

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)

Дослідження методів тривимірного фотосканування об'єктів  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи МІМ-20-1  
Громова С.О.  
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Шейко С.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Карташов В.М.  
(прізвище, ініціали)

2021 р.

# Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)

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

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Громовій Світлані Олександрівні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів тривимірного фотосканування об'єктів.

затверджена наказом по університету від " 08 " 11 2021 р. № 1676 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз існуючих сканерів. Виконати теоретичне обґрунтування та дослідження методів 3D-сканування. Провести порівняльну характеристику програм та обладнання, необхідного для обробки великої кількості фотографій. Провести дослідження впливу погодних умов на якість сканованого об'єкту. Зробити більше ніж 50 знімків з різних положень. На основі отриманих знімків, у програмі зробити 3D-сканування.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

Вступ

1. Аналіз предметної області.

2. Теоретичне обґрунтування методів 3D-сканування.

3. Створення фотограмметричної моделі.

Висновки

Перелік посилань

Додаток А

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

1. Процес фотограмметрії. \_\_\_\_\_
2. Умови якісного сканування. \_\_\_\_\_
3. Вигляд контактних сканерів. \_\_\_\_\_
4. Вигляд безконтактних сканерів. \_\_\_\_\_
5. Налаштування камери. \_\_\_\_\_
6. Апаратне забезпечення. \_\_\_\_\_
7. Процес зйомки об'єкту. \_\_\_\_\_
8. Процес роботи програми MeshRoom. \_\_\_\_\_
9. Результат сканування. \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	08.11.21–13.11.21	
2	Теоретичне обґрунтування методу	15.11.21–19.11.21	
3	Аналіз програмного і апаратного забезпечення	20.11.21–24.11.21	
4	Виконання знімків	25.11.21	
5	Створення 3D-моделі	26.12.21–30.12.21	
6	Обробка результатів досліджень	1.11.21–4.12.21	
7	Графічна частина роботи	5.11.21–7.12.21	
8	Перевірка керівником	8.12.21-14.12.21	
9	Перевірка на академічний плагіат	7.12.21	
10	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	7.12.21–8.12.21	

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 08.11.2021 р. \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_ проф. Шейко С.О.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи: 62 сторіноки, 42 рисунки, 4 таблиці, 30 джерел.

СКАНУВАННЯ, СКАНЕР, 3D-МОДЕЛЬ, СІТКА, МЕШ, ГРАНЬ, РЕБРО, ТЕКСТУРА, СТЕРЕОКОПІЧНА ПАРА ЗНІМКІВ, ТРІАНГУЛЯЦІЯ, ЧПУ, САПР.

Об'єкт дослідження – технологія фотограмметрії за допомогою смартфона.

Метою роботи є визначення параметрів, характеристик та налаштування камери і програми для сканування. Оцінка впливу погодних умов, матеріалу об'єкту та навколишнього середовища на якість сканованої моделі.

Методи дослідження – модельний експеримент, натурний експеримент.

Було зроблено огляд обладнання для сканування. Виконано аналіз існуючих методів 3D-сканування. Проведена порівняльна характеристика обладнання, необхідного для обробки великої кількості фотографій. Експериментально досліджено вплив погодних умов на якість сканованого об'єкту. Було з'ясовано, що для більш точної роботи програми 3D-сканування потрібно більше 50 знімків, знятими з різних положень.

Також було з'ясовано, що до елементів зовнішнього орієнтування відносяться тривимірні координати центру проєкції, продольний та поперечний кут нахилу знімка та кут повороту. А до елементів внутрішнього орієнтування відносяться, в першу чергу, фокусне відстань об'єктива (хоча може враховуватись і характер спотворень, що вносяться під час зйомки: наприклад, дісторсія об'єктива, деформація фотоматеріалу та ін.) та двомірні координати головної точки.

## РЕФЕРАТ

Объяснительная записка к аттестационной работе: 62 страницы, 42 рисунка, 4 таблицы, 30 источников.

СКАНИРОВАНИЕ, СКАНЕР, 3D-МОДЕЛЬ, СЕТКА, МЕШ, ГРАНЬ, РЕБРО, ТЕКСТУРА, СТЕРЕОКОПИЧЕСКАЯ ПАРА СНИМКОВ, ТРИАНГУЛЯЦИЯ, ЧПУ, САПР.

Объект исследования – технология фотограмметрии с помощью смартфона.

Целью работы является определение параметров, характеристик и настроек камеры и приложения для сканирования. Оценка влияния погодных условий, материала объекта и окружающей среды на качество сканируемой модели.

Способы исследования – модельный опыт, натурный опыт.

Был произведен обзор оборудования для сканирования. Произведен анализ существующих методов 3D-сканирования. Произведена сравнительная характеристика оборудования, необходимого для обработки большого количества фотографий. Экспериментально исследовано влияние погодных условий на качество сканируемого объекта. Было установлено, что для более точной работы программы 3D-сканирования требуется более 50 снимков, снятых с разных положений.

Также было установлено, что к элементам внешнего ориентирования относятся трехмерные координаты центра проекции, продольный и поперечный угол наклона снимка и угол поворота. К элементам же внутреннего ориентирования относятся, в первую очередь, фокусное расстояние объектива (хотя может учитываться и характер искажений, вносимых во время съемки: например, дисторсия объектива, деформация фотоматериала и др.) и двухмерные координаты главной точки.

## ABSTRACT

Explanatory note to the certification work: 62 pages, 42 figures, 4 tables, 30 sources.

SCANNING, SCANNER, 3D-MODEL, GRID, MESH, EDGE, RIB, TEXTURE, STEREOCOPIC PAIR OF IMAGES, TRIANGULATION, NPC, CADS.

The object of research is the technology of photogrammetry using a smartphone.

The aim of the work is to determine the parameters, characteristics and settings of the camera and the program for scanning. Estimation of the influence of weather conditions, object material and environment on the quality of the scanned model.

Research methods - model experiment, field experiment.

An inspection of the scanning equipment was performed. An analysis of existing 3D-scanning methods is performed. The comparative characteristic of the equipment necessary for processing of a large number of photos is carried out. The influence of weather conditions on the quality of the scanned object has been experimentally studied. It has been found that more than 50 shots taken from different positions are required for a more accurate 3D-scanning program.

It was also found that the elements of external orientation include three-dimensional coordinates of the projection center, longitudinal and transverse angle of inclination of the image and the angle of rotation. And the elements of internal orientation include, first of all, the focal length of the lens (although you can take into account the nature of distortions introduced during shooting: for example, lens distortion, deformation of photographic material, etc.) and two-dimensional coordinates of the main point.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	8
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	11
1.1 Об'єкти та їх 3D-оцифрування.....	11
1.2 Людське око, 3D-сприйняття та 3D-сканери.....	13
1.3 3D-моделі за допомогою сканування, САПР .....	15
1.4 Основні елементи 3D-моделі – вершини, грані, ребра та полігони.....	15
1.5 Сітки у світі 3D-сканування.....	16
1.6 Вокселі та 3D-сканування .....	17
1.7 Твердотільні об'єкти та 3D-геометрія за допомогою сканування.....	18
1.8 Текстура та як вона застосовується при 3D-скануванні .....	19
1.9 Що таке тріангуляція 3D-точок? Застосовувані технології та методи.....	20
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ 3D-СКАНУВАННЯ .....	22
2.1 Види 3D-сканерів: контактні та безконтактні.....	22
2.1.1 Контактні сканери.....	22
2.1.2 Безконтактні сканери .....	22
2.2 Переваги і недоліки використання 3D-сканування об'єктів.....	25
2.3 Теорія пари знімків. Елементи взаємного орієнтування пари знімків .....	26
2.4 Визначення елементів взаємного орієнтування.....	31
2.5 Побудова моделі із перетворенням зв'язок проєктуючих променів .....	33
3 СТВОРЕННЯ ФОТОГРАММЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ.....	35
3.1 Вибір об'єкта для сканування, обладнання та процес сканування .....	35
3.2 Аналіз обладнання та програм для сканування .....	39
3.3 Створення сканованої моделі у обраному середовищі .....	47
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	59
ДОДАТОК А .....	63
ДОДАТОК Б.....	69

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Сканування – це процес перетворення звичайного зображення в цифровий формат.

Прототип – працююча модель технічного пристрою, механізму, машини або деталі, створений для перевірки базової функціональності та для тестування роботи системи в цілому.

ЧПУ – числове програмне управління.

САПР – системи автоматизованого проектування.

АСУП – автоматизовані системи управління виробництвом.

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

АФА – аерофотоапарат.

Грань – це замкнута послідовність ребер.

Сітка – це поєднання вершин, граней та даних про те, як вершини утворюють грані та як вони з'єднуються між собою.

Воксели – невеликі прямокутні паралелепіпеди (тривимірні фігури, що складаються з шести паралелограмів).

Текстура – зображення, нанесене на поверхню.

Текстурування (UV-перетворення) – накладання текстури на поверхню.

Триангуляція – процес розбиття полігональної області зі складною конфігурацією набір трикутників.

Стереоскопічна пара знімків (стереопара) – два знімки із зображеннями однієї і тієї ж ділянки місцевості, отримані з двох точок простору.

Стереомодель (модель місцевості) – сукупність точок перетину пари променів, які утворюють поверхню.

Компланарність (лат. com – спільність, лат. planus – плоский, рівний) – властивість трьох (або більшого числа) векторів, які, приведені до загального початку, лежать в одній площині.

Колінеарність (від лат. col – спільність і лат. linearis – лінійний) – відношення паралельності векторів: два ненульові вектори називаються колінеарними, якщо вони лежать на паралельних прямих або на одній прямій.

## ВСТУП

Тривимірне сканування – це нова технологія, яка з'явилася наприкінці 20 століття. Прототипи було випробувано ще у 60-х роках. Вони мали широкий спектр можливостей, але добре справлялися з основним завданням. У 80-х роках моделі вдосконалили завдяки лазерам. Поліпшилося захоплення об'єктів.

Також були розроблені контактні датчики, які оцифровували поверхню предметів із твердою та складною будовою. Обладнання розроблялося за технологіями військової промисловості з використанням навігаторів. 3D-сканери використовуються в дизайнерських студіях, автомобільних концертах та кіноіндустрії. Першими моделями були: Head Scanner, 3D-сканер REPLICA та інші.

3D-сканер – це пристрій, що займається дослідженням фізичних об'єктів та відтворенням моделей у цифровому форматі. Можуть мати стаціонарні чи мобільні форми. Особлива лампа або лазер використовують для підсвічування деталей, що збільшує точність вимірювань. Сканери призначені для введення графічної інформації. За допомогою сканерів можна вводити і знакову інформацію. У цьому випадку вихідний матеріал вводиться у графічному вигляді, після чого обробляється спеціальними програмними засобами.

Від технології сканування залежить принцип роботи тривимірного сканера. Підсвічування та вбудовані камери вимірюють відстань до об'єкта. Картинки, які отримують у процесі, зіставляються. Далі відбувається ретельний аналіз даних та відображення цифрової, тривимірної моделі на екрані. Робота лазерного 3D-сканера ґрунтується на вимірі відстані до об'єкта в заданих точках. Отримані відомості виводяться у координати.

## 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

### 1.1 Об'єкти та їх 3D-оцифрування

Простір навколо нас має три виміри і положення чогось можна описати за допомогою трьох чисел, також званих параметрами чи координатами. Існує безліч способів позначення цих трьох параметрів, і всі вони підкоряються правилу, яке називається системою координат. Найвідоміша система координат – декартова (рис.1.1).

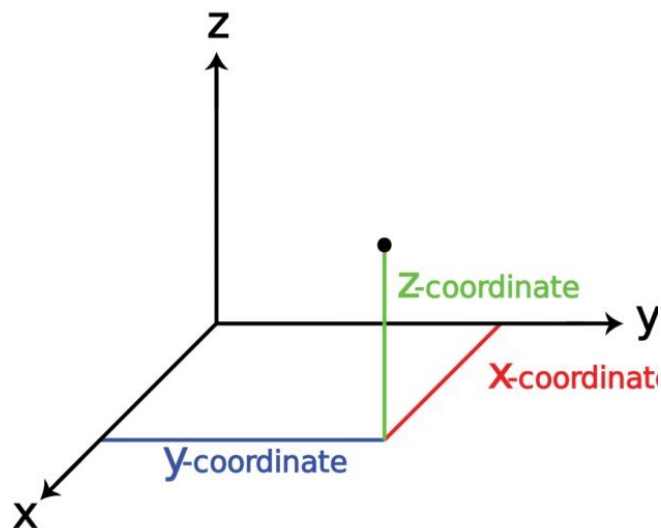


Рисунок 1.1 – Система координат

Коли вимірюється об'єкт за довжиною, шириною та висотою, користуються термінами декартової системи координат, яка буває правою та лівою. Єдина різниця між ними – напрямок осі Z, що визначає висоту об'єктів навколо. Існують інші системи координат, наприклад, сферична або циліндрична (рис.1.2).

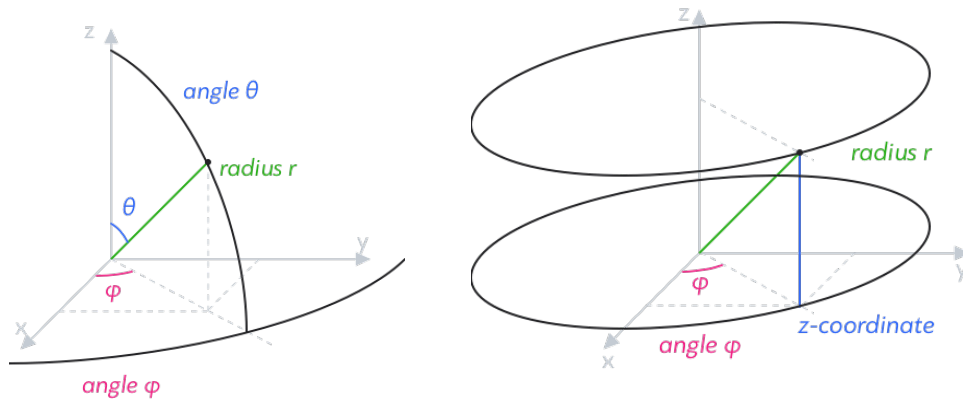


Рисунок 1.2 – Сферична та циліндрична системи координат

Загальне у цих тривимірних систем координат те, що вони мають три незалежні параметри, які чітко описують положення будь-якої точки в просторі. Це все здається надто простим, але, коли йдеться про 3D-сканери та сканування, ці фундаментальні принципи дійсно можуть допомогти зрозуміти і успішно працювати з цією змінною світ технологією. Будь-яка згадка вимірювань у контексті 3D-сканування стає ще більш важливою, коли говориться про точність та дозвіл сучасних професійних продуктів для 3D-сканування.

Характеристики новітніх моделей 3D-сканерів, що діють на рівні, не доступному людському оку, залежать від надійності обладнання та якості системи координат у супутніх програмах.

Незалежно від положення в просторі, всі об'єкти фізичної природи мають розміри. Об'єкти можуть бути 0D, 1D, 2D чи 3D (рис.1.3).

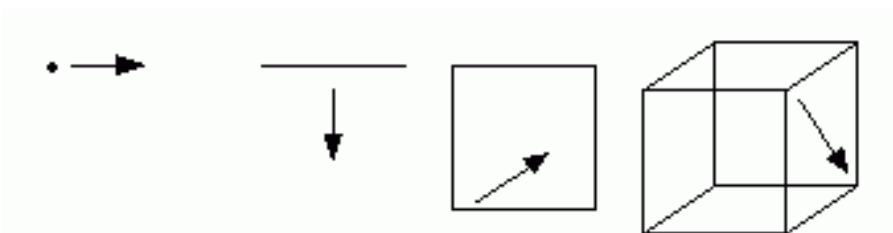


Рисунок 1.3 – 0D, 1D, 2D та 3D об'єкти

Розглянемо атом, який, як здається, практично не займає місця, тому його можна вважати точкою. Коли у просторі знаходиться така точка, положення якої можна визначити як  $x$ ,  $y$  та  $z$ , говорять, що вона не має розмірів, тому вона є

об'єктом 0D. При тому, що з одновимірними, двовимірними та тривимірними об'єктами сканери можуть впоратися, цього не можна сказати про об'єкти 0D.

