

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук
Кафедра Медіасистеми та технології
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 186 Видавництво та поліграфія
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Технології електронних
мультимедійних видань
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри МСТ _____
(підпис)
« 18 » листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Кирні Юлії Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема работ Дослідження можливостей фотограмметрії
для 3D-сканування архітектурних об'єктів

затверджена наказом по університету від 8 листопада 2024 р. № 1191 Ст


2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 18 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи
Цифрова камера Canon EOS 650D; Смартфон Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G; Цифрові зображення архітектурних об'єктів: формат – jpg, raw; Стандартні методи обробки фотограмметричних даних.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
Вступ; Аналіз літератури відповідно завдань дослідження; Огляд сутності методу фотограмметрії; Експеримент; Розробка рекомендацій; Економічна частина; Висновки; Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Проміжні результати обробки фотографій; Детальні фото отриманих моделей.

6. Консультанти розділів роботи

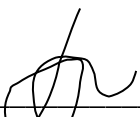
Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	проф. Кулішова Н. Є.		14.01.2025
Економічна частина	ас. Помогалова Н.В.		11.01.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання на атестаційну роботу	30.11.2024	
2	Аналіз стану проблем у сфері фотограмметрії	05.12.2024	
3	Проведення теоретичних досліджень	12.12.2024	
4	Проведення експериментальних досліджень	06.12.2024	
5	Економічна частина	11.01.2025	
6	Оформлення пояснювальної записки	13.01.2025	
7	Захист атестаційної роботи	20.01.2025	

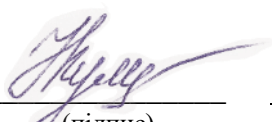
Дата видачі завдання 18 листопада 2024 р.

Здобувач


(підпис)

Кирпа Ю.О.

Керівник роботи


(підпис)

проф. Кулішова Н. Є.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 86 стор., 81 рис., 11 табл., 2 дод., 22 джерела.

ФОТОГРАММЕТРІЯ, 3D СКАНУВАННЯ, АРХІТЕКТУРНІ ОБ'ЄКТИ, ТОЧНІСТЬ РЕКОНСТРУКЦІЇ, REALITYCAPTURE, AGISOFT METASHAPE, MESHROOM.

Мета роботи – підвищення якості тримірних моделей архітектурних об'єктів та скорочення тривалості процесу їх розробки.

Об'єктом дослідження є процес створення 3D моделей архітектурних об'єктів за допомогою фотограмметрії.

Предметом дослідження є експериментальний метод вивчення впливу якості та кількості фотографій, а також налаштувань програмного забезпечення на якість тримірних моделей архітектурних об'єктів, метод експертних оцінок.

Проведено огляд сучасного стану проблеми використання фотограмметрії для оцифрування культурної спадщини, розглянуто спосіб роботи фотограмметрії та алгоритми, що задіяні в процесі. Проведено експерименти впливу вихідних матеріалів та програмного забезпечення на результат. Розроблено рекомендації щодо створення 3D моделі методом наземної фотограмметрії.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 86 p., 81 fig., 11 tabl., 2 app., 22 references.

PHOTOGRAMMETRY, 3D SCANNING, ARCHITECTURAL OBJECTS,
RECONSTRUCTION ACCURACY, REALITYCAPTURE, AGISOFT
METASHAPE, MESHROOM.

The purpose of the work is to improve the quality of three-dimensional models of architectural objects and reduce the duration of their development process.

The object of the study is the process of creating 3D models of architectural objects using photogrammetry.

The subject of the research is an experimental method of studying the influence of the quality and quantity of photographs, as well as software settings, on the quality of three-dimensional models of architectural objects, a method of expert assessments.

The study includes a review of the current state of photogrammetry applications for digitizing cultural heritage. It examines the principles of photogrammetry and the algorithms involved in the process. Experiments were conducted to assess the influence of input materials and software on the results. Recommendations for creating 3D models using terrestrial photogrammetry were developed.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ВІДПОВІДНО ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1 Підходи до 3D-моделювання.....	14
2 СУТНІСТЬ МЕТОДУ ФОТОГРАММЕТРІЇ.....	19
2.1 Принципи фотограмметрії	19
2.2 Алгоритми для обробки фотограмметричних даних.....	23
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	25
3.1 Вибір об'єкта для дослідження	25
3.2 Підготовка обладнання та проведення зйомок.....	26
3.2.1 Проведення зйомок для Експерименту 1	27
3.2.2 Проведення зйомок для Експерименту 2	27
3.2.3 Проведення зйомок для Експерименту 3	28
3.2.4 Проведення зйомок для Експерименту 4	29
3.2.5 Проведення зйомок для Експерименту 5	29
3.2.6 Проведення зйомок для Експерименту 6	30
3.3 Створення 3D-моделей.....	31
3.3.1 Вибір та обґрунтування програмного забезпечення.....	32
3.3.2 Створення моделей.....	34
3.3.3 Висновок щодо використання програм.....	61
3.4 Аналіз якості отриманих моделей	63
4 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ.....	68
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	74
5.1 Характеристика науково-дослідного рішення.....	74
5.2 Етапи виконання НДР, їх трудомісткість та заробітна плата	74
5.5 Визначення економічної ефективності результатів НДР.....	81
ВИСНОВКИ	82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	84
ДОДАТОК А Проміжні результати обробки фотографій.....	87
ДОДАТОК Б Детальні фото отриманих моделей	90

ВСТУП

Фотограмметрія, як метод 3D-сканування є доступною технологією, що відкриває нові можливості у збереженні, дослідженні та реконструкції культурної спадщини. Дослідження методів 3D-сканування має високу актуальність завдяки його значущості для збереження культурної спадщини. Історичні архітектурні об'єкти, такі як замки, собори, античні пам'ятки, зазнають постійного впливу часу, погодних умов, урбанізації та природних катастроф, що поступово призводить до їхнього руйнування. Оцифрування та створення детальних 3D-моделей таких об'єктів стає все більше важливим завданням, оскільки дозволяє зберегти їх для наступних поколінь, забезпечуючи майже безконтактний доступ до безцінних історичних артефактів.

Крім того, 3D-сканування відкриває нові можливості для музеїв, де з його допомогою можна візуально відтворювати втрачені чи зруйновані об'єкти та створити віртуальні екскурсії, роблячи експозиції більш інтерактивними та цікавими для відвідувачів. Такі технології створюють більш захоплююче та освітнє проведення часу, дозволяючи занурюватися в атмосферу минулого через цифрові реконструкції.

Виходячи з цього метою цієї роботи стало підвищення якості тримірних моделей архітектурних об'єктів та скорочення тривалості процесу їх розробки. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні *завдання*:

- аналіз предметної галузі та літератури за темою дослідження;
- провести аналіз існуючих підходів до фотограмметрії та її використання для архітектурних об'єктів;
- дослідити принципи фотограмметрії;
- дослідити вплив якості та кількості фотографій на точність отриманих моделей;

– порівняти результати, отримані за допомогою різних програм для фотограмметрії;

– розробити практичних рекомендацій для організації процесу розробки 3D-моделей методом фотограмметрії та скорочення його тривалості.

Об'єктом дослідження є процес створення 3D-моделей архітектурних об'єктів за допомогою фотограмметрії.

Предметом є експериментальний метод вивчення впливу якості та кількості фотографій, а також налаштувань програмного забезпечення на якість тримірних моделей архітектурних об'єктів, метод експертних оцінок.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ВІДПОВІДНО ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

На сьогодні в Україні зберіглося не так багато будівель, споруд та пам'яток, які є об'єктами культурної спадщини. Тому вони особливо потребують збереження і, отже, періодичного огляду, реставрації та цифровізації. Детальні виміри будівель та споруд – невід'ємна частина огляду будівель. Об'єкти, які є частиною культурної спадщини, часто мають складну геометричну форму, складні архітектурні форми фасадів, складні малюнки, тріщини та пошкодження, які також потребують фіксації для аналізу. На практиці може бути складно виконувати докладні вимірювання вручну, особливо на висоті та у важкодоступних елементах дахів, веж і т. д. Крім того, ручний збір геометричних розмірів елементів є трудомістким, і може виникнути помилка людського фактора, що збільшує вартість та тривалість обстежень, особливо коли йдеться про великі проекти. Порівняно з традиційним ручним підходом сучасні цифрові методи 3D-зйомки забезпечують дуже точне представлення властивостей об'єкту, включаючи: поверхню, структуру, реалістичне візуальне подання (текстури) [1].

Для підготовки до дослідження було підібрано та опрацьовано кілька літературних джерел, що висвітлюють такі теми як: огляд методології та технологій 3D-сканування, включаючи фотограмметрію, лазерне сканування та інші підходи; фотограмметрія, її застосування в архітектурі та проблеми, які виникають під час 3D-сканування; порівняння точності фотограмметрії та лазерного сканування; використання безпілотних літальних апаратів для вимірювання деформацій; порівняння ефективності NeRF та 3DGS з класичною фотограмметрією.

