

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
(позначення документа)

Дослідження методу фотограметрії для невеликих об'єктів

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи СТМм-21-1  
Роман ЩЕРБАКОВ

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Марина КОЛЕНДОВСЬКА

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Володимир КАРТАШОВ  
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма "Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа"

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Щербакову Роману Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методу фотограметрії для невеликих об'єктів

затверджена наказом по університету від " 21 " 11 2022 р. № 1503СТ

2. Термін подання студентом роботи 08.12.2021 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_

1. Об'єкти до 300 мм

2. Сканування об'єкту методом фотограметрії доступними засобами (смартфон, програмне забезпечення, об'єкт сканування)

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

ВСТУП

1. Аналіз предметної області

2. Теоретичне обґрунтування вибору методів та засобів 3D-сканування

3. Обґрунтування вибору обладнання та програмних засобів для 3D-сканування

4. Створення 3D-моделі за допомогою технології фотограметрії у програмі Meshroom

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

ДОДАТКИ

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій:

1. Огляд технології фотограметрії; 2. Огляд методу з використанням лазерної технології;

3. Огляд методу структурованого світла; 4. Аналіз контактного 3D-сканера; 5. Аналіз

теорії пари знімків; 6. Полігон; 7. Вершина; 8. Ребро; 9. Грань; 10. Полігональна сітка;

11. Текстурування; 12. Процес зйомки об'єкта для сканування; 13. Створення 3D-моделі у

програмі Meshroom; 14. Алгоритм створення 3D-моделі у програмі Meshroom; 15.

Отримання хмари точок; 16. Результат сканування; 17. Фінальний результат після

доопрацювання моделі; 18. Створення 3D-моделі у програмі RealityCapture; 19.

Налаштування програми RealityCapture; 20. Результат роботи в програмі RealityCapture;

21. Результати програм Meshroom та RealityCapture.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термин виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз предметної області	21.11.22–28.11.22	
2.	Теоретичне обґрунтування вибору методів та засобів 3D-сканування	21.11.22–28.11.22	
3.	Створення 3D-моделі за допомогою технології фотограметрії у програмі Meshroom	23.11.22–02.12.22	
4.	Створення 3D-моделі за допомогою технології фотограметрії у програмі Meshroom	01.12.21–05.12.22	
5.	Графічна частина роботи	07.12.22–08.12.22	
6.	Перевірка керівником	07.12.22–08.12.22	
7.	Перевірка на академічний плагіат	08.12.22–09.12.22	
8.	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	09.12.22–10.12.22	

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 21.11.2022 р.

Студент \_\_\_\_\_ Роман ЩЕРБАКОВ  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. Марина КОЛЕНДОВСЬКА  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи має: 65 с., 42 рис., 4 табл., 21 додатків, 31 джерел.

СКАНУВАННЯ, СКАНЕР, 3D-МОДЕЛЬ, СІТКА, МЕШ, ГРАНЬ, РЕБРО, ТЕКСТУРА, ТРИАНГУЛЯЦІЯ, ЧПК, САПР

*Об'єкт дослідження* – методи фотограметрії.

*Предмет дослідження* – сучасні технології фотограметрії для об'єктів до 30 см.

*Мета кваліфікаційної роботи* – проанлізувати методи сканування та отримати 3D модель за допомогою технології фотограметрії.

*Методи дослідження* – теоретичний аналіз, математичне обґрунтування, та моделювання.

У даній роботі проведено аналіз методів, та засобів сканування 3D-об'єктів. Наведено порівняльну характеристику обладнання, необхідного для обробки великої кількості зображень. Обґрунтовано вибір програми для створення 3D-моделі. Виконано сканування методом фотограметрії, а після скановані дані 3D-моделі опрацьовано у програмі Meshroom та RealityCapture.

## ABSTRACT

The explanatory note of the qualification work has: 65 p., 42 fig., 4 table., 21 appendices, 31 sources.

SCAN, SCANNER, 3D MODEL, MESH, MESH, FACE, EDGE, TEXTURE, TRIANGULATION, CNC, CAD

*The object of study* is photogrammetry.

*The subject of the study* is the study of the method of photogrammetry for small volumes.

*The purpose of the qualification work* is to analyze the methods of scanning and optimize the 3D model using photogrammetry technology.

*Research methods* – theoretical analysis, mathematical justification, and modeling.

In this paper, an analysis of the methods and means of scanning 3 D-objects is carried out. A comparative description of the equipment necessary for processing a large number of images is given. The choice of a program for creating a 3 D-model is justified. Scanning by photogrammetry method was performed, and after scanned data, 3 D-models were scanned and processed in the Meshroom and RealityCapture program.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЧПК - Числове програмне керування

САПР - Система автоматизованого проектування

3D - Тривимірний простір

АСКВ - Автоматизована система керування виробництвом

ПК - персональний комп'ютер

ТЗ - технічний засіб

КВМ - Координатно-вимірювальна машина

ГІС - Геоінформаційна система

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	6
Вступ.....	9
1 Аналіз технологій тривимірного сканування, та видів сканерів.....	11
1.1 Огляд технології фотограмметрії.....	12
1.2 Огляд методу структурованого світла .....	13
1.3 Огляд методу з використанням азерної технології .....	15
1.4 Аналіз контактного 3D-сканеру .....	16
2 Теоретичне обґрунтування вибору методів та засобів 3D-сканування.....	19
2.1 Аналіз теорії пари знімків .....	19
2.2 Аналіз математичного методу фотограмметрії .....	20
2.3 Огляд 3D сприйняття людським оком, та 3D сканеру .....	23
2.4 Огляд 3D моделі та САПР.....	24
2.5 Аналіз основних понять 3D-моделювання.....	25
2.6 Аналіз використання полігональної сітки у 3D-скануванні.....	27
2.7 Огляд видів полігонів у 3D .....	28
2.8 Огляд методів текстурування у 3D, та при скануванні.....	30
2.9 Аналіз використання методу тріангуляції.....	31
3 Обґрунтування вибіру обладнання та програмних засобів для 3D сканування.....	35
3.1 Обґрунтування вибору обладнання для 3D сканування .....	35
3.2 Аналіз програм, які використовуються для створення 3D-моделей за допомогою технології фотограмметрії .....	39
3.2.1 Аналіз програми для фотограмметрії Meshroom .....	40
3.2.2 Аналіз програми для фотограмметрії VisualSFM.....	41

	8
3.2.3 Аналіз програми для фотограмметрії Regard3D .....	42
3.2.4 Аналіз програми для фотограмметрії OpenMVG .....	43
3.2.5 Аналіз програми для фотограмметрії Colmap .....	44
3.2.6 Аналіз програми для фотограмметрії МісМас .....	45
3.2.7 Аналіз програми для фотограмметрії RealityCapture .....	47
4 Створення 3D-моделі за допомогою технології фотограмметрії у програмі Meshroom та RealityCapture .....	49
4.1 Створення 3D-моделі у програмі Meshroom .....	49
4.2 Створення 3D-моделі у програмі RealityCapture .....	56
4.3 Порівняння отриманих результатів у програмі Meshroom та RealityCapture .....	58
ВИСНОВКИ .....	59
Перелік посилань .....	62
Додатки .....	67
ДОДАТОК А .....	68
Додаток В .....	79

## ВСТУП

Технологія фотометрії не є новою, раніше вона використовувалася в галузях геодезії, криміналістики та архітектури, але сьогодні вона набула перспективи завдяки розвитку комп'ютерів і спеціальних програм для обробки інформації, отриманої при скануванні.

Є багато способів, за допомогою яких можна створювати 3D моделі. Одним з таких способів є технологія фотограметрія, яку ми будемо використовувати для отримання невеликого об'єкту у 3D.

Цифрові дизайнери все частіше використовуватимуть технології 3D-сканування та моделювання для розробки віртуальних середовищ і доповненої реальності, щоб досліджувати різноманітні об'єкти, які вони створюють, і взаємодіяти з ними, а потім друкувати їх у 3D із різноманітних матеріалів. Можна з упевненістю сказати, що 3D-сканування має великий потенціал у сучасних технологіях.

Фотограметрія знаходить застосування в різних видах діяльності:

- створення топографічних карт та ГІС;
- охорона навколишнього середовища (вивчення льодовиків та снігового покриву, бонітування ґрунтів та дослідження процесів ерозії, спостереження за змінами рослинного покриву, вивчення морських течій);
- проектування та будівництво будівель та споруд;
- археологічні розкопки;
- кіноіндустрія (поєднання гри живих акторів з комп'ютерною анімацією);
- автоматизована побудова просторових моделей об'єкта за знімками;
- у військовій справі: для створення топографічних та спеціальних карт, фотодокументів, згущення опорних геодезичних мереж, визначення

координат цілей та своїх військ, дослідження траєкторій та швидкостей польоту снарядів та ракет та іншого;

– комп'ютерні ігри (створення тривимірних моделей ігрових об'єктів).

Цілью роботи є вивчення та дослідження методів та технологій фотограметрії, та на практиці засосувати даний метод, використовуючи при цьому засоби які доступні практично кожному (смартфон, комп'ютер, безкоштовне програмне забезпечення та т.і.).

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТРИВИМІРНОГО СКАНУВАННЯ, ТА ВИДІВ СКАНЕРІВ

Технологія 3D-сканування з'явилася десятиліття тому, в кінці 20 століття. Перші робочі прототипи з'явилися в 1960-х роках. Правда, тоді він не давав багато чого, але це був справжній 3D-сканер. У середині 1980-х скануюче обладнання вдосконалилося. Їх доповнюють лазери, джерела білого світла і затемнення. Це покращує «розпізнавання» об'єкта дослідження. За цей час з'являється контактний датчик. З їх допомогою оцифровуються тверді поверхні складної форми без перепадів [1].

3D-сканери використовують не тільки в дизайн-студіях і автомобільних компаніях, але і співробітникам кіноіндустрії. У 80-х і 2000-х роках різні компанії випускали власні моделі пристроїв: сканери голови, 3D-сканери REPLICA та ін. З тих пір агрегати змінювалися, вдосконалювалися, ставали більш мобільними і функціональними. Характеристики сучасних 3D-сканерів значно відрізняються. 3D-сканер детально вивчає фізичний об'єкт, а потім відтворює його точну модель у цифровому форматі. Сучасні агрегати можуть бути стаціонарними і мобільними. В якості підсвічування використовуються лазери або спеціальні лампи (їх застосування підвищує точність вимірювань). Принцип роботи 3D-сканера визначається технологією сканування.

Потім порівнюються зображення, передані камерами. Після ретельного аналізу всіх отриманих даних на екрані відображається готова до використання цифрова 3D-модель. Якщо пристрій 3D сканера заснований на роботі лазерного променя, то з його допомогою можна вимірювати відстані в заданих точках. На основі цієї інформації виводяться координати.

Виділяють два основних методи тривимірного сканування:

- контактний метод полягає в тому, що пристрій зондує предмет за допомогою фізичного контакту, поки об'єкт знаходиться на прецизійній повірочній поверхні. Контактний 3D сканер

- відрізняється надточними результатами роботи. Правда, при скануванні можна пошкодити або змінити форму об'єкта;
- безконтактний метод полягає в тому, що застосовується випромінювання або особливе випромінювання (ультразвук, рентгенівські промені та т.і.).

### 1.1 Огляд технології фотограметрії

Фотограметрія походить від фотографії, є неймовірно корисною технологією в різних галузях. Ця технологія дозволяє робити кілька зображень, знятих у різних положеннях, і триангулювати точки на цих зображеннях, щоб визначити їх положення в 3D-просторі (рис.1.1).

Картографи, наприклад, використовують цю технологію при створенні карт. Коли справа доходить до важкодоступних місць, таких як гори, геодезисти можуть використовувати фотограметрію для проведення вимірювань.



Рисунок 1.1 – Створення 3D-моделей акторів технологією фотограметрії [1]

Огляд літературних джерел показує, що багато сучасних технологій використовують фотограмметрію, причому основним фактором, що визначає точність, є якість зображень. Якщо зображення поганої якості, у сітці будуть дірки. Чим більше зображень ви можете отримати, тим вища точність сканування [2].

Розглянувши технологію фотограметрії, можна виділити наступні недоліки та переваги (табл.1.1)

Таблиця 1.1 – Перелік недоліків та переваг технології фотограметрії

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Високий ступінь автоматизації процесу;</li> <li>– Велика продуктивність (оскільки вимірюються не самі об'єкти як такі, а лише їх зображення);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Потрібно багато знімків для отримання точної моделі;</li> <li>– Можливо знадобиться доробка вручну;</li> </ul>

## 1.2 Огляд методу структурованого світла

Ця технологія створюється шляхом нанесення геометричних візерунків на об'єкт з одночасним захопленням зображення камерою. У цьому випадку камера фіксує відхилення зображення (рис.1.2)

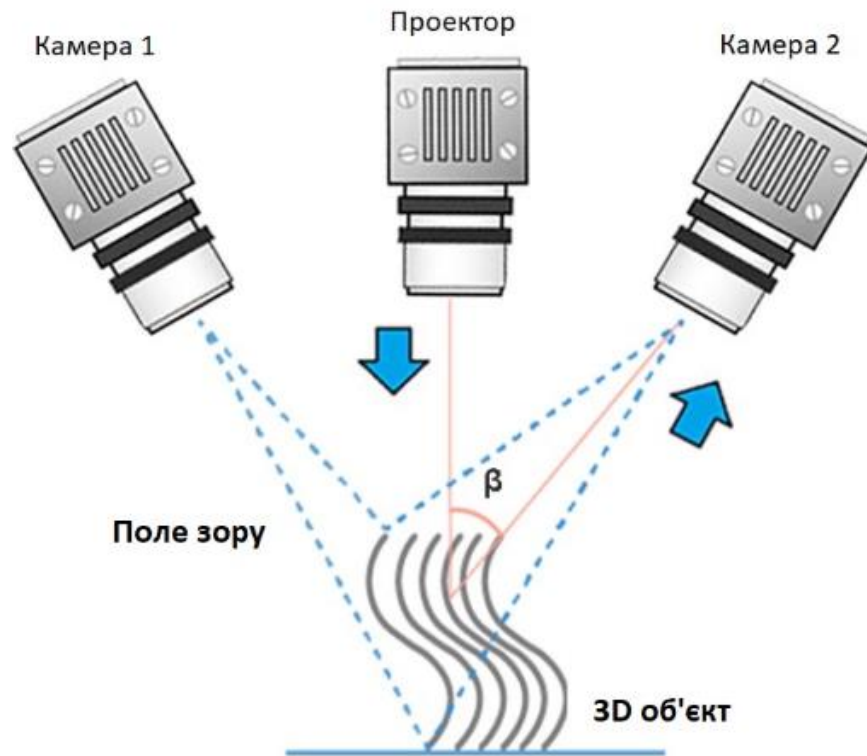


Рисунок 1.2 – Структуроване світло [3]

На основі цього зміщення шаблону можна знайти всі існуючі точки. Необхідно виконати багато сканувань з різних позицій, а потім об'єднати їх, поки сітка не буде завершена на 100%. Комп'ютерні програми автоматично об'єднують усі зображення в повну сітку.

Цей тип технології забезпечує високу швидкість 3D-сканування. Це легкі пристрої, що відрізняються нижчою ціною, ніж лазерні 3D-сканери. Проте вони дуже чутливі до умов освітлення, всі тіні на об'єкті можуть відобразитися у створеному 3D-файлі. Тому використання 3D-сканера структурованого освітлення поза приміщеннями або у складних умовах (наприклад, у приміщеннях з високою запиленістю) може бути проблематичним. Крім того, перед початком 3D-сканування чорні або глясові поверхні необхідно покрити спеціальним спреєм [3].