Прикладом одномірного (1D) об'єкта може бути дуже тонкий ланцюг. Кожна її ланка, за винятком першої та останньої, має всього дві сусідні ланки.

Тонкий аркуш паперу (с) – це двомірний об'єкт, оскільки його третій параметр – товщина – несуттєвий у порівнянні з довжиною та шириною.

Простим прикладом 3D-об'єкта може бути короб, що має довжина, ширина і висота, тобто. Він займає певний простір у всіх трьох вимірах.

Сьогодні виробники професійних 3D-сканерів зазвичай вказують в описі продуктів оптимальний розмір(и) об'єктів для сканування. 3D-сканери сильно відрізняються за габаритами: автоматичні настільні для крихітних об'єктів, портативні на основі структурованого підсвічування для невеликих та середніх об'єктів, більші 3D-сканери, наприклад, лазерні для великих і навіть дуже великих об'єктів. Зі свого боку, 3D-моделі, створювані з допомогою сканерів, можуть бути за необхідності масштабовані у вигляді, зокрема, професійних САПР.

## 1.2 Людське око, 3D-сприйняття та 3D-сканери

Тривимірний зір людини ґрунтується на так званому стереоскопічному ефекті. Це процес спостереження за об'єктом із двох різних точок, при якому зображення, що розпізнаються кожним оком, практично ідентичні, але зміщені відносно один одного. Величина такого усунення залежить від відстані між людиною та об'єктом: чим ближче об'єкт, тим більше усунення. Це явище називається ретинальна (бінокулярна) диспаратність, або бінокулярний паралакс. На жаль, дозвіл ока неоднорідний. Найбільш висока щільність колб – у центрі, тому для максимального дозволу і найкращого сприйняття відстані обидва очі повинні бути сфокусовані безпосередньо на об'єкті. Розпізнавання відстані при погляді на близько розташований об'єкт відбувається за рахунок зовнішніх м'язів очного яблука. При цьому при фокусуванні зору на дальньому об'єкті кут зору значно менший. Після того, як два зображення (у кожному оці)

проектується на сітківках, вони проходять через зорові нерви і прямують далі до різних ділянок головного мозку. Різні ділянки мозку одночасно аналізують зображення. Деякі ділянки розпізнають геометричні форми, деякі вловлюють рух, інші порівнюють зображення з побаченими раніше, тощо. Зрештою, всього за 50 мілісекунд вся ця інформація потрапляє в нашу свідомість, і ми помічаємо колір, відстань, рух, форму того, на що дивимося. 3D-сканери працюють практично за тим же принципом, але вони більш точно вимірюють відстань, ніж зір людини, і це справедливо як для лазерних, так і для 3D-сканерів на основі структурованого підсвічування.

Оскільки під впливом середовища світло може поводитися по-різному, тривимірне зорове сприйняття яке завжди працює однаково добре. Насправді, якщо тривимірний об'єкт більший за один нанометр, людському оку або сучасному сканеру важко побачити всі його сторони одночасно, оскільки, як правило, цьому заважають інші об'єкти. Наприклад, тильні поверхні непрозорих об'єктів закриті фронтальними поверхнями.

Важливо сканувати об'єкт з усіх боків, щоб побачити його тривимірні контури, особливо якщо форма не відома заздалегідь. Розпізнати великі об'єкти одного кольору простої форми в 3D може бути досить непросто, особливо плоскі або дуже гладкі поверхні.

Це відбувається тому, що очам для фокусування потрібні контрастні зображення. Однотонні та однорідні поверхні без будь-яких видатних ознак визначаються оком як неконтрастні. Те саме стосується і чорних поверхонь.

Багато професійних 3D-сканерів важко зчитують чорні або однорідні темні поверхні, оскільки також потребують орієнтирів для фокусування, описаних вище. Як багато новачків, так і фахівці 3D-сканування в таких випадках стикаються з великими труднощами, що вимагають різних способів і підходів до оцифрування, або навіть часом вибору іншого типу сканера. Таким чином, якщо час від часу потрібно сканувати темні поверхні, перед придбанням 3D-сканера варто випробувати його на таких об'єктах. Вибір кращого сканера в такому випадку не обмежується показниками точності та роздільної здатності.

### 1.3 3D-моделі за допомогою сканування, САПР

Сьогоднішнє покоління професійних рішень для 3D-оцифрування, включаючи сканери на основі структурованого підсвічування, лазерні сканери та програмне забезпечення, нерозривно пов'язані з досягненнями у сфері комп'ютерних технологій, завдяки яким стало можливим створення програмованого управління різним обладнанням, або числовим програмним управлінням (ЧПУ). З появою ЧПУ вдалося зробити великий прорив у галузі виготовлення об'єктів різних форм, та іноді званих поверхнями довільної форми.

Основне значення ЧПУ полягає в тому, що верстатом управляє комп'ютер, а не людина. Комп'ютери здатні робити це з неперевершеною точністю, вражаючи точно і набагато ефективніше. Вони роблять це за допомогою спеціальних команд, що генеруються програмними системами, відомими як автоматизовані системи управління виробництвом (АСУП) та системи автоматизованого проектування (САПР).

### 1.4 Основні елементи 3D-моделі – вершини, грані, ребра та полігони

Вершина (англ. vertex, мн.ч. vertices) у комп'ютерній графіці – це структура даних, що описує певні атрибути, наприклад, положення точки у 2D чи 3D просторі. Графічні об'єкти складаються з масивів плоских поверхонь (як правило, трикутників – полігонів), і вершини визначають розташування, кути та інші атрибути поверхонь. Таким чином це базове геометричне поняття досить часто використовується для опису інших складніших елементів, наприклад, ребра, сітки, грані або поверхні. Тому деякі атрибути вершини містять як крапку, а й поверхню навколо чи поруч із нею.

Хмара точок – це ряд вершин, як правило, створюваних 3D-сканерами, особливо лазерними 3D-сканерами.

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

Грань – це замкнута послідовність ребер. Кожна вершина грані з'єднує два ребра. Грань трикутника має три ребра, а чотирикутника – чотири ребра. Грані із трьома і більше ребрами називають полігонами (від грецького «багатокутник»).

### 1.5 Сітки у світі 3D-сканування

У сфері 3D-технологій сітка (включаючи моделі, що створюються за допомогою 3D-сканерів) є одним із способів представлення поверхні у графічній програмі. Примітивною мовою, сітка – це поєднання вершин, граней та даних про те, як вершини утворюють грані та як вони з'єднуються між собою (рис.1.5).

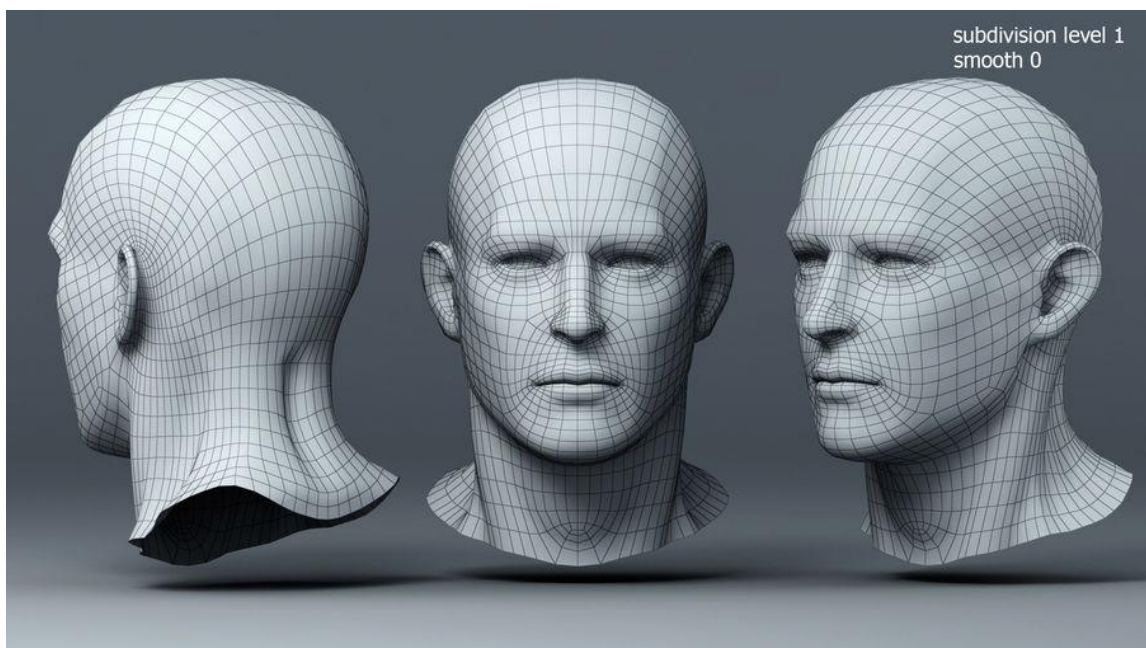


Рисунок 1.5 – Примітивна сітка

Як правило, грані складаються з полігонів будь-якого типу, але найчастіше з трикутників, тому що графічному процесору простіше з ними працювати. Різні види сіток вимагають різного роду полігонів, що залежить від сфери застосування сітки:

Грань-вершина – вершини і набір полігонів, що вказують на вершини, що використовуються.

Криланий край – кожне ребро має дві вершини, дві грані та чотири суміжні ребра.

Чотири ребра – складається з ребер, напівребер та вершин без вказівки полігонів.

Таблиця кутів – зберігає вершини в певній таблиці, такої, що обхід таблиці неявно задає полігони.

По суті, це віяло трикутників, що використовується в апаратному рендерингу. Таке уявлення – більш компактне та продуктивне для знаходження полігонів, але операції щодо їх зміни виконуються повільніше. Понад те, таблиця кутів не представляють сітку повністю – потрібно кілька таблиць кутів.

У вершинній структурі представлені лише вершини, що вказують інші вершини. Це дуже ефективний формат щодо обсягу даних, хоча кількість ефективних операцій обмежена (рис.1.6).

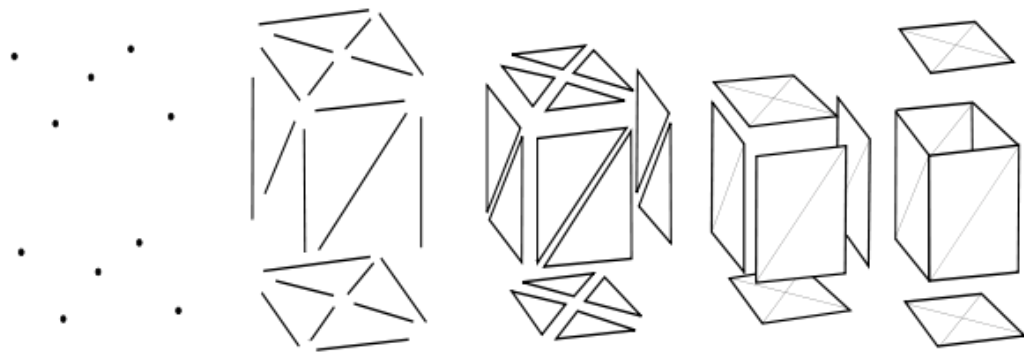


Рисунок 1.6 – Полігональна сітка, що складається з трикутників

Прості сітки можуть створюватися вручну; більш складні – моделюються за допомогою математичних рівнянь, алгоритмів або за допомогою 3D-сканування реальних об'єктів. Однією з найважливіших характеристик сітки є простота. Є безліч способів зчитування однієї і тієї ж поверхні та представлення її цифрової копії.

## 1.6 Воксели та 3D-сканування

У декартовій системі координат весь обсяг можна розділити на невеликі прямокутні паралелепіеди (тривимірні фігури, що складаються з шести паралелограмів), які називаються вокселями (рис.1.7). Якщо розміри по осях  $x$ ,  $y$

та  $z$  однакові, то вони будуть кубами. Після такого спрощення будь-який твердотільний об'єкт можна створити з певної кількості вокселів. Що менше воксель, то точніше підсумкові параметри.

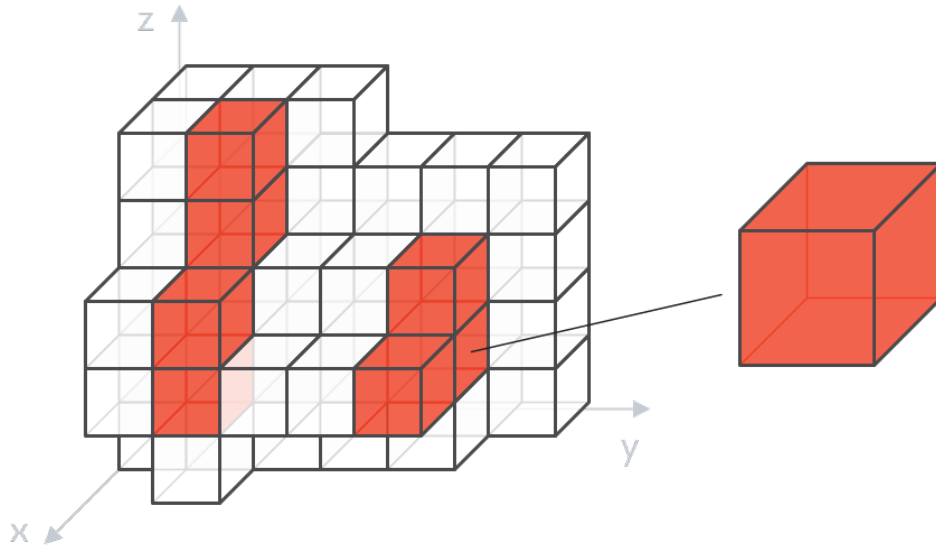


Рисунок 1.7 – Воксель

Координати вокселя визначаються їх становищем у масиві даних. Стандартний символ у цьому масиві та базова форма вокселя забезпечують більш простий та надійний процес, але найчастіше вимагають більше дискового простору для зберігання та більше пам'яті для обробки. Як і у випадку з двовимірними зображеннями, непрямокутні поверхні, що представляють воксельні грані, містять дискретні дані.

Щоб досягти точності непрямокутної моделі, потрібні дуже маленькі вокселі. Оскільки вони вимагають значного дискового простору, їх не так часто використовуються для таких об'єктів. Вокселі найбільш ефективні для складних різномірних об'єктів, що робить їх ідеальними у рішеннях для 3D-сканування, візуалізації та САПР.

### 1.7 Твердотільні об'єкти та 3D-геометрія за допомогою сканування

Будь-який фізичний об'єкт займає певний обсяг простору та складається з будь-якого матеріалу. Існують різні способи моделювання твердотільних об'єктів: шаблонне формування, моделювання поверхневої сітки, декомпозиція. Будь-який об'єкт має межі (поверхні), і межі твердих об'єктів розділять простір

на дві частини – внутрішню та зовнішню. Таким чином, твердий об'єкт може бути представлений межами та деякими даними, такими як сітка, і можуть служити для відокремлення внутрішнього простору від зовнішнього.

Ще один підхід, що застосовується в конструктивній блоковій геометрії (КБГ), де всі основні елементи вже є суцільними (сфера, конус, куб, тор та ін) і складніші форми, складені з примітивних фігур за допомогою булевих операцій: злиття, віднімання, перетин і т.д. (рис.1.8).