В статті [2] йде мова про порівняння двох основних методів створення 3D-моделей об'єктів з близької відстані: фотограмметрії та лазерного сканування. Основна мета статті – допомогти вибрати найбільш підходящий метод залежно

від конкретного застосування, враховуючи їхні переваги, недоліки та області застосування. Автори підкреслюють, що вибір методу залежить від конкретного завдання: фотограмметрія добре підходить для створення моделей із реалістичними текстурами (наприклад, археологія, культурна спадщина), а лазерне сканування ідеальне для технічних застосувань, де важлива точність і геометрія.

Стаття [3] обговорює використання фотограмметрії, виконаної за допомогою безпілотних літальних апаратів (UAS), для створення креслень історичних будівель. Автори аналізують технічні й практичні виклики, що виникають у процесі роботи, і пропонують рішення для підвищення ефективності та точності таких проєктів. Автори демонструють успішне використання фотограмметрії з безпілотників для створення моделей будівель, але визначають необхідність оптимізації таких робочих процесів, як: вибір правильних параметрів зйомки (висота польоту, перекриття знімків), використання комбінованих методів (наприклад, наземна зйомка для деталей і UAS для великих ділянок).

Робота [4] описує методи покращення розпізнавання та моделювання структурних елементів існуючих будівель на основі фотограмметричних даних. Автори зосереджуються на використанні двовимірних проєкцій тривимірних моделей, отриманих за допомогою фотограмметрії, для полегшення процесу розпізнавання візерунків і форм. Для подолання труднощів розпізнавання візерунків у тривимірних моделях автори використовують двовимірні зразки, отримані шляхом проєкції. Вони застосовують техніки обробки, такі як *ambient occlusion*, карти кривизни та нормалей, які зазвичай використовуються в сучасній комп'ютерній графіці для представлення тривимірних поверхонь у двовимірних наборах даних. Мета даної роботи полягає в розробці робочого процесу, який дозволить зіставляти значущі частини та цілі з даними, отриманими за допомогою швидких і детальних методів документування, що сприятиме створенню інформаційних моделей існуючих структур.

Стаття [5] досліджує використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для структурного моніторингу мостів, зокрема для вимірювання геометричних деформацій під навантаженням. В якості досліджуваного об'єкту автори використали залізобетонний міст довжиною 17,5 м, шириною плити 4,0 м та висотою стінки 0,8 м, який піддавався контрольованим навантаженням за допомогою наземних анкерів. Зображення збиралися до, під час та після застосування навантаження з перекриттям 80% по ходу та вбік для забезпечення високої точності. Автори виміряли переміщення окремих точок на мосту та створили щільні хмари точок для оцінки поверхневих деформацій. Порівняння з даними від датчиків переміщення показало різницю менше 1 мм, підтверджуючи високу точність методу.

В [6] йде мова про ефективність сучасних технологій 3D реконструкції лісових сцен, зокрема Neural Radiance Fields (NeRF) та 3D Gaussian Splatting (3DGS), у порівнянні з традиційною близькодіапазонною фотограмметрією (CRP). NeRF та 3DGS показали вищу ефективність у порівнянні з фотограмметрією, особливо в складних лісових умовах. Фотограмметрія виявилася менш придатною для складних лісових ділянок, зокрема через надмірний шум у кронах дерев та дублювання стовбурів. NeRF краще справляється з реконструкцією складних ділянок, особливо в області крон, але може допускати помилки в області ґрунту при обмеженій кількості вхідних зображень.

Стаття [7] досліджує підхід до моніторингу змін у стані історичних споруд з плином часу. Автор пропонує п'ятикомпонентну структуру цифрового двійника, яка використовує фотограмметрію для створення детальних 3D-моделей об'єктів культурної спадщини. Цей підхід дозволяє відстежувати та аналізувати процеси деградації, такі як поява тріщин або осідання, що є критично важливим для своєчасного втручання та збереження історичних споруд. Для перевірки ефективності запропонованої методики було обрано каземат у Форті Соледад на острові Гуам. Результати дослідження підтвердили, що використання

цифрових двійників, побудованих на основі фотограмметрії, є дієвим інструментом для моніторингу та оцінки стану історичних споруд у динаміці.

Робота [8] фокусується на тому, як інтеграція лазерного сканування, фотограмметрії та змішаної реальності може забезпечити комплексний підхід до цифрового обстеження та реконструкції пам'яток релігійної культурної спадщини. У дослідженні розглядається церква Панагія Екаторнтапіліані, разом із прилеглою церквою Святого Миколая та баптистерієм. Для об'єктів було проведено детальне лазерне сканування, щоб створити геометрично точну 3D-модель, отримано фотограмметричні знімки з використанням безпілотників, щоб додати текстурні дані до моделей та створено віртуальні тури та інтерактивні додатки.

В [9] досліджується застосування технологій оптичного віддаленого зондування, таких як фотограмметрія та 3D-сканування для документації та моделювання об'єктів культурної спадщини. У статті наводяться порівняльні дані щодо точності різних методів 3D-сканування: TOF (Time-of-Flight), Фазовий зсув (Phase Shift), Фотограмметрія, LIDAR.

Стаття [10] описує спільне використання технологій фотограмметрії та LiDAR для створення високоякісних 3D-середовищ для віртуального виробництва в кіно та на телебаченні. У статті наведено приклад сканування моста, де фотограмметрія надала докладні текстури, а LiDAR – точну геометрію. Цей інноваційний підхід дозволяє швидко створювати реалістичні цифрові середовища, підвищуючи візуальну якість та ефективність віртуальних виробництв. Точність методів 3D-сканування підкреслюється докладними результатами в вигляді фотографій.

У статті [11] досліджується точність хмар точок, створених за допомогою ультращільного лазерного сканування та фотограмметрії для картографування з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Автори порівнюють чотири хмари точок, отриманих двома методами: лазерне сканування (LiDAR) та фотограмметрія. Дві хмари створені з використанням фотограмметрії з

контрольними точками на землі (GCP) і без них, а дві інші – з використанням різних лідарних датчиків. Основна мета дослідження – визначити відмінності в точності та оцінити покращення, які дають контрольні точки на землі у фотограмметрії.

Стаття [12] зосереджується на використанні облікової фотограмметрії за допомогою безпілотників (UAV) та технології LiDAR для створення високоточних 3D-моделей культурної спадщини, зокрема Фонтана Геркулеса в саду Вілли Венарія Реале в Італії. Дослідники використовували мультисенсорні методи, об'єднавши фотограмметрію з безпілотників, наземні LiDAR-сканування та ближню фотограмметрію для створення детальної 3D-моделі пам'ятки, що дозволяє детально документувати та зберігати її в цифровому вигляді. Дослідження показує, що кожен метод має свої переваги залежно від цілей сканування.

Існуючі проекти з оцифрування історичних об'єктів:

– Фіванський картографічний проект (The Theban Mapping Project). Цей проект займається документуванням некрополів Фів, включаючи Долину Царів. Проект використовує сучасні методи 3D-сканування для створення детальних моделей гробниць. Однією з основних технологій, що використовуються, є лазерне сканування LiDAR. Крім того, TMP використовує фотограмметрію [13];

– реконструкція Собору Паризької Богоматері. Після пожеги у 2019 році виникла необхідність використати попередньо отримані результати сканування пам'ятки для оцінки збитків та планування реставраційних робіт. Для сканування Собору Паризької Богоматері використовувалися кілька передових технологій: було використано LiDAR для створення високоточних тривимірних моделей собору та фотограмметрію, що дозволяє захопити дрібні деталі та текстури поверхні будівлі, доповнюючи дані, отримані за допомогою лазерного сканування (як із землі, так і з повітря) [14].

Мільярди цифрових точок, отриманих в результаті сканування собору в 2010 році, становлять основу віртуальної сітчастої моделі з точністю до часток

дуюма. Додаткова інформація та зображення були об'єднані з вихідними даними для створення надійної інтерактивної моделі, яка використовується багатьма зацікавленими сторонами, включаючи вчених, архітекторів, істориків та інженерів. Аномалії моделі виглядають як неповні області або відображають доданий матеріал, наприклад, будівельні риштування біля лінії даху [15].

с) Проєкт створення цифрового двійника собору Святого Петра у Ватикані. Італійська інженерна фірма Italferr отримала замовлення від Fabric of Saint Peter створити цифрового двійника споруди. Створення цифрового двійника передбачало масштабну геодезичну кампанію з використанням передових технологій картографування, включаючи топографію, лазерне сканування, аерофотограмметрію за допомогою дронів і георадару. Протягом місяців команди – за допомогою дронів і аеростатичних куль – літали всередині базиліки. Вони отримали всю необхідну інформацію, не ризикуючи пошкодити надзвичайно дорогоцінну будівлю, зробивши понад 15 000 фотографій (еквівалентно 630 гігапікселям даних) [16].