Розглянувши технологію структурованого світла, можна виділити наступні переваги та недоліки (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Недоліки та переваги технології структурованого світла

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Швидкість 3D-сканування</li> <li>– Дешевші за лазерні 3D-сканери</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Чутливі до умов освітлення</li> <li>– Чутливі до матеріалу сканованого об'єкта</li> </ul>

### 1.3 Огляд методу з використанням лазерної технології

Лазерна технологія полягає в аналізі заломлення лазерних променів на поверхні об'єкта, що тестується, або вимірюванні відстані між фізичним елементом і пристроєм. Сенсор або камера аналізують отримані дані та відтворюють геометрію об'єкта (рис.1.3).

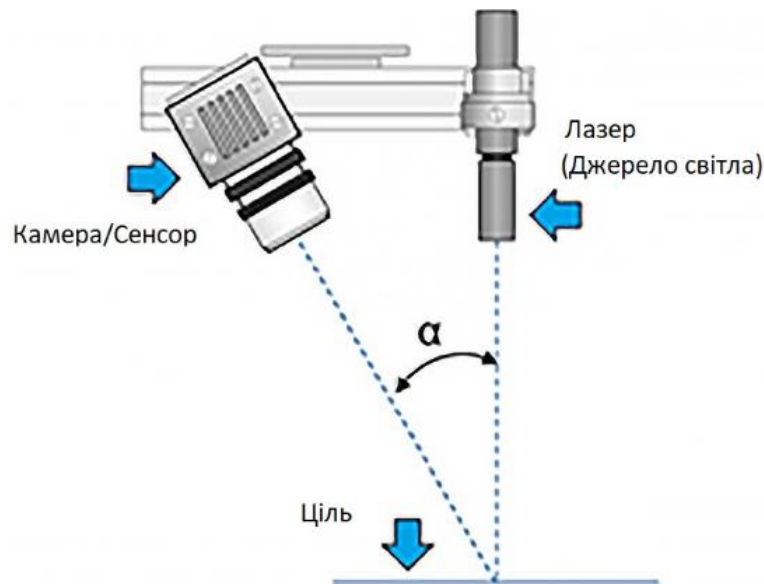


Рисунок 1.3 – Технологія лазерного сканування [3]

Лазерні 3D-сканери характеризуються набагато більш високою точністю та роздільною здатністю 3D-сканування в порівнянні з пристроями, що використовують технологію структурованого світла. Вони здатні сканувати в умовах низького освітлення, а також розпізнають чорні, блискучі та білі елементи без необхідності покривати їх матовим спреєм. Лазерні 3D-сканери можуть сканувати великі об'єкти (наприклад, будівлі). Тим не менш, вони набагато дорожчі, ніж сканери структурованого світла, і водночас мають нижчу швидкість сканування [3].

Розглянувши технологію лазерного сканування, можна виділити наступні переваги та недоліки (табл. 1.3)

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки технології лазерного сканування

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Висока точність та роздільна здатність</li> <li>– Сканування в умовах низького освітлення</li> <li>– Розпізнають білі, чорні та блискучі елементи</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Дорожче за сканери структурованого світла</li> <li>– Нижча швидкість сканування у порівнянні зі сканерами структурованого світла</li> </ul>

#### 1.4 Аналіз контактного 3D-сканеру

Контактні 3D-сканери є пристроями зі спеціальним щупом, який, проходячи по контурах об'єкта, складає його тривимірну копію на екрані комп'ютера. Контактні сканери точні, прості у використанні та чудово підходять для об'єктів з нескладною геометрією – наприклад, промислових деталей (рис.1.4).



Рисунок 1.4 – Щуп для контактного сканування [4]

Однак їх використання ускладнено тим, що об'єкти мають багату деталізацію, а форма контурів замість чітко окреслених граней включає плавні лінії. І тут сканування може тривати багато часу. Крім того, контактні сканери не застосовуються там, де принципово неможливий сам контакт скануючого вузла з об'єктом. Як приклад тут можна назвати необхідність сканування живих об'єктів та внутрішніх органів для медичних потреб або сканування предметів із надмалими розмірами. Тим не менш, в даний час контактні сканери успішно застосовуються в промисловості, нерідко будучи додатковою опцією різних фрезерних та гравірувальних верстатів [4].

Також до контактного типу сканування відносяться СММ - Coordinate measuring machine - координатно-вимірювальні машини (рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Координатно-вимірювальна машина [5]

Розглянувши технологію контактного 3D-сканування, можна виділити наступні переваги та недоліки (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Переваги та недоліки контактного сканера

Переваги	Недоліки
– Дешевше у порів'янні з лазерним	– Ускладнено використання с деталізованими об'єктами – Людський фактор – Час сканування

Після проведення аналізу способів тривимірного сканування, постала задача вибору методу сканування та програми обробки отриманих даних. Для досягнення поставленої цілі необхідно виконати наступні кроки:

- провести аналіз технологій;
- проаналізувати конструкції існуючих прототипів сканерів та технологій;
- провести аналіз існуючих методів побудови тривимірних моделей.

На основі проведеного аналізу методів тривимірного сканування можна зробити висновок, що для створення 3D-моделі невеликого об'єкту будемо використовувати метод фотограметрії у зв'язку з його не високою вартістю, відносно високою точністю, та доступністю використання на даний час.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ 3D-СКАНУВАННЯ

### 2.1 Аналіз теорії пари знімків

Пара стереоскопічних зображень (стереопара) відноситься до двох зображень із зображеннями однієї місцевості, які записуються з двох точок простору. Зображення, отримане з точки відбору проб  $S_1$ , називається лівим, а з  $S_2$  – правим. На рис. 2.1 показана пара зображень в положенні, в якому вона перебувала в момент зйомки.

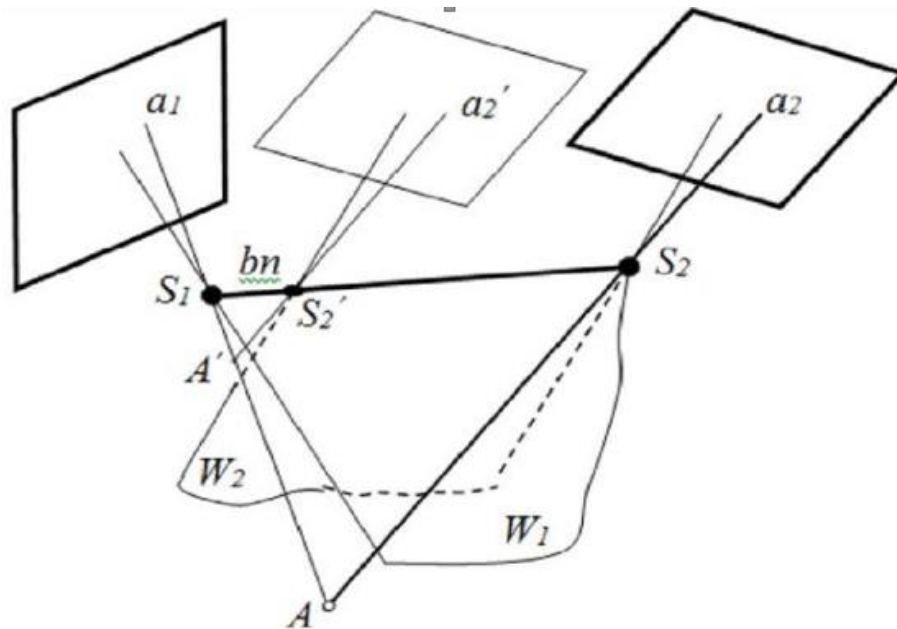


Рисунок 2.1 – Теорія пари знімків [5]

$A$  — точка площі, зображеної на рисунку 2.1 точками  $a$  і  $a$ . Їх називають відповідними або однойменними точками. Проекційні промені  $S_1A'$  і  $S_2A'$ , що проходять через ці точки, називають відповідними або однойменними проекційними променями [5].

Відстань між точками зйомки  $S_1$  і  $S_2$  є основою для фотографування.

Площина  $W_a$ , що проходить через основу та точку місцевості, є площиною основи.

Площини, що проходять через основу фотографії та головні промені, є головними базовими площинами ( $W_1$  – ліворуч,  $W_2$  – справа від зображень).

Кожна пара відповідних променів перетинається, коли зображення приймають положення, яке було під час зйомки [5].

Сукупність їх перетинів утворює поверхню. Її називають стереомоделлю або просто моделлю місцевості. За наведених умов вона збігається із земною поверхнею, а це означає, що масштаб моделі 1:1. Розглянемо основний смисл.

Припустимо, що одна з ланок (наприклад, права) рухається вперед уздовж основи з положення  $S_2$  в  $S_2'$ . Модель не розвалиться, але зміниться її масштаб. Відстань  $bn$  між центрами проєкцій двох елементів, які складають модель, називається розрахунковою основою, а її масштаб обчислюється за такою формулою:

$$\frac{1}{t} = \frac{bn}{B} \quad (2.1)$$

Існує поняття елементів орієнтації стереопари. Вони містять елементи орієнтації (внутрішні  $x$ ,  $y$ ,  $f$  і зовнішні  $X$ ,  $Y_S$ ,  $Z_S$ ,  $\alpha$ ,  $\omega$  і  $\kappa$ ) кожного із зображень, які його складають, тому їх загальна кількість становить 18. Якщо місцевість фотографується з точок  $S_1$  і  $S_2$  виконуються одним і тим же АФА, то стереопара має 15 елементів орієнтації. Інші три кутові елементи зовнішньої орієнтації зображень також використовуються на практиці, але значно рідше. У системах координат зображення положення точок  $a_1$  і  $a$  (зображення точки  $A$  місцевості) визначається координатами  $x_1$ ,  $y_1$  і  $x$ ,  $y$  відповідно.

## 2.2 Аналіз математичного методу фотограметрії

Математична сутність фотограметрії є векторна алгебра та аналітична геометрія. Фундамент аналітичної фотограметрії (це є базою для цифрової фотограметрії) є умова колінеарності та умова компланарності векторів [6].

Математичні методи що використовуються в фотограметрії можна розділити на дві групи:

- методи попередньої обробки зображень, отриманих за допомогою різних датчиків;
- методи фотограметричних побудов моделей досліджуваних об'єктів.

Попередня обробка зображень спрямована на усунення деформацій зображень, що спричинено дією зовнішніх або внутрішніх чинників (дисторсія оптичної системи, рефракція атмосфери, деформація фотографічного матеріалу, похибка під час сканування фотографічного зображення тощо). Саме тоді вимірюваний знімок буде подано у вигляді плоских прямокутних координат  $(x, y)$ , які з великою ймовірністю відповідали б їхнім істинним значенням  $(x^0, y^0)$ . Інша мета попередньої обробки зображення стосується покращення якості зображення (кольорова гамма, контраст, оптична щільність – це все називають радіометричними характеристиками), а також у разі необхідності компактного запису, оскільки обсяг інформації навіть одного цифрового знімка є доволі великим.

Методи фотограметричних побудов – це класичні задачі аналітичної фотограметрії:

- визначення просторових точок координат об'єкта з поодинокого знімка та стереопари;
- перехід від нахиленого зображення до горизонтального в заданому масштабі;
- обернена і пряма фотограметричні зачіски;
- взаємне орієнтування пари знімків (стереопара);
- зовнішнє орієнтування фотограметричної моделі;
- побудова опорних мереж способами фоторіангуляції;
- створення цифрових ортофотокарт;
- побудова цифрових моделей об'єктів, або цифрових об'єктів місцевості;

Усі ці задачі становлять базу аналітичної фотограметрії.



### 2.3 Огляд 3D сприйняття людським оком, та 3D сканеру

Тривимірний зір людини заснований на так званому стереоскопічному ефекті. Це акт спостереження об'єкта з двох різних точок, де зображення, які бачать обидва ока, практично ідентичні, але зсунуті відносно одне одного. Ступінь такого усунення залежить від відстані між людиною та об'єктом: чим ближче об'єкт, тим більше усунення. Це явище називається ретинальним (бінокулярним) розбіжністю або бінокулярним паралаксом. На жаль, роздільна здатність ока неоднакова. Найвища щільність колби знаходиться в центрі, тому для максимальної роздільної здатності та найкращого сприйняття відстані обидва ока повинні дивитися безпосередньо на об'єкт [7].

Виявлення відстані при погляді на близький предмет відбувається за рахунок зовнішніх м'язів очного яблука. При цьому кут огляду при фокусуванні погляду на віддалений об'єкт значно менше. Після двох зображень (в кожному оці) проектуючись на сітківку, вони проходять через зорові нерви і прямують до різних ділянок мозку. Різні ділянки мозку аналізують зображення одночасно. Одні області розпізнають геометричні фігури, інші розпізнають рух, треті порівнюють зображення з раніше побаченими тощо. Зрештою, вся ця інформація надходить у нашу свідомість лише за 50 мілісекунд, і ми сприймаємо колір, відстань, рух і форму того, на що дивимося. 3D-сканери працюють за тим самим принципом, але вони вимірюють відстань точніше, ніж людський зір, і це справедливо як для лазерних, так і для 3D-сканерів зі структурованим світлом.

Оскільки світло може поводитися по-різному під впливом навколишнього середовища, тривимірне візуальне сприйняття завжди працює однаково добре. Фактично, коли 3D-об'єкт більший за нанометр, людському оку або сучасному сканеру важко побачити всі сторони одночасно, оскільки інші об'єкти зазвичай заважають. Наприклад, тильні сторони непрозорих предметів закриті лицьовими.

Треба відсканувати об'єкт з усіх боків, щоб побачити його тривимірні контури, особливо якщо форма заздалегідь не відома. Виявлення великих об'єктів одного кольору простої форми в 3D може бути досить складним, особливо плоских або дуже гладких поверхонь.

Це відбувається тому, що очі потребують висококонтрастних зображень для фокусування. Гладкі однорідні поверхні без характерних рис сприймаються оком як неконтрастні. Те саме стосується чорних областей.

Багато професійних 3D-сканерів мають проблеми з читанням чорних або рівномірно темних поверхонь, оскільки їм також потрібні напрямні фокусування, описані вище. І початківці, і професіонали 3D сканування стикаються з великими труднощами в таких випадках, які вимагають різних методів і підходів до оцифровки, а іноді навіть вибору іншого типу сканера. Тож якщо час від часу виникає потреба сканувати темні поверхні, перед покупкою 3D-сканера варто протестувати його на таких об'єктах. Вибір кращого сканера в цьому випадку не обмежується точністю і роздільною здатністю.

#### 2.4 Огляд 3D моделі та САПР

3D-оцифрування, включаючи сканери на основі структурованого освітлення, лазерні сканери та програмне забезпечення, нерозривно пов'язане з досягненнями в комп'ютерних технологіях, які зробили можливим створення програмованих контролерів для різних апаратних чи програмних систем числового керування (ЧПК). З появою ЧПК стало можливим зробити серйозний прорив у сфері виготовлення об'єктів різної форми, які іноді називають поверхнями будь-якої форми [8].

Основне значення ЧПК полягає в тому, що машиною керує комп'ютер, немає людини. Комп'ютери можуть робити це з неперевершеною точністю, неймовірно точно та набагато ефективніше ніж людина. Вони роблять це за допомогою спеціальних команд, створених програмними системами,

відомими як автоматизовані системи керування виробництвом (АСКВ) і системи автоматизованого проектування (САПР).