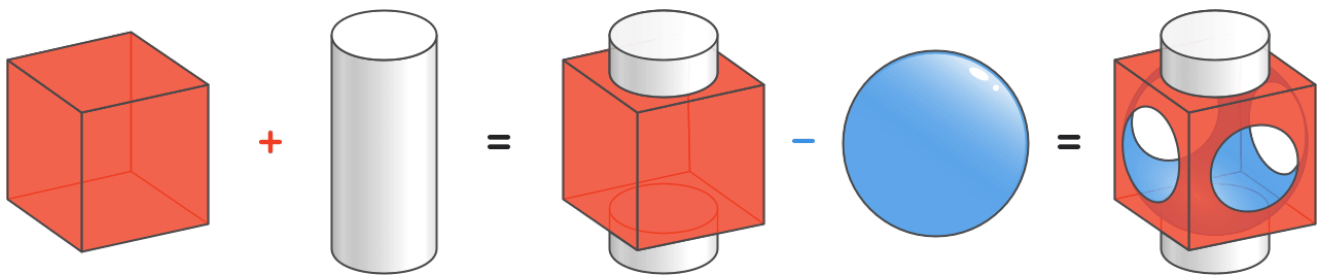


Рисунок 1.8 – Результат конструктивної блокової геометрії

### 1.8 Текстура та як вона застосовується при 3D-скануванні

У комп'ютерній графіці та 3D-скануванні текстура означає зображення, нанесене на поверхню. Дані текстури зберігаються в окремих файлах, в яких кожен піксель з координатами  $U$  і  $V$  має відповідний колір. Накладання текстури на поверхню називається текстуруванням або  $UV$ -перетворенням (рис.1.9).

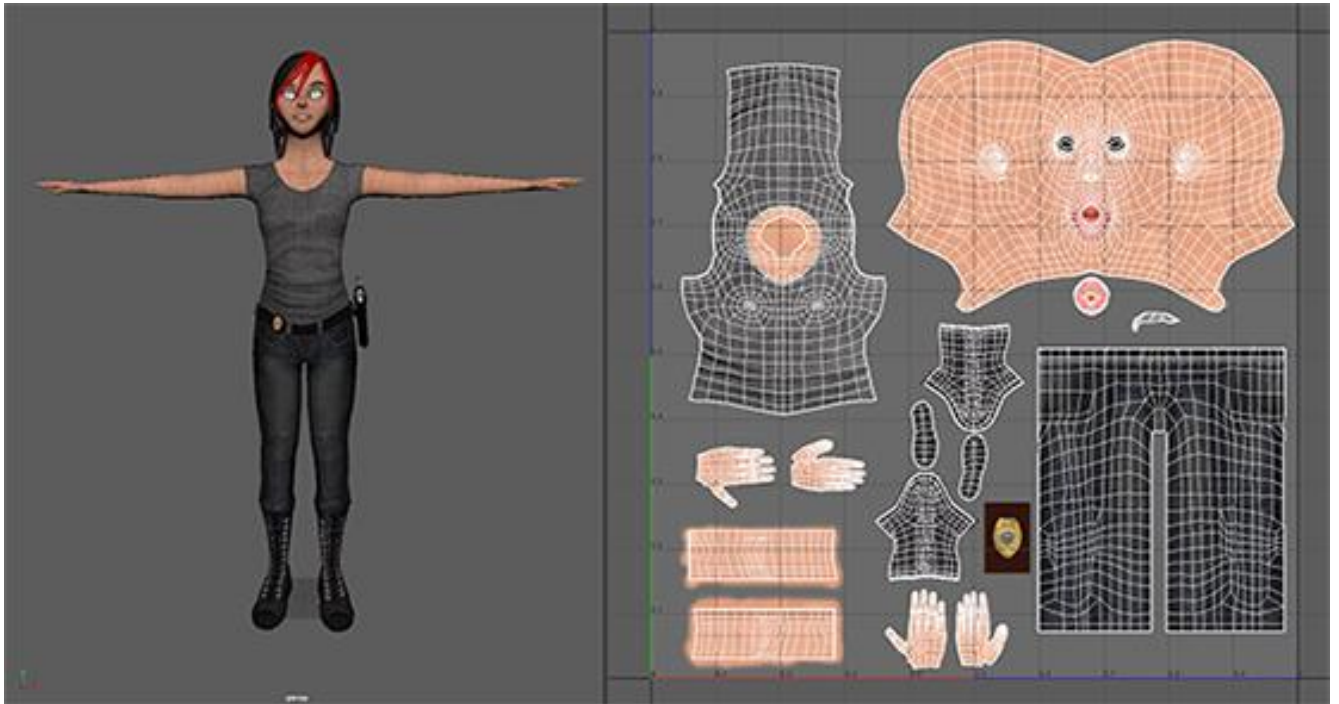


Рисунок 1.9 – UV-перетворення

Враховуючи, що людський мозок у візуальному сприйнятті навколишнього світу в основному покладається на тінь, колір та градієнт кольору, текстура є високоефективним способом зображення форми без зміни геометрії. Цей метод часто застосовується виробниками комп'ютерних ігор для швидшого та ефективного рендерингу графіки.

Виробники 3D-рішень іноді оснащують сканери спеціальними об'єктивами для розпізнавання текстури – текстурними камерами. Для отримання зображення високої якості потрібне яскраве рівномірне освітлення, якщо сканер не обладнаний спалахом. поверхня без квітів текстури.

### 1.9 Що таке триангуляція 3D-точок? Застосовувані технології та методи

Процес розбиття полігональної області зі складною конфігурацією набір трикутників називається триангуляція. При аналізі чи синтезі складних поверхонь їх апроксимують сіткою трикутників, і згодом оперують із найпростішими полігональними областями, тобто. з кожним із трикутників.

Особливий інтерес до алгоритмів триангуляції визначається тим, що вони використовуються в багатьох процедурах машинної графіки, таких як формування поверхонь, забарвлення, видалення невидимих частин, відсікання.

Розбиття зображень на трикутники пояснюється такими причинами:

- трикутник є найпростішим полігоном, вершини якого однозначно задають грань;
- будь-яку область можна гарантовано розбити на трикутники.

Жоден сучасний сканер не в змозі відсканувати людину таким чином, щоб потім не знадобилося втручання професіонала, який працює у спеціалізованому програмному забезпеченні. На пост-обробку, отриманої сканером інформації, хорошому фахівцю знадобиться кілька годин, що, звичайно, значно швидше, ніж моделювання об'єкта з нуля. Але з іншого боку, моделювання вручну є повністю контрольованим процесом, на відміну від роботи тривимірних сканерів, які не в змозі уникнути розриву сітки, важко працювати зі складним рельєфом поверхні і т.д. В результаті багато моделей виходять формою досить точними, але з таким букетом проблем, що про якісну анімацію можна забути. У будь-якому випадку, якщо навіть модельєру доведеться створювати модель знову, то «заготівля», що є під рукою, прискорить робочий процес.

Магістерська атестаційна робота виконана на кафедрі Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем ХНУРЕ. На кафедрі МІРЕС проводяться дослідження в таких наукових областях, як технічний зір роботів [17,18], виявлення та розпізнавання БПЛА за результатами відео – [19-24] і акустичного спостережень [25-28]. Отже, дослідження в рамках даної атестаційної роботи відповідають тематиці досліджень кафедри.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ 3D-СКАНУВАННЯ

### 2.1 Види 3D-сканерів: контактні та безконтактні

#### 2.1.1 Контактні сканери

Контактні сканери працюють за принципом обведення об'єктів спеціальним щупом, завдяки якому в комп'ютер передаються координати моделі.

У нього є переваги і недоліки (табл.2.1):

Таблиця 2.1 – Переваги і недоліки контактних сканерів

Переваги	Недоліки
Легко сканувати фігури складної форми	Тривалий час сканування
Немає потреби у освітленні	Проблеми сканування органічних поверхонь
Дозволяє детально сканувати ребра	Проблеми сканування невеликих деталей
Простий у зверненні	Щуп торкається об'єкта
Простий результат на виході	Людський фактор

#### 2.1.2 Безконтактні сканери

Існують три типи безконтактних сканерів:

- фотограмметричний;
- структурований білий колір;
- лазерний.

## Технологія на основі фотограмметрії;

Технологія на основі фотограмметрії є фотографуванням об'єкта сканування з різних точок і відтворення на основі отриманих зображень тривимірної моделі (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Переваги і недоліки технології на основі фотограмметрії

Переваги	Недоліки
Низькі витрати	Складність процедури встановлення приймальних камер та нанесення точок прив'язки
Немає контакту з предметом	Складність калібрування
	Прив'язка до програмного забезпечення
	Багато фотографій, необхідних для отримання точної моделі
	Складність зшивання

## Сканування на основі структурованого білого світла

Сканування на основі структурованого білого світла полягає у проектуванні на об'єкт ліній, що утворюють унікальний візерунок, кожна зміна якого сканується приймальною камерою (табл.2.3).

Таблиця 2.3 – Переваги і недоліки сканування на основі структурованого білого світла

Переваги	Недоліки
Велика швидкість сканування	Відсутність транспортабельності
Отримання 100 000 точок сканування за один прохід	Немає можливості сканування внутрішніх областей
Гарна деталізація	Обмеження яскравості об'єктів
Можливість сканування людини завдяки відсутності лазерів	Велика вартість системи
Немає контакту з предметом	Необхідна підготовка до зшивання

### Лазерна технологія

Лазерна технологія ґрунтується на проектуванні лазерного променя на об'єкт сканування. Усі спотворення сприймаються вимірювальною камерою, яка відстежує фізичне положення лазера. Дані передаються на комп'ютер, де буквально викреслюються лазером (табл.2.4).

Таблиця 2.4 – Переваги і недоліки сканування на основі структурованого білого світла

Переваги	Недоліки
Недорогі 3D-сканери для промислового застосування в порівнянні з іншими видами сканерів	Виникає необхідність напилення на прозорі та сильновідбиваючі об'єкти пудри.
Можливість роботи з об'єктами недоступними для сканування іншими методами	Не можна сканувати чорні об'єкти
Немає контакту з предметом	Неможливість сканувати ділянки об'єкта поза зоною видимості камери

## 2.2 Переваги і недоліки використання 3D-сканування об'єктів

3D-сканер – прилад, що дозволяє отримати координати точок об'єкта у тривимірному просторі та на їх основі створити комп'ютерну 3D-модель об'єкта. Ідея тривимірної візуалізації об'єктів втілюється в 3D-сканерах. На відміну від камери, це обладнання дозволяє зосередити увагу на об'єктах таким чином, щоб забезпечити ефект 3D.

Існуючі лазерні сканери баланують між трьома основними характеристиками: швидкістю, дальністю дії та роздільною здатністю (точність отриманої моделі).

Сканери використовуються в індустрії розваг, для будівництва детальних моделей для різноманітних додатків, включаючи промисловий дизайн та медицину. Ультразвукові сканери використовують у медицині. Звукові хвилі можуть проникати в матку і показувати тривимірні зображення плоду, що розвивається. Рентгенівські промені у 3D-сканері також використовуються у медицині. Ці сканери збирають світло або випромінювання, яке створюється об'єктом. 3D-сканери мають широке застосування у багатьох галузях промисловості. Лікарі, наприклад, використовують їх для сканування зубів, кісток та вивчення органів тіла. Інженери можуть приймати 3D-сканування будівлі. Лазерні сканери зазвичай застосовуються для безконтактного сканування поверхні та 3D-сцен.

Область застосування включає комп'ютерну графіку, робототехніку, промисловий дизайн, медичні дослідження, археологію, мультимедіа та веб-дизайн, поряд із швидким моделюванням та автоматизованим контролем якості.

3D-сканери поділяються на дві групи – контактні та безконтактні. Контактні сканери фізично обстежують сканований об'єкт на дотик. До недоліків цього виду 3D-сканерів відноситься те, що вони повільні і можуть пошкодити тендітні об'єкти сканування. Сканером, як правило, управляє оператор. Незважаючи на свої недоліки, вони дуже точні. Безконтактні сканери поділяються залежно від типу емісії, яка використовується у 3D-фотографіях. Вони можуть використовувати світло, випромінювання та ультразвук.

### 2.3 Теорія пари знімків. Елементи взаємного орієнтування пари знімків

Два знімки із зображеннями однієї і тієї ж ділянки місцевості, отримані з двох точок простору, називається стереоскопічною парою знімків (стереопарою). Знімок, отриманий з точки фотографування  $S_1$  називається лівим, а з  $S_2$  – правим. На рис. 2.1 зображена пара знімків у положенні, яке вона займала у момент фотографування.

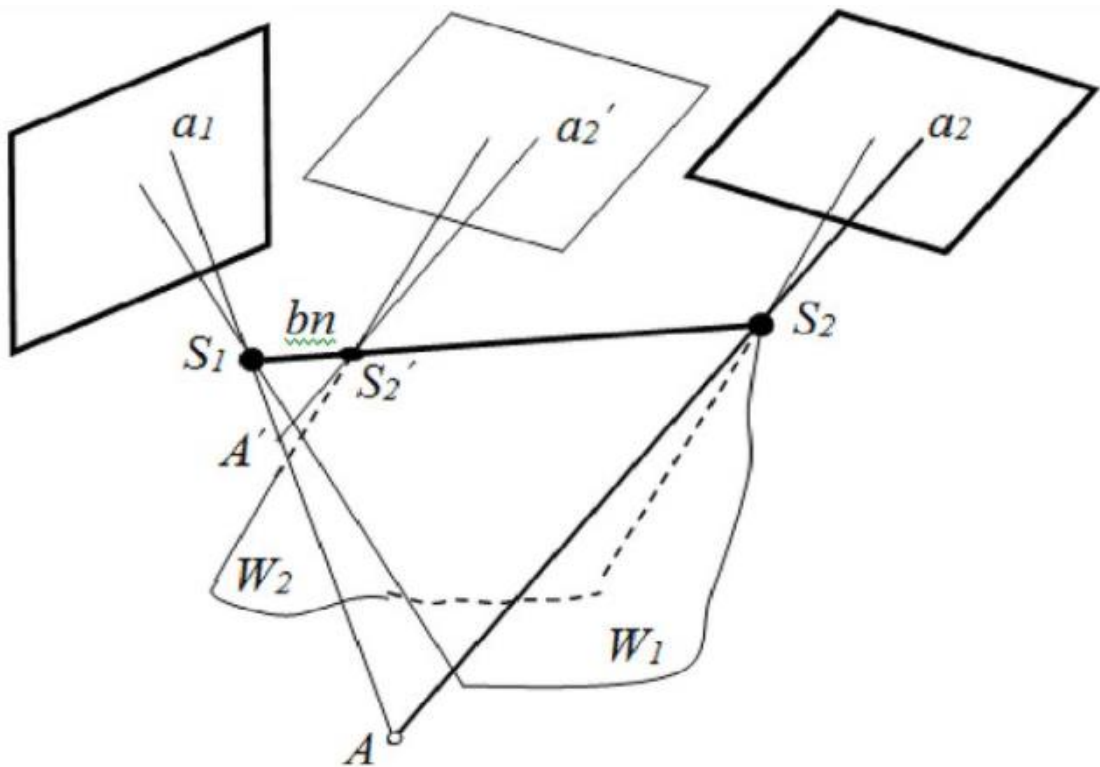


Рисунок 2.1 – Структура пари знімків

$A$  – точка місцевості, що зобразилася на знімках у точках  $a_1$  та  $a_2$ . Вони називаються відповідними або однойменними точками. Проектуючи промені  $S_1A'$  і  $S_2A'$ , що проходять через ці точки називаються відповідними або однойменними проєктуючими променями.

Відстань між точками фотографування  $S_1$  і  $S_2$  – базис фотографування.

Площина  $WA$ , що проходить через базис і точку місцевості є базова площина.

Площини, що проходять через базис фотографування та головні промені є головними базисними площинами ( $W_1$  – лівого  $W_2$  – правого знімків).

Будь-яка пара відповідних променів перетинається, якщо знімки займають становище, яке було у момент фотографування.

Сукупність їх точок перетину утворює поверхню. Її називають стереомоделлю чи просто моделлю місцевості. При вище названих умовах вона збігається із земною поверхнею, значить масштаб такої моделі 1:1.