1.1 Підходи до 3D-моделювання

Зараз існує декілька основних підходів до 3D віртуального моделювання, які використовуються для створення цифрових моделей різної тематики: 3D сканування та фотограмметрія. 3D-сканування використовує вузькоспеціалізоване обладнання, яке вимірює та реконструює поверхню об'єкта за допомогою технології, заснованої на стереобаченні, вимірюванні відстані світлових або звукових хвиль. Альтернативно, фотограмметричні методи витягують інформацію з 2D фотографій для реконструкції об'єктів у 3D [17].

Перелік і опис найпоширеніших методів 3D сканування.

1. Лазерне сканування – це технологія, яка базується на використанні лазерів для отримання точних 3D-зображень об'єктів або навколишнього середовища.

Лазерний сканер випромінює промінь світла, зазвичай в інфрачервоному або видимому діапазоні, який потрапляє на поверхню об'єкта і відбивається назад. Час, протягом якого промінь повертається до датчика, використовується розрахунку відстані до об'єкта. Сучасні сканери здатні виробляти мільйони таких вимірювань за секунду, що дозволяє створювати точні та деталізовані моделі.

Типи лазерних сканерів:

– наземні сканери – використовуються для сканування великих об'єктів, таких як будівлі або ландшафти. Вони встановлюються на штативи та сканують навколишній простір;

– повітряні сканери (LiDAR) – кріпляться на дронах або літаках для створення 3D-карт великих територій, таких як лісові масиви чи міські райони;

– ручні сканери – використовуються для сканування невеликих об'єктів чи деталей і мають високу мобільність.

Переваги лазерного сканування: точність, безконтактний метод, швидкість, доступність важкодоступних ділянок.

Недоліки лазерного сканування: висока вартість обладнання та програмного забезпечення, високі вимоги до кваліфікації персоналу, великі обсяги даних, обмеження в скануванні поверхонь, що відбивають або прозорих (скло, дзеркала, глянсові поверхні), сканування може ускладнюватися в умовах поганого освітлення, дощу, туману або якщо поверхня об'єкта покрита пилом, брудом або рослинністю.

2. Фотограмметрія – це метод відновлення тривимірних об'єктів за допомогою набору фотографій. Це один із ключових методів, що застосовуються для сканування історичних та культурних об'єктів, таких як будівлі, статуї та архітектурні споруди, з метою їхньої документації, аналізу та збереження.

Переваги фотограмметрії: доступність (не тільки вартість, а також відсутність вимог до кваліфікації виконавця), неінвазивність, висока точність, масштабованість (можна застосовувати як до дрібних деталей, так і великих архітектурних комплексів).

Основні обмеження методу: залежність від якості зображень, обмеження в умовах освітлення, складності з текстурами прозорих чи відбиваючих поверхонь.

3. Сканування структурованим світлом Structured Light Scanning (SLS). Цей метод заснований на проектуванні певного світлового візерунка (зазвичай смуг або ґрат) на об'єкт і захоплення зображення за допомогою однієї або декількох камер. Зі спотворень візерунка на поверхні об'єкта обчислюються його просторові координати. Технологія дозволяє точно фіксувати дрібні тріщини та деформації, які можуть бути непомітними при візуальному огляді, що вкрай важливо для, наприклад, реставрації.

Переваги технології SLS: висока точність (фіксує деталі до мікронних змін), швидке та масштабоване сканування.

Недоліки технології: обмеження за розміром об'єктів (точність та якість скану можуть знижуватися при роботі з великими або багаторівневими будівлями), проблеми з прозорими та поверхнями та тими, що відбивають, необхідність контрольованого освітлення, складнощі з доступом до важкодоступних ділянок, висока вартість обладнання та послуг, обмежена мобільність.

4. LiDAR (Light Detection and Ranging) використовує лазери для вимірювання відстаней та побудови карт, зазвичай застосовується для сканування великих об'єктів, таких як будинки, ландшафти або інфраструктура. LiDAR – це один з різновидів лазерного сканування, який зазвичай використовує метод ToF (Time of Flight) для вимірювання відстаней [18]. Використовується для картографування та створення 3D-моделей великих об'єктів та територій.

Плюси: відмінно підходить для масштабних проєктів (картографія або ландшафтні дослідження).

Мінуси: висока вартість та обмежена точність для малих об'єктів (до 10 мм).

4. Blue Light Scanning (Сканування синім світлом). Це технологія 3D-сканування, яка використовує синє світло для створення точних цифрових копій

об'єктів. Цей метод відрізняється високою точністю. Blue Light Scanning – це окремий випадок сканування структурованим світлом, але замість звичайного білого або інфрачервоного світла для проєктування на об'єкт використовується синє світло, за рахунок використання синього спектру технологія досягає більшої точності. BLS у порівнянні краще працює в умовах яскравого освітлення або на глянцевиx поверхнях, так як синє світло менше схильне до впливу зовнішнього освітлення та використовує синє світло з короткою довжиною хвилі, що зменшує розсіювання та шуми, підвищуючи точність та деталізацію сканування.

В результаті проведеного аналізу технологій стає зрозуміло, що фотограмметрія відкриває можливості для участі широкого кола людей у процесі цифровізації культурної спадщини. Громадські та приватні організації можуть виконувати роботи з оцифрування, що сприяє популяризації архітектурних пам'яток. Цифрові моделі можуть стати доступними для освітніх і наукових цілей, а також для створення віртуальних турів і виставок.

Фотограмметрія є перспективним методом 3D-сканування завдяки своїй точності, доступності та універсальності. Її використання відкриває широкі можливості для цифровізації архітектурних об'єктів та створення віртуальних архівів за умов браку фінансування та кваліфікованих робітників. Для проведення зйомки можна використовувати звичайну цифрову камеру або навіть смартфон із гарною камерою, що значно зменшує вартість порівняно з, наприклад, лазерним 3D-сканером. Зрозумілі інтерфейси програм та різноманіття цінових пропозицій (від безкоштовних програм до комерційних) роблять цей метод доступним для підприємств з різним бюджетом.

Для забезпечення якісного результату важливо використовувати чітку методику, в якій містяться рекомендації щодо обладнання (камери, фокусної відстані та інше), правил зйомки (перекриття зображень, стабільність освітлення, оптимальна кількість фото), обробки (інструкції щодо використання програмного забезпечення для фотограмметрії та покроковий опис процесу створення моделі).

Виходячи з цього, метою даної роботи стає підвищення якості тримірних моделей архітектурних об'єктів та скорочення тривалості процесу їх розробки.

Об'єктом дослідження є процес створення 3D моделей архітектурних об'єктів за допомогою фотограмметрії.

Предметом є експериментальний метод вивчення впливу якості та кількості фотографій, а також налаштувань програмного забезпечення на якість тримірних моделей архітектурних об'єктів, метод експертних оцінок.

Для досягнення даної мети потрібно виконати наступні задачі:

- аналіз предметної галузі та літератури за темою дослідження;
- аналіз існуючих підходів до фотограмметрії та її використання для моделювання архітектурних об'єктів;
- дослідження принципів фотограмметрії;
- дослідження впливу якості та кількості фотографій на точність отриманих моделей;
- порівняння результатів, отриманих за допомогою різних програм для фотограмметрії;
- розробка практичних рекомендацій для організації процесу розробки 3D-моделей методом фотограмметрії та скорочення його тривалості.

Сформульовано таку гіпотезу, що буде перевірена в процесі дослідження: «Використання розроблених рекомендацій з організації зйомок архітектурних об'єктів, підбору програмних засобів для автоматичної побудови 3D моделей на основі набору фотографій, та їх налаштувань підвищує якість тривимірних моделей та скорочує тривалість їх розробки».

2 СУТНІСТЬ МЕТОДУ ФОТОГРАММЕТРІЇ

2.1 Принципи фотограмметрії

Фотограмметрія – це тривимірний метод вимірювання, що використовує центральне проєкційне зображення як свою основну математичну модель (рис. 2.1). Форма та положення об'єкта визначаються шляхом реконструкції пучків променів, де для кожної камери кожна точка зображення P' разом із відповідним перспективним центром O' визначає просторовий напрямок променя до відповідної точки об'єкта P . За умови, що геометрія зображення всередині камери та місце розташування системи зображення у просторі об'єкта відомі, кожен промінь зображення може бути визначений у тривимірному просторі об'єкта.

Перетином щонайменше двох відповідних (гомологічних), просторово розділених променів зображення можна визначити точку об'єкта у трьох вимірах. У стереофотограмметрії для цього використовуються два зображення. У багатозображувальній фотограмметрії кількість залучених зображень ϵ , в принципі, необмеженою.