## 2.5 Аналіз основних понять 3D-модельювання

Полігон – це основна частина полігональної сітки (рис.2.6). Він містить в собі такі елементи як:

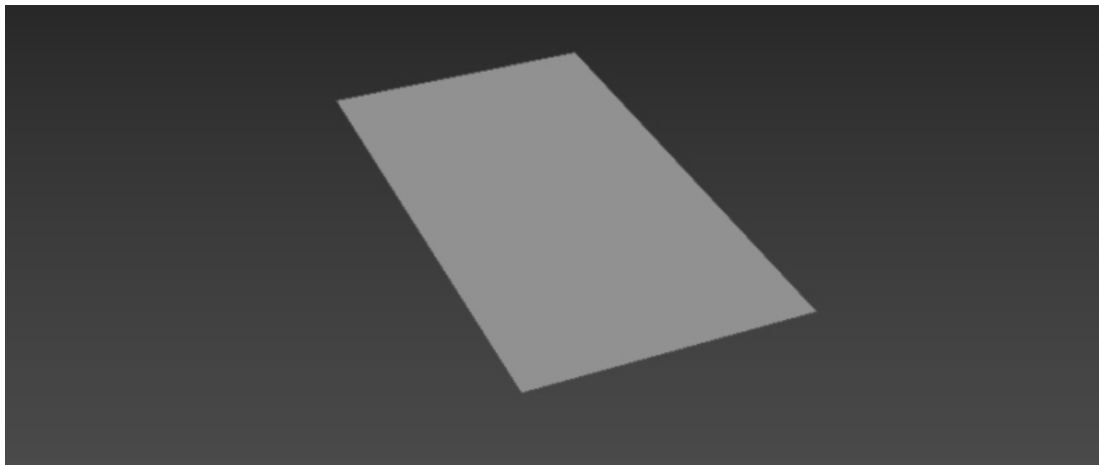


Рисунок 2.6 - Полігон [6]

Вершина (Vertex) – це точка перетину 3-х або більше ребер (рис 2.7). При роботі з 3D моделями, а конкретніше з полігональною сіткою, вершина часто виступає в ролі маніпулятора, який є найбільш популярним методом формування полігональної сітки в її підсумковому вигляді. Рухаючи вершини у всіх 3-х площинах (x, y, z), користувачеві вдається досягти правильної та потрібної йому форми в 3д моделі [9].

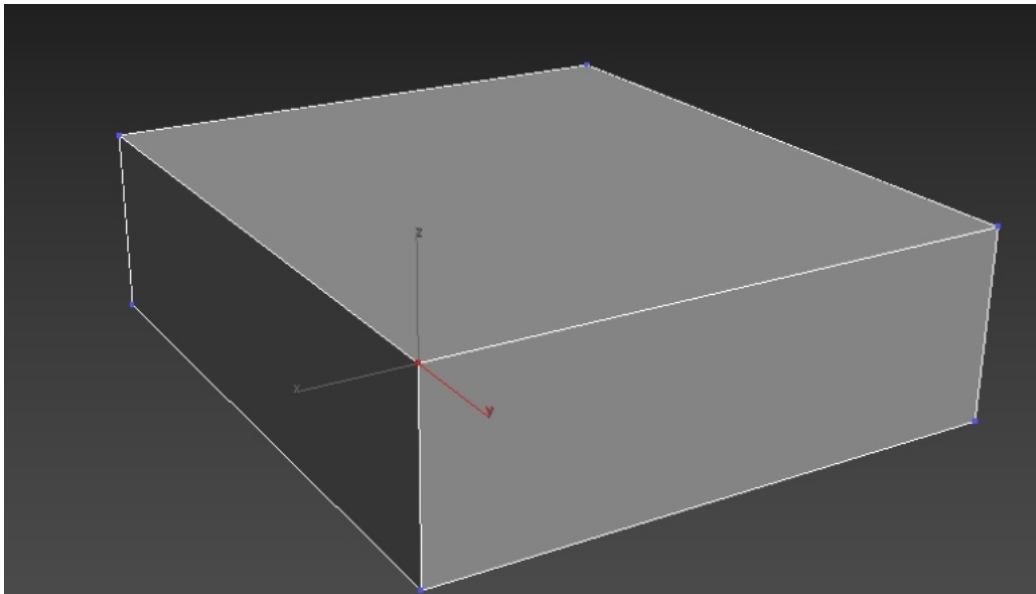


Рисунок 2.7 - Вершина [6]

Ребро (Edge) - будь-яка пряма лінія, що з'єднує дві точки вершини (рис.2.8). Може бути частиною грані.

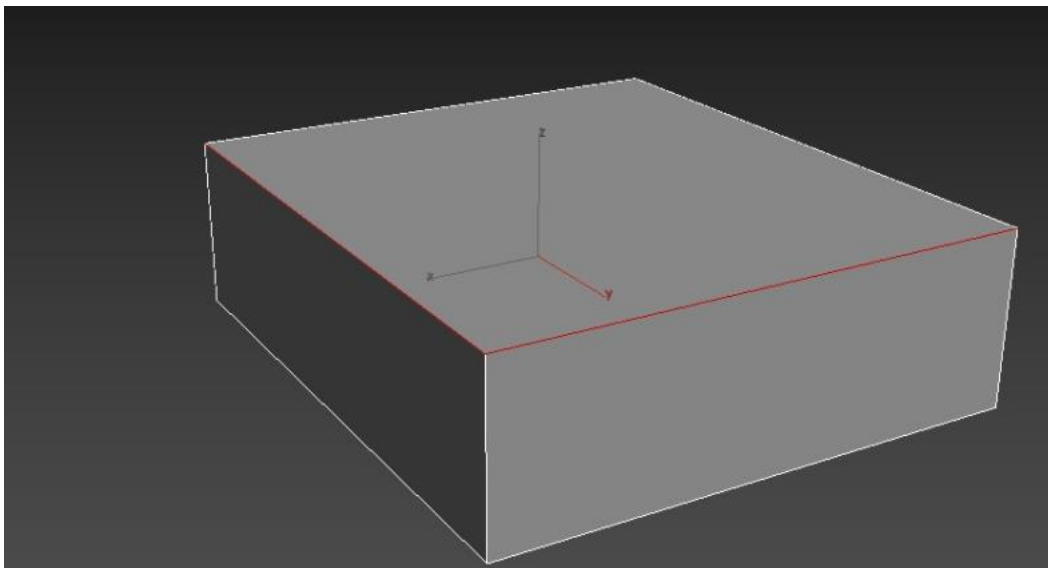


Рисунок 2.8 – Ребро [6]

Грань (Face) – це площина що утворюється при поєднанні щонайменше трьох ребер.

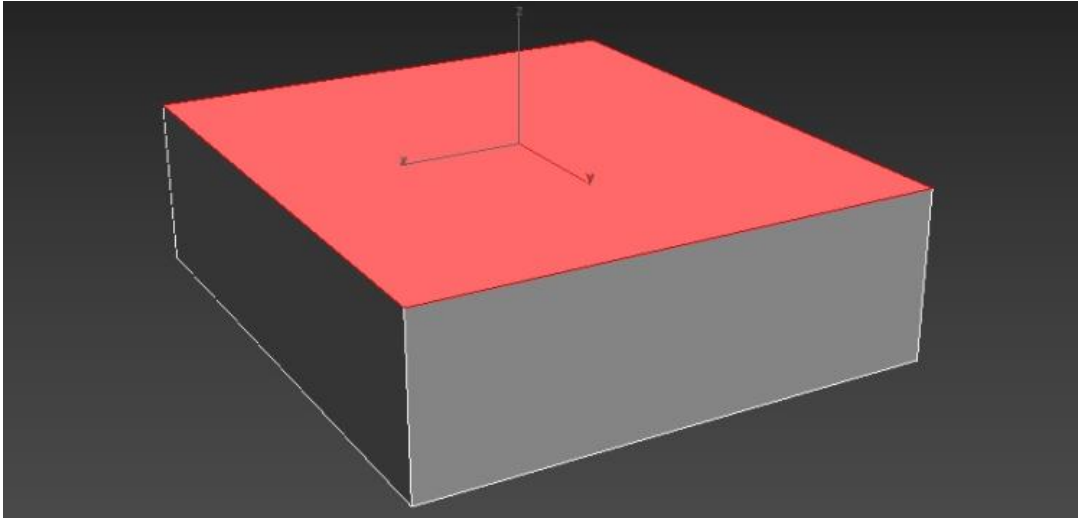


Рисунок 2.9 – Грань [6]

Часто буває, що грань плутають з полігоном, але насправді це одне й те саме, оскільки грань – це лише одна із складових полігона. Але саме вона й відповідає за те, як ми бачимо об’єкт і як на нього лягають текстури.

## 2.6 Аналіз використання полігональної сітки у 3D-скануванні

Полігональна сітка — це набір вершин, ребер і граней, які визначають форму багатогранного об’єкта в тривимірній комп’ютерній графіці. По суті, коли ми бачимо 3D-модель, ми уявляємо багатокутну решітку, оскільки саме компоненти полігональної решітки формують форму моделі, яку ми бачимо.

Зазвичай, коли ми дивимося на готовий і відрендерений 3D-об’єкт, він не відображається у формі сітки (рис.2.10). Однак під час створення 3D-об’єкта художники дуже часто використовують режим каркасного відображення, щоб правильно створити топологію та форми моделі (рис.2.11).



Рисунок 2.10 – Об'єкт без сітки [6]

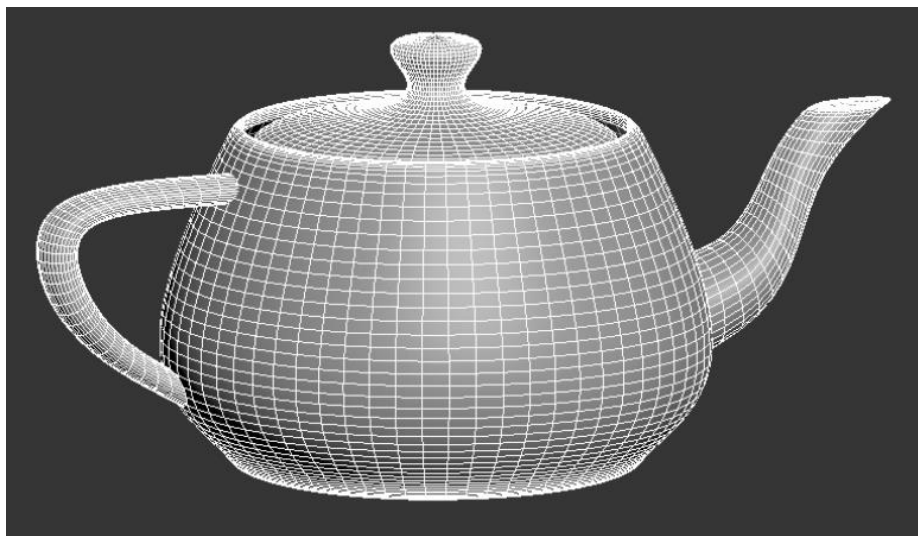


Рисунок 2.11 – Об'єкт з сіткою [6]

У цьому режимі художники можуть маніпулювати компонентами полігональної сітки для створення 3D-моделі правильної форми та топології [9].

## 2.7 Огляд видів полігонів у 3D

Можна виділити три основні типи полігонів:

Полігон з трьома вершинами – є найпростішим полігоном з можливих, оскільки має мінімальну кількість вершин та сторін для утворення площини (рис.2.12).

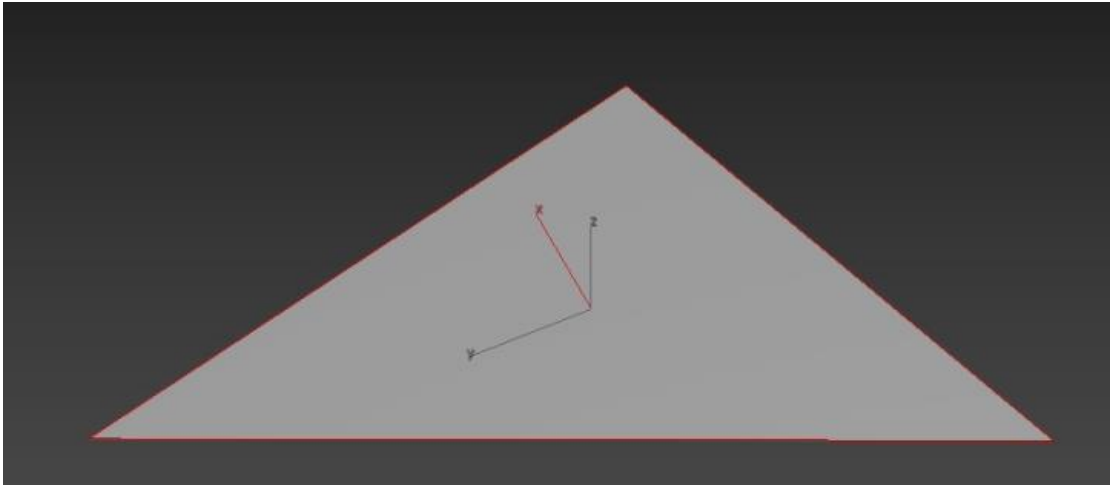


Рисунок 2.12 – Полігон з трьома вершинами [6]

На практиці створення моделей виключно з Tris є скоріше винятком, ніж правилом. Однак варто відзначити, що в комп'ютерній графіці існує велика кількість сфер, де на кінцевому етапі полігональна сітка повинна складатися виключно з трикутних багатокутників. Так, гарним прикладом є движки для комп'ютерних ігор, де 3D-модель повинна бути триангульованою [9].

Полігон з чотирма вершинами (рис.2.13).

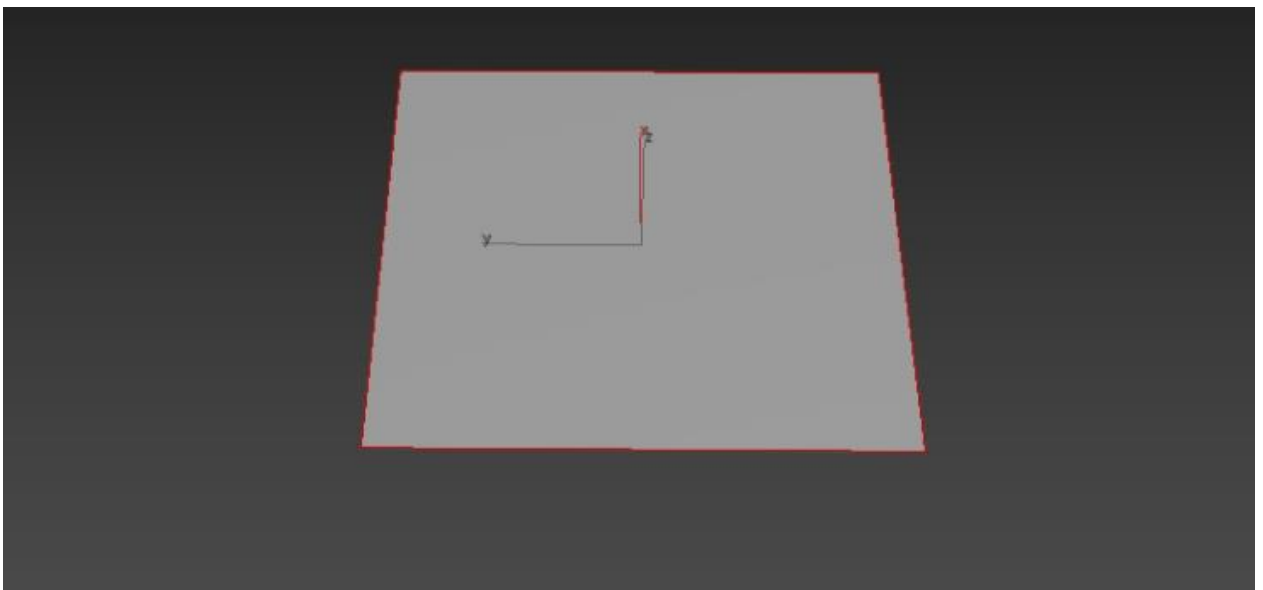


Рисунок 2.13 – Полігон з чотирма вершинами [6]

На практиці це найпоширеніший тип полігонів у 3D-графіці. Він має чотири сторони та робочу вершину, що робить його дуже зручним для побудови тривимірних фігур і маніпулювання полігональною сіткою. Це практично обов'язково при створенні 3D-моделей, які в майбутньому будуть анімовані або згладжені. При необхідності його можна легко перетворити в трикутний багатокутник. Все, що вам потрібно зробити, це розрізати його по діагоналі вручну або зробити тріангуляцією програмними методами [9].

