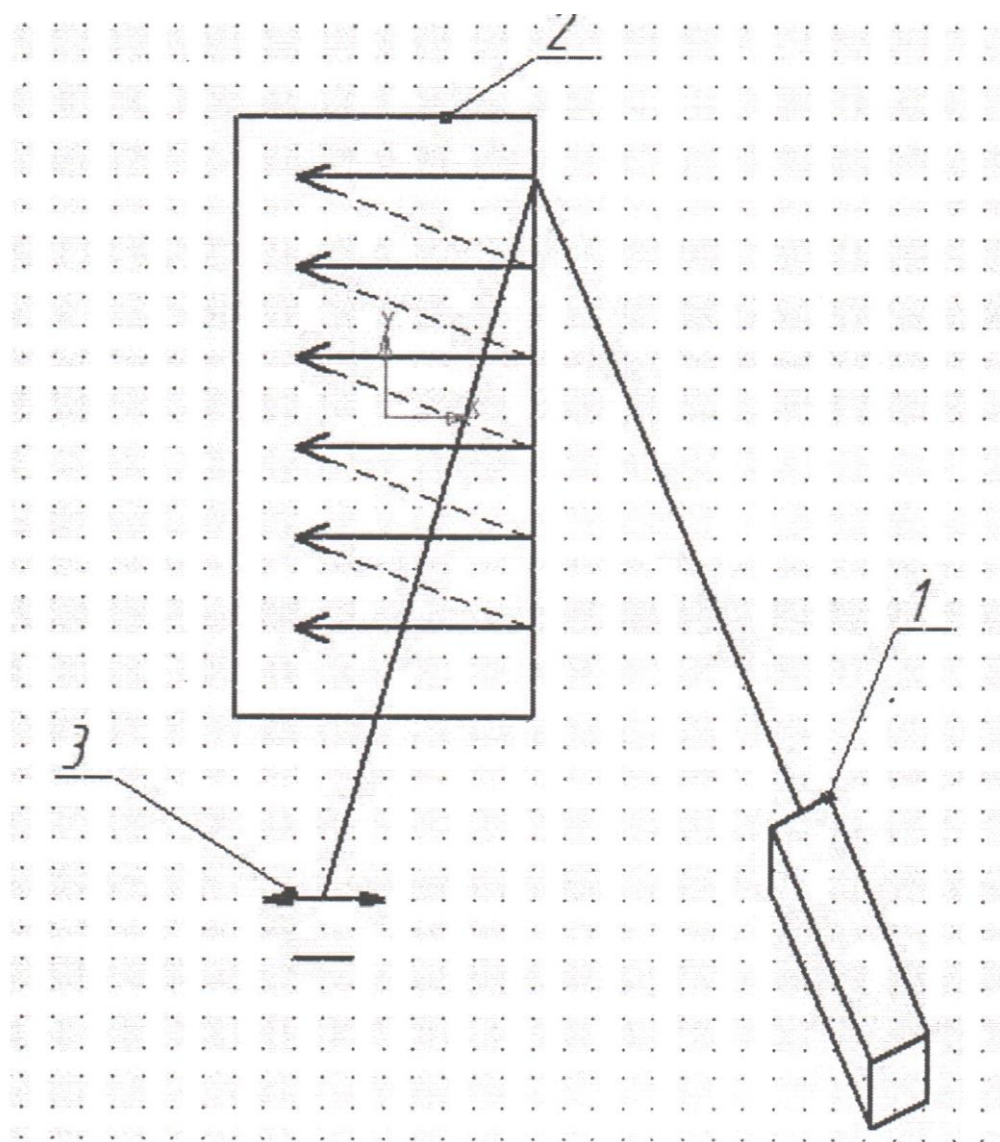
2.1 Вибір способу сканування

Для розробки навчального зразка 3D-сканера було обрано один із найбільш поширених та технічно доступних методів оптичного цифрового сканування - метод сканування точковим лазерним променем. Цей підхід базується на принципі оптичної тріангуляції та широко використовується у бюджетних системах, орієнтованих на освітнє, хобійне або лабораторне застосування. Його основними перевагами є конструктивна простота, мінімальна кількість оптоелектронних компонентів та прийнятна точність у межах вимог до побутових і навчальних приладів [4].

Принцип дії методу полягає в поетапному переміщенні вузького лазерного променя по контрольованій поверхні об'єкта, в результаті чого на ній формується світлова лінія або окрема світлова пляма. Відбитий від поверхні променевий сигнал реєструється приймальним оптичним модулем - зокрема, звичайною веб-камерою, яка встановлюється під заздалегідь визначеним кутом до осі випромінювання. Така конфігурація дозволяє фіксувати зсув світлової плями на зображенні при зміні просторового положення об'єкта, що забезпечує можливість обчислення його координат за методом геометричної тріангуляції. Отже, система визначає положення кожної точки на основі аналізу кута спостереження та відстані до джерела випромінювання, що дозволяє поступово формувати цифрову 3D-модель сканованого об'єкта (рис. 2.1) [4].

Процес оцифрування полягає в послідовному аналізі серії зображень, кожне з яких відповідає окремій позиції променя відносно поверхні об'єкта. Для досягнення заданої просторової роздільної здатності, наприклад,

1000×1000 точок, система повинна опрацювати орієнтовно 10^6 кадрів, які сукупно покривають всю скановану площу. Це вимагає високої точності синхронізації між рухомим елементом, що керує положенням лазера, і модулем фіксації зображення, а також ефективної обробки відеопотоку в режимі реального часу або посткадрового аналізу [4].



1 – лазерний модуль; 2 – об'єкт сканування; 3 – веб-камера як приймач зображення

Рисунок 2.1 – Схема сканування об'єкта точковим лазерним променем:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Таким чином, метод точкового лазерного сканування дозволяє отримати просторову карту об'єкта з достатнім рівнем деталізації, використовуючи відносно просту й недорогу апаратну базу, що робить його особливо придатним для реалізації в умовах навчального середовища, лабораторних занять або дослідницької практики в галузі технічної інформатики та оптоелектроніки.

2.2 Розробка структурної схеми 3D сканера

На рисунку 2.2 (аркуш [БРМА 23.00.00.000 Е1]) зображено структурну схему розробленої системи 3D-сканування, яка включає основні функціональні елементи пристрою, їх зв'язки та інформаційні потоки між компонентами. Система побудована за принципом модульності та реалізує оптико-механічний метод сканування з цифровим управлінням.

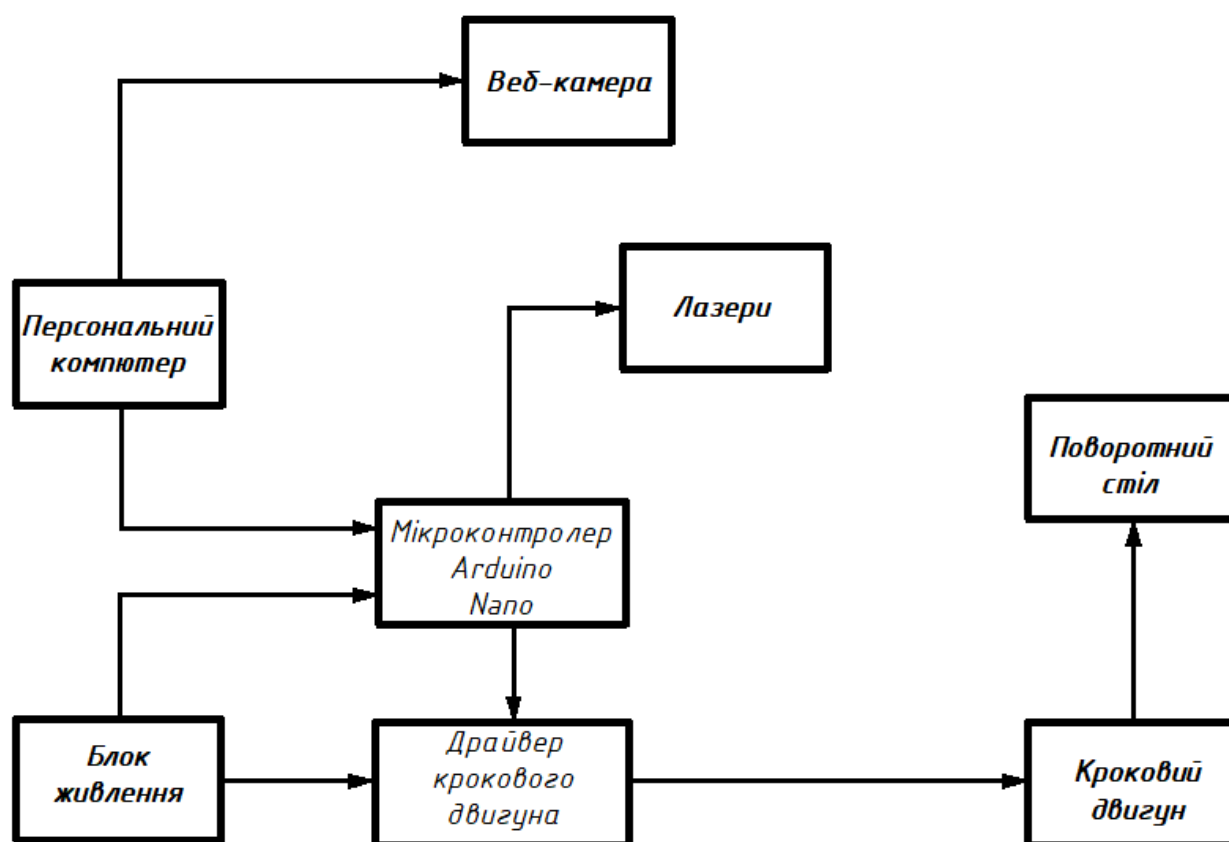


Рисунок 2.2 – Структурна схема 3D сканера

Персональний комп'ютер виступає центральною керуючою ланкою. Він ініціює запуск сканування, передає керуючі сигнали на мікроконтролер Arduino Nano, приймає відеоінформацію з веб-камери та виконує обробку отриманих зображень для побудови тривимірної цифрової моделі об'єкта.