Допустимо, що одна із зв'язок (наприклад, права) поступально переміщається вздовж базису з положення  $S_2$  до  $S_2'$ . Модель при цьому не зруйнується, але зміниться її масштаб. Відстань  $b_n$  між центрами проєкцій двох зв'язок, якими побудована модель, називається базисом проєктування, та її масштаб обчислюється за такою формулою:

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

Існує поняття елементи орієнтування стереопари. До них відносять елементи орієнтування (внутрішнього  $x_0, y_0, f$  і зовнішнього  $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, i$  к), кожного з утворюючих її знімків, таким чином, загальне їх число 18. Якщо фотографування місцевості з точок  $S_1$  та  $S_2$  виконано одним і тим же АФА, то стереопара має 15 елементів орієнтування. Іншу трійку куткових елементів зовнішнього орієнтування знімків на практиці також використовують, але значно рідше. У системах координат знімків положення точок  $a_1$  та  $a_2$  (зображень точки А місцевості) визначається координатами  $x_1, y_1$  та  $x_2, y_2$  відповідно.

Взаємне орієнтування знімків стереопари це встановлення їх у положення, при якому будь-яка пара відповідних променів перетинається, то тобто забезпечується побудова моделі. Величини, що визначають таке положення знімків, називаються елементами взаємного орієнтування.

На практиці виконання умови перетину відповідних променів досягається поворотом обох знімків або поворотами та зсувами тільки одного з них за нерухомого становища другого. Відповідно з цим розрізняють дві системи елементів взаємного орієнтування. У першій нерухомими вважають базис

фотографування та головну базисну площину лівого знімка; у другій – лівий знімок.

За умовою взаємного орієнтування пари знімків необхідно, щоб для будь-якої точки  $M$ , вектори  $\overline{r_1}$ ,  $\overline{r_2}$  та  $\overline{R_0}$ , лежали в одній площині, тобто виконувалася умова компланарності трьох векторів:

$$\overline{R_0} * (\overline{r_1} \times \overline{r_2}) = 0 \quad (2.2)$$

У координатній формі ця умова виражається рівністю нулю визначника третього порядку, складеного з координат векторів:  $\overline{R_0}$  (складають базису фотографування  $B_x, B_y, B_z$ ),  $\overline{r_1}$  (координат  $X_1', Y_1', Z_1'$ ), та  $\overline{r_2}$  (координат  $X_2', Y_2', Z_2'$ ):

$$\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_1' & Y_1' & Z_1' \\ X_2' & Y_2' & Z_2' \end{vmatrix} = 0. \quad (2.3)$$

Визначник, записаний на основі умови компланарності, може бути отриманий з вирішення рівнянь колінеарності, записаних для однієї і тієї ж точки місцевості, що зобразилася на парі знімків, отриманих з точок фотографування  $S_1$  та  $S_2$ .

Відповідно до цих рівнянь, зв'язок між координатами точки місцевості  $X, Y, Z$  та координатами її зображення на лівому  $X_1', Y_1', Z_1'$  та правому  $X_2', Y_2', Z_2'$  знімках мають такий вигляд:

$$X = X_{S_1} + (Z - Z_{S_1}) \frac{X_1'}{Z_1'}, \quad X = X_{S_2} + (Z - Z_{S_2}) \frac{X_2'}{Z_2'} \quad (2.4)$$

$$Y = Y_{S_1} + (Z - Z_{S_1}) \frac{Y_1'}{Z_1'}, \quad Y = Y_{S_2} + (Z - Z_{S_2}) \frac{Y_2'}{Z_2'}. \quad (2.5)$$

Тому:

$$X_{S_2} - X_{S_1} - (Z - Z_{S_1}) \frac{X_1'}{Z_1'} + (Z - Z_{S_2}) \frac{X_2'}{Z_2'} = 0, \quad (2.6)$$

$$Y_{S_2} - Y_{S_1} - (Z - Z_{S_1}) \frac{Y_1'}{Z_1'} + (Z - Z_{S_2}) \frac{Y_2'}{Z_2'} = 0. \quad (2.7)$$

Розв'язавши перше (або друге) рівняння щодо  $Z$  та підставивши результат у друге (або перше) рівняння, після перетворень запишемо:

$$(X_{S_2} - X_{S_1})(Y_1'Z_2' - Y_2'Z_1') - (Y_{S_2} - Y_{S_1})(X_1'Z_2' - X_2'Z_1') + (Z_{S_2} - Z_{S_1})(X_1'Y_2' - X_2'Y_1') = 0 \quad (2.8)$$

Так як  $X_{S_2} - X_{S_1} = B_x, Y_{S_2} - Y_{S_1} = B_y, Z_{S_2} - Z_{S_1} = B_z$ , те отримане рівняння є результатом розкладання визначника за елементами першого рядка.

Умова не порушується, якщо вектор  $\overline{R_0}$  замінити колінеарним вектором. Ця заміна рівноцінна зміні масштабу моделі місцевості  $\overline{R_0}'$ .

При використанні першої системи складові базису фотографування  $B_y = B_z = 0$ , а  $B_x = B = 0$ , тому:

$$\begin{vmatrix} B_x & 0 & 0 \\ X_1' & Y_1' & Z_1' \\ X_2' & Y_2' & Z_2' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ X_1' & Y_1' & Z_1' \\ X_2' & Y_2' & Z_2' \end{vmatrix} = 0. \quad (2.9)$$

$$\text{або } Y_1'Z_2' - Y_2'Z_1' = 0$$

А з урахуванням формул:

$$(x_1b_1' + y_1b_2' - fb_3')(x_2c_1'' + y_2c_2'' - fc_3'') - (x_2b_1'' + y_2b_2'' - fb_3'')(x_1c_1' + y_1c_1' - fc_1') = 0, \quad (2.10)$$

де  $x_1, y_1$  та  $x_2, y_2$  – координати відповідних точок на лівому та правому знімках;

$b_1', b_2', \dots, c_3'$  – напрямні косинуси матриці перетворення координат лівого знімка;

$b_1'', b_2'', \dots, c_3''$  – напрямні косинуси матриці перетворення координат правого знімка.

Напрямні косинуси обчислюють за формулами:

$$a_1 = \cos(X', x) = \cos\alpha \cos x + \sin\alpha \sin\omega \sin x \quad (2.11)$$

$$a_2 = \cos(X', y) = -\cos\alpha \cos x + \sin\alpha \sin\omega \cos x \quad (2.12)$$

$$a_3 = \cos(X', z) = \sin\alpha \cos\omega \quad (2.13)$$

$$b_1 = \cos(Y', x) = \cos\omega \sin x \quad (2.14)$$

$$b_2 = \cos(Y', y) = \cos\omega \cos x \quad (2.15)$$

$$b_3 = \cos(Y', z) = -\sin\omega \quad (2.16)$$

$$c_1 = \cos(Z', x) = -\sin\alpha \cos x + \cos\alpha \sin\omega \sin x \quad (2.17)$$

$$c_2 = \cos(Z', y) = \sin\alpha \sin x + \cos\alpha \sin\omega \cos x \quad (2.18)$$

$$c_3 = \cos(Z', z) = \cos\alpha \cos\omega, \quad (2.19)$$

з використанням кутових елементів  $\alpha'_1, \omega'_1 = 0, x'_1$  для лівого знімка та  $\alpha'_2, \omega'_2, x'_2$  для правого.

Рівняння для системи елементів взаємне орієнтування пари знімків справедливе для будь-яких значень елементів взаємного орієнтування. Для планових знімків можна використовувати їх наближений варіант. Так, на підставі залежностей з точністю до членів першого порядку малості для першої системи елементів (верхня рядок для лівого знімка, нижня – для правого) маємо:

$$\begin{aligned} a'_1 = b'_2 = c'_3 = 1, a'_2 = -b'_1 = -k'_1, a'_3 = -c'_1 = a'_1, b'_3 = c'_2 = 0 \\ a''_1 = b''_2 = c''_3 = 1, a''_2 = -b''_1 = -k''_2, a''_3 = -c''_1 = a''_2, b''_3 = c''_2 = \omega_2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Підставивши зазначені вище значення напрямних косинусів відповідно до рівняння, після перетворень, для першої системи елементів отримаємо:

$$\frac{x_1 y}{f} a'_1 - \frac{x_2 y}{f} a'_2 - \left(f - \frac{y^2}{f}\right) \omega'_2 + x_1 y'_1 - x_2 y'_2 + q = 0, \quad (2.21)$$

де  $q = y_1 - y_2$ .

Величина  $q$  називається поперечним паралаксом.

У коефіцієнтах при елементах взаємного орієнтування прийнято,  $y_1 \approx y_2 = y$ , так як для планових знімків це суттєво не впливає на точність результату.

З формули видно, що якщо елементи взаємного орієнтування, рівні нулю, то поперечний паралакс  $q$  у всіх точках орієнтування відсутній.

#### 2.4 Визначення елементів взаємного орієнтування

Взаємне орієнтування пари знімків визначається п'ятьма елементами. Отже, для їх визначення необхідно виміряти на знімках координати як мінімум п'яти відповідних точок, скласти для них систему рівнянь взаємного орієнтування та вирішити її щодо невідомих величин.

Насправді точок беруть більше п'яти, тому завдання вирішують методом ітерацій за способом найменших квадратів. Для першої системи:

1. Приймають нулі як наближені значення елементів взаємного орієнтування знімків пари.

2. Виконують вимірювання з метою визначення координат відповідних точок  $x_1, y_1$  та  $x_2, y_2$ .

3. Наближені значення елементів взаємного орієнтування, а також елементи внутрішнього орієнтування та виміряні координати відповідних точок підставляють у рівняння, яке є функцією шуканих величин, тобто

$$\varphi_i(\alpha'_1, \alpha'_2, \omega'_2, x'_1, x'_2) = Y'_{1,i}Z'_{2,i} - Z'_{1,i}Y'_{2,i} = 0. \quad (2.22)$$

Через похибки вимірювань, неточності наближених величин, прийнятих у якості невідомих, та інших причин зазначена вище функція дорівнює нулю не буде. Позначимо отримані значення через  $l_i$  де  $i$  номер відповідної точки.

4. Приймають  $l_i$ , як вільні члени, складають рівняння поправок

$\delta\alpha_1, \delta\alpha_2, \delta\omega_2, \delta x_1, \delta x_2$ , яке у загальному випадку виглядає наступним чином:

$$a\delta\alpha'_1 + b\delta\alpha'_2 + c\delta\omega'_2 + d\delta x'_1 + e\delta x'_2 + 1 = v, \quad (2.23)$$

де  $v$  – залишкова величина нев'язки рівняння взаємного орієнтування. Коефіцієнти перед поправками – приватні похідні функції щодо відповідних невідомих. Рівнянь складають стільки, скільки виміряно відповідних точок.

5. При надмірній їх кількості система лінійних рівнянь вирішується за умови:

$$V^T P V = \min, \quad (2.24)$$

де  $P$  – матриця ваги вимірних координат точок знімка.

Тобто складають та вирішують нормальні рівняння, та у результаті визначають вектор поправок.

6. Вводять поправки до наближених значень елементів взаємного орієнтування, набувають уточнених значень невідомих, які знову приймають за наближені значення і т. д. Як критерій точності визначення елементів взаємного орієнтування можна використовувати величини поправок  $\delta$ , поправок  $v$  або залишкових паралаксів:

$$\delta q = y_1^0 - y_2^0, \quad (2.25)$$

обчислюваних після кожного наближення для всіх точок орієнтування. Ординати  $y_1^0$  і  $y_2^0$ , визначаються за другою формулою через отримані елементи взаємного орієнтування та вимірні координати  $x$ ,  $y$  відповідних точок лівого та правого знімків.

Для оцінки точності визначення елементів взаємного орієнтування в останній ітерації знаходять вагові коефіцієнти  $Q_{jj}$  і поправки  $v$ . За цими даними обчислюють помилку одиниці ваги

$$\mu = \sqrt{\frac{[pvv]}{n-5}}, \quad (2.26)$$

а за формулою

$$m = \mu\sqrt{Q_{jj}} \quad (2.27)$$

– середні квадратичні похибки визначення ЕВзО.

## 2.5 Побудова моделі із перетворенням зв'язок проектуючих променів

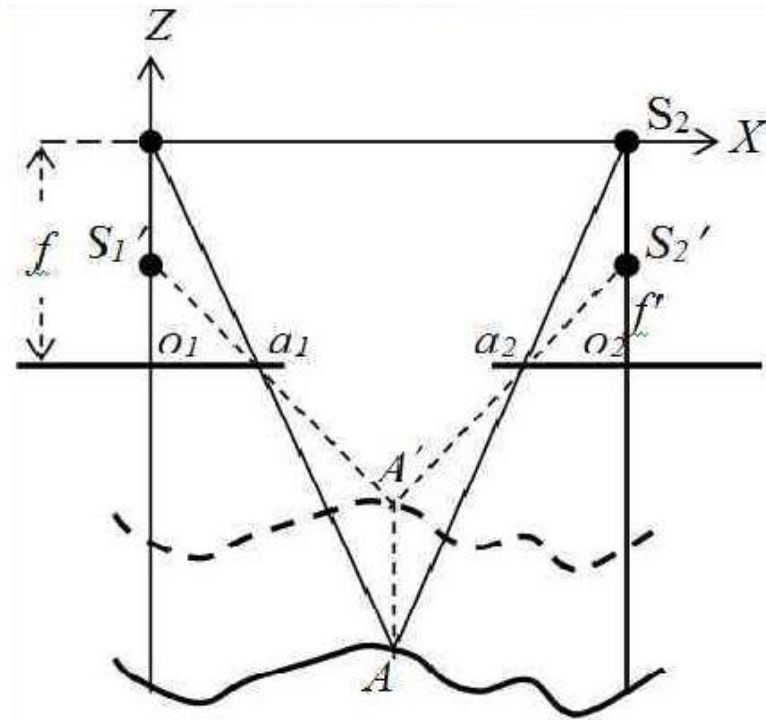


Рисунок 2.2 – Модель, побудована з пари знімків

Іноді будують модель, коли відстань  $f$  від центру проекції до знімка не відповідає фокусній відстані  $f$  камери АФА. У цьому випадку кажуть, що зв'язка проектуючих променів перетворена. Для того, щоб зрозуміти до чому це призводить, змінимо фокусну відстань АФА в  $k$  раз побудові моделі по парі горизонтальних знімків нормального випадку зйомки. З малюнка видно, що умова взаємного орієнтування пари знімків при цьому не порушиться, тобто кожна пара відповідних променів перетворених зв'язок перетинатиметься.

Сукупність точок, у яких перетинаються відповідні промені перетворених зв'язок, називається перетвореною (афінною) моделлю. Однак зауважимо, що при перетворенні зв'язок проектуючих променів точка  $A$  моделі перемістилася до точки  $A'$ . Причому відрізок  $AA'$  паралельний осі  $Z$ , так як він лежить на лінії

перетину двох вертикальних площин  $S_1S_1'a_1$  та  $S_2S_2'a_2$ . Звідси одразу ж випливає, що в плані жодних змін не відбувається. Змінюється лише координата  $Z$ , тобто горизонтальний масштаб  $1/MГ$  моделі не зміниться. Стане іншим вертикальний масштаб  $1/MВ$ , і він тепер не буде дорівнює горизонтальному. Причому з малюнка легко отримати співвідношення  $M_B = M_r/k$  серед їх знаменниками.

## 3 СТВОРЕННЯ ФОТОГРАММЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ

### 3.1 Вибір об'єкта для сканування, обладнання та процес сканування

Данна робота націлена на те, щоб довести, що сканування об'єктів можливо, маючи звичайний смартфон. Тому об'єктом для сканування було обрано пам'ятник студенту, який знаходиться на території ХНУРЕ. Він зроблений з металу, який має блискучу структуру, що ускладнює процес сканування.