Полігон з п'ятьма вершинами або більше (рис.2.14). Часто називають як "N-Gon"

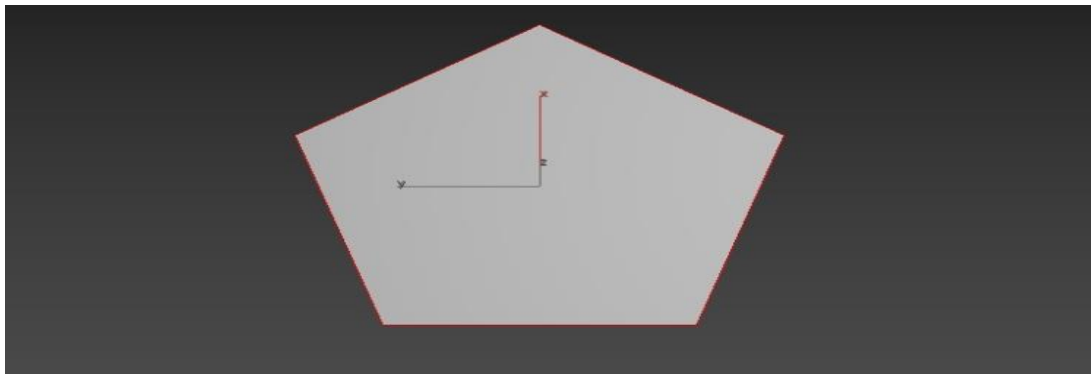


Рисунок 2.14 – Полігон N-Gon [6]

Має п'ять або більше сторін і вершин. Небажаний полігон практично в будь-якому процесі. Часто N-кутники викликають труднощі у вигляді артефактів із текстурованням, рендерингом та анімацією, а також погано згладжуються на вигнутих поверхнях.

## 2.8 Огляд методів текстуровання у 3D, та при скануванні

У комп'ютерній графіці та 3D скануванні текстура означає зображення, нанесене на поверхню. Дані текстури зберігаються в окремих файлах, де кожен піксель має відповідний колір з координатами U та V. Нанесення текстури на поверхню називається текстурованням або UV-трансформацією (рис. 2.15).

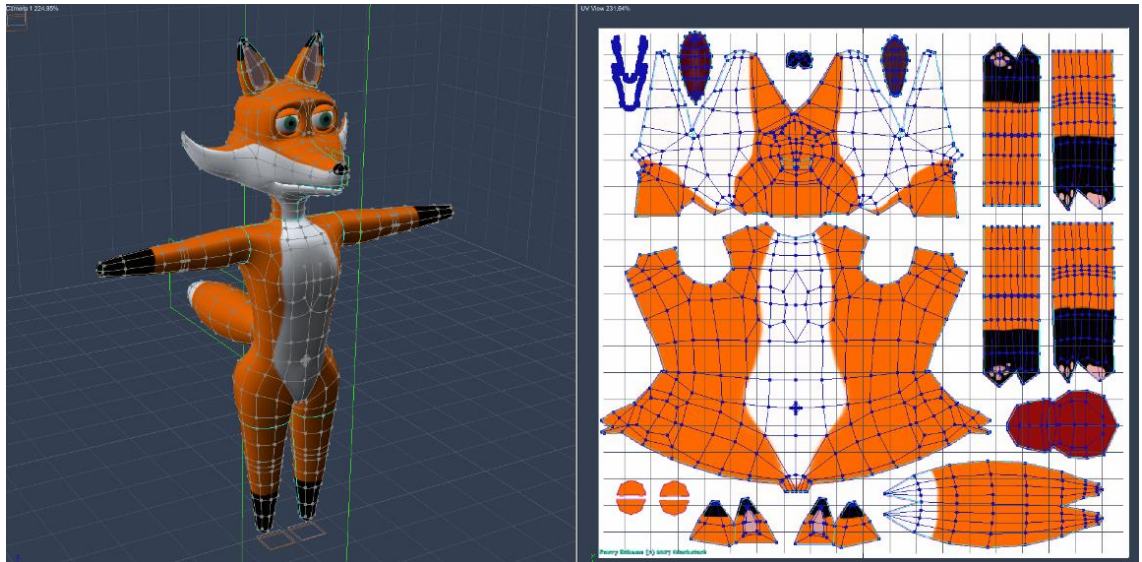


Рисунок 2.15 – UV розгортка та текстури [7]

Оскільки людський мозок покладається насамперед на тіні, кольори та градієнти для візуального сприйняття навколишнього світу, текстура є надзвичайно ефективним способом представлення форм без зміни геометрії. Цей метод часто використовують розробники комп'ютерних ігор для швидшого й ефективнішого відтворення графіки [10].

Виробники 3D рішень іноді оснащують сканери спеціальними лінзами для розпізнавання текстур - текстурними камерами.

## 2.9 Аналіз використання методу триангуляції

Триангуляція — це процес визначення точки в тривимірному просторі за допомогою її проєкцій на два або більше зображень. Для вирішення цієї проблеми необхідно знати параметри функції проєкції камери від 3D до 2D, представлені в найпростішому випадку матрицею камери.

Задача триангуляції теоретично тривіальна. Кожен піксель відповідає лінії в тривимірному просторі, всі точки, що лежать на цій лінії, проєктуються на один піксель. Якщо можна знайти пару відповідних точок у двох або більше зображеннях, які є проєкціями точки  $x$  у тривимірному просторі, лінії, утворені точками зображень, повинні перетинатися в точці  $x$ ,

а алгебраїчна значення координат точки  $x$  можна обчислити багатьма способами [11].

На практиці, однак, координати пікселя не можуть бути визначені з високою точністю. Різні типи спотворень, такі як геометричні спотворення лінзи, шум або помилки у визначенні положення локальних елементів, призводять до неточностей у визначенні координат відповідних пікселів. У результаті лінії, утворені відповідними точками, не завжди перетинаються в тривимірному просторі. Тоді завдання полягає в тому, щоб знайти координати тривимірної точки, яка оптимально проектується в точки на зображеннях. У літературі є кілька пропозицій щодо визначення оптимальності та методів знаходження оптимальної точки. Оскільки вони засновані на різних критеріях оптимальності, різні методи дають різні оцінки тривимірної точки  $x$  за наявності спотворень і шуму.

#### Метод середньої точки

Кожна з двох точок зображення у  $y'_1$  та  $y'_2$  має відповідну проекційну лінію, позначаємо їх  $L'_1$  та  $L'_2$ , які можна визначити враховуючи матриці камер  $C_1, C_2$ . Нехай  $d$  – функція відстані між лінією  $L$  та точкою  $x$  така, що  $d(L, x)$  – евклідова відстань між  $L$  та  $x$ . Метод середньої точки знаходить точку  $x_{\text{est}}$  яка мінімізує

$$(L'_1, x)^2 + d(L'_2, x)^2 \quad (2.8)$$

Виявляється, перетин  $x_{\text{ext}}$  лежить точно в середині найкоротшого відрізка, який з'єднує дві проекційні лінії.

За допомогою істинної матриці

Обчислення координат у прсторі  $(x_1, x_2, x_3)$  з відповідних нормованих координат зображення  $(y_1, y_2)$  та  $(y'_1, y'_2)$ . Якщо істотна матриця відома та були визначені відповідні перетворення повороту та зсуву можна використати алгоритм описаний у роботі Лонгве-Гігінса. Нехай  $r_k$  позначає рядок  $k$  матриці обертаня  $R$ :

$$R = \begin{pmatrix} -r_1 - \\ -r_2 - \\ -r_3 - \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Поєднуючи наведені вище співвідношення між тривимірними координатами в двох системах координат та проєкцією 3D точок на 2D зображення

$$y'_1 = \frac{x'_1}{x'_3} = \frac{r_1 * (x-t)}{r_3 * (x-t)} = \frac{r_1 * (y-t/x_3)}{r_3 * (y-t/x_3)} \quad (2.10)$$

або

$$x_3 = \frac{(r_1 - y'_1 r_3) t}{(r_1 - y'_1 r_3) y} \quad (2.11)$$

Після знаходження  $x_3$  дві інші координати можуть бути знайдені як

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = x_3 \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Наведений розв'язок не є унікальним. Почавши із  $y'_2$ , можемо отримати  $x_3$  відповідно

$$x_3 = \frac{(r_2 - y'_2 r_3) * t}{(r_2 - y'_2 r_3) * y} \quad (2.13)$$

В ідеальному випадку, коли камера відповідає ідеальній камері-обскури, а шум відсутній і точки можуть бути визначені точно, ці два значення для  $x_3$  співпадатимуть. На практиці це не завжди так, і може бути корисним об'єднати значення  $x_3$  наприклад, як середнє арифметичне.

Фотограмметрія використовує способи та прийоми різних дисциплін, в основному, запозичені з оптики та проектної геометрії. У найпростішому випадку просторові координати точок об'єкта визначаються шляхом вимірювань, що виконуються за двома або більшими фотографіями, знятими з різних положень. У цьому кожному зображенні відшуковуються загальні точки. Потім промінь зору проводиться від розташування камери до точки на

об'єкті. Перетин цих променів і визначає розташування точки у просторі. Більш складні алгоритми можуть використовувати іншу, відому заздалегідь, інформацію про об'єкт: наприклад, симетрію елементів, що його складають, в певних випадках дозволяє реконструювати просторові координати точок лише по одному фотографічному зображенню. Тому саме метод фотограметрії актуальний для створення якісних 3D моделей.

## 3 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБІРУ ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ 3D СКАНУВАННЯ

### 3.1 Обґрунтування вибору обладнання для 3D сканування

Однією з задач кваліфікаційної роботи було: сканування об'єкту методом фотограмметрії доступними засобами, наприклад якщо у Вас є звичайний смартфон, та ноутбук. Тому я обрав звичайний шкіряний черевик, який я розмістив на кухонному столі. Він має багато нерівностей, що ускладнює процес сканування.

Для фотограмметрії краще підходить хмарна погода, якщо це зйомка на вулиці, але я робив це вдома на кухні, і тому використовував штучне світло (лампа).

Своє дослідження я проводив за допомогою смартфона POCO M4 PRO. Основна камера – 64 + 8 + 2 Мп. Звісно це не є професійне обладнання, але цього достатньо щоб продемонструвати як працює ця технологія. Для цього я обрав наступні налаштування:

- баланс білого повинен бути однаковий протягом усієї зйомки;
- експокорекція (оскільки наш черевик такого ж кольору як і плитка на кухні, експокорекцію ставим -0.5, щоб червик не зливався з фоном);
- ISO – 300.

Головна умова при скануванні об'єктів – це отримання максимально чітких кадрів. Треба слідкувати за експокорекцією, зоною фокусування.

Обравши наш об'єкт для сканування та налаштувавши обладнання, ми можемо переходити до сканування.

Необхідні умови для створення якісної 3D-моделі:

- під час зйомки постійно рухаюся навколо об'єкта, тому що, якщо я буду стояти на одному місці, я отримаю тільки панораму, яка ніяк не допоможе мені у створенні 3D-моделі, і навпаки внесе помилки в

скан;

- чим більше зроблено знімків, тим чіткіше вийде 3D-модель;
- на камері встановлюємо максимально роздільну здатність;
- кожна точка поверхні сцени повинна бути чітко видно принаймні на двох високоякісних зображеннях. Тут більше – краще, і треба прагнути до принаймні трьох зображень, оскільки більшість програм використовують обчислення триангуляції для отримання результатів;
- треба захоплювати весь об'єкт, та рухатися навколо нього, а потім зосередитися на деталях. Підходити не різко, а поступово;
- не змінювати кут огляду більш ніж на 30 градусів;
- під час зйомки об'єктів, завжди треба рухатись і закінчувати зйомку в тому самому місці, де й почали;
- не зупинятися на одному колі, робити кілька обертів з різної висоти;
- повертаємо камеру (горизонтальний і вертикальний рух забезпечує краще калібрування);

На рисунку 3.1 показано об'єкт сканування (черевик). Об'єкти, які потрібно сфотографувати ближче:

- люверси;
- носок;
- язичок;
- шнурки;
- логотип.



Рисунок 3.1 – Об'єкт сканування

В роботі потрібно було зробити акценти на необхідних планах об'єкта. На рисунках ми бачимо сфотографовані загальний план об'єкта (рис.3.2), та детальний план об'єкта (рис.3.3).



Рисунок 3.2 – Загальний план

Роблячи загальний план, треба захоплювати весь об'єкт та рухатись по колу кілька разів змінюючи висоту знімків. Інтервал між знімками треба робити приблизно 30 градусів.



Рисунок 3.3 – Детальний план

Роблячи детальний план треба фокусуватися на дрібних деталях, робити кілька знімків з різних положень.

Для подальшої роботи було зроблено більше 22 фотографій.

3.2 Аналіз програм, які використовуються для створення 3D-моделей за допомогою технології фотограмметрії

Як показав оглід літературних джерел фотограмметрія фоторгаметрія має не аби який попит, і такі великі компанії, як Bentley та Pix4D, займають значну частку ринку програмного забезпечення для фотограмметрії та продовжують радувати своїх акціонерів серйозним зростанням їх фінансових

показників. Користувачі Pix4D вже звикли до того, що якісне програмне забезпечення для фотограмметрії є досить дорогим. Наприклад, річна підписка на Pix4Dv1m коштує 120.000 грн. А «вічна» ліцензія Pix4Dmapper коштує 159.000 грн [12].

Зробомо аналіз програмних продуктів, які можна завантажити безкоштовно.

### 3.2.1 Аналіз програми для фотограмметрії Meshroom

Meshroom — це безкоштовне програмне забезпечення для фотограмметрії з відкритим кодом (рис.3.4). Він заснований на потужній платформі для фотограмметрії AliceVision.

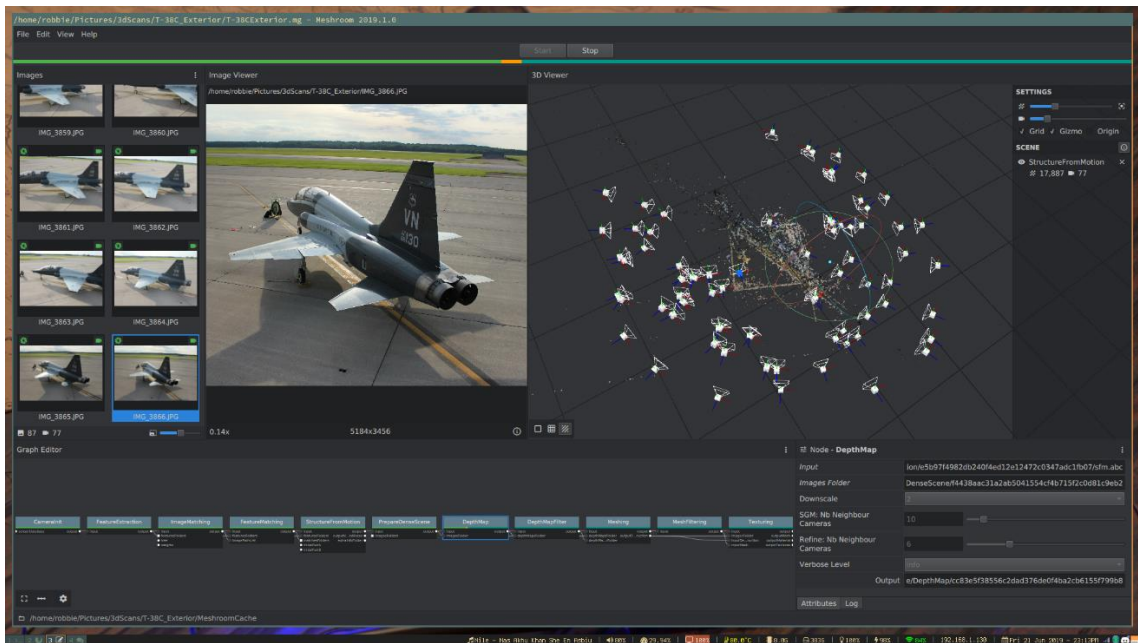


Рисунок 3.4 – Meshroom [8]

По суті, програмне забезпечення Meshroom — це інтерфейс, який об'єднує багато невеликих модулів, які потрібні для створення тривимірної моделі. У багатьох інших програмах такі модулі потрібно активувати та налаштовувати. Але в Meshroom всі модулі утворюють конвеєр завдань, і для отримання результату достатньо натиснути одну кнопку «Start».