Веб-камера, підключена до ПК, виконує захоплення зображення з відбитком лазерного променя, що проєктується на об'єкт сканування. Для підвищення точності фіксації координат лазерної лінії обрано камеру з достатньою роздільною здатністю та низьким рівнем шумів.

Мікроконтролер Arduino Nano слугує інтерфейсом між програмною частиною системи (ПК) та апаратними виконавчими пристроями (лазери, двигун). Він забезпечує формування сигналів керування для:

- лазерів (перемикання режимів горизонтальної/вертикальної розгортки);
- драйвера крокового двигуна, який, у свою чергу, керує кроковим двигуном, що обертає поворотний стіл з об'єктом сканування.

Блок живлення подає стабілізовану напругу до Arduino, драйвера та двигуна. Передбачено використання одного загального джерела для спрощення конструкції і зменшення ваги та габаритів системи.

Керування лазерами реалізовано через цифрові виходи Arduino, що дозволяє перемикати режим сканування та узгоджено працювати з процесом захоплення кадрів камерою. Сигнали на драйвер формуються відповідно до встановленого алгоритму переміщення: кількість кроків, пауза між кроками, напрям обертання.

Таким чином, система забезпечує узгоджену роботу всіх елементів 3D-сканера: від генерації лазерного променя до збору зображень і обертання об'єкта, що дозволяє отримати просторові координати точок поверхні і сформувати 3D-модель.

2.3 Підбір компонентів 3D сканера

Для забезпечення повноцінного функціонування навчального зразка 3D-сканера необхідно ретельно підібрати основні елементи системи, кожен з яких виконує окрему функціональну роль у реалізації методу оптичного лазерного сканування. Враховуючи принцип дії пристрою, до складу апаратної частини входять: лазерний модуль для проєкції маркерного променя, камера для фіксації відбитого сигналу, а також система повороту об'єкта, реалізована за допомогою крокового електродвигуна з цифровим управлінням.

Лазерний модуль.

Основним елементом, що створює проєкційну лінію на поверхні сканованого об'єкта, є лазер. Для навчального зразка доцільно використовувати напівпровідниковий лазер малої потужності - переважно 5 мВт - з довжиною хвилі в червоній області спектра (близько 650 нм). Такий лазер формує яскраву, чітко видиму лінію навіть на малоконтрастних або слабо текстурованих поверхнях, що є критично важливим для оптичного виявлення. Модулі цього типу можуть бути виконані з автономним джерелом живлення (наприклад, батарея типу CR2032), або вимагати зовнішнього електроживлення. У випадку відсутності вбудованого живлення конструкція повинна передбачати відповідне електричне підключення через стабілізований модуль живлення та жорстке механічне кріплення, яке забезпечить фіксоване положення променя щодо об'єкта та камери, що необхідно для дотримання умов триангуляції.

Веб-камера.

Захоплення візуального зображення відбитого променя здійснюється цифровою веб-камерою, що слугує приймальним елементом системи. До ключових вимог до цього модуля належать:

- роздільна здатність не нижче ніж 640×480 пікселів (оптимально –

1280×720 і вище);

- можливість ручного фокусування і вимкнення автофокусування, що дозволяє зафіксувати стабільне фокусне положення під час усього циклу сканування;

- низький рівень шуму та висока контрастність, що критично для точного позиціонування світлової плями в кожному кадрі;

- відсутність значних геометричних аберацій (барельні або подушкоподібні спотворення), які можуть викривлювати координатні дані та порушувати точність обчислень.

Якість оптики визначає не лише деталізацію, а й достовірність розрахункових просторових координат, тому для точного сканування доцільно обирати камери з фіксованою фокусною відстанню та скляними лінзами.

Кроковий електродвигун.

Для створення поворотного руху об'єкта відносно нерухомої оптичної системи застосовується кроковий двигун, що забезпечує дискретне позиціонування з високою точністю. Це спеціалізований привід, широко застосовуваний у системах ЧПК, 3D-принтерах та робототехнічних пристроях.

Його переваги:

- висока точність кутового позиціонування без використання енкодера;
- стабільна швидкість обертання за відсутності коливань моменту;
- можливість інтеграції з мікроконтролерами, що дозволяє синхронізувати крок повороту з відеозахопленням кадрів.

У представленій моделі пристрою використано базове рішення з використанням двофазного гібридного крокового двигуна, що керується драйвером на базі мікросхеми A4988 або TMC2208 з регульованою мікрокроковою дискретністю.

2.3.1 Лазер 650nm 5mW

У проєктованій конструкції 3D-сканера застосовується лазерний модуль типу 650 nm 5 mW, побудований на основі напівпровідникового лазерного діода з інтегрованою системою формування лінійного променя (рис.2.3) [20]. Цей тип джерела випромінювання широко використовується в компактних медичних, контрольно-вимірювальних та освітніх системах завдяки поєднанню надійності, стабільної довжини хвилі та високої видимості променя.



Рисунок 2.3 – Лазерний модуль 650 нм, 5 мВт

Вбудована оптична лінза-розширювач забезпечує трансформацію вузького лазерного пучка у чітку лінію, що дозволяє ефективно реалізувати метод активної лазерної тріангуляції.

Технічні характеристики модуля:

- потужність випромінювання - 5 мВт;
- довжина хвилі - 650 нм (видимий спектр, червоне світло);
- робоча напруга 3–5 В постійного струму;
- струм споживання - до 40 мА;
- форма променя - лінійна (за рахунок вбудованої циліндричної оптики).

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

38

- кут емітування лазерного модуля становить 120°, що забезпечує широке охоплення сканованої області при мінімальній кількості позиційних змін;
- довжина з'єднувального кабелю – 135 мм (5,31 дюйма) – забезпечує зручне підключення модуля до джерела живлення або керуючої плати;
- матеріал лінзи – пластик, що дозволяє зменшити вагу пристрою та забезпечує достатню оптичну прозорість для освітлення з видимим спектром.
- розміри лазерного модуля – 12×35 мм, що робить його зручним для інтеграції в компактну конструкцію сканера.

Компактні розміри модуля дозволяють зручно інтегрувати його до корпусу пристрою, забезпечуючи стабільне формування опорного маркера на поверхні сканованого об'єкта.

Такий лазер оптимально підходить для реалізації бюджетних та навчальних систем сканування, де важлива поєднаність безпечності, точності та доступності компонентів.

2.3.2 Веб-камера Logitech C270

Для фіксації положення лазерного променя на поверхні об'єкта у процесі сканування використовується веб-камера Logitech C270, зображена на рисунку 2.4. Цей пристрій належить до доступного споживчого сегменту, проте забезпечує достатній рівень точності для завдань 3D-сканування у навчальних та аматорських системах.

Технічні характеристики веб-камери Logitech C270 [21]:

- тип сенсора: CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) – енергоефективна матриця з хорошою передачею зображення;
- роздільна здатність матриці: 1.3 мегапікселя;
- максимальна роздільна здатність відео: 1280×720 пікселів (HD);
- максимальна частота кадрів: 30 кадрів/с;

- роздільна здатність фото: 1280×720 пікселів;
- тип з'єднання: дротове, через інтерфейс USB 2.0;
- сумісність із операційними системами: Windows 7, Windows Vista, Windows XP.



Рисунок 2.4 – Веб-камера Logitech C270 [21]

Особливості конструкції:

- будоване підсвічування: відсутнє;
- кріплення: універсальне, підходить для фіксації на моніторах і рівних поверхнях;
- функція автоматичного стеження за обличчям: підтримується.

Габаритні розміри:

- довжина – 70 мм;
- ширина – 69 мм;
- товщина – 32 мм.

2.3.3 Кроковий двигун і драйвер

У складі 3D-сканера застосовується кроковий двигун типу NEMA 17 у парі з драйвером A4988, що зображені на рисунку 2.5 [22, 23].

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

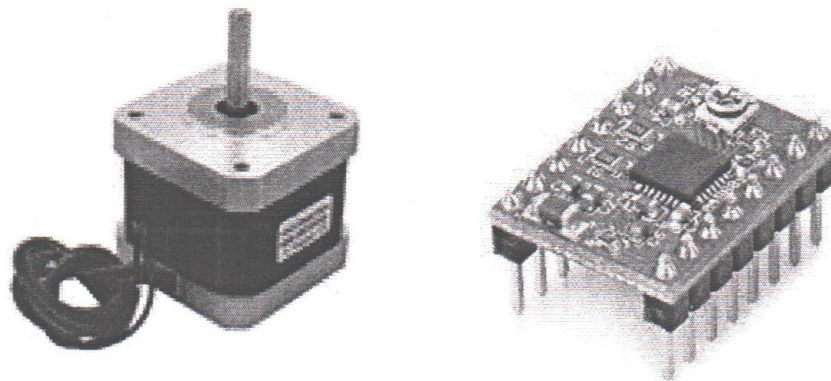


Рисунок 2.5 – Кроковий двигун NEMA 17 і драйвер A4988

Кроковий двигун NEMA 17 є поширеним елементом у багатьох системах з числовим програмним керуванням, таких як 3D-принтери, фрезерні мікроверстати, лазерні плотери, тощо. Його застосування у 3D-сканері обумовлене високою точністю крокового позиціонування, простотою управління та надійністю у циклічних навантаженнях.