Щоб об'єкт мав мінімальну блискучість, необхідно обрати хмарну погоду з суцільними хмарами. Також погода повинна бути без дощу (мокрый об'єкт набуває ще більшої блискучості) та вітру (сильний вітер унеможливорює сканування дрібних і легких об'єктів і ускладнює весь процес).

Оскільки дослідження проводяться за допомогою смартфона, був обраний наступний: Samsung A50. Основна камера: 25,0 Мп + 8,0 Мп + 5,0 Мп. Не зважаючи на те, що це не професійне обладнання, тут присутнє професійні налаштування:

- ISO (якомога нижче, переважно не вище 400);
- баланс білого (повинен встановлюватися вручну та не повинен змінюватися протягом усієї знімальної сесії);
- експозиція.

Головне завдання при скануванні – це отримати максимально чіткі кадри. Необхідно слідкувати за зоною фокусування, з правильним балансом білого щодо навколишнього середовища і правильним експонуванням фотографії.

Налаштувавши обладнання та обравши об'єкти для сканування, можна переходити до сканування об'єктів.

Існує декілька порад, щодо створення якісного сканування:

- не обмежувати кількість зображень;
- використовувати максимально доступну роздільну здатність;
- кожна точка поверхні сцени має бути чітко видно принаймні на двох високоякісних зображеннях. Тут працює правило «чим більше, тим краще», і

потрібно прагнути хоча б трьох зображень, тому що для отримання результатів більшість програм використовує розрахунок триангуляції;

- завжди рухатися під час зйомки. Стоячи на одній точці, можна отримати тільки панораму, яка нічим не допоможе створенню 3D-моделі, і навіть занесе помилки в скан;

- не змінювати точку огляду більше, ніж на 30 градусів;

- починати зі зйомки всього об'єкта, рухатися навколо нього, а потім фокусуватися на деталях. Наближатись не різко, а поступово;

- при зйомці таких об'єктів як статуї, будівлі та подібних до них потрібно завжди рухатися навколо і закінчувати в тому ж місці, звідки почали;

- не зупинятися на одному обході ,робити знімки з різної висоти;

- повертати камеру (горизонтальне та вертикальне переміщення забезпечує найкраще калібрування);

- експериментувати і не боятися порушувати правила, якщо це потрібно.

На рисунку 3.1 зображено об'єкт сканування. Об'єкти, які треба сфотографувати детальніше:

- голова;

- руки;

- ноутбук;

- ноги та взуття;

- портфель;

- лавочка.



Рисунок 3.1 – Об'єкт сканування

Усього було зроблено 200 фотографій. Було здійснено фотографування загального плану (рис.3.2). Підійшовши ближче, була знята серія фотографій голови (рис.3.3). Okремо зроблена серія фотографій ніг (рис.3.4) та сумки. (рис.3.5).



Рисунок 3.2 – Загальний план



Рисунок 3.3 – Детальный план головы



Рисунок 3.4 – Детальный план обуви



Рисунок 3.5 – Детальний план сумки

### 3.2 Аналіз обладнання та програм для сканування

Сьогодні фотограмметрія переживає вибухове зростання, і великі компанії, такі як Bentley і Pix4D, займають серйозну частку на ринку програмного забезпечення для фотограмметрії і продовжують радувати своїх акціонерів серйозним зростанням своїх фінансових показників. Багато користувачів Pix4d вже звикли до того, що якісне програмне забезпечення для фотограмметрії досить дороге. Наприклад річна підписка на Pix4Dmapper буде коштувати 123 000 грн. А "вічна" ліцензія Pix4Dmapper коштує 163 000 грн.

Але сьогодні існує безкоштовних програм для фотограмметрії та 3D-моделювання.

#### Безкоштовна програма для фотограмметрії Colmap (рис.3.6)

COLMAP – це безкоштовне програмне забезпечення для фотограмметрії, яке можна завантажити із Github. За бажанням можна вибрати: працювати з командного рядка або з графічним інтерфейсом Як більшість програм для фотограмметрії з нашого списку, COLMAP може автоматично створювати 3D-

об'єкти з фотографій, зроблених камерою з одним об'єктивом, або обробляти знімки зроблені стереокамерою.

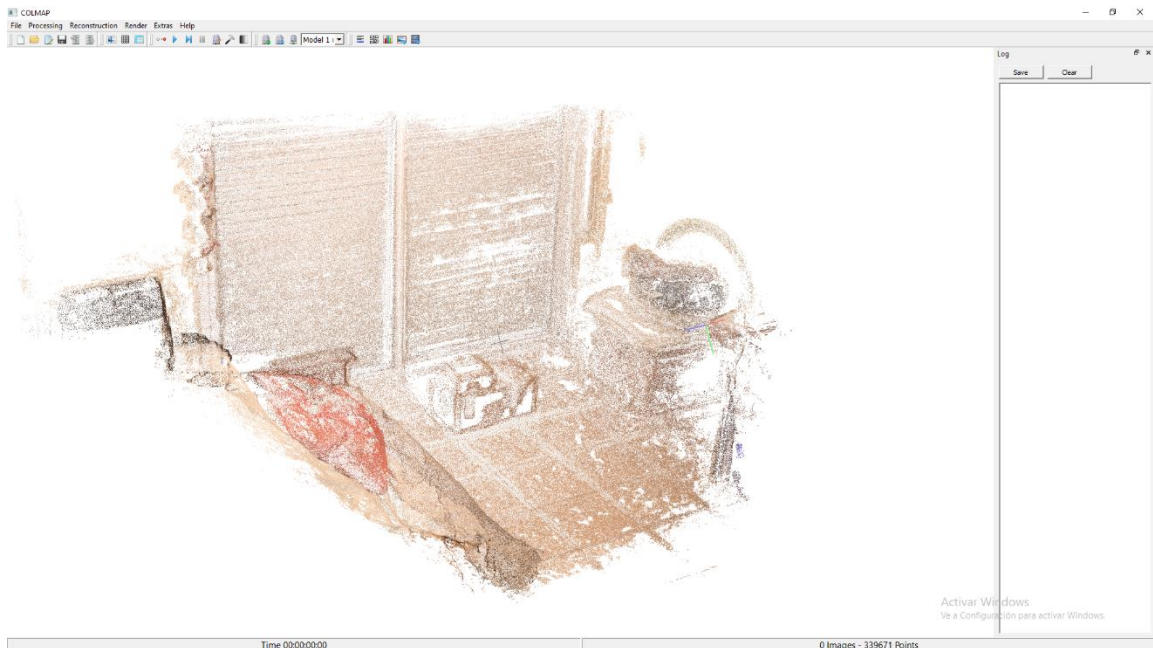


Рисунок 3.6 – COLMAP

Оскільки ця програма створена ентузіастами та має відкритий код COLMAP увібрав у себе багато різних плагінів та доповнень. Всі ці доповнення встановлюються за бажанням та за необхідності розширити стандартні можливості цієї чудової безкоштовної програми для фотограмметрії. Наприклад, можна точно визначити параметри камери, яка використовувалася для фотографування. Те саме стосується і процесу отримання додаткової формації з фото-файлу, це допоможе поліпшити отриманий результат. Хоча програма може експортувати тривимірну поверхню але її алгоритми працюють тільки з щільною хмарою точок у вікні перегляду. На жаль, програма не вміє працювати з сіткою поверхні 3D-об'єкта і для очистки та покращення 3D-моделі, вам доведеться використовувати сторонні програми, наприклад як MeshLab.

Для створення хмари щільних точок достатньо використовувати COLMAP без плагінів у кілька кроків. Для просунутих користувачів програма дозволяє налаштовувати безліч різних параметрів. Не всі їх інтуїтивно зрозумілі для новачка. Для швидкого отримання результату в COLMAP немає необхідності змінювати будь-які параметри, достатньо використовувати стандартні

налаштування. Значення параметрів за замовчуванням є компромісом між якістю та швидкістю роботи.

Отже, Meshroom - гнучка програма, яка підійде як для новачка, так і для серйозної роботи та проведення різноманітних досліджень. Величезна перевага перед іншими програмами – наявність документації російською мовою!

### Безкоштовна програма для фотограмметрії Meshroom (рис.3.7)

Meshroom – це безкоштовне програмне забезпечення для фотограмметрії з відкритим кодом. Він побудований на потужній платформі для фотограмметрії AliceVision.

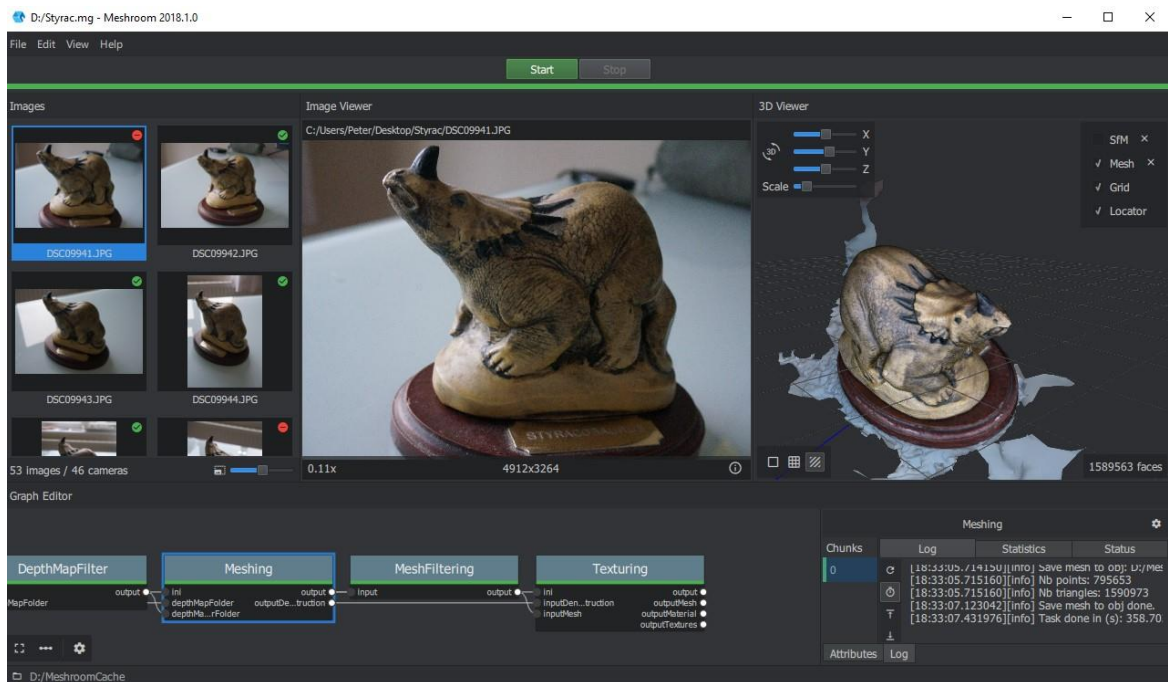


Рисунок 3.7 – Meshroom

По суті програмне забезпечення Meshroom це інтерфейс, що об'єднує багато дрібних модулів для створення тривимірної моделі. У багатьох інших програмах такі модулі доводиться активувати та налаштовувати. Але в Meshroom всі модулі утворюють один конвеєр завдань і для отримання результату достатньо натиснути лише одну кнопку «Пуск».

Незважаючи на простоту використання будь-який параметр обробки фотографій, можна налаштувати, щоб отримати саме той результат, який ви

хочете. Наприклад, у параметрах текстур можна досягти по істині приголомшливих результатів, що дозволяють використовувати створені моделі у професійній діяльності. Спеціально для користувачів Autodesk Maya у програмі Meshroom є плагін для створення 3D-моделі, що дозволяє робити експорт. Цей плагін можна завантажити безкоштовно на веб-сайті Meshroom.

Безкоштовна програма для фотограмметрії MicMac (рис.3.8)

MicMac – це безкоштовне програмне забезпечення для фотограмметрії з відкритим кодом, розроблене Французьким національним географічним інститутом та Французькою національною школою географічних наук.



MicMac



Рисунок 3.8 – MicMac

Його величезний і складний набір функцій переважно підходить для професійних користувачів або вчених, але й звичайні користувачі можуть його використовувати для створення ортопланів та різних 3D-моделей.

Програма МісМас створена з урахуванням досвіду викладачів та науковців. Ця програма для фотограмметрії зарекомендувала себе як універсальний інструмент, який успішно використовується у таких галузях, як картографія, охорона навколишнього середовища, лісове господарство, збереження культурної спадщини та приватні охоронні підприємства.

Використовуючи МісМас, можна створювати 3D-моделі та ортофотографічні плани. Крім того, це програмне забезпечення для фотограмметрії може обробити об'єкти будь-якого типу та будь-якого масштабу без обмежень. Воно також придатне як для обробки аеро-фотографій великих ділянок землі, так і для сканування невеликих об'єктів. Програма може обробляти відеофайли для побудови моделей.

У програмі є інструменти, що дозволяють його використовувати в метрології та геодезії. Веб-сайт МісМас містить докладні посібники та навчальні посібники, які допоможуть вам швидко освоїтися.

#### Безкоштовна програма для фотограмметрії Regard3D (рис.3.9)

Regard3D – це безкоштовна програма для фотограмметрії з відкритим вихідним кодом, в якій для побудови тривимірних моделей використовується метод структури з руху (SfM).

Незважаючи на те, що Regard3D можна безкоштовно скачати і користуватися, він є дуже просунутим програмним забезпеченням. Вивчення цієї програми вимагає чимало часу, щоб розібратися у всіх тонкощах, але винагородою за витрачений час будуть якісні 3D-моделі.

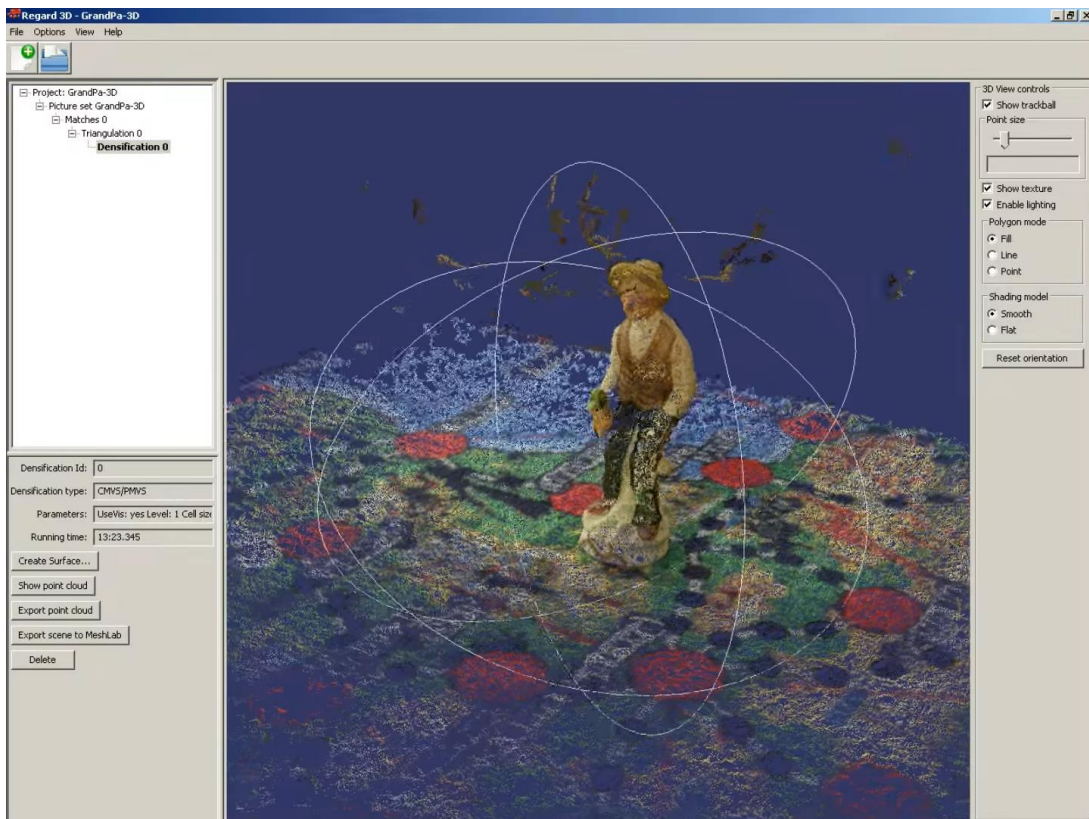


Рисунок 3.9 – Regard3D

У цій програмі ви зможете відредувати хмари точок перед тим, як відправите команду на генерацію тривимірної поверхні об'єкта. Якщо ви починаєте вивчати фотограмметрію, ця програма для Вас стане відмінним початком для занурення в цю цікаву тему. На веб-сайті Regard3D є докладні посібники та навчальні посібники, необхідні для початку роботи.