Незважаючи на простоту використання, кожен параметр редагування фотографії можна налаштувати, щоб отримати саме той результат, який ви хочете. Наприклад, можна отримати дійсно вражаючі результати за параметрами текстур, що дозволить використовувати створені моделі в професійній діяльності. Спеціально для користувачів Autodesk Maya програма Meshroom має плагін для створення 3D-моделі, який дозволяє експортувати. Цей плагін можна безкоштовно завантажити з веб-сайту Meshroom [12].

### 3.2.2 Аналіз програми для фотограмметрії VisualSFM

VisualSFM — це програмне забезпечення для фотограмметрії, яке використовує метод створення 3D-об'єктів із послідовностей плоских зображень (SfM) для створення хмар точок. Користувач може працювати як в графічному інтерфейсі, так і з командного рядка (рис.3.5).

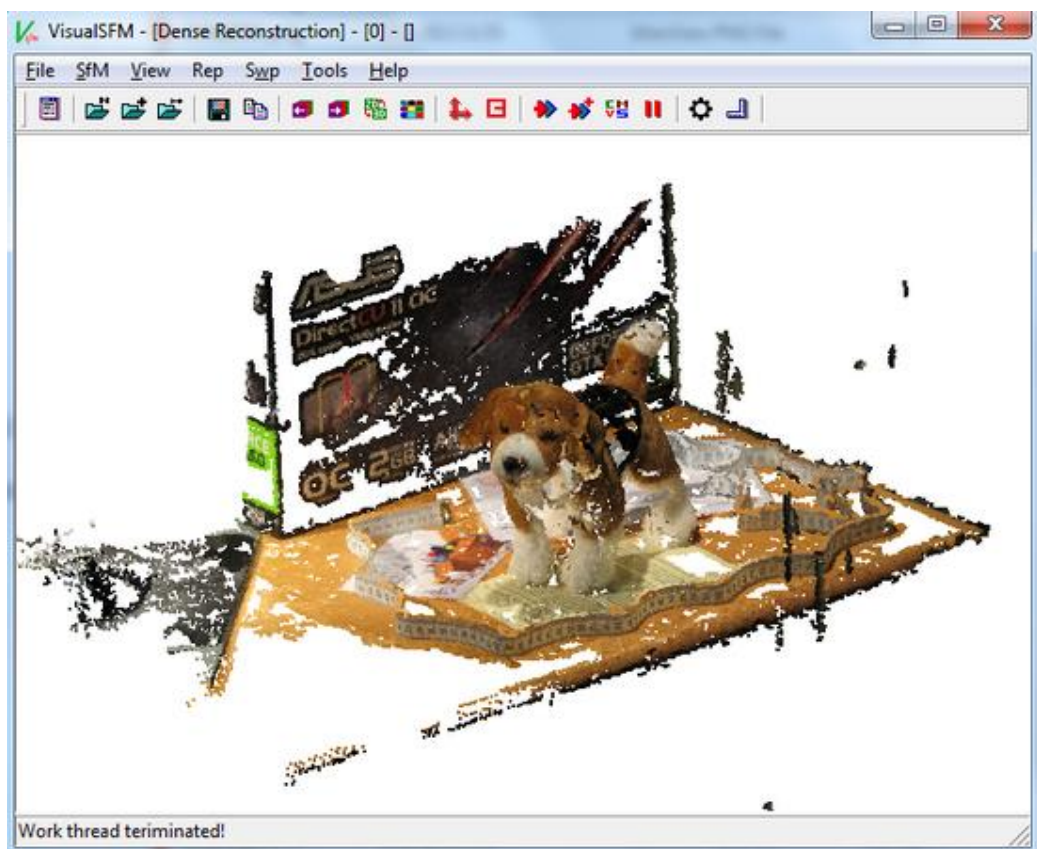


Рисунок 3.5 – VisualSFM [9]

Ця програма поєднала кілька розробок автора Changang Wu: SIFT на GPU (SiftGPU), Multicore Bundle Adjustment і Towards Linear-time Incremental Structure from Motion. Великою перевагою програми є швидкість роботи і алгоритми, що забезпечують ефективну роботу на системах з багатоядерними графічними процесорами.

### 3.2.3 Аналіз програми для фотограмметрії Regard3D

Regard3D — це безкоштовна фотограмметрична програма з відкритим вихідним кодом, яка використовує метод «Структура з руху» (SfM) для створення 3D-моделей (рис.3.6).

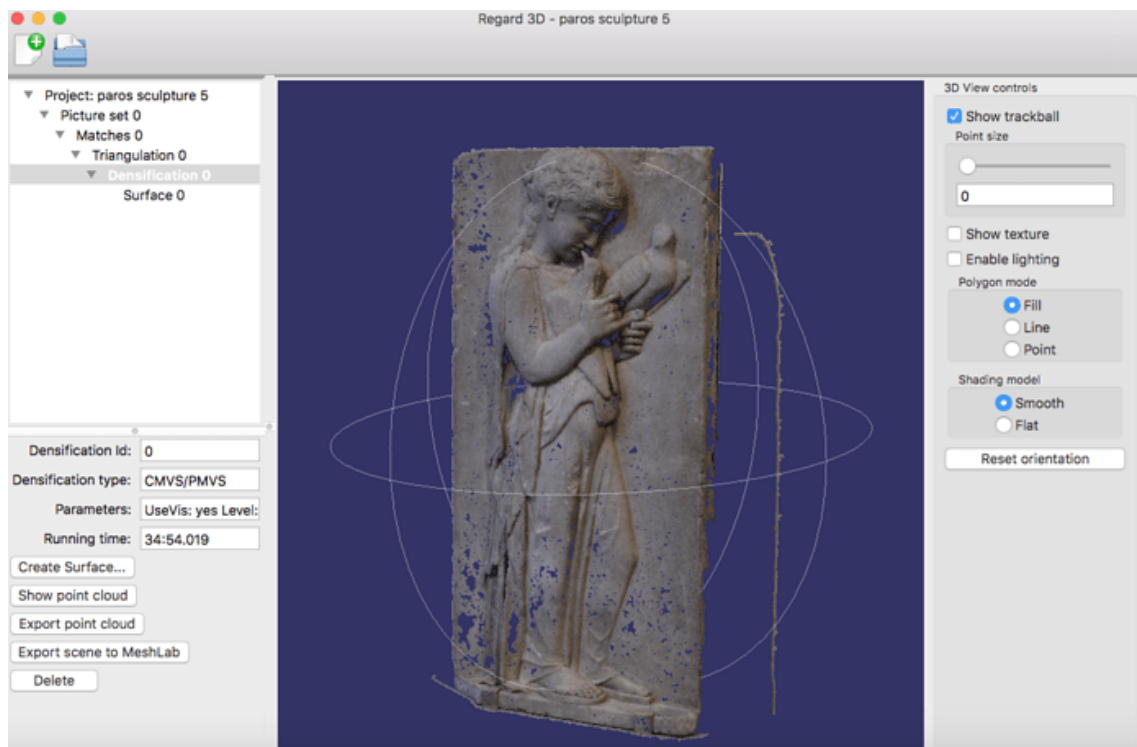


Рисунок 3.6 - Regard3D [10]

Хоча Regard3D можна безкоштовно завантажити та використовувати, це дуже просунуте програмне забезпечення. Вивчення цієї програми займе

багато часу, щоб зрозуміти всі тонкощі, але нагородою за витрачений час стануть якісні 3D моделі.

У цій програмі ви можете редагувати хмари точок перед відправкою команди на створення тривимірної поверхні об'єкта. Якщо ви починаєте вивчати фотограмметрію, ця програма стане гарним початком для вас, щоб заглибитися в цей цікавий предмет. Відвідайте веб-сайт [Regard3D](http://Regard3D.com), щоб отримати докладні посібники та навчальні посібники, щоб розпочати роботу.

### 3.2.4 Аналіз програми для фотограмметрії OpenMVG

OpenMVG (Multiple View Geometry) — це безкоштовна бібліотека з відкритим вихідним кодом, популярна серед науковців із комп'ютерного зору та призначена для спільноти Multiple View Geometry (рис.3.7). Він призначений для легкого доступу до класичних розв'язків задач у режимі Multiple View Geometry (геометрія кількох видів) та їх вирішення [12].

OpenMVG легко читати, легко використовувати та змінювати спільноту.

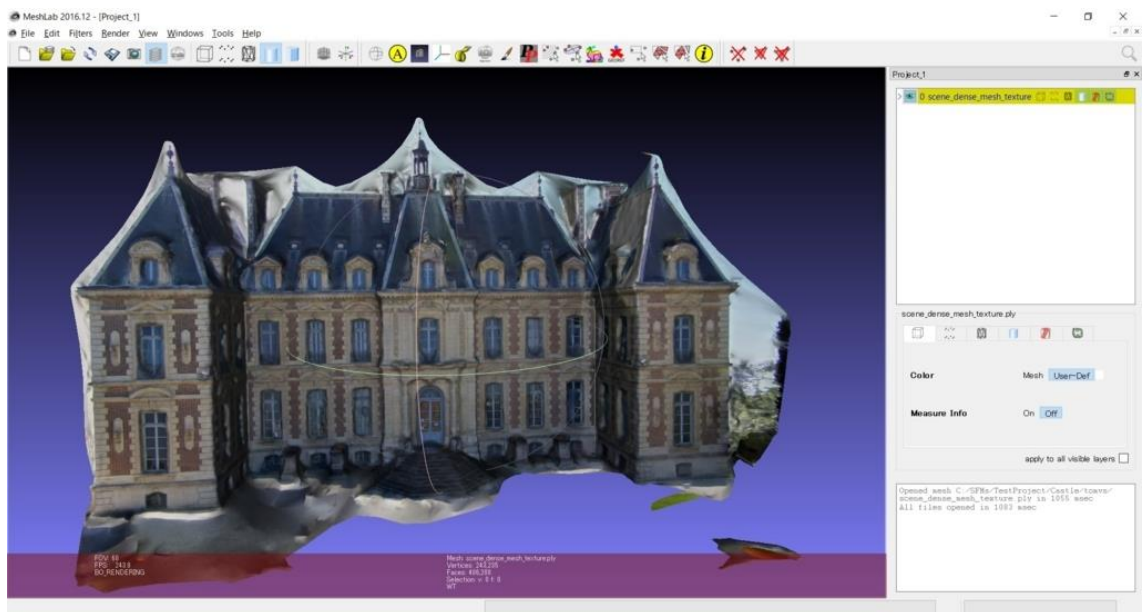


Рисунок 3.7 – OpenMVG [11]

Кожен модуль цієї бібліотеки неодноразово тестується та перевіряється спільнотою, що робить його надзвичайно надійним. Цей модуль фотограмметрії потребує компіляції та певного досвіду роботи з Windows або Linux. Ви можете встановити роздільну здатність у пікселях на сантиметр для використання в мобільних іграх і до високої роздільної здатності для побудови модельних будівель.

### 3.2.5 Аналіз програми для фотограмметрії Colmap

COLMAP — це безкоштовне програмне забезпечення для фотограмметрії, яке можна завантажити з Github. За бажанням можна вибрати роботу з командного рядка або з графічним інтерфейсом. Як і більшість програм фотограмметрії в нашому списку, COLMAP може автоматично генерувати 3D-об'єкти з фотографій, зроблених камерою з об'єктивом, або обробляти зображення, зроблені стереокамерою (рис.3.8).

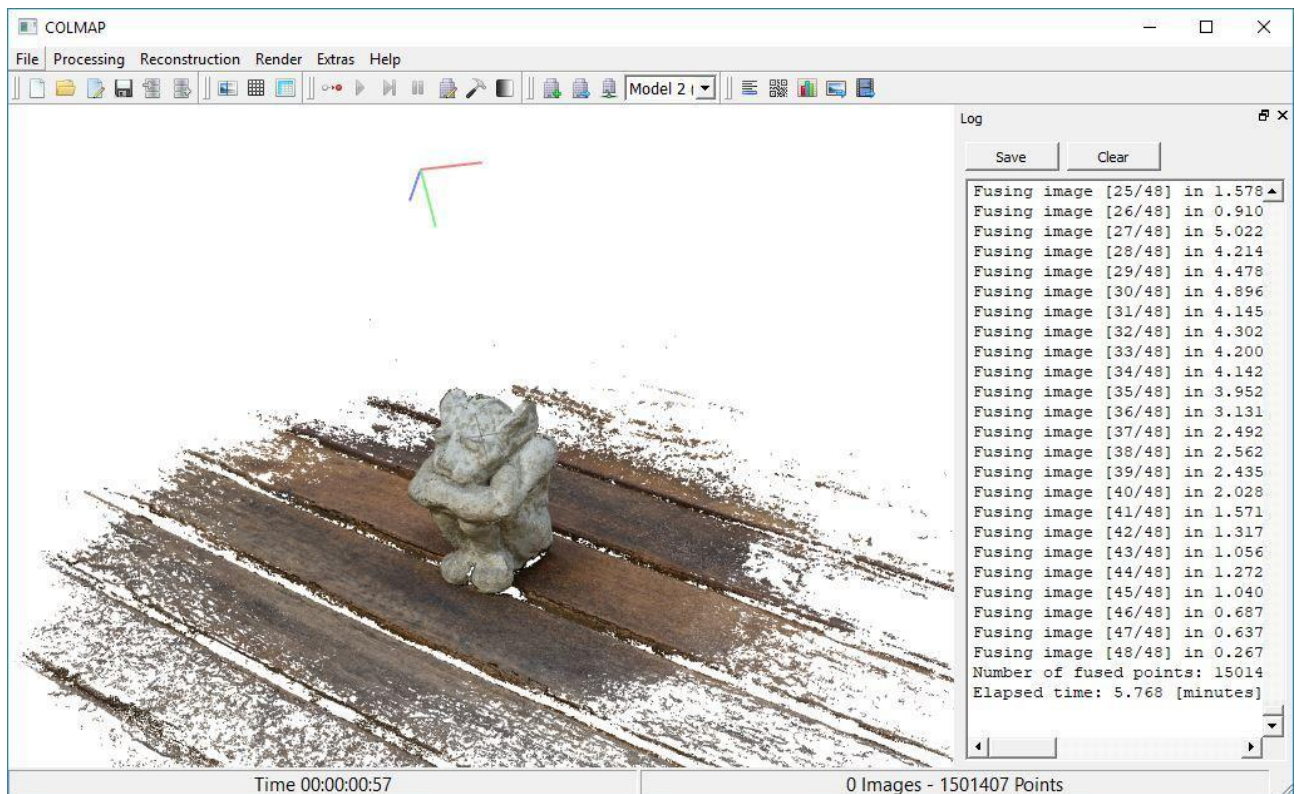


Рисунок 3.8 – Colmap [12]

Програма Colmap створена ентузіастами та має відкритий код, має багато різних плагінів і доповнень. Усі ці додатки встановлюються за потреби для розширення стандартних функцій цієї чудової безкоштовної програми фотограмметрії. Наприклад, можна точно визначити параметри камери, якою був зроблений знімок. Те ж саме стосується і процесу отримання додаткового утворення з фото-файлу, це допоможе поліпшити отриманий результат. Хоча програма може експортувати тривимірну поверхню, її алгоритми працюють лише з щільною хмарою точок у вікні огляду. На жаль, програма не вміє працювати з поверхневою сіткою 3D-об'єкта, тому для очищення та покращення 3D-моделі доводиться використовувати сторонні програми, такі як MeshLab [12].