Основні технічні характеристики двигуна NEMA 17 [22]:

- типорозмір - NEMA 17;
- крок - $1,8^\circ$ /крок (200 кроків на оберт);
- робоча напруга - 3,4 В;
- номінальний струм - 1,7 А на фазу;
- опір обмотки - 2,0 Ом;
- Індуктивність- 3,0 мГн;
- утримуючий момент - 4000 г*см (0,4 Н·м);
- маса - 0,24 кг.

Для керування двигуном використовується драйвер A4988, що є універсальним мікроконтролерним модулем, здатним реалізовувати повний, половинний, четвертний, восьмий і шістнадцятий мікрокроки. Драйвер має вбудовані функції захисту [23]:

- від перегрівання;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

- від перевищення струму;
- від короткого замикання.

Керування двигуном здійснюється за допомогою двох цифрових сигналів (STEP і DIR), що надходять від мікроконтролера Arduino або іншого контролера. Наявність мікрокроків дозволяє значно підвищити гладкість руху та точність сканування, що є критичним для створення точних цифрових 3D-моделей.

Сумісність, енергоефективність і мінімізація вібрацій при роботі в низькошвидкісному режимі роблять комплект NEMA 17 + A4988 ідеальним вибором для побудови поворотної платформи 3D-сканера.

2.3.4 Контролер

У даному сканері використовується контролер Arduino Nano, зображений на рисунку 2.6 [24].

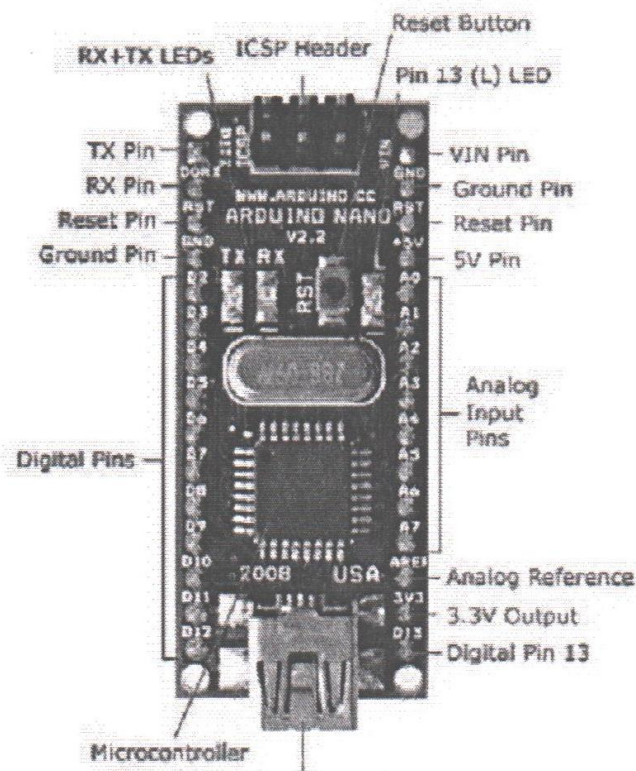


Рисунок 2.6 - Мікроконтролер Arduino Nano

Пристрій призначений для програмування автономних мікропроцесорних систем або для підключення до комп'ютера з подальшою інтеграцією із зовнішнім програмним забезпеченням, наприклад Adobe Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider.

Для роботи контролера необхідно підключити його до комп'ютера за допомогою miniUSB кабелю через порт USB. Альтернативно можливо підключення зовнішнього джерела живлення або акумулятора. При подачі живлення на плату активується синій індикатор, що свідчить про ввімкнення пристрою, а також починає блимати білий світлодіод. На екрані комп'ютера з'являється повідомлення про нове зовнішнє обладнання.

Окремої інсталяції драйвера не потрібно, оскільки в контролер вбудовано завантажувач з USB COM-драйвером. Після цього встановлюється програмне забезпечення Arduino, через яке можна підключати і програмувати пристрій.

Контролер базується на мікроконтролері ATmega328P-20AU. Він постачається з попередньо записаним завантажувачем, що дозволяє легко перепрограмувати пристрій без використання зовнішнього програматора. Також можливе створення власного завантажувача або прошивка без стандартного програмного середовища.

У разі необхідності мікроконтролер Arduino Nano можна запрограмувати не лише через стандартний завантажувач, а й використовуючи інтерфейс внутрішньосхемного програмування ISP (In-System Programming), що здійснюється через спеціальні контактні виводи ICSP. Це дозволяє прошивати мікроконтролер на низькому рівні, обходячи стандартне середовище Arduino IDE. На платі також присутня кнопка скидання (Reset), яка дозволяє перезавантажити мікроконтролер вручну або через плату розширення.

Вбудований мікроконтролер має 14 цифрових входів/виходів, з яких частина підтримує спеціальні функції. Зокрема, контакти 0 і 1 виконують роль послідовного інтерфейсу зв'язку UART (Rx і Tx відповідно), що дозволяє

реалізувати емуляцію порту RS232 для обміну даними з комп'ютером або іншими пристроями.

Виходи 3, 5, 6, 9, 10 і 11 підтримують генерацію сигналів широтно-імпульсної модуляції (PWM) із роздільною здатністю 8 біт, що дозволяє реалізовувати керування яскравістю світлодіодів, швидкістю обертання двигунів та іншими аналоговими параметрами.

Плата також підтримує роботу з інтерфейсом SPI (Serial Peripheral Interface), для якого призначені виводи 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Цей інтерфейс використовується для швидкого обміну даними з периферійними пристроями, наприклад, датчиками або зовнішніми модулями пам'яті. Незважаючи на наявність апаратної підтримки SPI, цей інтерфейс може потребувати додаткової реалізації у коді на Arduino.

До цифрового виходу 13 підключений вбудований світлодіод, який активується, коли на цьому виводі встановлюється високий логічний рівень.

Для зв'язку з пристроями, що підтримують інтерфейс I2C (TWI), призначені виводи 4 (SDA) та 5 (SCL). Це дозволяє підключати численні датчики та модулі з мінімальною кількістю з'єднань.

Контролер також оснащено вісьмома аналоговими входами, позначеними A0 – A7. Кожен із них підтримує 10-бітну розрядність, що дозволяє зчитувати до 1024 різних рівнів напруги. Для забезпечення коректної роботи аналогових входів передбачено вивід AREF, який задає опорну напругу.

Вивід Reset може використовуватися для дистанційного перезавантаження мікроконтролера, наприклад, за допомогою кнопки на платі розширення, якщо доступ до основної кнопки обмежений.

Для повного перепрограмування мікроконтролера доступний інтерфейс ICSP, який дозволяє підключити програматор і виконати низькорівневу прошивку незалежно від USB-завантажувача [18, 19].

Живлення плати може здійснюватися через порт USB або зовнішнє

джерело. Arduino Nano підтримує три варіанти підключення живлення: через USB-порт, через нерегульовану напругу 6–20 В на виводі VIN (контакт 30), або через стабілізоване джерело 5 В на виводі 5V (контакт 27). Вибір джерела живлення відбувається автоматично, і контролер використовує той вхід, де напруга є вищою. При живленні через зовнішнє джерело напруга 3,3 В не буде доступною. Світлодіоди RX і TX блимають лише під час активної передачі або прийому даних через послідовний інтерфейс.

Роз'єми живлення:

- VIN – вхід для подачі живлення від зовнішнього джерела напругою у діапазоні від 6 до 20 В;
- VCC – стабілізоване джерело напруги 5 В, яке використовується для живлення мікроконтролера та інших компонентів плати;
- 3.3V – вихід із напругою 3,3 В, що генерується вбудованим стабілізатором; максимальний допустимий струм навантаження – 50 мА
- GND – виводи загального заземлення;

Технічні характеристики контролера Arduino Nano:

- модель – Arduino Nano V3.0 ATmega328P-20AU;
- мікроконтролер – ATmega328P-20AU;
- робоча напруга – 5 В;
- рекомендована вхідна напруга – від 7 до 11 В;
- допустима межа вхідної напруги – від 6 до 20 В;
- кількість цифрових входів/виходів – 14, з них 6 підтримують режим широтно-імпульсної модуляції;
- кількість аналогових входів – 8;
- максимальний постійний струм на один вхід/вихід – 40 мА;
- максимальний струм для лінії 3.3 В – 50 мА;
- об'єм флеш-пам'яті – 32 КБ, з яких 2 КБ зарезервовано під завантажувач;

- об'єм оперативної пам'яті (SRAM) – 2 Кб;
- об'єм електрично стираної пам'яті (EEPROM) – 1 Кб;
- тактова частота – 16 МГц;
- габаритні розміри – 45 × 18 × 18 мм.

2.4 Розробка електричної схеми 3D сканера

На рисунку 2.7 представлена електрична принципова схема керування виконавчими пристроями 3D-сканера, побудована на базі мікроконтролера Arduino Nano та драйвера крокового двигуна A4988 [22, 23].