### Безкоштовна програма для фотограмметрії VisualSFM (рис.3.10)

VisualSFM – це програмне забезпечення для фотограмметрії, яке для створення хмар точок використовує метод створення 3D-об'єктів з послідовностей плоских зображень (SfM). Користувач може працювати як у графічному інтерфейсі, так і через командний рядок.

Ця програма об'єднала кілька розробок автора Чангана Ву: SIFT on GPU(SiftGPU), Multicore Bundle Adjustment, та Towards Linear-time Incremental Structure from Motion. Великою перевагою програми є швидкість роботи та

алгоритми, що дозволяють ефективно працювати на системах з багатоядерними графічними процесорами.

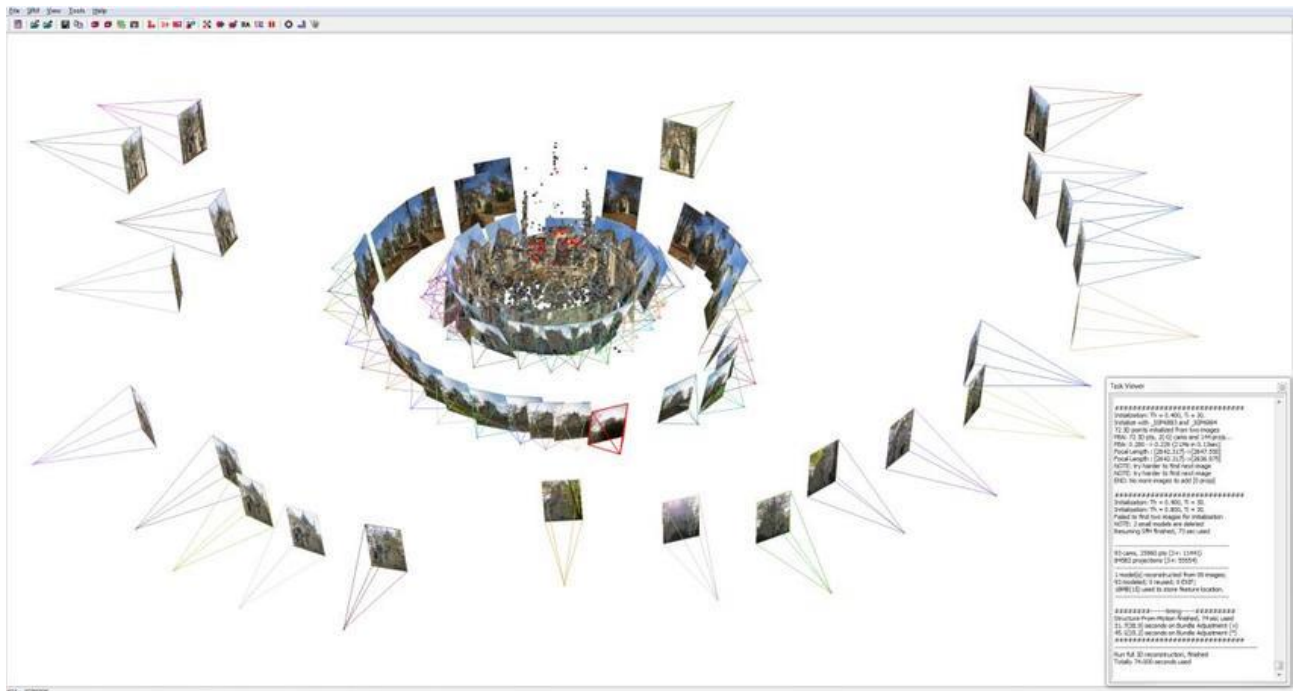


Рисунок 3.10 – VisualSFM

Може здатися, що безліч тонких налаштувань програми може звести з розуму навіть фаната фотограмметрії, але для створення хмари точок достатньо натиснути всього чотири кнопки.

Безкоштовна програма для фотограмметрії OpenMVG (рис.3.11)

OpenMVG (Multiple View Geometry) – це безкоштовна з відкритим кодом бібліотека популярна у вчених у галузі комп'ютерного зору, призначена для спільноти фахівців у галузі Multiple View Geometry. Вона призначена для легкого доступу до класичних рішень задач у режимі Множинної оглядової геометрії та їх вирішення.

Кредо OpenMVG – "Тримайте все просто, тримайте його в робочому стані". OpenMVG добре читається, проста у використанні та має можливість вносити зміни спільноту.

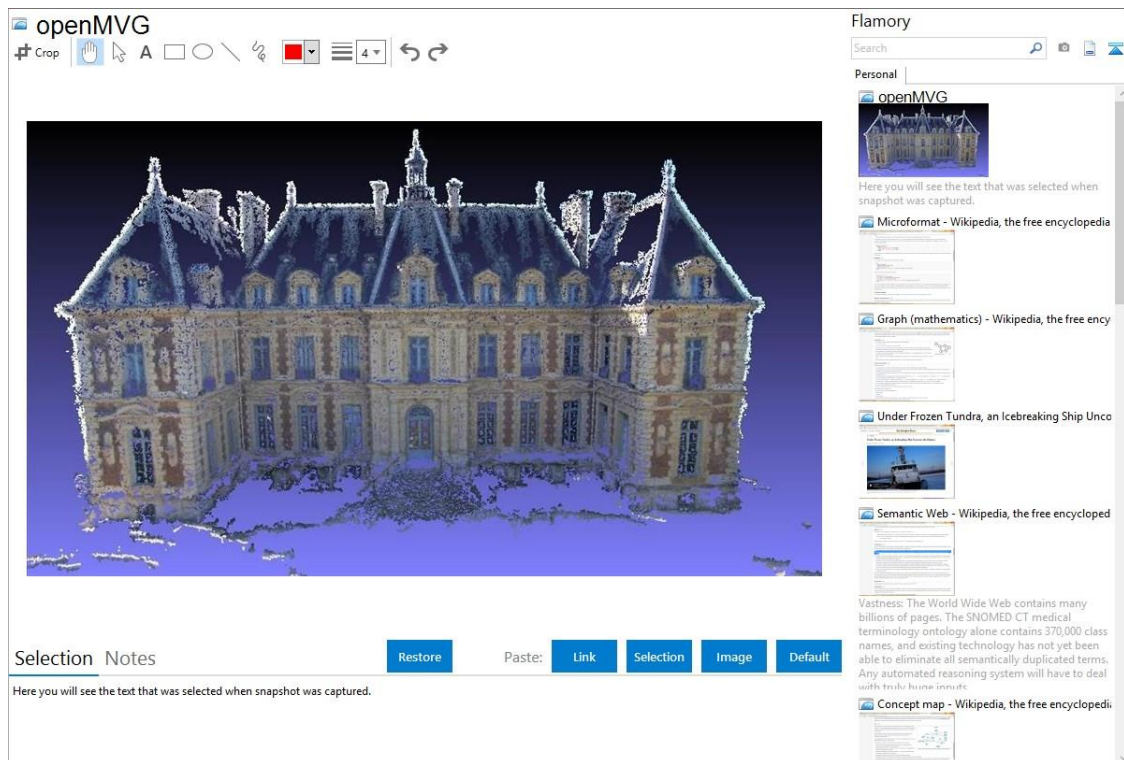


Рисунок 3.11 – OpenMVG

Кожен модуль цієї бібліотеки проходить багаторазове тестування та перевірки спільноту, що робить її вкрай надійною. Цей модуль для фотограмметрії вимагає компіляції та деяких навичок роботи у Windows чи Linux. Одна встановити дозвіл у пікселях на сантиметр для використання в мобільних іграх і аж до високої роздільної здатності для побудови моделі будівель.

Ознайомившись з вище наведеним програмним забезпеченням було обрано Meshroom, тому що він дуже зручний і має зрозумілий інтерфейс. Також він має плагін для експорту моделі у Autodesk Maya, тому що подальша обробка моделі буде проходити саме там.

Мінімальні вимоги щодо використання Meshroom:

- операційна система: Windows x64, Linux або macOS;
- процесор: Intel Core i7 або AMD Ryzen 7;
- оперативна пам'ять: 8 Гб;
- жорсткий диск: 400 МБ для Meshroom + місце для даних;
- графічний процесор: GPU з підтримкою NVIDIA CUDA (обчислювальні можливості  $\geq 2.0$ ).

Обладнання на якому виконувалось сканування об'єкту:

- операційна система: Windows x64;
- процесор: Intel Core i5;
- оперативна пам'ять: 16 Гб;
- жорсткий диск: 2 ТБ HDD + 128 Гб SSD;
- графічний процесор: NVIDIA RTX 2080.

### 3.3 Створення сканованої моделі у обраному середовищі

Завантажуємо фотографії, перетягнувши необхідні знімки з папки у вікно «Images» (рис.3.12). Програма проаналізує фотографії і результатом буде зелений або жовтий індикатор над кожною фотографією. Якщо над фотографією з'явився червоний індикатор, її слід видалити, тому що вона буде заважати програмі отримувати коректні дані. Після того як знімки завантажені та проаналізовані, натискаємо кнопку «Start» і програма почне сканування.

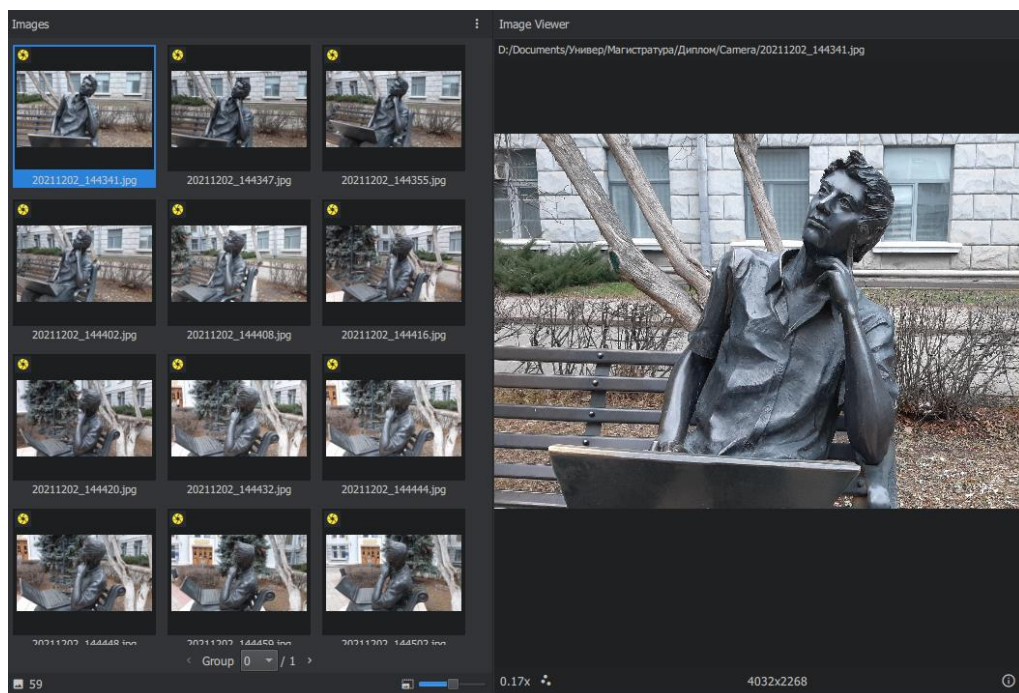


Рисунок 3.12 – Завантаження знімків у програму

На рисунку 3.13 показано послідовність дій, які необхідні для створення 3D-моделі із фотографій

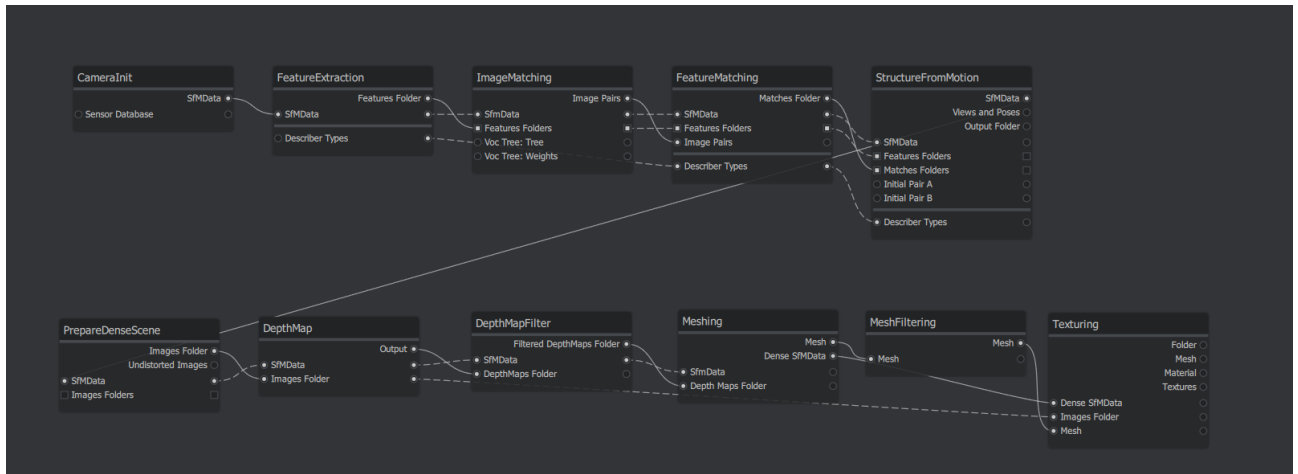


Рисунок 3.13 – Схема створення сканованого об'єкта

1. CameraInit. Створює SFM-файл, в якому міститься інформація про камеру, розмір матриці та ін. Етап виконується відразу після завантаження фото, ще до натискання кнопки «Start».
2. FeatureExtraction. На цьому етапі «витягуються елементи з зображень».
3. ImageMatching. Етап попередньої обробки. Тут Meshroom з'ясовує, які зображення має сенс зіставляти одне з одним.
4. FeatureMatching. Пошук відповідності між зображеннями.
5. SrtuctureFromMotion. На цьому етапі визначаються положення камер та характеристики цих камер. Слово «Motion» тут використано як загальний термін, цей етап виконується, навіть якщо нічого у кадрах не рухається. На цьому етапі створюється хмара точок. Тут же поруч із фотографіями з'являється значок камери. Зелений/жовтий – все добре, фото підійшла і дані з неї будуть використовуватися. Червоний – фото не підходять, дані з них програма не зможе отримати.
6. PrepareDenseScene. На цьому етапі Meshroom робить щось, спрямоване на боротьбу зі спотвореннями зображення.
7. DepthMap. Генерація карти глибини. Саме на цьому етапі Meshroom працює найдовше. Для кожного зображення буде створено карту глибини у форматі EXR.

8. DepthMapFilter. Карти глибини спочатку не дуже узгоджуються. Деякі карти глибини «бачать» області, закриті іншими картами. Етап DepthMapFilter забезпечує узгодженість.

9. Meshing. Генерація меша.

10. MeshFiltering. виправляє та допрацьовує згенерований меш. Згладжування, видалення великих трикутників (які відразу впадають у вічі і змушують лізти в аптечку за НИМ), видалення дрібних шматків меша (при збереженні великих).