Щоб створити хмару щільних точок, достатньо використовувати COLMAP без плагінів у кілька кроків. Досвідчені користувачі можуть налаштувати багато різних параметрів за допомогою програми. Не всі вони інтуїтивно зрозумілі новачкові. Щоб швидко отримати результат в COLMAP, не потрібно змінювати параметри, достатньо використовувати параметри за замовчуванням. Параметри за замовчуванням є компромісом між якістю та швидкістю.

### 3.2.6 Аналіз програми для фотограмметрії MicMac

MicMac — це безкоштовне програмне забезпечення для фотограмметрії з відкритим кодом, розроблене Національним географічним інститутом Франції та Національною школою географічних наук Франції (рис.3.9).

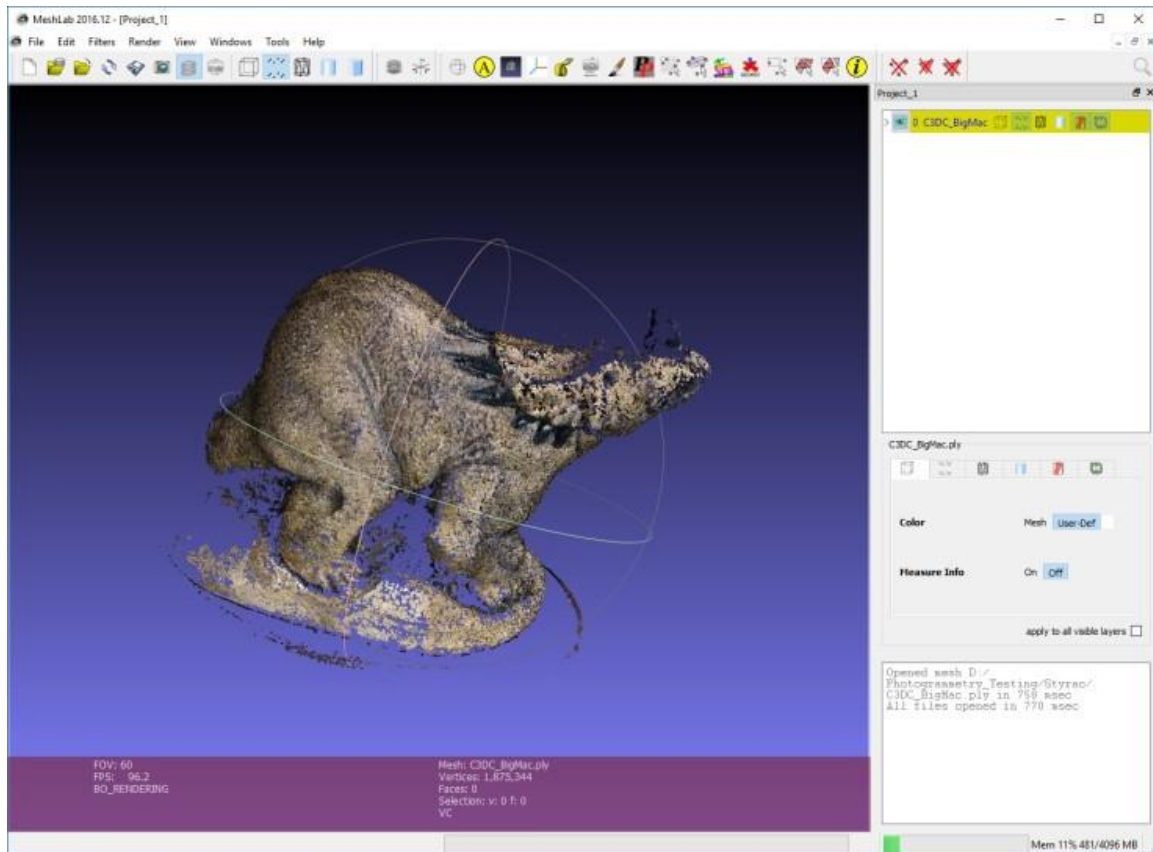


Рисунок 3.9 – МісМас [13]

Його величезний і складний функціонал в основному підходить для професійних користувачів або вчених, але звичайні користувачі також можуть використовувати його для створення ортопланів і різних 3D-моделей.

Програма МісМас створена з урахуванням досвіду викладачів та науковців. Ця фотограмметрична програма виявилася універсальним інструментом, який успішно використовується в таких галузях, як картографія, захист навколишнього середовища, лісове господарство, охорона пам'яток і приватні охоронні компанії.

За допомогою МісМас ви можете створювати 3D моделі та ортофотоплани. Крім того, це програмне забезпечення для фотограмметрії може без обмежень обробляти об'єкти будь-якого типу та будь-якого масштабу. Підходить як для обробки аерофотознімків великих ділянок землі, так і для сканування невеликих об'єктів. Програма може обробляти відеофайли для створення моделей.

Програма має засоби, які дозволяють використовувати її в метрології та геодезії. На веб-сайті МісМас є докладні посібники та посібники, які допоможуть вам швидко розпочати роботу.

### 3.2.7 Аналіз програми для фотограмметрії RealityCapture

RealityCapture (RC) — це фотограмметричне програмне забезпечення для створення 3D-моделей із невпорядкованих фотографій (наземних і/або повітряних) або лазерних сканувань без швів [13]. Найпоширенішими сферами його поточного використання є культурна спадщина (мистецтво та архітектура), повне сканування тіла, ігри, геодезія, картографування, візуальні ефекти (VFX) і віртуальна реальність (VR) загалом (рис. 3.10)

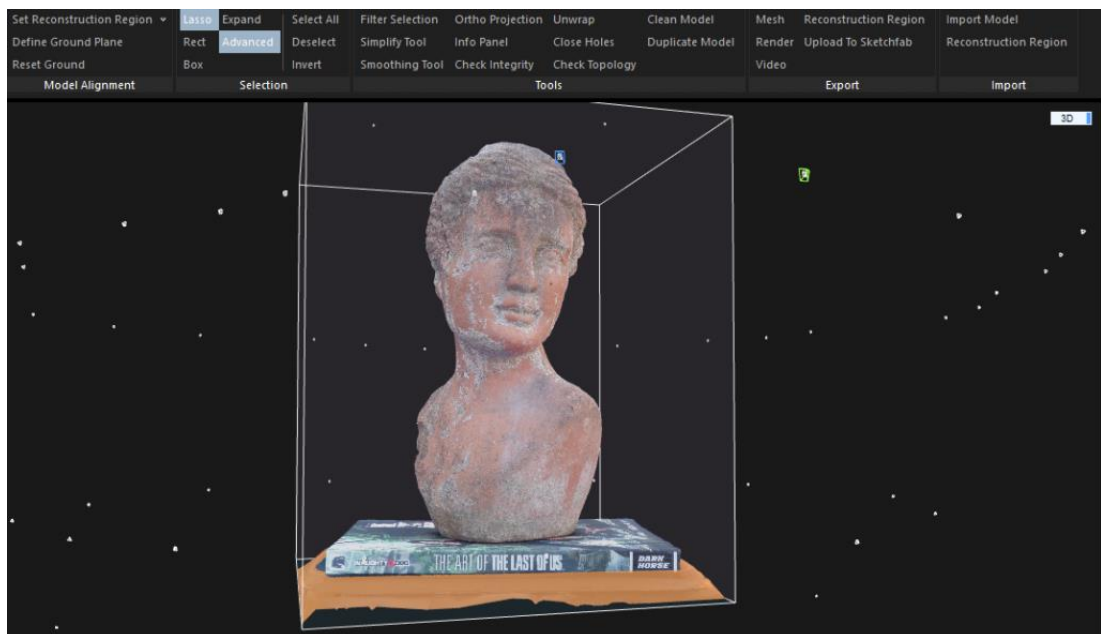


Рисунок 3.10 – RealityCapture [14]

Після огляду програмного забезпечення було обрано Meshroom та RealityCapture, оскільки вони дуже зручні для користувача та мають простий інтерфейс. Вони також мають можливості для експорту моделей до Blender, оскільки там відбувається подальше редагування моделей.

Характеристики системи на якій виконувалась робота:

- операційна система: Windows 10 Pro;

- процесор: Intel Core i5 4690k;
- відеокарта: Geforce GTX 970;
- оперативна пам'ять: 16 Гб;
- жорсткий диск: 512 Гб SSD.

## 4 СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ ФОТОГРАМЕТРІЇ У ПРОГРАМІ MESHROOM ТА REALITYCAPTURE

### 4.1 Створення 3D-моделі у програмі Meshroom

Створення 3D-моделі за проходить в декілька етапів. Для початку, треба завантажити потрібні нам фотографії, для цього треба перетягнути фотографії у вікно “Images” (рис.4.1).

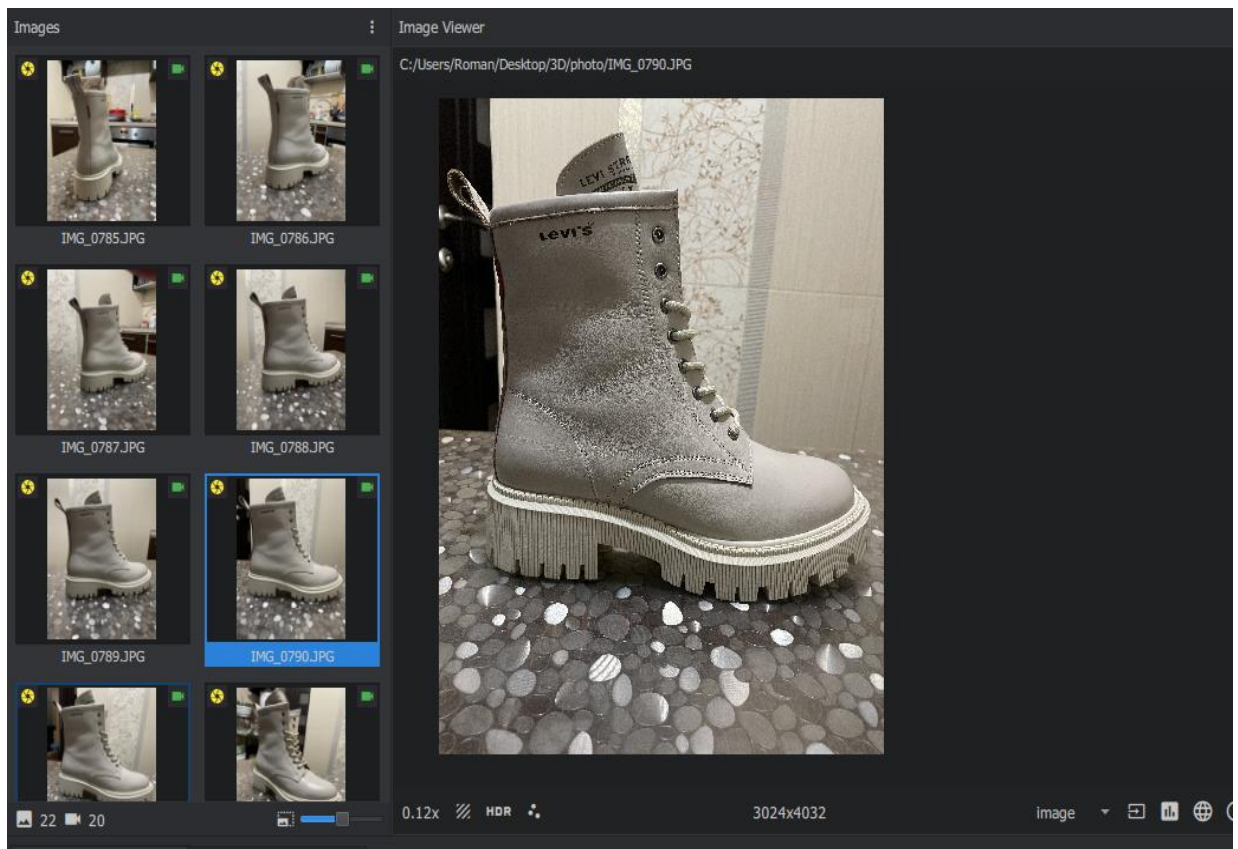


Рисунок 4.1 – Завантаження фотографій у програму

Програма автоматично перевірить кожену фотографію та виведе зелений або жовтий індикатор біля кожної фотографії. Якщо з'явився червоний індикатор слід видалити цю фотографію, щоб вона не заважала коректному створенню 3D-моделі. Після завантаження та аналізу зображень натисніть кнопку «Start», і програма розпочне сканування.

На рисунку 4.2 показано послідовність дій, необхідних для створення 3D-моделі з фотографій.

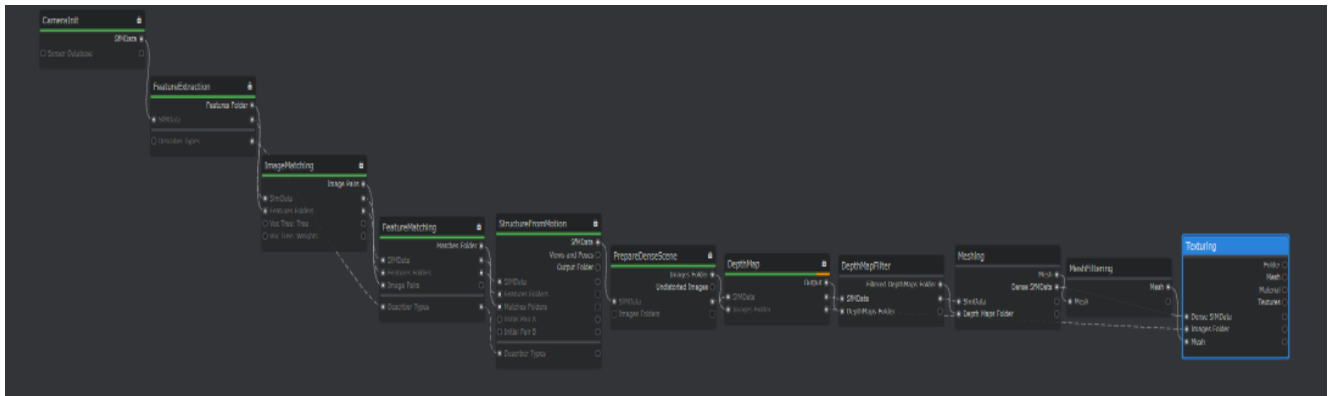


Рисунок 4.2 – алгоритм для створення 3D-моделі (Nodes).

1. CameraInit. Створює файл, що містить інформацію про камеру, розмір матриці тощо. Етап виконується одразу після завантаження зображень, ще до моменту натискання кнопки “Start”.
2. FeatureExtraction. На цьому кроці витягуються елементи з зображень.
3. ImageMatching - це попередня обробка зображень. Саме тут Meshroom дізнається, які зображення мають сенс одне для одного.
4. FeatureMatching. Пошук збігів між зображеннями.
5. StructureFromMotion. На цьому етапі визначаються положення камер і властивості цих камер. На цьому етапі створюється хмара точок. Біля фотографій з’явиться значок камери. Зелений/Жовтий - все добре, фото підходить і дані з нього використовуються. Червоний - фотографії не підходять, програма не може отримати з них дані.
6. PrepareDenseScene. На цьому етапі Meshroom робить щось для боротьби зі спотворенням зображення.
7. DepthMap. Генерація карт глибини. У цій фазі Meshroom працює найдовше. Для кожного зображення створюється карта глибини у форматі EXR.
8. DepthMapFilter. Карти глибини спочатку не дуже послідовні. Деякі карти глибини “бачать” території, покриті іншими картами. Стадія DepthMapFilter забезпечує послідовність.

9. Meshing. Генерація полігональної сітки.

10. MeshFiltering. Виправляє та покращує згенеровану сітку. Розгладжування, видалення великих трикутників, видалення дрібних шматочків сітки.