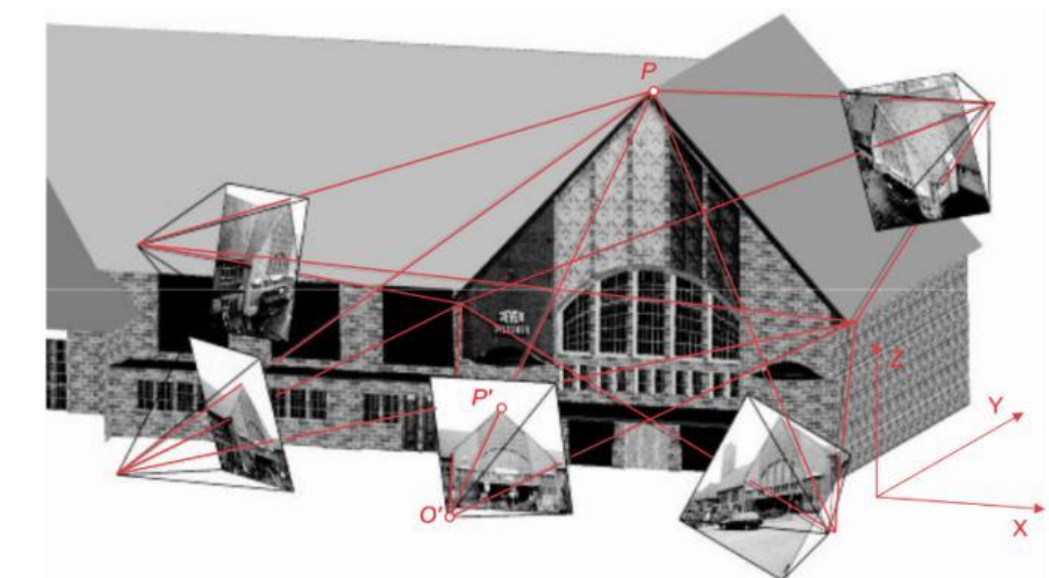


Рисунок 2.1 – Принцип фотограмметричного вимірювання

Параметри внутрішньої орієнтації описують внутрішню геометричну модель камери. Згідно з моделлю камери зі шпаринним об'єктивом (рис. 2.2), найважливішою точкою відліку є перспективний центр O , через який проходять усі промені зображення. Внутрішня орієнтація визначає положення перспективного центру відносно фіксованої системи координат у камері (системи координат зображення), а також відхилення від ідеальної центральної проєкції (спотворення зображення). Найважливішим параметром внутрішньої орієнтації є головна відстань c , яка визначає відстань між площиною зображення і перспективним центром.

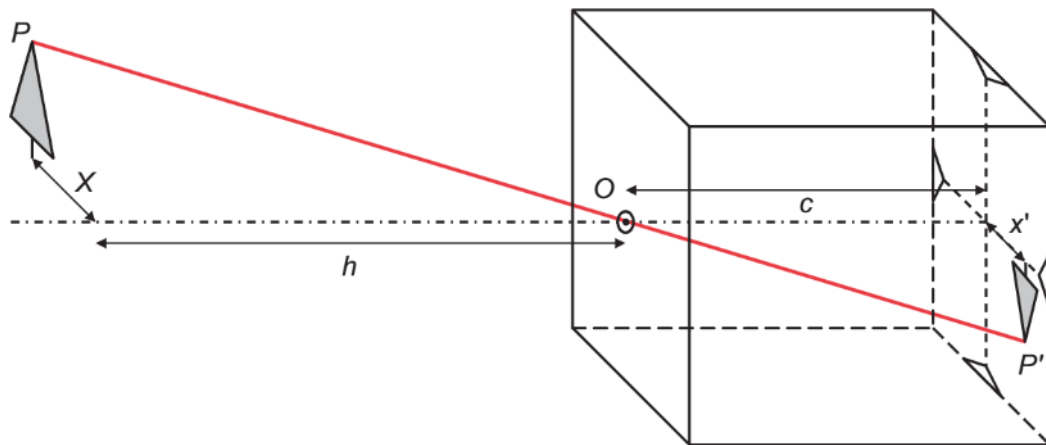


Рисунок 2.2 – Модель камери-обскури

Практична фотограмметрична камера та модель камери зі шпаринним об'єктивом відрізняються своїми властивостями та застосуванням. Модель камери зі шпаринним об'єктивом є ідеалізованою математичною моделлю, яка використовується для опису процесу формування зображень у фотограмметрії. У цій моделі камера складається з тонкої пластини з невеликим отвором (шпарини), через який промені світла проєктують зображення об'єкта на площину зображення. Вона передбачає ідеальну центральну проєкцію, де всі промені сходяться в перспективному центрі, без будь-яких спотворень. Основним параметром такої моделі є головна відстань – відстань h між площиною зображення та перспективним центром.

Практична фотограмметрична камера, на відміну від теоретичної моделі, є реальним технічним пристроєм, що використовується для створення фотограмметричних зображень. Вона має складну конструкцію, яка включає багатолінзовий об'єктив, корпус камери та поверхню для запису зображень, таку як цифровий сенсор або фотоплівка. Через реальні технічні особливості камера може мати відхилення від ідеальної геометрії зображення, наприклад спотворення об'єктива або неперпендикулярність площини зображення до оптичної осі. Щоб компенсувати ці відхилення та забезпечити точність вимірювань, необхідно проводити калібрування камери для визначення параметрів внутрішньої орієнтації та врахування спотворень.

Практична фотограмметрична камера відрізняється від моделі камери зі шпаринним об'єктивом. Через необхідність використання відносно складної об'єктивної лінзи, нестабільного положення камери та поверхні для запису зображень, яка може бути ані плоскою, ні перпендикулярною до оптичної осі лінзи, виникають відхилення від ідеальної геометрії зображення. Внутрішня орієнтація, яка включає параметри цих відхилень, повинна визначатися шляхом калібрування для кожної камери.

Основною властивістю фотограмметричного зображення є масштаб зображення або фотомасштаб. Масштабний коефіцієнт m визначає співвідношення між відстанню до об'єкта h і головною відстанню c . Альтернативно, це співвідношення між відстанню X у просторі об'єкта паралельно площині зображення та відповідною відстанню x' у просторі зображення x' :

$$m = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'}. \quad (2.1)$$

Масштаб зображення у кожному випадку є вирішальним фактором для розрізнення деталей зображення, а також для точності фотограмметричних вимірювань, оскільки будь-яка похибка у зображенні множиться у просторі

об'єкта на масштабний коефіцієнт. Звісно, при роботі зі складними об'єктами масштаб може змінюватися по всьому зображенню – зазвичай наводять номінальне або середнє значення.

Параметри зовнішньої орієнтації визначають просторове положення та орієнтацію камери у глобальній системі координат. Зовнішня орієнтація описується координатами перспективного центру у глобальній системі та трьома належним чином визначеними кутами, що виражають обертання системи координат зображення відносно глобальної системи. Параметри зовнішньої орієнтації розраховуються непрямо після вимірювання координат зображень добре ідентифікованих точок об'єкта з фіксованими та відомими глобальними координатами.

Кожна виміряна точка зображення відповідає просторовому напрямку від проєкційного центру до точки об'єкта. Довжина вектора напряму спочатку невідома, тобто кожна точка об'єкта, що лежить на лінії цього вектора, генерує ту ж точку зображення. Іншими словами, хоча кожна тривимірна точка об'єкта перетворюється на унікальну точку зображення для заданих параметрів орієнтації, зворотнє унікальне проєктування неможливе. Точку об'єкта можна визначити на промені зображення та точно визначити у просторі об'єкта, лише перетинаючи промінь із додатковим відомим геометричним елементом, таким як другий просторовий напрям або площина об'єкта.

Кожне зображення створює просторовий пучок променів, визначений зображуваними точками та перспективним центром, у якому всі промені були зафіксовані в один і той самий момент часу. Якщо всі пучки променів із кількох зображень перетинаються, як описано вище, створюється щільна мережа; за відповідної конфігурації зображення така мережа має потенціал для високої геометричної стійкості. Використовуючи метод пучкової тріангуляції, можна одночасно орієнтувати будь-яку кількість зображень (пучків променів), а також обчислювати тривимірні координати точок об'єкта [19].

2.2 Алгоритми для обробки фотограмметричних даних

Основні етапи технології фотограмметрії:

– збір даних (фотографування). Перший етап – це створення набору фотографій об'єкта з різних ракурсів. Для цього важливо використовувати високоякісні камери та відповідні об'єктиви. Фотографії мають бути зроблені з достатнім перекриттям (близько 60-80%) між знімками для того, щоб програмне забезпечення могло порівняти загальні риси на зображеннях. Камери захоплюють двовимірні проєкції тривимірних точок у координатах пікселів. Геометричні зв'язки між точками в просторі закладено в перспективні перетворення кожного знімка;

– трекінг ключових точок. Алгоритми обробки зображень виявляють ключові точки (унікальні візуальні особливості, такі як краї чи кути) на кожному фото. Ці точки зіставляються між зображеннями для визначення їхньої ідентичності. Це дозволяє побудувати початкові кореляції між знімками, а потім створити хмару точок. Використовуються методи, такі як SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), які обчислюють дескриптори ключових точок, інваріантних до змін масштабу, повороту або освітлення;

– вирівнювання зображень та калібрування камер. На цьому етапі розраховуються положення та орієнтація камер у просторі. Це досягається за допомогою алгоритму Bundle Adjustment, який оптимізує 3D-координати точок та параметри камер одночасно. Вирішується нелінійна оптимізаційна задача мінімізації залишкової помилки між спостережуваними та проєктованими положеннями ключових точок;

– створення початкової хмари точок. На основі відповідностей між зображеннями виконується процес для обчислення тривимірних координат точок, які відображаються на кількох фотографіях. Використовується принцип геометричної триангуляції, що визначає перетин прямих, які проходять через оптичний центр камери та відповідні точки на зображеннях. Результатом є рідка

хмара точок, яка репрезентує основну геометрію об'єкта. Чим більше фотографій і що вища їх якість, то точніше буде хмара точок;

– створення щільної хмари точок. Алгоритми оцінюють додаткові точки на основі диспаратету між стереопарами зображень. Розрахунок точок здійснюється через аналіз паралаксу–зміщення точок на зображеннях при зміні позиції камери. Це створює деталізовану тривимірну модель поверхні;

– моделювання та створення сітки (mesh). На основі хмари точок створюється трикутна сітка (модель об'єкта), яка включає усі дрібні деталі архітектурного об'єкта. Ця сітка може бути використана для подальшого створення текстурованою 3D-моделі;

– текстурування. Після того, як створено тривимірну модель, на сітку накладаються текстури, отримані з оригінальних фотографій. Це додає реалістичності 3D-моделі. Кожна ділянка сітки співвідноситься з пікселями зображень, враховуючи перспективні спотворення. Застосовуються алгоритми UV-розгортки для мінімізації перекриття та спотворень текстури [20].