11. Texturing. Створення UV-розгорток та проектування на них текстур. Всі тіні та світла зберігаються на своїх місцях («запікаються» у текстуру).

Налаштування програми:

- у вікні «FeatureExtraction» у вкладці «Attributes», у полі «Descriptor Preset» необхідно обрати значення «ultra», щоб точніше була модель. Це займатиме більше часу, але модель буде якісніше;
- у вікні «Texturing» у полі «Texture Side» обираємо параметр «8192», це розмір майбутньої текстури. Чим він більше, тим якісніше текстура.

Після того, як програма пройде етап «StructureFromMotion», у вікні «3D Viewer» з'явиться хмара точок (рис. 3.14.а–г)

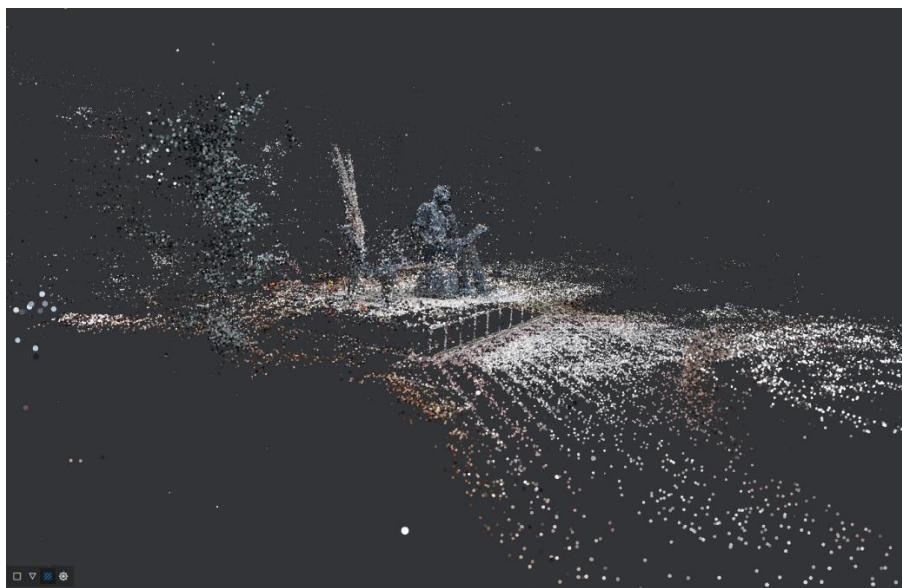


Рисунок 3.14.а – Хмара точок з бокового ракурсу зліва

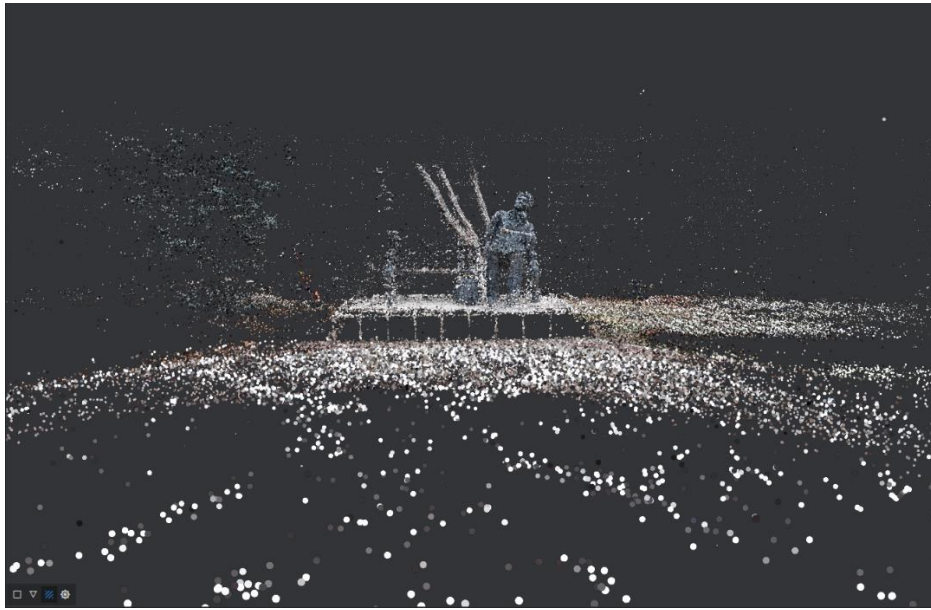


Рисунок 3.14.б – Хмара точок з фронтального ракурсу



Рисунок 3.14.в – Хмара точок з заднього ракурсу



Рисунок 3.14.г – Хмара точок з бокового ракурсу заправа

Поруч з вікном «3D Viewer» є вікно «Settings» (рис. 3.15) де можна збільшити або зменшити масштаб камер та точок, або зовсім їх сховати (рис. 3.16). У вкладці «Scene» натиснувши на «око» можна показати, або сховати елементи, які були створені програмою (меш, текстури, хмара точок). Натиснувши на хрестик поруч, можна видалити елемент зі сцени, але не з усієї програми.

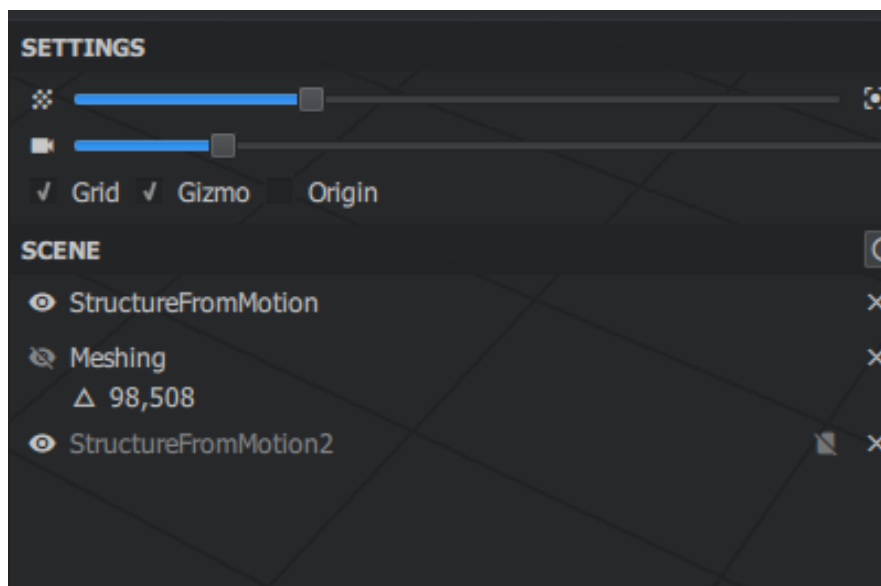


Рисунок 3.15 – Вікно «Settings»

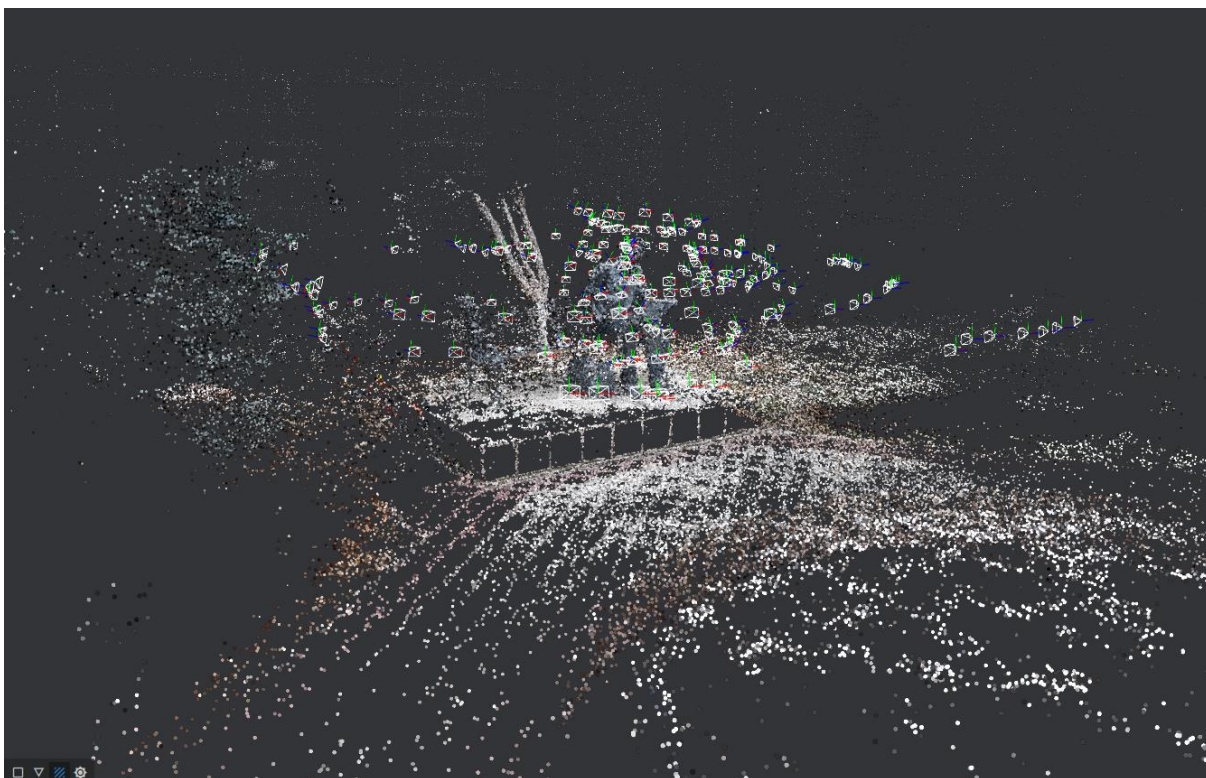


Рисунок 3.16 – Відображення положення камер та точок

У результаті (рис.3.17) вийшла ось така модель, де багато зайвого і тих об'єктів які погано отсканувалися, тому їх краще видалити.

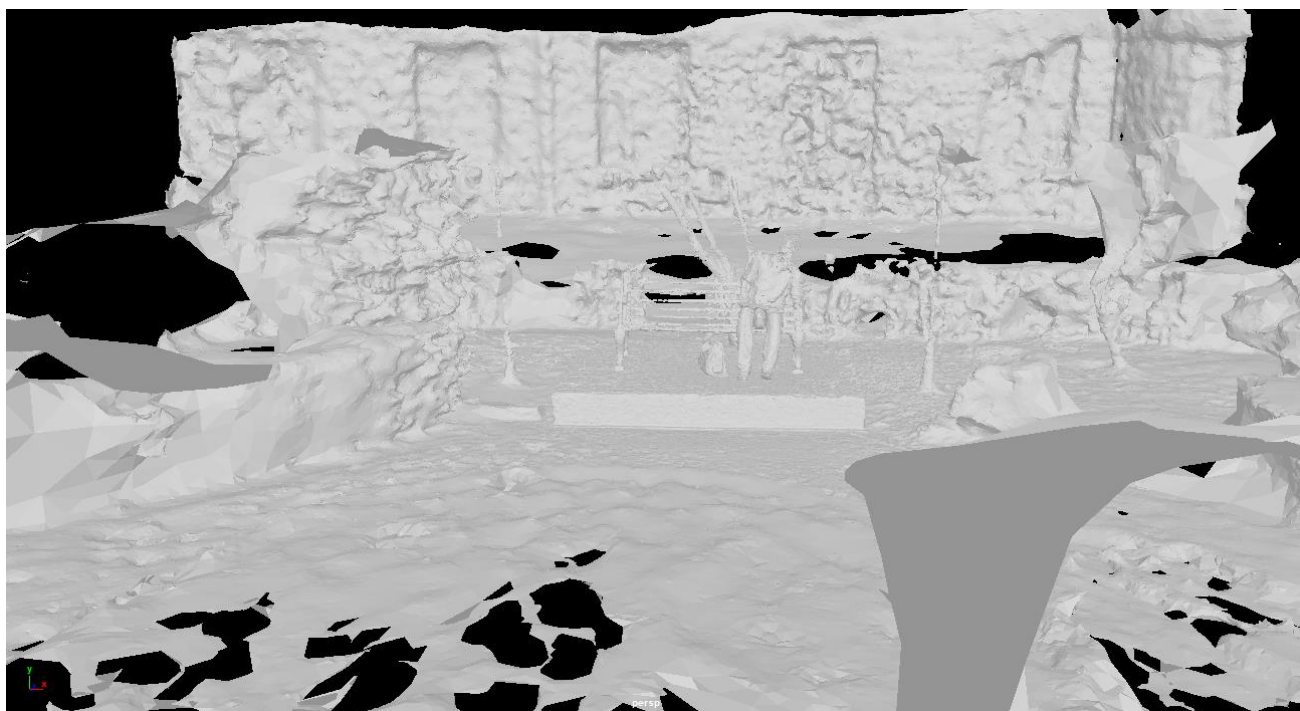


Рисунок 3.17 – Результат сканування

Після видалення зайвих об'єктів, модель приймає наступний вигляд (рис.3.18.а–в)