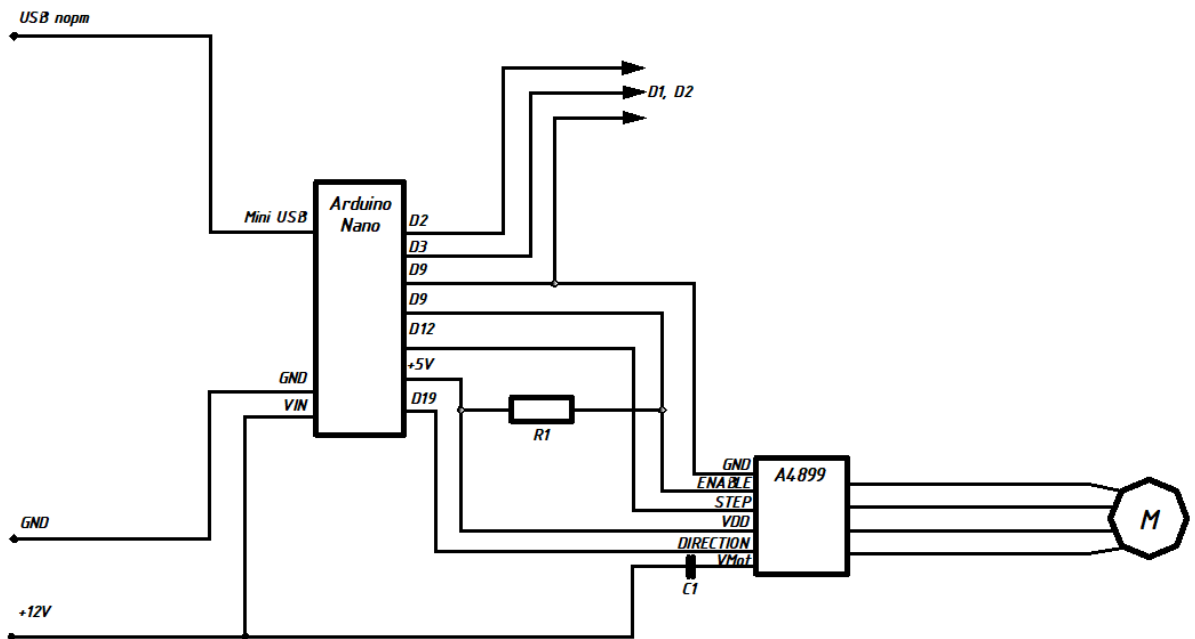


Рисунок 2.7 – Електрична схема 3D сканера

Система керування забезпечує синхронну роботу крокового двигуна (обертання поворотного столу) та керування лазерними модулями. Основу електронної частини становлять наступні компоненти:

- Arduino Nano - мікроконтролер, що виконує керування усіма елементами системи. Він приймає сигнали з персонального комп'ютера через

2.5 Розробка корпусних частин пристрою

Усі елементи корпусу було спроектовано в середовищі тривимірного моделювання SolidWorks [25], що дало змогу створити точну, геометрично узгоджену конструкцію з урахуванням взаємного розташування функціональних вузлів. Програмне забезпечення дозволило не лише побудувати віртуальну модель пристрою, але й перевірити сумісність деталей, забезпечити належні монтажні зазори та провести базову віртуальну збірку, що значно спрощує подальше виготовлення та знижує ймовірність помилок у процесі складання. Конструкція враховує ергономіку, жорсткість корпусу та доступ до обслуговування електроніки й оптичних компонентів (рисунок 2.8).

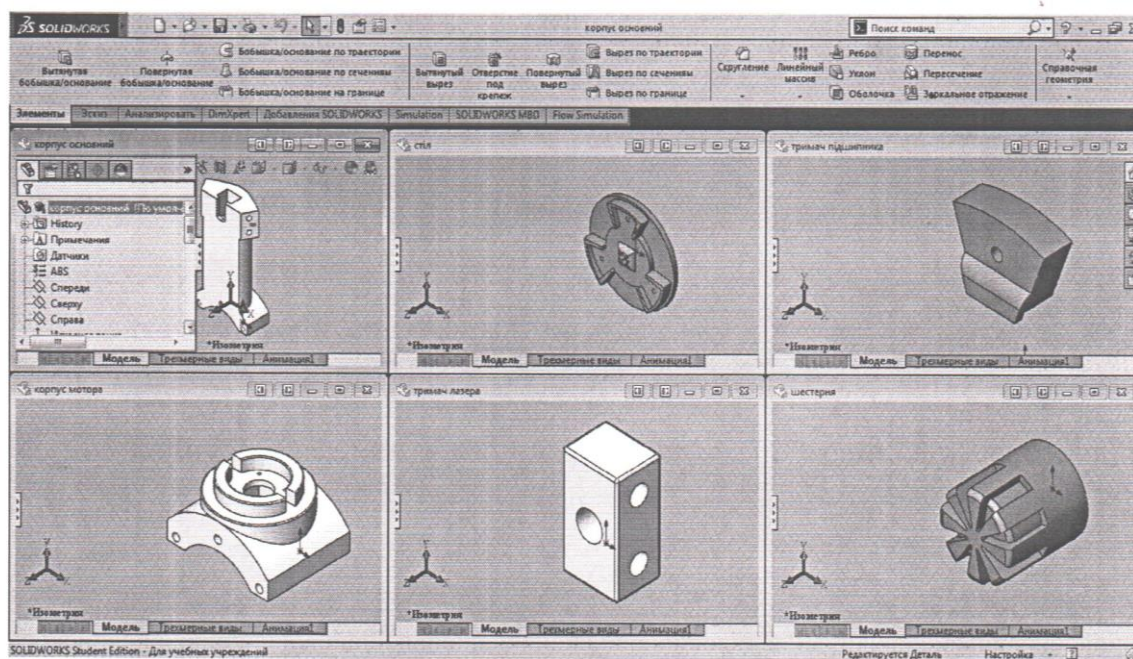


Рисунок 2.8 - Розробка корпусних деталей

На основі спроектованих деталей було розроблено складальне креслення 3D сканера, що приведене на аркуші [БРМА25.00.00.000СК].

Виготовлення корпусних деталей 3D-сканера здійснювалося методом

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
48

адитивного виробництва на 3D-принтері Anycubic 4Max Pro 2.0, який забезпечує високу точність і стабільність друку пластикових компонентів (рис.2.9) [26]. Завдяки великому робочому об'єму принтера було можливим друкувати як малі, так і габаритні елементи без необхідності поділу моделі на частини.

Основні технічні характеристики 3D-принтера Anycubic 4Max Pro 2.0:

- технологія друку FDM (Fused Deposition Modeling);
- робоче поле $270 \times 210 \times 190$ мм;
- товщина шару 0,05–0,3 мм;
- діаметр сопла 0,4 мм (стандартне);
- точність позиціонування по осі XY $\pm 12,5$ мкм;
- максимальна температура екструдера до 250 °С;
- максимальна температура платформи до 100 °С;
- сумісні матеріали PLA, ABS, TPU, NIPS;
- тип платформи ультрабазове скло з підігрівом;
- підтримка файлів STL, OBJ, AMF;
- програмне забезпечення Cura, Repetier-Host, Simplify3D;
- інтерфейс підключення: USB, SD-карта.

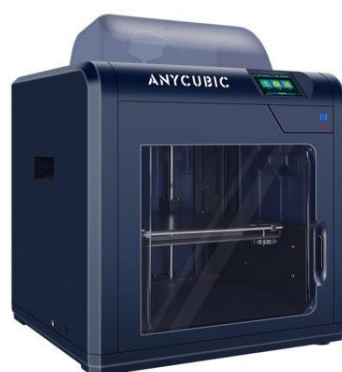


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд 3D принтера
Anycubic 4Max Pro 2.0

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
49

Друк деталей здійснювався з використанням нитки PLA діаметром 1,75 мм, оскільки цей матеріал забезпечує достатню міцність і стабільність розмірів виробів, при цьому є екологічним і легким у використанні. Оптимальні параметри друку були підібрані залежно від складності геометрії, товщини стінок і навантажень на конструктивні елементи.

Таким чином, поєднання тривимірного моделювання в SolidWorks і друку на Anycubic 4Max Pro 2.0 забезпечило високу точність виготовлення, взаємозамінність компонентів та функціональну надійність корпусу пристрою.

2.6 Програмне забезпечення 3D сканера

Для керування роботою 3D-сканера було обрано програмне забезпечення Horus [27]. Це спеціалізоване відкрите середовище, розроблене для роботи з простими саморобними або модульними 3D-сканерами. Програма надає користувачеві повний контроль над усіма етапами процесу сканування, включаючи налаштування параметрів веб-камери, керування поворотним столом через кроковий двигун, а також візуалізацію та збереження отриманих результатів (рис.2.10).



Рисунок 2.10 - Загальний вигляд програмного забезпечення Horus

Horus підтримує попередній перегляд у реальному часі, можливість калібрування системи, побудову хмари точок, а також експорт 3D-моделі у популярних форматах для подальшої обробки у сторонніх редакторах. Інтерфейс програми інтуїтивно зрозумілий, що дозволяє швидко освоїти її використання навіть новачкам.

Програмне забезпечення Horus надає користувачеві повний контроль над усіма функціями 3D-сканера. Воно дозволяє гнучко регулювати якість сканування, налаштовуючи параметри зйомки, швидкість обертання платформи, чутливість камери та інші характеристики. Інтерфейс програми зручний і інтуїтивно зрозумілий, що робить її зручною у використанні як для початківців, так і для досвідчених користувачів. У програму інтегровано віртуального помічника, який допомагає покроково пройти процес калібрування 3D-сканера, забезпечуючи правильну геометрію сканування і високу точність результатів.