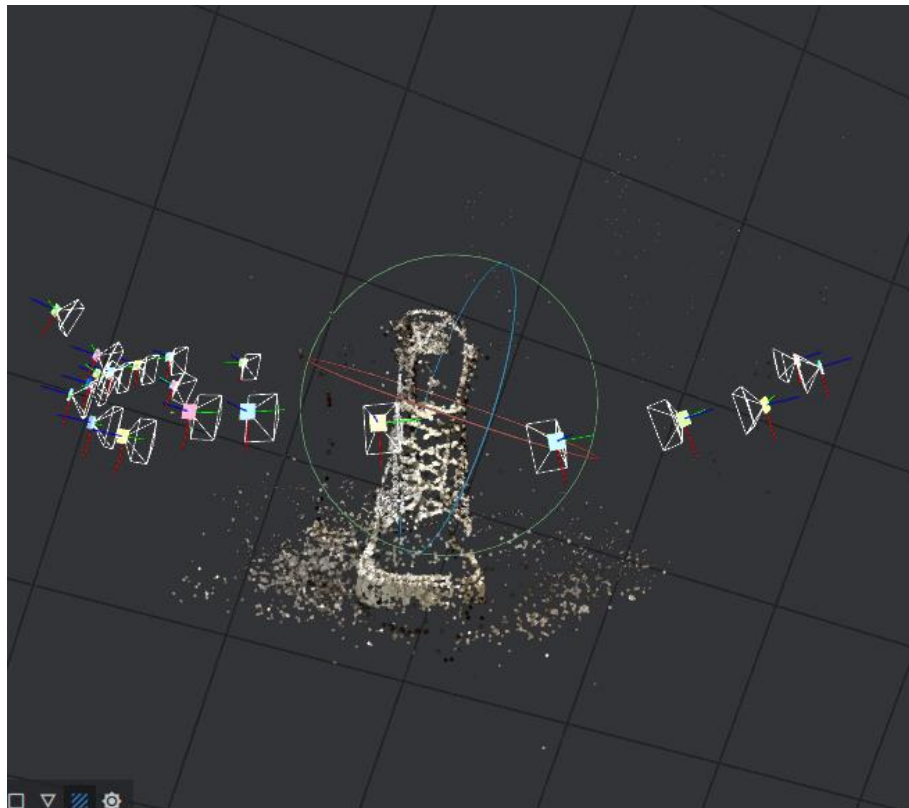
11. Texturing. Створення UV- розгортки і проектування текстур на них.

12. Всі тіні і відблиски залишаються на місці (процес запікання текстур).

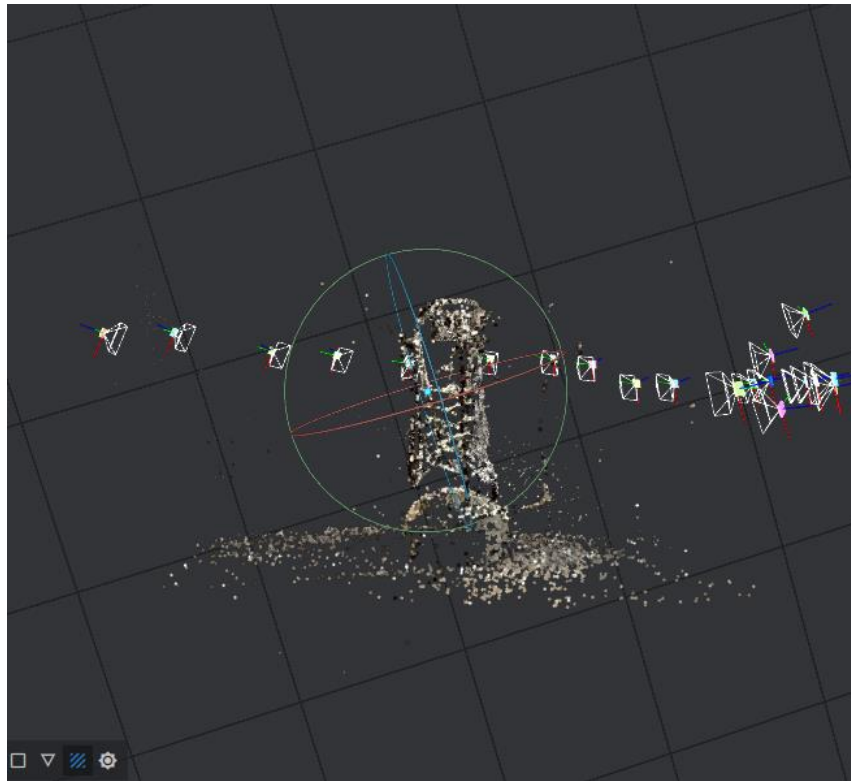
Попереднє налаштування програми:

- для початку треба зайти у елемент “ FeatureExtraction”, який знаходиться у ланцюгу послідовності дій програми, та у вкладці Attributes – Descriptor виставити значення ultra, це зробить модель більш точною, але займе більше часу;
- у елементі “Texturing” у полі “Texturing size” обираємо 16384, це розмір текстури. Чим він більший, тим краща текстура.

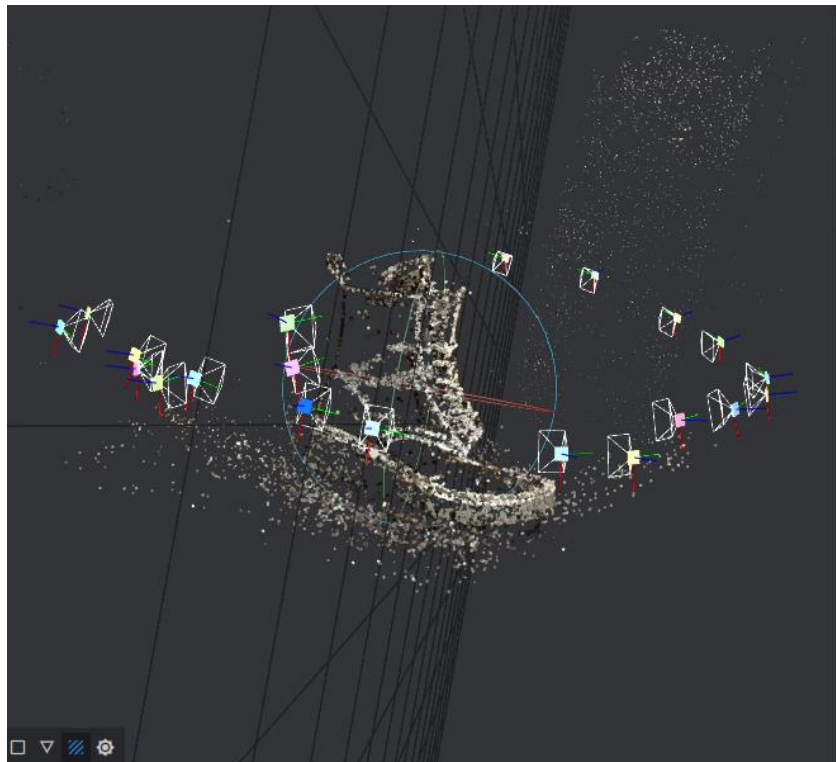
Після того, як програма пройде етап “StructureFromMotion”, у вікні “3D Viewer” з’явиться хмара точок (рис. 4.3).



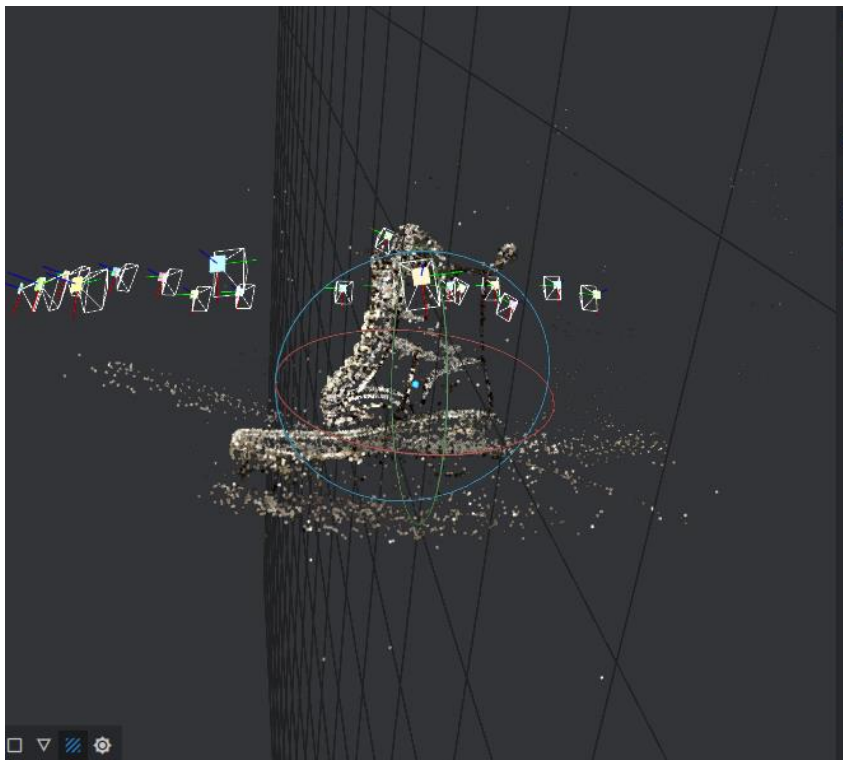
(a) – Хмара точок з фронтального ракурсу



(б) – Хмара точок з заднього ракурсу



(в) – Хмара точок з бокового ракурсу справа



(г) – Хмара точок з бокового ракурсу зліва

Рисунок 4.3 Хмара точок з різних ракурсів

Справа на екрані знаходиться вікно «Display» (рис. 4.4), там можна збільшити або зменшити розмір камер і точок, чи повністю їх приховати (рис. 4.5). У вкладці «Scene», якщо натиснути на «око», можна показати або приховати створені програмою елементи (сітки, текстури, хмару точок). Натиснувши на хрестик поруч, ви можете видалити елемент зі сцени, але не з усієї програми.

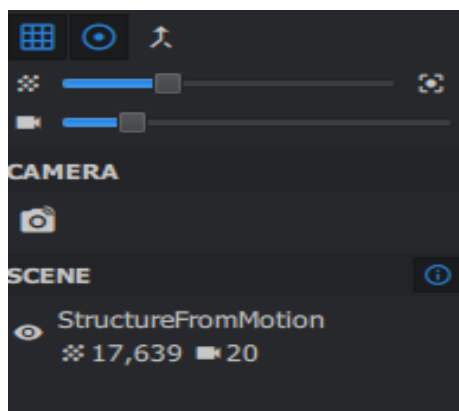


Рисунок 4.4 – Display

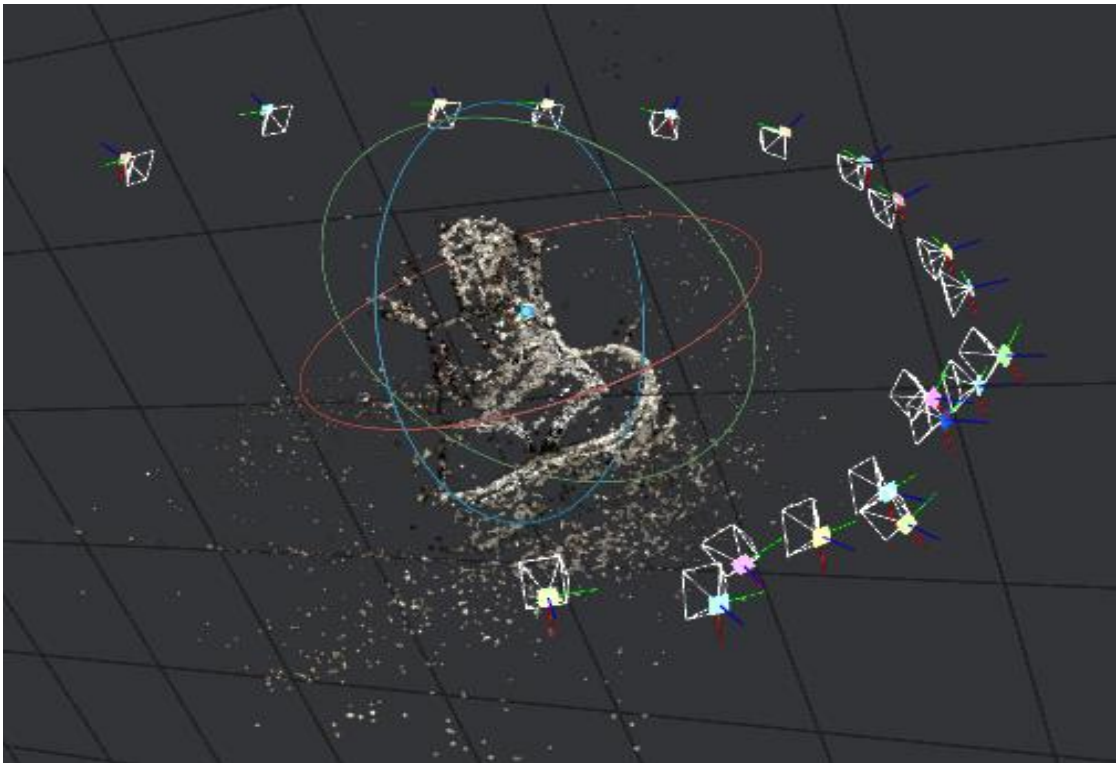


Рисунок 4.5 – Відображення положення камер та точок

Після перенесення моделі у програму Blender ми отримали таку модель (рис.4.7), тут є багато зайвих деталей, тому краще їх видалити.

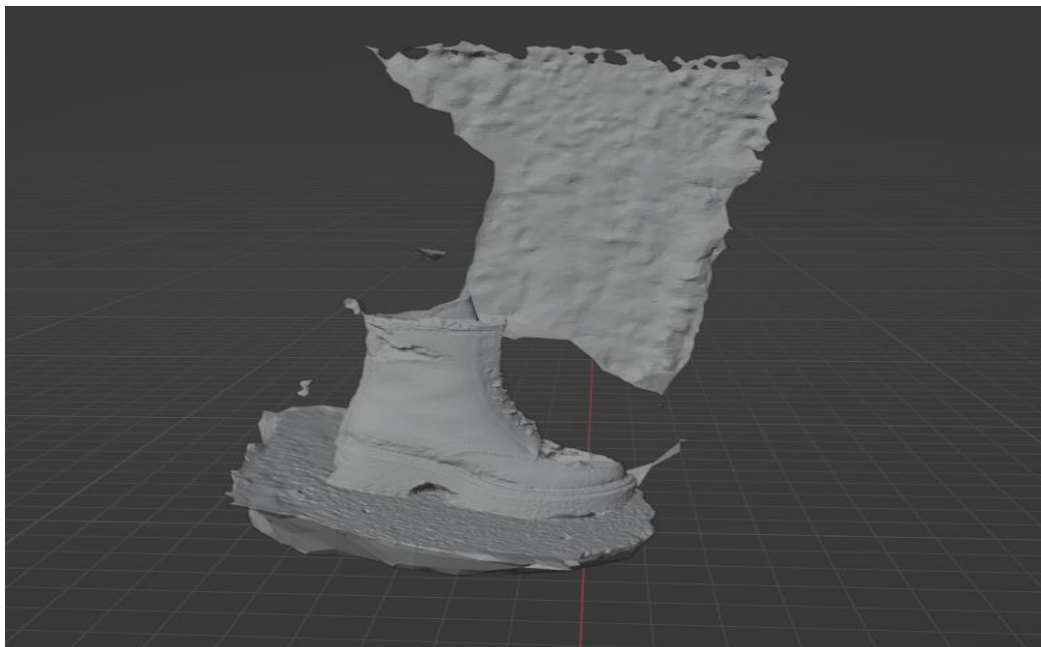


Рисунок 4.6 – Результат сканування

Після видалення зайвих деталей, наша модель виглядає таким чином (рис.4.7), та модель з текстурою (рис.4.8).