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Вибір об'єкта для дослідження

Для експерименту було обрано кам'яну статую висотою 2,5 метри, розташовану на відкритому повітрі. Вільний доступ із чотирьох сторін дозволяє повноцінно охопити об'єкт для зйомки з різних ракурсів.

Статуя, як об'єкт дослідження, має культурну та архітектурну цінність. Кам'яні скульптури часто є частиною історичної спадщини, і їхнє сканування може мати практичне застосування для створення цифрових архівів, реставрації чи використання в музеях і віртуальних експозиціях. Окрім того, складна форма та текстура статуї надають чудову можливість перевірити, наскільки метод фотограмметрії здатен захоплювати дрібні деталі, такі як різьблення чи природні пошкодження поверхні.

Розташування статуї на відкритому повітрі створює умови для дослідження впливу природного освітлення. Це дозволяє провести експерименти за різної погоди, наприклад, у яскравий сонячний день, щоб оцінити вплив тіней і бликів на якість моделі. Матеріал об'єкта—камінь—є також важливим аспектом. Його текстура забезпечує природні орієнтири для програм фотограмметрії, зменшуючи необхідність у додаткових маркерах для точного зшивання кадрів.

Обрана висота статуї, яка становить 2,5 метри, є оптимальною для такого дослідження. З одного боку, це дозволяє повністю охопити об'єкт без спеціального обладнання, наприклад, дронів. З іншого боку, це реалістичний розмір, який часто зустрічається серед об'єктів архітектури чи скульптури.

Таким чином, статуя з каменю, розташована на відкритому повітрі з можливістю вільного доступу, є оптимальним вибором для експерименту. Вона забезпечує необхідні умови для всебічної перевірки можливостей фотограмметрії, дозволяючи отримати практично значущі результати.

3.2 Підготовка обладнання та проведення зйомок

Для отримання якісних даних для фотограмметрії необхідно ретельно підготувати обладнання та організувати процес зйомки відповідно до завдань експерименту. Зйомка проводиться з використанням кількох підходів для оцінки впливу різних факторів на якість 3D-моделі.

Для проведення експерименту використовувалися два пристрої: цифрова дзеркальна камера Canon EOS 650D та смартфон Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G.

Характеристики обладнання:

а) Canon EOS 650D:

- 1) змінний об'єктив: стандартний 18-55 мм;
- 2) формат зображення: RAW і JPEG;
- 3) особливості: ручне налаштування параметрів (ISO, витримка, діафрагма), можливість стабільної зйомки на штативі;

б) Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G:

- 1) основна камера: 108 Мп з ширококутним об'єктивом;
- 2) додаткові функції: підтримка HDR, штучний інтелект для покращення зображення;
- 3) формат зображення: JPEG із високою роздільною здатністю.

Виконані налаштування для камери Canon EOS 650D:

- використано стандартний об'єктив (18-55 мм) на фокусній відстані приблизно 18-35 мм, що зменшить спотворення перспективи
- заблоковано фокус на одній із деталей статуї для всіх знімків. Це забезпечить однакову різкість усім кадрах
- обрано значення діафрагми $f/8$. Це забезпечить хорошу різкість та глибину різкості без втрати деталей
- встановлено ISO 200 для мінімізації шумів
- використано ручний режим та зафіксовано налаштування, щоб освітленість та експозиція залишалися однаковими на всіх кадрах.

3.2.1 Проведення зйомок для Експерименту 1

Використання Canon EOS 650D із дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Мета: отримати максимальну якість 3D-моделі за ідеальних умов.

Кількість фотографій: 190.

Зйомка відбувалась у хмарний день без різких тіней та бликів. Для камери було використано вище наведені ручні налаштування.

Процес.

1. Відстань до об'єкта ~1.5 метри.

2. Зйомка виконувалася у три рівні висоти:

- нижній рівень (~1 м): кадри охоплюють нижню частину статуї;
- середній рівень (~1.8 м): охоплення центральної частини;
- верхній рівень (~2.5 м): кадри верхньої частини статуї.

3. Окремо зроблено крупні плани обличчя, волосся та верхівки статуї.

4. Забезпечено перекриття кадрів 70–80%.

В результаті зйомки отримано фотографії високої якості: чіткі, без шуму, з правильною експозицією, деталі статуї, включно з текстурою каменю та дрібними елементами, передані максимально точно, завдяки трьом рівням зйомки й окремим крупним планам забезпечено повне охоплення всіх частин об'єкта.

3.2.2 Проведення зйомок для Експерименту 2

Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G із дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Мета: оцінка якості моделі, створеної смартфоном, за ідеальних умов.

Кількість фотографій: 150.

Використано ручні налаштування у режимі Pro: ISO 100, витримка 1/100 сек, баланс білого – 5500K.

Погода: хмарний день, рівномірне освітлення.

Процес.

1. Відстань до об'єкта ~1.5 метри.
2. Зйомка виконувалася у три рівні висоти:
 - нижній рівень (~1 м): кадри охоплюють нижню частину статуї;
 - середній рівень (~1.8 м): охоплення центральної частини;
 - верхній рівень (~2.5 м): кадри верхньої частини статуї.
3. Окремо зроблено крупні плани обличчя, волосся та верхівки статуї.
4. Забезпечено перекриття кадрів 60–70%.

В результаті зйомки отримано фотографії гарної якості: висока роздільна здатність зображень завдяки камері смартфона, чіткі деталі на добре освітлених ділянках, але не такі виразні, як у знімках з камери Canon, є незначні спотворення через автоматичну обробку смартфоном.

3.2.3 Проведення зйомок для Експерименту 3

Використання Canon EOS 650D із недостатньою кількістю кадрів та дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери

Мета: оцінка впливу кількості кадрів на якість моделі.

Кількість фотографій: близько 50.

Зйомка відбувалась у хмарний день без різких тіней та бликів. Для камери було використано вище наведені ручні налаштування.

Процес.

1. Відстань до об'єкта ~1.5 метри
2. Зйомка виконувалася лише з основних ракурсів (приблизно через кожні 25°).
3. Забезпечено перекриття кадрів ~40%.

В результаті зйомки отримано фотографії високої якості, але охоплення об'єкта недостатнє. Чіткість і деталізація знімків залишаються на високому рівні,

але через недостатню кількість кадрів деякі ділянки об'єкта покриті слабо або зовсім відсутні.

3.2.4 Проведення зйомок для Експерименту 4

Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G із недостатньою кількістю кадрів та дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Мета: оцінка впливу кількості кадрів на якість моделі, створеної смартфоном.

Кількість фотографій: близько 50.

Зйомка відбувалась у хмарний день без різких тіней та бликів. Для камери було використано вище наведені ручні налаштування.

Процес.

1. Відстань до об'єкта ~1.5 метри
2. Зйомка виконувалася лише з основних ракурсів (приблизно через кожні 25°).
3. Забезпечено перекриття кадрів ~40%.

В результаті зйомки отримано фотографії гарної якості, але охоплення об'єкта недостатнє. Чіткість і деталізація знімків залишаються на високому рівні, але через недостатню кількість кадрів деякі ділянки об'єкта покриті слабо або зовсім відсутні. Якість задовільна, але значне зниження точності моделі очікується через недостатню кількість фото.

3.2.5 Проведення зйомок для Експерименту 5

Використання Canon EOS 650D при яскравому сонці з автоматичними налаштуваннями.

Мета: оцінка впливу сонячного освітлення та автоматичних налаштувань на якість моделі.

Кількість фотографій: 150.

Камера встановлена у автоматичний режим.

Погода: яскравий сонячний день, тіні та блиски на об'єкті.

Процес.

1. Відстань до об'єкта ~1.5 метри.