2.6.1 Налаштування сканера

Для початку налаштування необхідно під'єднати веб-камеру та мікроконтролер до комп'ютера, а також підключити блок живлення крокового двигуна. Після цього запускається програмне забезпечення Horus і активується режим налаштування сканера (рис.2.11).

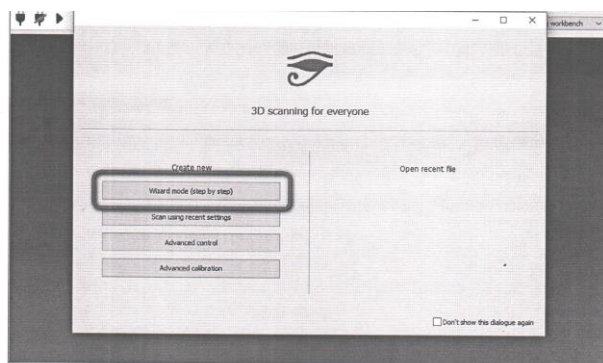


Рисунок 2.11 – Перехід до налаштувань

У вікні програми слід натиснути кнопку "connect", щоб ініціювати з'єднання сканера з комп'ютером (рисунок 2.12). У випадку появи повідомлення про помилку з'єднання (рисунок 2.13) необхідно перевірити налаштування СОМ-порту. Для цього потрібно відкрити диспетчер пристроїв операційної системи та переглянути, до якого порту підключено контролер (рисунок 2.14).

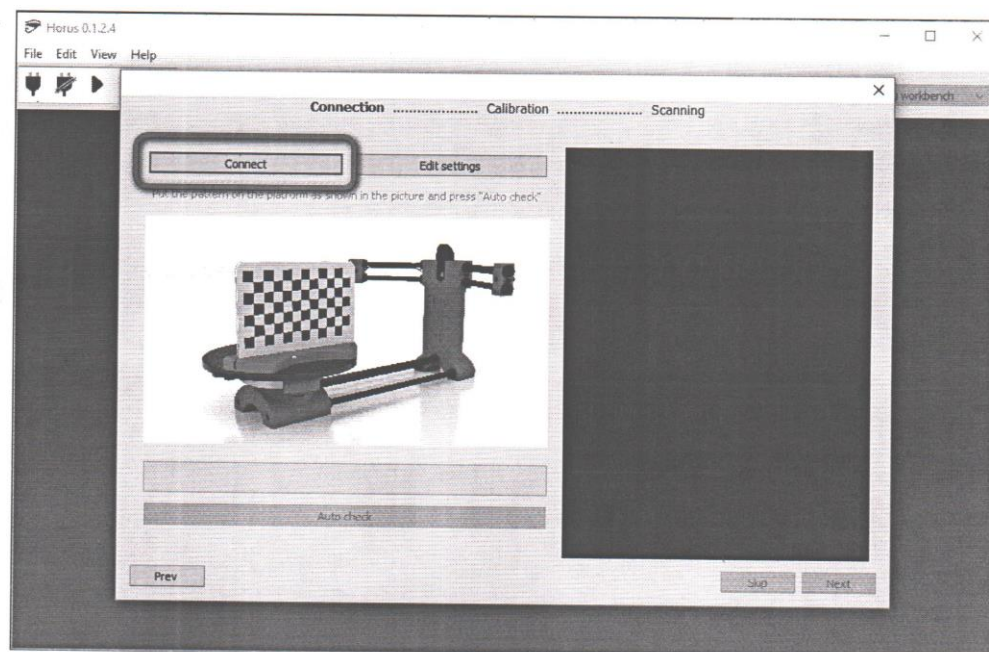


Рисунок 2.12 - З'єднання сканера з комп'ютером

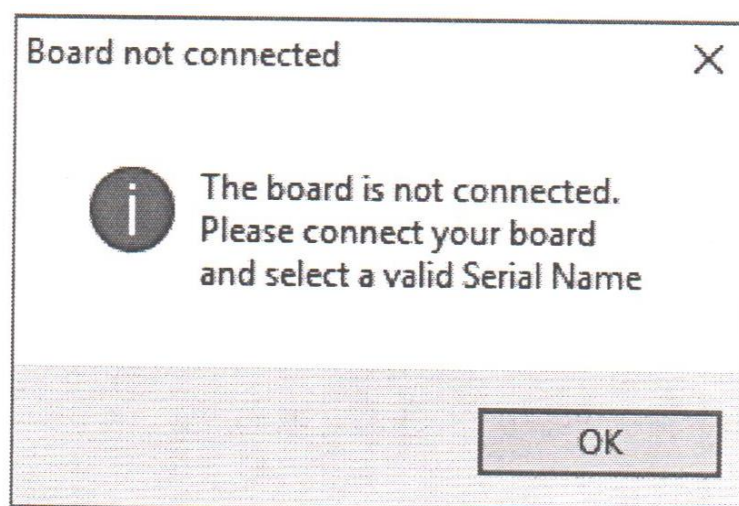


Рисунок 2.13 - Помилка при підключенні

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

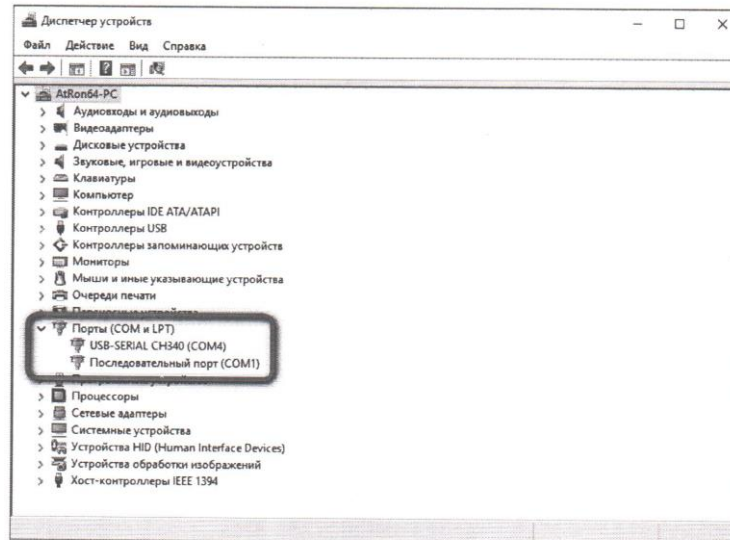


Рисунок 2.14 - Диспетчер пристроїв

У відкритому вікні налаштувань програми, в правому нижньому куті інтерфейсу, необхідно перейти на вкладку "Preferences". У цьому розділі виконується базове конфігурування параметрів роботи сканера, таких як роздільна здатність зображення, налаштування кадрів, частота обертання поворотного столу, масштаб координат та інші параметри, що впливають на якість побудови 3D-моделі. Значення кожного параметра слід встановити відповідно до вказаних на рисунку 2.15.

Після виконання початкових налаштувань сканер успішно з'єднується з комп'ютером і переходить у режим готовності. Наступним етапом є проведення калібрування системи. Для цього у верхній частині вікна програми слід обрати вкладку "Calibration workbranch", яка відповідає за процес налаштування геометрії сканування та взаємного розташування компонентів сканера.

У режимі калібрування необхідно досягти відображення зображення на екрані, аналогічного зображенню, наведеному на рисунку 2.16. Це зображення дозволяє впевнитися, що всі компоненти системи правильно зорієнтовані відносно один одного.