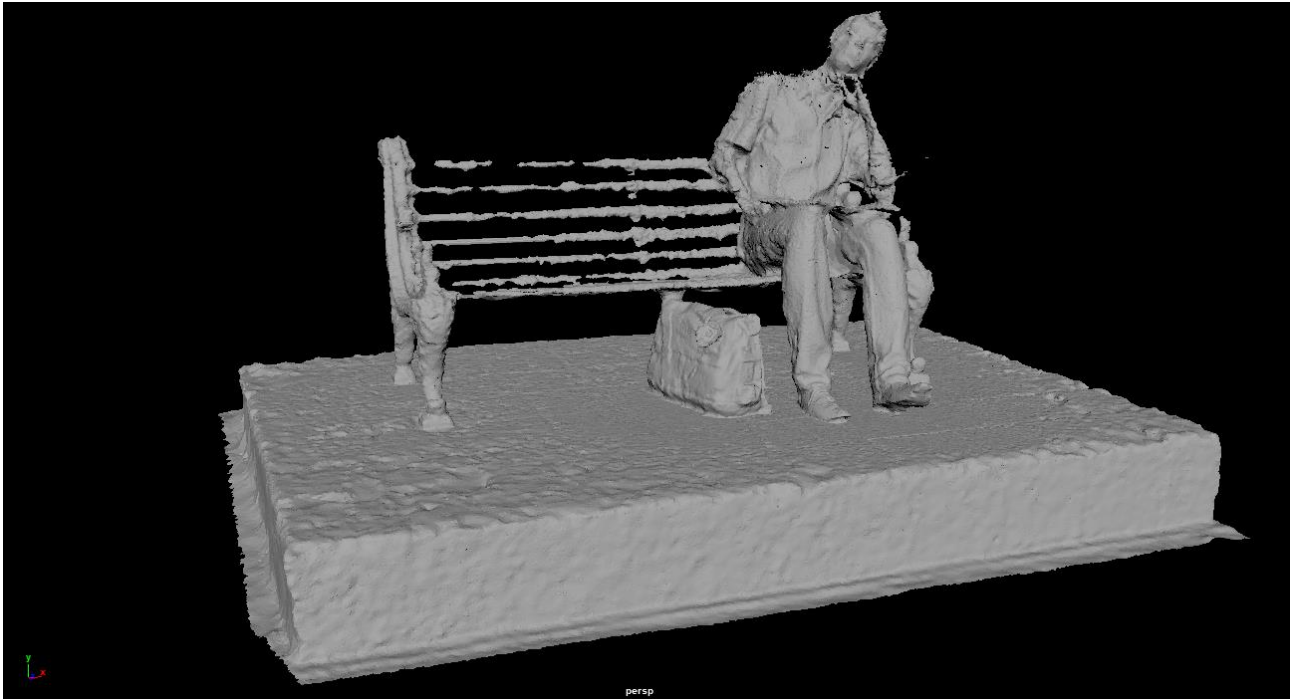


Рисунок 3.18.а – Модель після видалення зайвого

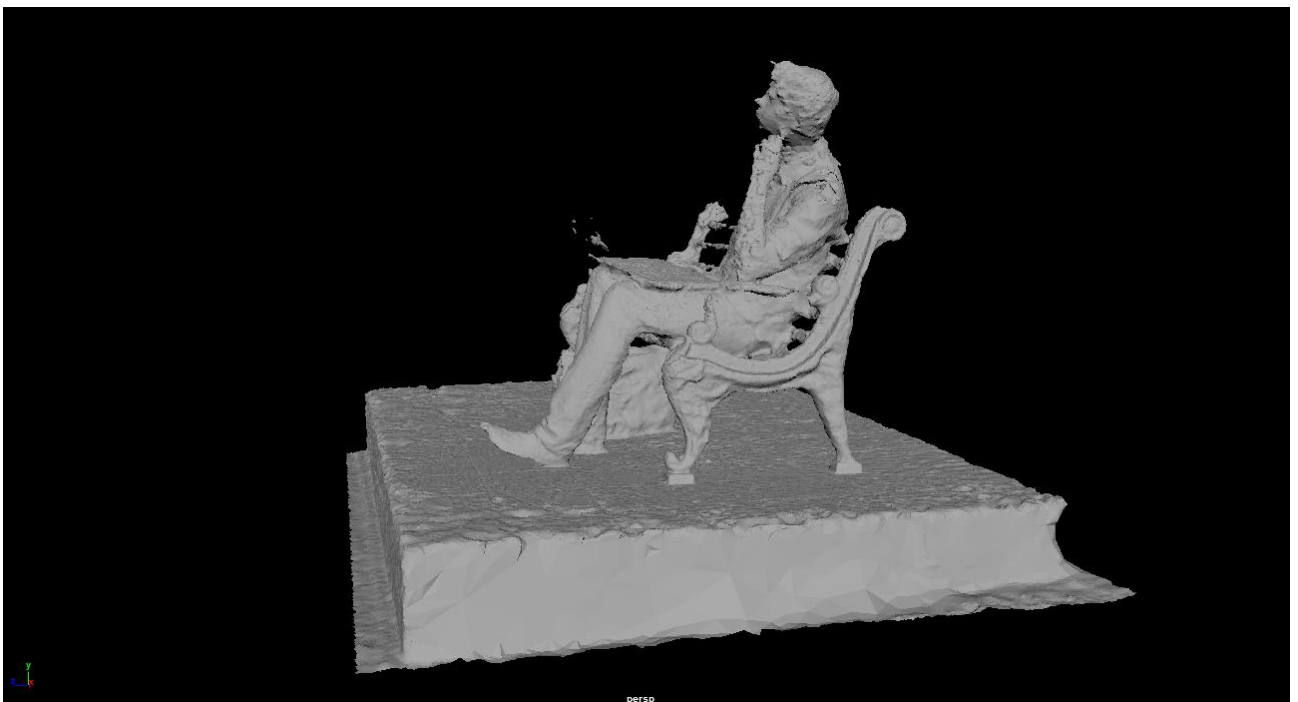


Рисунок 3.18.б – Модель після видалення зайвого збоку

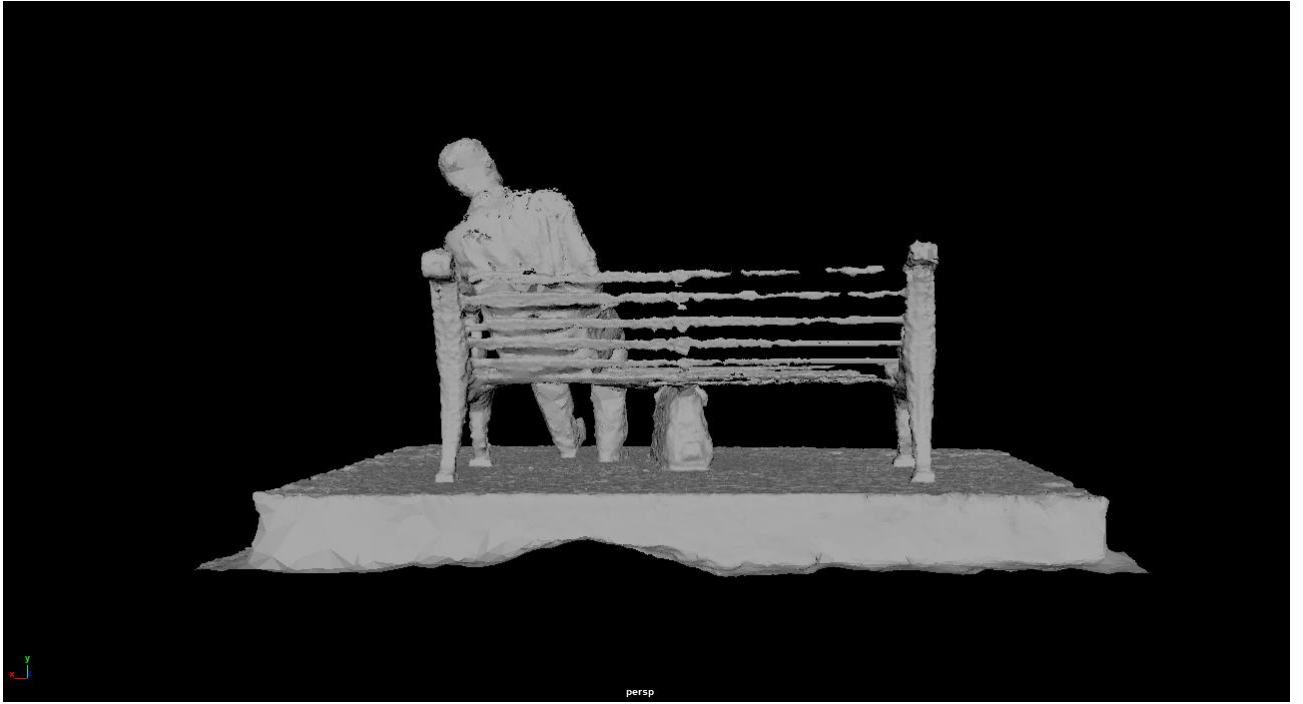


Рисунок 3.18.в – Модель після видалення зайвого зраду

## ВИСНОВКИ

Сьогоднішнє молоде покоління вже бачить, що 3D-сканери – це не лише інструменти лабораторій чи реквізит у науково-фантастичному фільмі, як це було ще кілька десятиліть тому. З кожним роком професійне 3D-сканування наближається до того, щоб стати частиною нашого повсякденного життя, і виробники цих технологій вже мають на меті плавно впровадити свої рішення у всі сфери життя. Навіть діти у шкільних класах можуть користуватися сканерами на основі структурованого підсвічування. 3D-сканери можна побачити у терапевта або стоматолога. Що раніше було доступно лише певному колу фахівців, стає незамінним інструментом у повсякденному житті.

Дана робота присвячена дослідженню можливості 3D-сканування об'єктів за допомогою звичайного смартфона.

Метою роботи є визначення параметрів, характеристик та налаштування камери і програми для сканування. Оцінка впливу погодних умов, матеріалу об'єкту та навколишнього середовища на якість сканованої моделі.

Просторові координати точок об'єкта визначаються вимірюваннями, зробленими за допомогою двох або більше фотографій, з різного положення камери. У кожному зображенні визначаються спільні точки. Потім створюється лінія видимості від місця розташування камери до точки на об'єкті. Переріз цих променів визначає розташування точки в просторі. Більш складні алгоритми можуть використовувати іншу, раніше відому інформацію про об'єкт: наприклад, симетрію складових його елементів, у певних випадках дозволяючи відновити просторові координати точок лише з одного зображення.

Алгоритми, що застосовуються у фотограмметрії, мають на меті мінімізувати суму квадратів безлічі помилок, яку можна вирішити за допомогою алгоритму, заснованого на розв'язанні нелінійних рівнянь методом найменших квадратів.

Існує чотири основних типи даних, які можуть бути як вхідними, так і вихідними при виконанні фотограмметричних робіт:

- просторові координати визначають положення точок об'єкта у просторі;
- координати на фотографії визначають положення точок об'єкта на аналоговому чи цифровому знімку;
- елементи зовнішнього орієнтування фотоапарата визначають його положення у просторі та напрямок зйомки;
- елементи внутрішнього орієнтування визначають геометричні характеристики процесу зйомки.

До елементів зовнішнього орієнтування відносяться тривимірні координати центру проєкції, поздовжній та поперечний кути нахилу знімка та кут повороту.

До елементів внутрішнього орієнтування відносяться: фокусна відстань об'єктива (хоча може враховуватись і характер спотворень, що вносяться під час зйомки: наприклад, дісторсія об'єктива, деформація фотоматеріалу та ін.) та двомірні координати головної точки.

Додаткові спостереження допомагають точніше визначати відстані та координати точок об'єкта, а також уточнювати масштаби та саму систему координат.

Знімки, отримані на телефон, не завжди можуть бути якісними. Оскільки камера має функцію автоматичного фокусування, фокус, націлений на яскравий об'єкт, зменшує яскравість усього фото, а фокус, націлений на темний об'єкт, навпаки – додає яскравості на фото, тому знімки можуть відрізнитися за яскравістю та насиченістю.

Ще одним з головних параметрів для гарного знімку є погодні умови. Про яскравому сонці, будь який об'єкт може мати певний блиск, що значно відобразиться на сканованій моделі (програма не отримає дані з цієї області фотографії і на самій моделі з'явиться діра, яку потім треба закрити).

Під час зйомки об'єкту були враховані усі можливі фактори які впливали на якість фото і обрані методи, які дозволяли отримати максимально гарні фотографії. Для найкращого результату сканування, було зроблено 200 фотографій.

Також було проведено тестування програмного забезпечення, яке підійде під параметри комп'ютера та буде працювати без збоїв. Цим програмним забезпеченням став MeshRoom.

Після визначення ПЗ, було проведено аналіз обладнання, на якому робилося сканування об'єкту. Перша спроба зробити сканування об'єкту була здійснена за допомогою відеокарти NVIDIA GeForce 820M. Загальний час сканування усіх фотографій становив приблизно 6.5 годин. Друга спроба сканування об'єкту була за допомогою відеокарти Radeon RX 580. Оскільки компанія AMD не має підтримки CUDA-технології, текстурні карти не були зроблені, але сама модель відсканувалася приблизно за 4.5 години. Третя спроба сканування об'єкту, яка дала найкращий результат, була відеокарта NVIDIA RTX 2080. Сканування зайняло приблизно 45 хвилин.

З результатів дослідження впливає, що навіть звичайна камера, з примітивним налаштуванням може зробити якісні знімки, які дадуть непоганий результат. Також навіть самий слабкий комп'ютер здатен відсканувати 3D-об'єкт, але він займе дуже багату часу, тому для його економії краще обирати більш сучасне обладнання.

Отже, уявлення про 3D-технології допомагає не тільки краще розуміти деякі процеси в навколишньому світі, але й принципи роботи 3D-рішень, у тому числі 3D-сканування. За останні двадцять років 3D-технології проникли в багато важливих сфер нашого життя і застосовувалися в багатьох наукових проектах. Лазерні 3D-сканери та програми періодично використовуються для збереження об'єктів культурної спадщини – пам'яток та територій, що знаходяться на межі руйнування; інженери за допомогою сканерів на основі структурованого підсвічування виробляють реверс-інжиніринг складних поверхонь та форм для моделювання в САПР; лікарі та медичні працівники сканують у 3D своїх пацієнтів для різних застосувань, у тому числі для виготовлення протезів, діагностики шкірних захворювань та ін. Чим ширше поширюється інформація про те, що є 3D-технологією, тим важливішим стає це знання. Все частіше застосування 3D-технології у світі наштовхує експертів на думку, що в

найближчому майбутньому ми будемо використовувати її і вдома, і в школі, і на роботі.

Сьогодні 3D-технології все частіше застосовуються в таких сферах, як аерокосмічна галузь, інженерна справа, цифрове виробництво, медицина, комп'ютерна графіка та багато інших. У майбутньому фахівці з досвідом роботи в галузі 3D-сканування будуть ще більш популярними.

Виробники професійних 3D-сканерів та програмного забезпечення, включаючи лазерні сканери та сканери на основі структурованого підсвічування, досягли неймовірної точності та високого ступеня дозволу своїх пристроїв. У цей же час промислові дизайнери та інші інженери все частіше вдаються до 3D-сканерів, оскільки такі пристрої та 3D-моделі, що отримуються, істотно спрощують робочий процес і дозволяють виконувати такі завдання, які раніше були або неможливі або надзвичайно складні. Експерти передбачають широке поширення таких рішень, як віртуальна та доповнена реальність у сфері освіти. Діти зможуть побувати в лісах Амазонки, на вершинах Гімалаїв і будь-де, не залишаючи свого безпечного класу. Цифрові дизайнери будуть все частіше застосовувати технології 3D-сканування та моделювання для розробки віртуальних середовищ та доповненої реальності для ознайомлення та взаємодії з різними об'єктами, що створюються ними, а потім виготовляти їх на 3D-принтері з різних матеріалів. Лікарі зможуть швидко сканувати в 3D ваше тіло і друкувати відсутні органи і частини тіла з власних стовбурових клітин, що повністю виключатиме ймовірність відторгнення тканин. Говорячи про величезний потенціал 3D-сканування, можна з упевненістю заявити, що це лише початок.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Краснопевцев Б. В. Фотограмметрия – Москва: 2008. – 401 с.
2. Буров М.И. Практикум по фотограмметрии – Москва: 1987. – 302 с.
3. Рудий Р.М. Прикладна фотограмметрія : навч. Посібник / Р. М. Рудий. – Київ : НМК ВО, 1991. – 172 с.
4. Назаров А.С. Фотограмметрия – Москва: 2006. – 368 с.
5. Карманов А. Г. Фотограмметрия – Санкт-Петербург: 2012. – 372 с.
6. Карташов, І.В. Савченко – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 42 с. Як працює 3D-сканування? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.artec3d.com/ru/learning-center/3d-scanning-technology> (дата звернення 08.11.2021)
7. «Фотограметрія» конспект лекцій для бакалаврів спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій / Пеньков В.О. – Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 101с.
8. Лимонов А. Н., Гаврилова Л. А. – Прикладная фотограмметрия – 397 с.
9. Лобанов А. Н. Фотограмметрия – Москва: 1974. – 512 с.
10. Буров М.И. Практикум по фотограмметрии – Москва: 1987. – 302 с.
11. Thomas Luhmann Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging – 2013. – 684 с.
12. Детальний огляд 3D сканерів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://junior3d.ru/article/3d-skaner.html> (дата звернення 08.11.2021)
13. Обиралов А.И. Фотограмметрия / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Н. А. Гаврилова. – М. : КолосС, 2004. – 240 с.
14. Принципи роботи 3D-сканера [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cvetmir3d.ru/blog/poleznoe/printsipy-raboty-3d-skanera-vidy-skanerov-tekhnologii-i-metody-skanirovaniya/#title-dop1-2> (дата звернення 08.11.2021)

15. All You Need Is a Smartphone [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://all3dp.com/2/best-3d-scanner-app-iphone-android-photogrammetry/> (дата звернення 09.11.2021)
16. «Цифровая обработка изображений в информационных системах» учебное пособие для студентов V курса РЭФ специальности “Радиотехника” и “Средства связи с подвижными объектами” / И.С.Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А.Спектор – Новосибирск 2000. – 168 с.
17. Machine Vision and Navigation / Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes, Wendy, Mercorelli, Paolo. Springer, Cham.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 153 – 159.
22. 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.

23. 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 инфракрасном диапазонах // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 125 – 134.

24. 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.

25. 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.

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. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev 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.

28. 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.

29. 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.

30. Методичні вказівки з виконання атестаційної магістерської роботи за спеціальністю 8.05090102 «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення». Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр / Упоряд. В.М. Карташов, В.А. Тихонов, І.В. Савченко – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 68 с.