Рисунок 4.7 – Модель після видалення зайвого



Рисунок 4.8 – Модель з текстурою

## 4.2 Створення 3D-моделі у програмі RealityCapture

Тут так само як в Meshroom, для початку завантажуюємо потрібні нам знімки до програми (рис.4.9). Для цього натискаємо “Inputs” або “Folder”, при натисканні “Inputs” можна самостійно обрати тільки ті зображення, які необхідні, а при натисканні “Folder” обирається ціла папка з зображеннями.

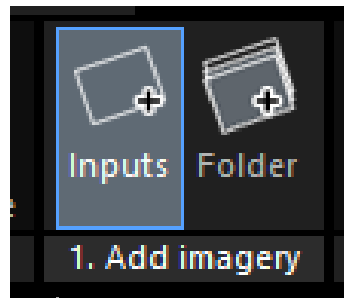


Рисунок 4.9 – Завантаження знімків у програмі RealityCapture

Після завантаження зображень ми їх можемо побачити у вікні програми (рис.4.10).

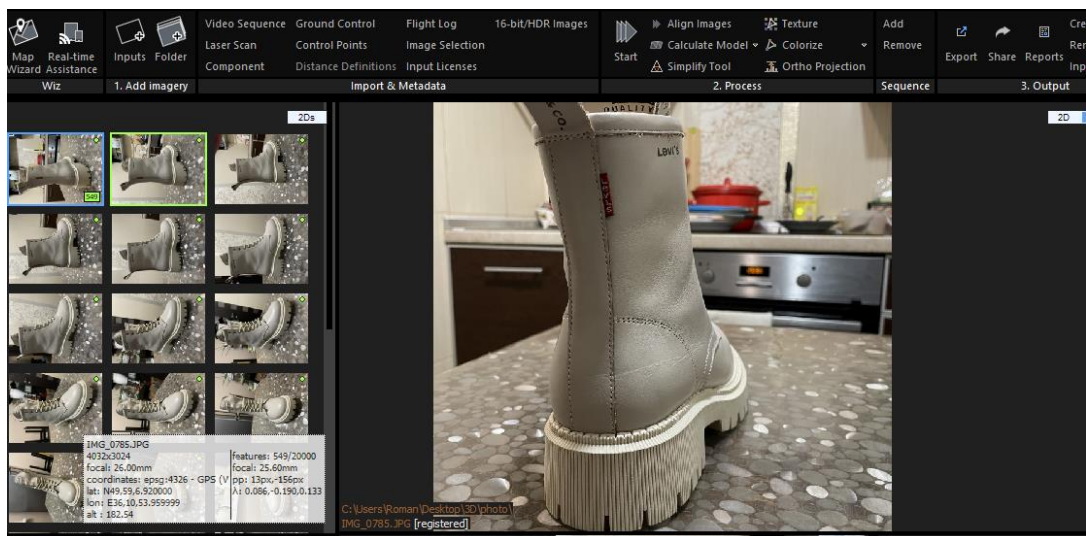


Рисунок 4.10 – Завантажені знімки у меню програми

Далі треба зайти до розділу “Aligment” – “Settings”, та у відкритшомуся вікні “Aligment Settings” обрати “High” для параметру “Image overlap” – це потрібно для більш щільного перекриття між сусідніми знімками, та впливає на якість отриманої моделі (рис.4.11).

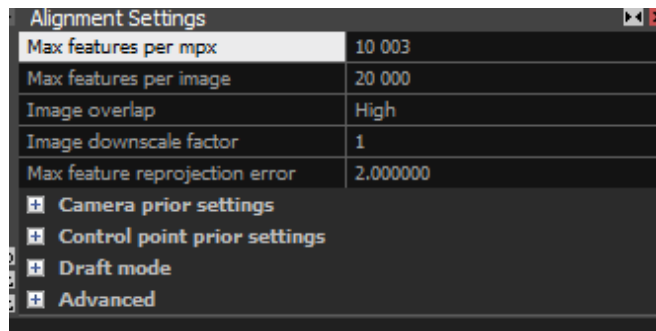


Рисунок 4.11 – Вікно “Alignment Settings”

Параметри “Max features per mpx” та “Max features per image” – це кількість збігів точок на знімках, встановлюються автоматично, проте є можливість виставити у ручну, встановлена кількість залежить від кількості завантажених зображень у програму.

Після завантаження знімків, та налаштувань програми натискаємо “Start”. Програма створює 3D-модель та накладає текстури на об’єкт (рис.4.12).



Рисунок 4.12 – Результат створення моделі у програмі RealityCapture

### 4.3 Порівняння отриманих результатів у програмі Meshroom та RealityCapture

Під час роботи були отримані результати програми Meshroom та RealityCapture, розглянемо отримані результати одночасно на рисунку 4.13



Рисунок 4.13 – Результати програм Meshroom та RealityCapture (а- Meshroom; б – RealityCapture)

У результаті за допомогою технології фотограметрії, програми та смартфона було відзнято 22 фотографії, які були завантажені до програми Meshroom та RealityCapture, проведено підбір параметрів налаштування програм під конкретний набір знімків, після запуску обробки зображень програми виконували створення 3D-моделей близько 40 хвилин у Meshroom, та близько 10 хвилин у програмі RealityCapture доопрацювання отриманої моделі з Meshroom проводилося у програмі Blender (видалення зайвих деталей, накладання текстури), для моделі створеної за допомогою RealityCapture накладання текстури проходило у самій програмі. Таким чином після порівняння програм, було виявлено що програма RealityCapture з однаковою кількістю зображень працює швидше ніж Meshroom, та отримана модель вийшла трохи краще, проте у програмі Meshroom більш зрозумілий інтерфейс та можна бачити на яких етапах працює програма.

## ВИСНОВКИ

Технологія фотометрії не є новою, раніше вона використовувалася в галузях геодезії, криміналістики та архітектури, але сьогодні вона набула перспективи завдяки розвитку комп'ютерів і спеціальних програм для обробки інформації, отриманої при скануванні.

Цілью роботи є вивчення та дослідження методів та технологій фотограмметрії, та на практиці засосувати даний метод, використовуючи при цьому засоби які доступні практично кожному (смартфон, комп'ютер, безкоштовне програмне забезпечення та т.і.).

Після проведення аналізу способів тривимірного сканування, постала задача вибору методу сканування та програми обробки отриманих даних. Для досягнення поставленої цілі необхідно виконати наступні кроки:

- провести аналіз технологій;
- проаналізувати конструкції існуючих прототипів сканерів та технологій;
- провести аналіз існуючих методів побудови тривимірних моделей.

На основі проведеного аналізу методів тривимірного сканування можна зробити висновок, що для створення 3D-моделі невеликого об'єкту будемо використовувати метод фотограмметрії у зв'язку з його не високою вартістю, відносно високою точністю, та доступністю використання на даний час.

Фотограмметрія використовує способи та прийоми різних дисциплін, в основному, запозичені з оптики та проектної геометрії. У найпростішому випадку просторові координати точок об'єкта визначаються шляхом вимірювань, що виконуються за двома або більшими фотографіями, знятими з різних положень. У цьому кожному зображенні відшуковуються загальні точки. Потім промінь зору проводиться від розташування камери до точки на об'єкті. Перетин цих променів і визначає розташування точки у просторі. Більш складні алгоритми можуть використовувати іншу, відому заздалегідь, інформацію про об'єкт: наприклад, симетрію елементів, що його складають, в

певних випадках дозволяє реконструювати просторові координати точок лише по одному фотографічному зображенню. Тому саме метод фотограметрії актуальний для створення якісних 3D моделей.

За допомогою двох, або більше фотографій зроблених з різних положень камери визначаються просторові координати точок об'єкта. На кожному зображенні визначаються спільні точки. Далі створюється лінія видимості від точки об'єкта до місця розташування камери. Перетин цих променів визначає положення точки в просторі. Існують складніші алгоритми, які використовують раніше відому інформацію про об'єкт: наприклад, лише з одного зображення дозволяє у певних випадках відновити просторові координати точок використовуючи симетрію елементів об'єкта.

Після огляду програмного забезпечення було обрано Meshroom та RealityCapture, оскільки вони дуже зручні для користувача та мають простий інтерфейс. Вони також мають можливості для експорту моделей до Blender, оскільки там відбувається подальше редагування моделей.

При зйомці об'єкта були враховані всі можливі чинники, що впливають на якість фотографії, і обрані методи, які дозволяють отримати найкращі фотографії.

Після вибору програмного забезпечення було проведено аналіз пристроїв, які використовувалися для сканування об'єкта. Сканування об'єкта було зроблено за допомогою відеокарти NVIDIA GeForce GTX 970. Загальний час сканування всіх фотографій склав приблизно 40 хвилин у Meshroom, та приблизно 10 хвилин у RealityCapture.

Результати дослідження показують, що навіть звичайна камера смартфона з примітивними налаштуваннями може робити якісні знімки, які дають хороший результат. Навіть найслабший комп'ютер здатний створити відсканований 3D-об'єкт, але це займе багато часу, тому для економії часу краще обрати більш потужні пристрої.

У результаті за допомогою технології фотограметрії, програми та смартфона було відзнято 22 фотографії, які були завантажені до програми

Meshroom та RealityCapture, проведено підбір параметрів налаштування програм під конкретний набір знімків, після запуску обробки зображень програми виконували створення 3D-моделей близько 40 хвилин у Meshroom, та близько 10 хвилин у програмі RealityCapture доопрацювання отриманої моделі з Meshroom проводилося у програмі Blender (видалення зайвих деталей, накладання текстури), для моделі створеної за допомогою RealityCapture накладання текстури проходило у самій програмі. Таким чином після порівняння програм, було виявлено що програма RealityCapture з однаковою кількістю зображень працює швидше ніж Meshroom, та отримана модель вийшла трохи краще, проте у програмі Meshroom більш зрозумілий інтерфейс та можна бачити на яких етапах працює програма.

Можна з упевненістю сказати, що 3D-сканування має великий потенціал у сучасних технологіях.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технології 3D-сканування. [Електронний ресурс]  
URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/05/242.pdf>
2. 3D-сканери, методи та технології сканування [Електронний ресурс]  
URL: <https://koloro.ua/ua/3d-skaner-3d-skanirovanie-obektov-i-trehmernoemodelirovanie.html>
3. Вибір 3D сканеру з лінійки Einscan від Shining3d [Електронний ресурс]  
URL: <https://3ddevice.com.ua/uk/blog/3d-printer-ogliad/yak-obrati-3d-skaner-einscan-vid-shining3d/>
4. Сканування об'єктів [Електронний ресурс]  
URL: <https://klona.ua/uk/uslugi/3d-skanuvannya-obyektiv>
5. Пеньков В.О. Фотограметрія. Теорія пари знімків [Електронний ресурс]  
ХНУМГ ім.О.М. Бекетова – Харків 2019  
URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/195387668.pdf>
6. Пеньков В.О. Фотограметрія Математичні методи фотограметрії [Електронний ресурс]  
ХНУМГ ім.О.М Бекетова – Харків 2019  
URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/195387668.pdf>
7. Стереоскопічний зір людини [Електронний ресурс]  
<https://jak.koshachek.com/articles/stereoskopichnij-zir-ljudini-metodijogo.html>
8. Вершини, грані, ребра. Редагування елементів [Електронний ресурс]  
URL: <https://docs.blender.org/manual/uk/2.82/modeling/meshes/structure.html>
9. Полігональна сітка [Електронний ресурс]  
URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Полігональна\\_сітка](https://uk.wikipedia.org/wiki/Полігональна_сітка)
10. Текстура(тривимірна графіка) [Електронний ресурс]

URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Текстура\\_\(тривимірна\\_графіка\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Текстура_(тривимірна_графіка))

11. Триангуляція (комп'ютерний зір) [Електронний ресурс]

URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Триангуляція\\_\(комп'ютерний\\_зір\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Триангуляція_(комп'ютерний_зір))

12. Бескоштовні програми для фотограметрії [Електронний ресурс]

URL: <http://www.50northspatial.org/ua/uav-image-processing-software-photogrammetry/>

13. Програма RealityCapture [Електронний ресурс]

URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/RealityCapture>

14. Ivanov M., Sergiyenko O., Tyrsa V., Mercorelli P., Kartashov V.M., Hernandez W., Sheiko S., Kolendovska M. Individual Scans Fusion in Virtual Knowledge Base for Navigation of Mobile Robotic Group with 3D TVS // IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – P. 3187–3192.

15. I. Koryttsev, S. Sheiko, V. Kartashov, O. Zubkov, V. Oleynikov, I. Selieznov, M. Anohin. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 International Scientific-Practical Conference. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6-9, 2020. – 5 p.

16. V. Kartashov, V. Oleynikov, O. Zubkov, S. Sheiko. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p

17. Machine Vision and Navigation / Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes, Wendy, Mercorelli, Paolo. Springer, Cham.

18. В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, О.В. Зубков, С.И. Бабкин. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных объектов и измерения их координат // Радиотехника: Всеукраїнське міжвуз. навч.-техн. зб. – 2020. – Вип. 202. – С. 153 – 159.

19. И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.М. Карташов, О.В. Зубков, В.Н. Олейников, С.И. Бабкин, И.С. Селезнев. Обработка сигналов при пеленгации и определении дальности до малоразмерных БПЛА в оптическом и инфракрасномдиапазонах // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 125 – 134.
20. О.В. Зубков, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин. Исследование эффективности детектирования и распознавания изображений дронов по видеопотоку // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 136 – 146.
21. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, М.М. Колендовская, Л.П. Тимошенко, Н.В. Рыбников, А.И. Капуста. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 201. – С. 120 – 129.
22. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.
23. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. –New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.
24. Громова С.О. Вимір характеристики спрямованості Акустичного випромінювання БПЛА/25-й Міжнародний молодіжний форум “Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті”. Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 33 – 34.
25. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin.

- Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.
26. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.
27. A Comparative Example Between The Use Of Pca And Mds For Image Classification / Hernandez, W., Mendez, A., Flor-Unda, O., Camejo, I.M., Kolendovska, M. // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17 June 2020 до 19 June 2020; Volume 2020-June, June 2020, № 9152565, Pages 1353-1358
28. Algorithm For Generating Refined Frequency Estimates In Atmospheric Radio Sounding Systems / Kartashov V., Hernandez W., Hernandez-Balbuena D., M. Kolendovska, Konovalenko O., Melnyk V. // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17 June 2020 до 19 June 2020; Volume 2020-June, June 2020, № 9152562, Pages 79-82
29. Application of Fast Frequency Shift Measurement Method for INS in Navigation of Drones / D. Avalos-Gonzalez, D.H. Balbuena, V. Tyrsa, V.M. Kartashov, M. Kolendovska, S. Sheiko, O. Sergiyenko, V. Melnyk, F.N. Murrieta-Rico // IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – P. 3159–3164.
30. Avalos-Gonzalez, D., Sergiyenko, O., Hernandez-Balbuena, D., Tyrsa, V., Kartashov V.M., V. Rivas-Lopes, M., Murrieta-Rico, F.N. Constraints definition and application optimization based on geometric analysis of the frequency measurement method by pulse coincidence // Measurement: Journal

of the International Measurement Confederation (USA). 2018, V.126. P. 184-193.

31. Book “Control and Signal Processing Applications for Mobile and Aerial Robotic Systems”, Hardback - Advances in Computational Intelligence and Robotics English. Edited by Oleg Sergiyenko, Moises Rivas-Lopez, Wendy Flores-Fuentes, Julio Cesar Rodríguez-Quiñonez, Lars Lindner. Editorial IGI Global, Hershey, United States, January 2020, 340 páginas. ISBN10 152259924X, ISBN13 9781522599241