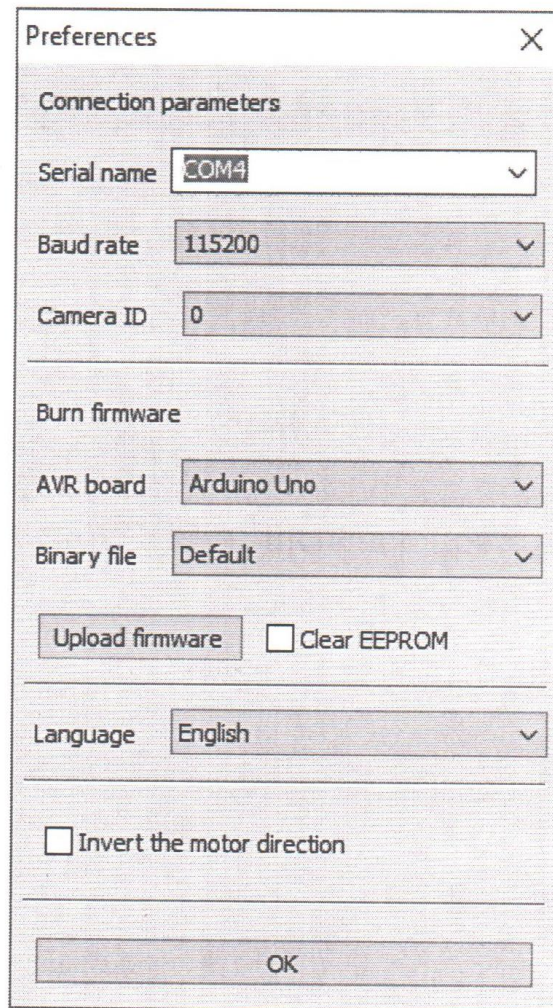


Рисунок 2.15 - Налаштування підключення

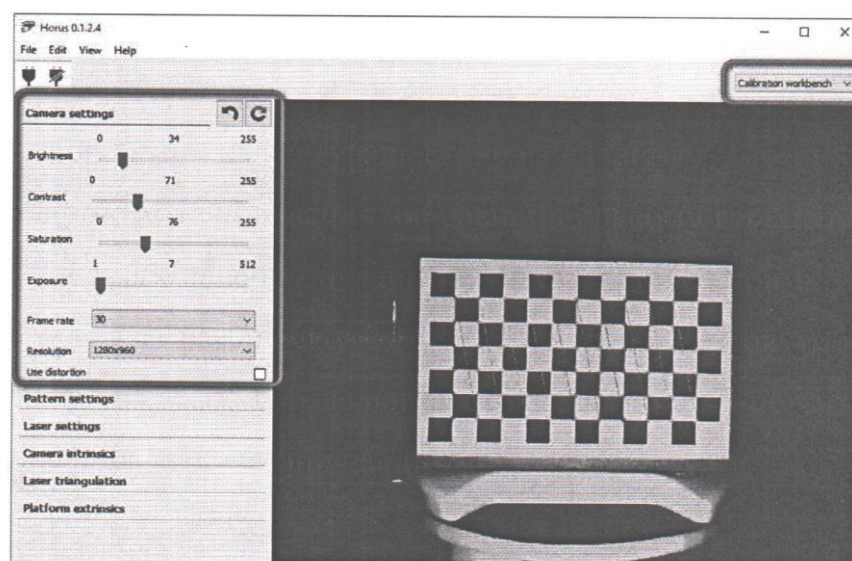


Рисунок 2.16 - Налаштування камери

Далі потрібно вручну налаштувати лазерні модулі таким чином, щоб на поверхні об'єкта з'явилися дві чіткі вертикальні лінії, які будуть розташовані паралельно одна одній. У центрі поворотного столу ці лінії мають перетинатися під прямим кутом, утворюючи хрестоподібне світлове маркування (рисунок 2.17). Це є важливою умовою для забезпечення точності подальшого сканування та побудови коректної цифрової моделі.

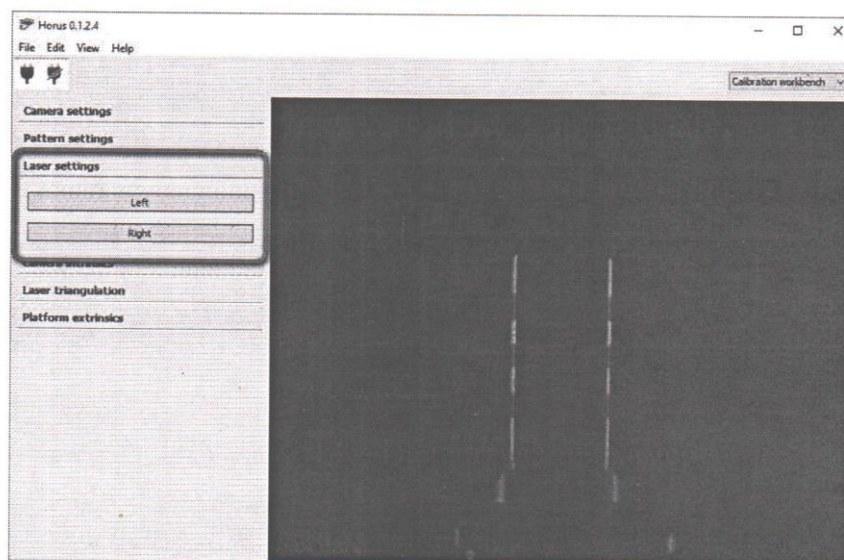


Рисунок 2.17 - Налаштування лазерів

2.7 Опис розробленого 3D сканера

Розроблений пристрій призначений для створення високоточної тривимірної цифрової моделі фізичного об'єкта з розмірами до 250 мм у діаметрі та висотою до 205 мм. Сканер належить до класу ротаційних триангуляційних систем, в яких використовується метод оптичної триангуляції для визначення координат точок на поверхні об'єкта. Основними елементами конструкції є поворотний стіл, дві лазерні лінії та веб-камера Logitech C270 HD, яка фіксує відбиття лазерного променя.

Цей тип сканера є ефективним інструментом для дизайнерів, інженерів,

техніків та інших фахівців, які працюють із прототипуванням, зворотнім інжинірингом або потребують точної цифрової копії об'єкта. Пристрій дозволяє автоматизувати процес отримання 3D-моделі та значно скорочує час на її створення.

Для обробки даних сканування використовується програмне забезпечення Hocus з відкритим кодом. Воно забезпечує широкі можливості налаштування параметрів сканування, включаючи експозицію камери, швидкість обертання платформи, обробку геометрії та побудову хмари точок. Програмне середовище розділено на три основні модулі: калібрування, керування процесом сканування та моніторинг стану апаратної частини. Завдяки інтуїтивному інтерфейсу програмою зручно користуватися навіть без спеціальної технічної підготовки.

Однією з важливих функцій сканера є автоматичне калібрування, яке враховує всі можливі геометричні похибки, що можуть виникнути при самостійному складанні пристрою. Це дозволяє досягати стабільної якості сканування незалежно від точності механічної збірки. Точність сканування складає до 0,5 мм, а за один повний оберт платформи може бути виконано до 1600 точкових зчитувань. Тривалість одного циклу сканування налаштовується в межах від 2 до 8 хвилин, залежно від вибраних параметрів.

Результати сканування зберігаються у форматі PLY, який підтримується більшістю 3D-редакторів та придатний для безпосереднього використання у 3D-друці. Файли можуть бути відредаговані або підготовлені для друку в таких програмах, як MeshLab, Blender або Fusion 360. Для передачі даних і зв'язку з комп'ютером сканер оснащений USB-інтерфейсом, а також модулем бездротового з'єднання Bluetooth, що забезпечує додаткову гнучкість під час роботи (аркуш [БРМА25.00.00.000 ДІ]).

2.8 Висновки до другого розділу

У другому розділі виконано всебічну розробку конструкції 3D-сканера, що призначений для освітніх і дослідницьких цілей. Обґрунтовано вибір методу сканування - оптична триангуляція за допомогою точкового лазерного променя, який поєднує простоту реалізації та прийнятну точність вимірювання. Розглянуто принцип дії системи та побудовано структурну схему, що охоплює всі основні функціональні блоки пристрою, включаючи персональний комп'ютер, веб-камеру, мікроконтролер Arduino Nano, лазери, кроковий двигун і блок живлення.

На основі аналізу функціональних вимог здійснено підбір апаратних компонентів системи, зокрема лазерного модуля 650 нм 5 мВт, веб-камери Logitech C270, крокового двигуна NEMA 17 з драйвером A4988, а також мікроконтролера Arduino Nano. Надано докладні технічні характеристики кожного з елементів, що дозволило обґрунтувати їх відповідність вимогам до точності, надійності та сумісності в межах єдиної системи.

Розроблено електричну принципову схему керування, що дозволяє реалізувати повноцінну автоматизовану роботу всіх виконавчих елементів, зокрема обертання платформи, керування лазерами та інтеграцію з програмним забезпеченням через USB-інтерфейс. Програмне забезпечення Horus, адаптоване під специфіку даного проекту, забезпечує зручну взаємодію користувача з апаратною частиною, можливість калібрування та вивід результатів у стандартних форматах.

Усі корпусні елементи були змодельовані в середовищі SolidWorks, а подальше виготовлення реалізовано за допомогою 3D-друку на принтері Anycubic 4Max Pro 2.0, що забезпечило точність складання та сумісність усіх механічних вузлів. Обрана технологія FDM-друку та матеріал PLA дозволили створити жорстку, стабільну та візуально привабливу конструкцію пристрою.

Таким чином, на основі комплексного інженерного підходу у розділі було реалізовано повний цикл розробки 3D-сканера: від концепції та вибору методу до побудови схеми, виготовлення корпусу та програмної інтеграції, що підтверджує готовність системи до подальшого експериментального використання.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРАХУНКИ ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ 3D СКАНЕРА

3.1 Сканування предмета

Для оцінки ефективності роботи 3D-сканера було здійснено аналітичну перевірку параметрів сканування. Умовно приймаємо, що камера має роздільну здатність 1000×1000 пікселів. Це означає, що для повного покриття площини об'єкта необхідно виконати два типи розгортки: горизонтальну та вертикальну, кожна з яких передбачає обробку 1000 окремих ліній.

Таким чином, загальна кількість знімків, які потрібно сформувати протягом одного циклу сканування, становить 2000 кадрів. Якщо час обробки одного кадру становить 20 мілісекунд, то повний цикл сканування триватиме [4]:

$$T = 2 \times 10^3 \times 20 \times 10^{-3} = 40 \text{ с.}$$

Це є прийнятним показником для пристрою, призначеного для навчальних і демонстраційних цілей.

Для реалізації обраного алгоритму сканування необхідно врахувати особливості побудови зображення. Сканування проводиться у два основні етапи.

На першому етапі використовується горизонтальна лінія лазера для створення вертикальної розгортки зображення.

На другому етапі, навпаки, вертикальна лінія лазера забезпечує горизонтальну розгортку з подальшою побудовою повної карти об'єкта.

Під час вертикальної розгортки (рис. 3.1) формується набір ліній, для кожної з яких відомо значення вертикального кута сканування. Проте відсутня

інформація про точний горизонтальний кут, під яким лазерне випромінювання потрапляє на об'єкт. Це ускладнює безпосереднє визначення просторових координат і потребує геометричної корекції за допомогою калібрування або програмного вирівнювання [4]:

$$r_j, m,$$
$$s_j, m,$$

де r – номер рядка в розгортці;

s – відстань до точки від початку відповідного рядка;

j – індекс положення лазерного променя;

m – позначення точки, яку змогли розділити.