2. Зйомка виконувалася у три рівні висоти:

- нижній рівень (~1 м): кадри охоплюють нижню частину статуї;
- середній рівень (~1.8 м): охоплення центральної частини;
- верхній рівень (~2.5 м): кадри верхньої частини статуї.

3. Окремо зроблено крупні плани обличчя, волосся та верхівки статуї.

4. Забезпечено перекриття кадрів 70–80%.

В результаті зйомки отримано фотографії середньої якості. Пересвітлення на блискучих ділянках статуї та глибокі тіні створюють контрастні зони. Через автоматичний режим налаштувань експозиція варіюється між кадрами, що може ускладнити подальшу обробку. Чіткість залишається гарною, але текстури передані нерівномірно.

3.2.6 Проведення зйомок для Експерименту 6

Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G при яскравому сонці з автоматичними налаштуваннями.

Мета: оцінка впливу яскравого сонячного освітлення на модель, створену смартфоном.

Кількість фотографій: 150.

Використано автоматичний режим смартфона.

Погода: яскравий сонячний день, значні тіні та відблиски. Зйомка виконувалася без додаткових джерел освітлення чи захисту від тіней.

Процес.

1. Відстань до об'єкта ~1.5 метри.

2. Зйомка виконувалася у три рівні висоти:

- нижній рівень (~1 м): кадри охоплюють нижню частину статуї;
- середній рівень (~1.8 м): охоплення центральної частини;
- верхній рівень (~2.5 м): кадри верхньої частини статуї.

3. Окремо зроблено крупні плани обличчя, волосся та верхівки статуї.

4. Забезпечено перекриття кадрів 60–70%.

В результаті зйомки отримано фотографії нижчої якості. Сильні тіні й пересвітлення впливають на рівномірність текстур і деталізацію. Автоматична експозиція смартфона не завжди коректно адаптується до умов, через що якість кадрів змінюється між знімками. Деякі дрібні деталі втрачено через надмірну обробку зображення пристроєм.

3.3 Створення 3D-моделей

На цьому етапі експерименту потрібно відібрати якісні фотографії та створити 3D-моделі за допомогою програмного забезпечення. Для відбору фото важливо враховувати такі параметри, як чіткість, хороше освітлення та загальну якість зображень, оскільки вони впливають на точність моделі. Створення 3D-моделей здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє побудувати цифровий об'єкт на основі фотограмметрії. В ході цього етапу буде отримано реалістичне відтворення об'єкта для подальшого аналізу.

З отриманих фото було відібрано:

- Експеримент 1: з початкових 212 обрано 176;
- Експеримент 2: з початкових 180 обрано 156;
- Експеримент 3: з початкових 61 обрано 46;
- Експеримент 4: з початкових 71 обрано 51;
- Експеримент 5: з початкових 192 обрано 173;
- Експеримент 6: з початкових 185 обрано 180.

3.3.1 Вибір та обґрунтування програмного забезпечення

Для проведення дослідження були обрані три програмні продукти: RealityCapture, Agisoft Metashape та Meshroom. Кожна з цих програм надає широкі можливості для створення 3D-моделей на основі фотограмметрії, однак їх функціональність і рівень складності відрізняються. RealityCapture та Agisoft Metashape є професійними інструментами, які забезпечують високий рівень точності, гнучкість налаштувань і швидкість роботи, тоді як Meshroom – це безкоштовне базове програмне забезпечення, яке підходить для початкових досліджень і ознайомлення з процесом фотограмметрії. Завдяки такому вибору програм стало можливим не лише оцінити кожен з них за ключовими параметрами, такими як точність, швидкість обробки даних і якість отриманих моделей, а й визначити їхню ефективність для різних завдань і рівнів дослідницької діяльності.

1. Agisoft Metashape [21]. Agisoft Metashape – це одна з найпопулярніших програм для фотограмметрії, яка надає широкий функціонал для роботи з фотографіями та геопросторовими даними. Вона пропонує користувачам можливість створювати 3D-моделі, ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу (DEM) та текстури високої роздільної здатності.

Переваги: гнучкість налаштувань (дозволяє точно налаштовувати параметри обробки для створення хмар точок, сіток і текстур, що надає можливість оптимізувати роботу для різних типів об'єктів і умов), широка функціональність, підтримка різних платформ (працює на Windows, macOS і Linux).

2. RealityCapture [22]. RealityCapture – це сучасна професійна програма для фотограмметрії, яка дозволяє створювати 3D-моделі з фотографій та лазерних сканів. Вона вирізняється високою швидкістю обробки, оптимізацією під GPU та зручністю використання. RealityCapture широко використовується в архітектурі, геодезії, а також у геймдизайні.

Переваги: швидкість обробки (оптимізована для використання обчислювальної потужності GPU, що дозволяє обробляти великі набори фотографій швидше, ніж більшість аналогів), точність моделей, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, гнучкість у роботі з великими даними (може працювати з сотнями і тисячами знімків, що робить її ідеальною для професійних проєктів).

3. Meshroom [23]. Meshroom – це безкоштовна програма з відкритим кодом, що робить її ідеальним вибором для тестування в умовах обмеженого бюджету. Програма пропонує простий інтерфейс на основі вузлів, що полегшує контроль за процесом обробки.

Переваги: гарна інтеграція з іншими програмами (Blender, Maya тощо), може працювати з великою кількістю фото різного формату, безкоштовна.

Недоліки: програма розрахована на використання GPU, що обмежує її продуктивність на слабких комп'ютерах, для отримання якісної моделі потрібні високодеталізовані знімки та великий їхній обсяг, працює повільніше.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика обраного ПЗ

	Назва	Переваги	Недоліки	Вартість підписки	Мінімальні вимоги до комп'ютера	Вимоги щодо якості та кількості фото
1	Agisoft Metashape	Універсальність, підтримка геоданих, кросплатформність, гнучкість налаштувань для різних задач	Обмежена функціональність у пробній версії, повільніша швидкість обробки порівняно з RealityCapture.	– Освітня версія: \$179 – Професійна ліцензія: \$3499 (довічна). – Безкоштовна пробна версія з обмеженнями	– RAM: 16 GB (рекомендовано 32 GB) – CPU: Intel i5, AMD Ryzen – GPU: NVIDIA з підтримкою CUDA, 4-6 GB VRAM	Помірно вибаглива: потребує гарної якості фото, але менш чутлива до кількості (мін. 40-50 фото). Добре працює з невеликими та середніми наборами даних (100-500 фото).

Продовження таблиці 3.1

	Назва	Переваги	Недоліки	Вартість підписки	Мінімальні вимоги до комп'ютера	Вимоги щодо якості та кількості фото
2	RealityCapture	Швидкість обробки, висока точність моделей, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, підтримка лазерних сканів	Потребує потужної відеокарти, пробна версія створює модель із водяним знаком	– \$1250/рік для підприємств з великим доходом – \$1850/рік для професійної версії – безкоштовна версія для малого бізнесу та приватних осіб	– CPU: Intel i5, AMD Ryzen – GPU: NVIDIA з підтримкою CUDA, 6 GB VRAM (рекомендовано RTX 2060 або вище) – RAM: 16 GB (рекомендовано 32 GB) – ОС: Windows 10 або вище	Дуже вибаглива: висока якість і достатня кількість фото (не менше 60-80% перекриття)
3	Meshroom	Безкоштовна програма з відкритим кодом, проста у використанні, працює з великою кількістю фото	Потребує потужного обладнання, чутлива до якості та кількості фото, довший час обробки	Безкоштовна	– Windows 10 – Багатоядерний процесор CPU із підтримкою SSE4.2 – RAM: 16 GB – GPU: NVIDIA з підтримкою CUDA – Від 10 ГБ вільного простору	Дуже висока вибагливість до якості і кількості

Ці програми представляють різні рівні фотограмметрії, що дозволяє дослідити ефективність кожної залежно від типу завдань та умов.

3.3.2 Створення моделей

1. Agisoft Metashape.

Експеримент 1. Використання Canon EOS 650D із дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Мета: отримати максимальну якість 3D-моделі за ідеальних умов.

Початкові дані: кількість фотографій: 176, зйомка відбувалась у хмарний день без різких тіней та бликів. Для камери було використано ручні налаштування. Відібрано фотографії вищої якості.

Етапи створення моделі в програмі Agisoft Metashape: додавання фотографій, вирівнювання фотографій, будування моделі, будування текстури, зберігання та експорт моделі. Модель показано на рис. 3.1, 3.2.

Проміжні результати обробки фото надано в Додатку А.



Рисунок 3.1 – Кінцевий етап побудови моделі



Рисунок 3.2 – Отримана суцільна та текстурована модель

Висновки.

Час обробки складає 26 хвилин. Якість отриманої моделі висока: деталі моделі передані чітко, на моделі відсутні артефакти та зайві тіні. Завдяки чіткому виконанню рекомендацій зйомка забезпечила рівномірне покриття об'єкта. Перекриття кадрів у 70–80% дозволило програмі побудувати стабільну хмару точок без розривів. Відсутність пересвічених зон або тіней на фотографіях

забезпечила однорідність текстури. Після виконання всіх етапів модель демонструє мінімальні геометричні спотворення. Отримана модель є достатньо якісною для використання у професійних задачах, таких як реставрація об'єктів архітектури, архівування культурної спадщини, створення віртуальних виставок або 3D-друку. Детальні фото отриманої моделі наведено в Додатку Б.