При кожному зчитуванні зображення камера фіксує просторове положення точки на поверхні об'єкта, визначаючи як вертикальний, так і горизонтальний кут, під яким ця точка спостерігається. Таким чином, кожна точка у кадрі має свій унікальний набір кутових координат у системі відліку камери.

Після виконання вертикальної розгортки лазерного променя отримується масив даних, у якому для кожного положення променя зафіксовані координати точок відбиття на поверхні об'єкта. Ці дані включають номер рядка зображення та відстань до точки у межах відповідного рядка.

На рисунку 3.1 наведено приклад розміщення довільної лазерної лінії з індексом j . Координати точки m описуються як (r_j, m) , а s_j, m - відстань у пікселях до точки від лівого краю кадру. Однак цієї інформації недостатньо для побудови повної просторової моделі, оскільки вона не враховує горизонтальний кут, під яким лазер освітлював кожну конкретну точку.

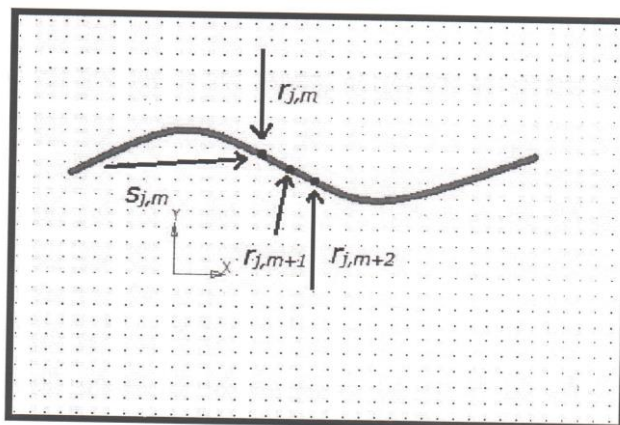


Рисунок 3.1 - Промінь лазера при вертикальній розгортці [4]

Щоб отримати повноцінний набір координат, необхідно провести ще один етап сканування - цього разу використовується вертикальний лазерний промінь, що здійснює розгортку в горизонтальній площині. Таким чином, друга серія зчитувань дозволяє визначити недостаючі горизонтальні кути, які у поєднанні з даними першої розгортки забезпечують повне відновлення тривимірної геометрії поверхні об'єкта.

Після виконання другої фази сканування - горизонтальної розгортки лазерного променя - формується ще один масив даних, який доповнює інформацію, отриману під час вертикального сканування. Цей масив складається з пар значень [4]:

$$r_{j, k},$$

$$s_{j, k},$$

де k - номер (індекс) конкретної точки в масиві.

На рис. 3.2 схематично зображено три довільні лазерні лінії під час горизонтальної розгортки. У цьому випадку фіксується положення кожного променя у горизонтальній площині, проте не можна точно визначити вертикальний кут падіння променя на об'єкт. Це обумовлено тим, що

вертикальний лазер під час сканування одночасно освітлює всю вертикальну площину, а не окремі її лінії, як це відбувається при вертикальній розгортці. Внаслідок цього індекс j , який визначає вертикальний кут сканування, залишається невідомим.

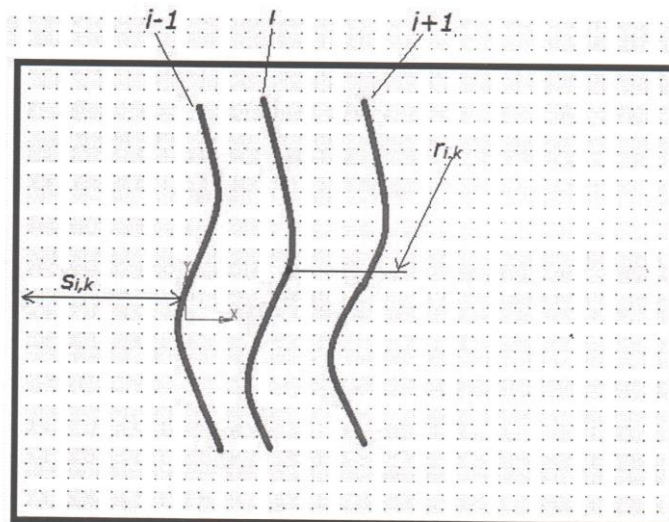


Рисунок 3.2 - Промені лазера при горизонтальній розгортці [4]

Таким чином, жодна з двох розгорток окремо не дозволяє отримати повний набір тривимірних координат. Але при суміщенні обох масивів даних та застосуванні алгоритмів об'єднання результатів можна отримати просторове положення кожної точки на об'єкті.

Під час горизонтальної розгортки лазера, як і у випадку вертикального сканування, виникає обмеження: неможливо визначити, під яким вертикальним кутом світловий промінь потрапляє на об'єкт. Це пов'язано з тим, що лазер освітлює всю вертикальну площину одночасно, без розділення на окремі лінії. У результаті невідомим залишається індекс i , який відповідає вертикальному положенню або куту сканування. Отже, маючи лише часткові дані з кожного з етапів сканування, неможливо точно визначити просторові координати всіх точок на поверхні об'єкта.

Для вирішення цієї задачі необхідно побудувати алгоритм, який

дозволить об'єднати отримані дані з обох розгорток і виявити ті точки, які були зафіксовані одночасно в обох скануваннях. Така точка буде перетином горизонтального та вертикального променів, а отже, матиме як вертикальний, так і горизонтальний кут сканування - тобто повний набір координат для побудови її положення у просторі.

Ідея полягає в наступному: якщо знайти спільні точки для обох масивів сканування, тобто ті, які розташовані на перетині горизонтальної та вертикальної лінії лазера, можна отримати повний набір параметрів для обчислення їх тривимірних координат. Для цього застосовується алгоритм виявлення збігів координат на основі порівняння положення точок у кадрах [4]:

$$\text{If } (\text{mod}[(r_{i,k}; s_{i,k}) - (r_{j,m}; s_{j,m})] < \varepsilon). \quad (3.2)$$

Цей логічний вираз означає: якщо відстань між двома точками (одна з вертикального сканування, інша з горизонтального) менша за певний заданий поріг ε , то вони вважаються однаковими, тобто відповідають одній і тій самій точці на поверхні об'єкта.

На рис. 3.3 схематично зображено принцип виявлення таких точок - це місце, де перетинаються горизонтальний і вертикальний промені лазера. Отримавши ці перетини, система формує повний набір даних для кожної точки: горизонтальний і вертикальний кут сканування, що дозволяє точно визначити її положення у тривимірному просторі.

Розв'язавши нерівність (3.2), ми отримуємо множину точок, які одночасно були виявлені під час обох фаз сканування - вертикальної та горизонтальної. Таким чином формується перетин двох масивів даних, що дозволяє точно ідентифікувати просторову точку. Як зображено на рисунку 3.3, у кожній точці перетину ми знаємо значення вертикального кута (i), горизонтального кута (j), а також положення точки у кадрі (r, i, s). Це дає нам

повну інформацію про те, під якими кутами камери і лазера фіксується дана точка на об'єкті.

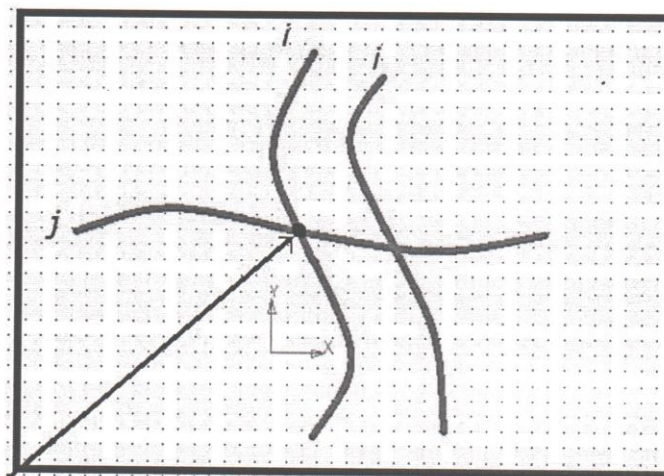


Рисунок 3.3 - Перетин горизонтального і вертикального променів [4]

Математично, умова збігу координат виражається наступним чином [4]:

$$\Gamma_{j,m} = \Gamma_{j,k},$$

$$S_{j,m} = \Gamma_{j,m},$$

Це означає, що для обраних точок у двох масивах кадри та положення точок у них збігаються. Відповідно, можемо сформувати новий об'єднаний масив, що містить трійку кутів і позицій:

$$\Gamma_{i,j,m}, S_{j,m}.$$

Цей масив містить повний набір інформації: індекси обох променів (горизонтального та вертикального), а також координату точки в полі зору камери. Такий підхід дозволяє перейти до наступного етапу — розрахунку просторових координат.

3.2 Отримання геометричних координат точок у просторі

Маючи базову відстань між джерелами випромінювання (лазером) і камерою, а також кути, під якими ці елементи фіксують певну точку, можна розв'язати задачу визначення координат точки у тривимірному просторі. Це типова задача триангуляції, в якій відомі напрямки до точки з двох точок спостереження і відстань між ними.

Для знаходження координат просторової точки А використовується комбінація просторової теореми Піфагора та теореми про три перпендикуляри [4]. Ці геометричні співвідношення дозволяють вирахувати точні значення координат X, Y та Z у системі координат сканера на основі відомої бази та вимірних кутів (наприклад, азимутального і вертикального) (рис.3.4).