Експеримент 2. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G із дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Мета: оцінка якості моделі, створеної смартфоном, за ідеальних умов.

Початкові дані: кількість фотографій 156, використано ручні налаштування у режимі Pro: ISO 100, витримка 1/100 сек, баланс білого – 5500K, зйомку проведено в хмарний день, освітлення рівномірне.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано наступну підсумкову модель (рис. 3.3, 3.4).

Висновки.

Час обробки складає 20 хвилин. Якість моделі середня: деталі моделі передані чітко, але також є невелика кількість артефактів та нерівності в архітектурі, що потребують подальшого редагування в іншому програмному забезпеченні. Завдяки достатньому перекриттю кадрів як в архітектрі, так і на текстурі немає плям, розмиттів чи пустих елементів. Дану модель можна використати для загального ознайомлення з формою, але вона вимагає додаткового допрацювання.

Експеримент 3. Використання Canon EOS 650D із недостатньою кількістю кадрів та дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Мета: оцінка впливу кількості кадрів на якість моделі.

Початкові дані: кількість фотографій 46, зйомка відбувалась у хмарний день без різких тіней та бликів. Для камери було використано ручні налаштування.



Рисунок 3.3 – Отримана модель



Рисунок 3.4 – Отримана суцільна та текстурована модель

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано підсумкову модель (рис. 3.5, 3.6).

Висновки.

Час обробки складає 15 хвилин. Недостатня кількість фотографій призвела до часткових прогалин у моделі. Деякі ділянки об'єкта, особливо ті, які не мали достатнього перекриття кадрів, були відтворені з меншою точністю або зовсім не відтворені. Модель містить артефакти в місцях, де зображення не перекривалися належним чином (особливо помітні на маківці та руці). Складні

частини об'єкта, такі як обличчя статуї, волосся та дрібні елементи, відтворені неповно. Отримана модель придатна для загального ознайомлення з формою об'єкта або візуалізації, але не може використовуватися для задач, що потребують високої точності (реставрація, архітектурне документування).



Рисунок 3.5 – Отримана модель



Рисунок 3.6 – Отримана суцільна та текстурована модель

Модель, створена за умов експерименту 3, демонструє середню якість через недостатню кількість вихідних фотографій. Хоча центральні частини

статуї відтворені з прийнятною точністю, крайові ділянки мають прогалини або низьку деталізацію. Це підтверджує важливість достатньої кількості кадрів для отримання повноцінної 3D-моделі у фотограмметрії.

Детальні фото отриманої моделі наведено в Додатку Б.

Експеримент 4. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G із недостатньою кількістю кадрів та дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Мета: оцінка впливу кількості кадрів на якість моделі, створеної смартфоном.

Початкові дані: кількість фотографій 51, зйомка відбувалась у хмарний день без різких тіней та бликів. Для камери було використано вище наведені ручні налаштування.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано модель (рис. 3.7, 3.8).



Рисунок 3.7 – Підсумкова модель після Експерименту 4



Рисунок 3.8 – Отримана суцільна та текстурована модель

Висновки.

Час обробки складає 17 хвилин. Недостатня кількість фотографій у поєднанні з меншою роздільною здатністю камери смартфона, порівняно з камерою, призвела до значних прогалин у геометрії. Відсутність належного перекриття кадрів спричинила артефакти та втрату точності в периферійних ділянках моделі.

Складні частини, як обличчя статуї та дрібні декоративні елементи, відтворені неточно або зі спрощенням геометрії.

Верхівка статуї, через відсутність фотографій із достатньою перекриттям, практично втратила деталізацію.

Обробка фотографій смартфона в програмі виконувалася стабільно, але результати моделювання мали значно нижчу якість, ніж за умови використання професійної камери.

Отримана модель є придатною лише для загального відображення форми об'єкта та потребує додаткової обробки. Вона не відповідає вимогам точності, потрібним для задач реставрації чи створення високодеталізованих копій.

Модель, створена в умовах експерименту 4, продемонструвала нижчу якість, ніж у попередніх експериментах, через використання менш точного обладнання (смартфона) та недостатньої кількості вихідних кадрів. Деякі частини моделі залишаються прийнятними, але верхні та бокові ділянки мають

значні прогалини та втрати деталізації. Цей експеримент підтверджує, що кількість і якість фотографій критично впливають на результат, особливо при використанні менш потужного обладнання.

Детальні фото отриманої моделі наведено в Додатку Б.

Експеримент 5. Використання Canon EOS 650D при яскравому сонці з автоматичними налаштуваннями.

Мета: оцінка впливу сонячного освітлення та автоматичних налаштувань на якість моделі.

Початкові дані: кількість фотографій 173, зйомка відбувалась у яскравий сонячний день, тіні та блиски на об'єкті. Камера встановлена у автоматичний режим.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано наступну підсумкову модель (рис. 3.9, 3.10).



Рисунок 3.9 – Підсумкова модель за умови експерименту 5



Рисунок 3.10 – Отримана суцільна та текстурована модель

Детальні фото отриманої моделі наведено в Додатку Б.

Висновки.

Час обробки складає 25 хвилин. Модель містить значні артефакти, спричинені різними рівнями експозиції на фотографіях. Тіні на поверхні об'єкта призвели до втрати текстурної однорідності, а блиски викликали пересвітлення у певних ділянках (металева табличка).

Автоматичні налаштування камери не забезпечили оптимальних параметрів для умов яскравого освітлення, що вплинуло на точність передачі кольорів і деталізацію. Геометрія об'єкта має значні нерівності та спотворення в ділянках з пересвіченнями.

Обробка фотографій у програмі зайняла більше часу через різну експозицію кадрів. Програмі довелося виконувати додаткові корекції, що уповільнило процес вирівнювання та генерації текстур.

Отримана модель може використовуватися лише для попереднього ознайомлення з формою об'єкта, архітектура має значні артефакти та нерівності, які не дозволяють використовувати дану модель для задач, що потребують точності, а текстура є неоднорідною та містить зайві тіні.

Модель, отримана в умовах експерименту 5, демонструє низьку якість із численними дефектами через яскраве сонячне освітлення та використання автоматичних налаштувань камери. Обробка зайняла більше часу через

необхідність програмного виправлення різноманітних артефактів. Це підтверджує, що для якісного моделювання важливо використовувати ручні налаштування камери та уникати різких перепадів освітлення.

Експеримент 6. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G при яскравому сонці з автоматичними налаштуваннями.

Мета: оцінка впливу яскравого сонячного освітлення на модель, створену смартфоном.

Початкові дані: кількість фотографій 180, зйомка відбувалась у яскравий сонячний день, тіні та блиски на об'єкті. Використано автоматичний режим смартфона.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано підсумкову модель (рис. 3.11, 3.12).



Рисунок 3.11 – Підсумкова модель за умов експерименту 6



Рисунок 3.12 – Отримана суцільна та текстурована модель

Детальні фото отриманої моделі наведено в Додатку Б.

Висновки.

Час обробки складає 23 хвилини. Модель має суттєві дефекти у вигляді прогалин, спотворень і артефактів, спричинених різкими тінями та пересвітами.

Автоматичні налаштування смартфона не змогли коректно адаптуватися до перепадів освітлення, через що якість фотографій була нерівномірною.

Складні елементи, такі як обличчя статуї та декоративні деталі, відтворені нечітко та зі значними артефактами.

Модель, отримана в умовах експерименту 6, продемонструвала низьку якість через яскраве сонячне освітлення, автоматичні налаштування смартфона та обмеженість його функцій. Різкі тіні та пересвітлення негативно вплинули на текстури та геометрію моделі, а обробка зайняла більше часу через необхідність виправлення дефектів. Цей експеримент підтверджує, що для створення якісних 3D-моделей важливо уникати нерівномірного освітлення та використовувати ручні налаштування.

Модель із фото, зроблених на смартфон, має більше дефектів, у порівнянні з моделлю з фото, зроблених на камеру, через спрощення, спричинене автоматичною обробкою смартфона. Втрата дрібних деталей і більші відхилення у геометрії роблять цю модель ще менш придатною для задач, що потребують точності.

2. RealityCapture.

Експеримент 1. Використання Canon EOS 650D із дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери

Етапи створення моделі в програмі RealityCapture: додавання фото, вирівнювання зображень, додавання додаткових точок, якщо було створено більше 1 компонента та об'єднання компонентів в один, обчислення моделі, текстурювання, експортування моделі.

Висновки.

Загальний час обробки складає 1 год. 15 хвилин. Модель, створена на основі фотографій, зроблених камерою Canon EOS 650D, демонструє високу якість із чіткою деталізацією. Поверхня статуї добре відтворена, зберігаючи текстуру каменю, включаючи дрібні нерівності та особливості (рис. 3.13, 3.14).