Ці методи є основою для побудови хмари точок, що формує 3D-модель об'єкта, і забезпечують необхідну точність позиціонування, визначену характеристиками сканера та камерного модуля.

Кут φ_k , отримаємо з наступного співвідношення [4]:

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{S_{j,i,k}}{f} \quad (3.3)$$

де f - фокусна віддаль камери.

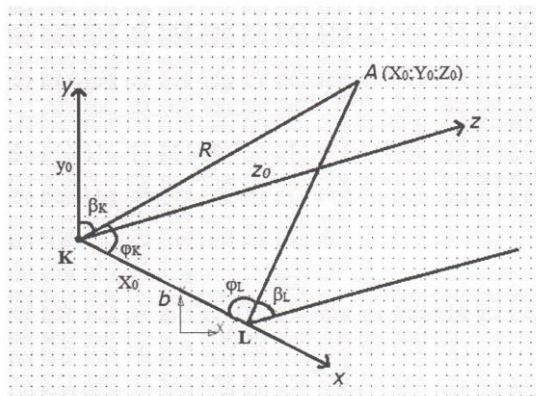


Рисунок 3.4 - Знаходження координати точки А в просторі

Кут β_k отримаємо з наступного рівняння [4]:

$$\operatorname{tg} \beta_k = \frac{r_{j,i,k}}{f} \quad (3.4)$$

Кут φ_L , є пропорцією і, а β_L , - пропорцією j.

Спочатку потрібно знайти вектор R з трикутника KAL.

Відповідно:

$$R = \frac{b \cdot \sin \varphi_L}{\sin(\varphi_k + \varphi_L)} = \frac{300 \cdot 0,866}{0,866} = 300 \text{ мм} . \quad (3.5)$$

За теоремою про три перпендикуляри проектуємо АК на вісь x. Координата x_0 буде рівною [4]:

$$x_0 = R \cdot \cos \varphi_k = \frac{b \cdot \sin \varphi_L \cdot \cos \varphi_k}{\sin(\varphi_k + \varphi_L)} = 300 \cdot 0,5 = 150 \text{ мм} . \quad (3.6)$$

За просторовою теоремою Піфагора знаходимо Z:

$$z_0 = \sqrt{R^2 - x_0^2 - y_0^2} = \sqrt{300^2 - 150^2 - 0^2} = 259,8 \text{ мм} . \quad (3.7)$$

Дані розрахунки дозволяють обрахувати відстань поворотного стола від камери, а також кут і відстань між лазерами.

3.3 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було здійснено математичне моделювання та аналітичну перевірку працездатності запропонованої конструкції 3D-сканера, що працює на принципі оптичної тріангуляції з використанням точкового лазерного променя. Було розглянуто детальний алгоритм сканування, що включає двоетапну лазерну розгортку - вертикальну та горизонтальну - з подальшим об'єднанням отриманих даних для формування повного набору просторових координат точок на поверхні об'єкта.

Проведено розрахунок часу повного циклу сканування за умови заданої роздільної здатності та швидкості обробки кадрів. Встановлено, що повна побудова карти поверхні з 2000 кадрів може бути реалізована за 40 секунд, що є прийнятним показником для лабораторного або навчального зразка.

На основі аналізу геометрії сканування визначено критичні обмеження кожного етапу: вертикальна розгортка не дає інформації про горизонтальний кут, а горизонтальна - про вертикальний. Проте розроблений підхід до ідентифікації точок, виявлених одночасно в обох масивах даних, дозволяє визначити просторові координати за допомогою тріангуляції. Це досягається шляхом порівняння позицій точок у зображеннях та виявлення їх просторових перетинів (рис.3.3).

В результаті об'єднання даних з обох фаз сканування формується масив координат, що містить повну інформацію про положення точки у полі зору (r , s) та кути під якими камера і лазер фіксують її. Це дозволяє перейти до розрахунків у прямокутній системі координат сканера.

Застосовуючи базові тригонометричні співвідношення (формули 3.3–3.7), було виконано обчислення просторового положення точки, з урахуванням кутів огляду та фокусної відстані камери. Це підтвердило теоретичну спроможність системи до побудови тривимірної моделі об'єкта методом

покадрової реконструкції.

Отже, проведені розрахунки підтверджують працездатність конструкції, а також її придатність до відтворення у вигляді повноцінного навчального або демонстраційного пристрою для ознайомлення з принципами 3D-сканування та геометричної реконструкції.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконаної роботи було розроблено повнофункціональний зразок 3D-сканера, орієнтованого на використання в навчальному процесі, дослідницькій діяльності та ознайомленні з методами оптичного цифрового сканування. Проведений у першому розділі аналіз сучасних типів і принципів дії 3D-сканерів дозволив обґрунтувати доцільність вибору безконтактного активного методу з використанням точкового лазерного променя й поворотного столу, що забезпечує достатню точність, мобільність та простоту у використанні.

У другому розділі реалізовано повний цикл інженерного проектування пристрою - від вибору принципу дії до виготовлення корпусу та створення електронної системи керування. Обґрунтовано вибір апаратної бази, зокрема використання лазера 650 нм, веб-камери Logitech C270, крокового двигуна NEMA 17 з драйвером A4988, а також контролера Arduino Nano. Створено структурну та електричну схеми, змодельовано корпус у середовищі SolidWorks та надруковано всі деталі на 3D-принтері Anycubic 4Max Pro 2.0. Забезпечено інтеграцію з відкритим програмним забезпеченням Hocus для сканування, калібрування та побудови хмари точок.

У третьому розділі проведено аналітичне моделювання процесу сканування, яке підтвердило працездатність системи. Розроблено алгоритм двофазного сканування (вертикальна та горизонтальна розгортки) з об'єднанням координатних даних методом геометричної триангуляції. Розраховано час повного циклу сканування, визначено математичну модель побудови просторових координат і доведено ефективність реалізованого підходу.

Загалом, розроблена система 3D-сканування демонструє збалансоване поєднання функціональності, технічної простоти та доступності, що робить її придатною для застосування у навчальних лабораторіях, демонстраційних експериментах та проєктній діяльності в галузі інженерії та інформаційних технологій.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Що таке 3D сканування? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pro3d.com.ua/a359154-scho-take-skanuvannya.html>
2. Богданов Г. Г. Еволюція матеріалів для одягу : навчальний посібник / Г.Г. Богданов, З. В. Захожай . – К. :, 2009. – 280 с.
3. Сучасна методика технічного контролю розмірів, допусків і посадок в машинобудуванні по ЄСКД, ISO та ASME [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dees.kiev.ua/blog/suchasna-metodyka-tehnicznego-kontrolyu-rozmiriv-dopuskiv-i-posadok-v-mashynobuduvanni-po-yeskd-iso-ta-asme/>.
4. Сфери застосування лазерного сканування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5200484/page:3/>.
5. 3D-сканери компанії Artec 3D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=812>.
6. Технологія 3D друку Z Corporation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.demos.zp.ua/catalogs/zcorp/ZCorp3DPrintingTechnology.pdf>.
7. ZScanner 600 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tcchan.wordpress.com/2010/07/10/zscanner-600/>.
8. MODELA Pro MDX-20/15 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.syscomp.net/roland/fresadoras/mdx20_15.htm.
9. Програмне забезпечення Leica Cyclone [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ngc.com.ua/ua/p/41-leica-cyclone.html>.
10. Вибір 3D сканеру з лінійки EinScan від SHINING3D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/blog/3d-printer-ogliad/%D1%8F%D0%BA-%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B8-3d-%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D1%80-einscan-%D0%B2%D1%96%D0%B4-shining3d/>

gnid=18151745907&gbraid=0AAAAADNakmdH998ItN-9i7TKuA410vgp5&gclid=CjwKCAjwuIbBBhBvEiwAsNypvYi21cjBeFXD5E_YB-w-4_Bpm_SYOi9zD7Qigq5jawIachU8EwFHPxoC4roQAvD_BwE.

22. Кроковий двигун NEMA17 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=380&product_id=267&gad_source=1&gad_campaignid=20839106384&gbraid=0AAAAADk5dvq_iYKyQnEbw_xe2gdQ5ITjf&gclid=CjwKCAjwuIbBBhBvEiwAsNypvWNbY3fz04fJmMa37dSYs8jzFv6uET8VbC7y9OC07WMTJ7n0rrO1IxoC6b0QAvD_BwE.

23. Драйвер крокового двигуна A4988 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://rozetka.com.ua/ua/351158181/p351158181/?gad_source=1&gad_campaignid=20086286791&gbraid=0AAAAADIXhI5PhjOgMwLPOZaDBM-gYNC9B&gclid=CjwKCAjwuIbBBhBvEiwAsNypvTFI5a3bU-q540zcrxbzrneNLWvXgDHzW7QyOTcpM1xu0YoPqyfV1xoCJKgQAvD_BwE.

24. Плата Arduino Nano [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cncprom.ua/ua/p1524259529-plata-arduino-nano.html>.

25. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник/ С.І. Пустюльга, В.Р. Самостян, Ю.В. Клак – Луцьк: Вежа, 2018. – 172 с.

26. Anycubic 4Max Pro 2.0 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dreams.com.ua/ua/product/anycubic-4max-pro-2-0-3d-%d0%bf%d1%80%d0%b8%d0%bd%d1%82%d0%b5%d1%80/>.

27. 3D сканер для визначення геометрії об'єкту контролю [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://asnk.kpi.ua/docs/anotations/bachelor/TasazhV_ua.pdf.

ДОДАТОК А

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		74