У програмі RealityCapture 1.5 при вирівнюванні фотографій було створено чотири окремі компоненти. Це свідчить про складність обробки набору фото через можливі дрібні похибки при зйомці, викликані порушенням перспективи через неможливість зробити кадри зверху з достатньої висоти.



Рисунок 3.13 – Отримана підсумкова модель



Рисунок 3.14 – Отримана модель в режимі Sweet та Solid

Для вирішення цієї проблеми довелося вручну створювати контрольні точки та об'єднувати компоненти, що значно збільшило час на попередню обробку даних. Після об'єднання компонентів і завершення обробки модель має високу деталізацію та точність, але проблеми зі злиттям компонентів були вирішені зі значною втратою якості в області голови та волосся. В цій області спостерігаються значні артефакти, на обробку яких потрібен додатковий час в іншій програмі. Це свідчить про важливість суворого дотримання рекомендацій щодо зйомки, особливо щодо дотримання однакової відстані від об'єкту та достатньої кількості кадрів, а також про чутливість даної програми до похибок, зроблених під час фотографування. Артефакти в окремих ділянках значно впливають на загальний результат та роблять модель непридатною для задач, що потребують точності, а також значно подовжують час обробки.

Експеримент 2. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G із дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано підсумкову модель (рис. 3.15, 3.16).



Рисунок 3.15 – Отримана модель в умовах експерименту 2



Рисунок 3.16 – Отримана модель в режимі Sweet та Solid

Висновки.

Час обробки складає 45 хвилин. Якість моделі нормальна. Текстура виглядає дуже опрацьованою, детальною і чіткою: немає плям та неточностей та при приближенні зберігає текстуру каменю. Архітектура в цілому також виглядає детально: добре визначені деталі в зоні голови, волосся та складок плаття, але присутні артефакти в зоні обличчя, через що отримана модель має бути допрацьованою. Дану модель можна використовувати для ознайомлення з формою а також для розташування на другому плані.

Експеримент 3. Використання Canon EOS 650D із недостатньою кількістю кадрів та дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано модель (рис. 3.17, 3.18).

Висновки.

Час обробки складає 19 хвилин. Модель має помітні недоліки, зумовлені недостатньою кількістю фотографій. Це призвело до втрати деталізації у деяких ділянках, зокрема у верхній частині голови (зона волосся, рука), де видно дефекти у вигляді нерівностей та артефактів. В інших частинах модель є задовільною, оглядаючи текстуру.

Текстура є точною та чіткою на всій моделі, навіть на зоні обличчя, хоч і виглядає менш деталізованою, порівнюючи з попередніми експериментами. Найбільші неточності створена модель має у зоні волосся: пасма мають розмиту та неточну текстуру а також мають ділянки з її відсутністю.



Рисунок 3.17 – Отримана модель в умовах експерименту 3



Рисунок 3.18 – Отримана модель в режимі Sweet та Solid

Через недостатню кількість фотографій найбільш постраждала архітектура моделі – відключивши текстури, можна побачити, що поверхня моделі є дуже неоднорідною та має багато впадин. Отримана модель потребує додаткової обробки та є непригідною для точної роботи.

Експеримент 4. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G із недостатньою кількістю кадрів та дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано модель (рис. 3.19, 3.20).

Висновки.

Час обробки складає 16 хвилин. Отримана модель є базовою й підходить для попереднього ознайомлення з об'єктом, проте її якість значно поступається моделям, створеним на основі професійної камери та більшої кількості фото.

У порівнянні з результатом, отриманим в експерименті 3, модель, створена на основі фотографій, зроблених на телефон за тих самих умов, виявилася менш якісною. Основна різниця полягає у деталізації та текстурах. Обличчя менш деталізоване порівняно з результатами експерименту 3. Контури губ, очей і носа менш чіткі, що добре видно, якщо прибрати текстуру та оглядати тільки геометрію. Проблеми з деталізацією волос зберігається та окрім спрощення

геометрії в цій частині, зона волосся має значні прогалини в текстурі, розмиті на відсутні текстури. Модель також має проблеми в зоні складок плаття. Загалом модель потребує додаткової обробки.



Рисунок 3.19 – Створена модель в умовах експерименту 4



Рисунок 3.20 – Отримана модель в режимі Sweet та Solid

Експеримент 5. Використання Canon EOS 650D при яскравому сонці з автоматичними налаштуваннями.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано модель (рис. 3.21, 3.22).



Рисунок 3.21 – Отримана модель в умовах Експерименту 5



Рисунок 3.22 – Отримана модель в режимі Sweet та Solid

Висновки.

Час обробки складає 55 хвилин. Модель, отримана за допомогою камери, демонструє хорошу деталізацію, проте її якість частково знижується через вплив

яскравого сонця, тіней. Риси обличчя та інші деталі відтворені досить чітко, хоча в місцях сильного освітлення помітно втрату деяких деталей, та навіть великої частини (в зоні волосся не вистачає пасма, бо програма прийняла затемнену область статуї за порожню область). Інші глибокі тіні або пересвітлені ділянки створили також невеликі артефакти, які не є критичними, але вже заважають використанню даної моделі для задач, потребуючих точності. Проте її можна використати для загального ознайомлення з архітектурою. При створення моделі за експериментом 5 найбільш постраждала текстура: затінені частини в підсумковій моделі також залишаються затіненими, а металева табличка, що була засвічена на фотографіях, на моделі не читабельна. Програмі необхідно більше часу для обробки даних фотографій.

Експеримент 6. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G при яскравому сонці з автоматичними налаштуваннями.

Виконавши всі вище перелічені кроки (додавання фото, вирівнювання фото, створення моделі, створення текстури та експорт отриманої моделі) було отримано наступну підсумкову модель (рис. 3.23, 3.24).



Рисунок 3.23 – Отримана модель в умовах експерименту 6



Рисунок 3.24 – Отримана модель в режимі Sweet та Solid

Висновки.

Час обробки складає 39 хвилин. Модель, отримана за допомогою смартфона, демонструє також хорошу деталізацію за такими ж умовами, як в експерименті 5. Різниця між отриманими результатами експериментів 5 і 6 полягає здебільшого в тому, як виглядає текстура. Автоматичні налаштування телефону більш вирівняли наслідки яскравого сонця, та відповідно, отримана модель має більш однорідну текстуру без яскраво виражених тіней. Однак модель все ж має тіні від руки (на передній частині) та невеликі тіні від пасм волосся. Отримана модель також має артефакти в архітектурі, які є більш вираженими у порівнянні з моделлю, отриманою за експериментом 5. Це помітно на деталях в зоні обличчя, а також волос – пасма мають загальну форму, але не є детально опрацьованими. Також артефакти, пов'язані зі примусовим з'єднанням компонентів є більш помітними. В цілому середня та нижня частини статуї виглядають дуже детально та якісно. Отриману модель після додаткового опрацювання можна використовувати для ознайомлення з формою а також для розташування на задньому плані.

3. Meshroom.

Експеримент 1. Використання Canon EOS 650D із дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Процес створення моделі: додавання фото, CameraInit (ініціалізація камер), FeatureExtraction, FeatureMatching (порівнює ключові точки між зображеннями), StructureFromMotion (положення камер), ImageMatching, DepthMap (створює глибинні карти для кожного зображення), DepthMapFilter (фільтрує глибинні карти), Meshing (генерує трикутну сітку на основі зливої хмари точок), MeshFiltering (оптимізує сітку), Texturing (накладає текстури) (рис. 3.25, 3.26).



Рисунок 3.25 – Підсумкова модель



Рисунок 3.26 – Отримана модель в режимі Solid та Textured

Висновки.

Час обробки становить 4 години 41 хвилина. Отримана модель є середньої якості, основні частини виглядають задовільно, але зони обличчя та голови, які мають дрібні деталі, мають невеликі нерівності та артефакти. В цілому текстура виглядає дуже опрацьованою та детальною при приближенні, добре видно текстуру та нерівність каменю. Але слід зазначити, що ця програма є дуже вибагливою щодо зміни освітлення. Навіть використовуючи фотографії, зроблені в один день у хмарну погоду, на моделі можна побачити переходи через нерівномірність освітлення, що робить підготовку до фотографування довшою та потребуючою додаткового обладнання.

Експеримент 2. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G із дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Виконавши всі необхідні етапи, було отримано модель (рис. 3.27, 3.28).



Рисунок 3.27 – Підсумкова модель



Рисунок 3.28 – Отримана модель в режимі Solid та Textured

Висновки.

Час обробки складає 4 години 3 хвилини. Якість отриманої моделі низька. Архітектура має значні нерівності та велику кількість артефактів, а текстура в цілому виглядає прийнятно, але при приближенні видно плями та нерівності. В цілому модель є незадовільною та рекомендовано зробити заново використовуючи інший вихідний матеріал.

Експеримент 3. Використання Canon EOS 650D із недостатньою кількістю кадрів та дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Виконавши всі необхідні етапи, було отримано модель (рис. 3.29, 3.30).



Рисунок 3.29 – Підсумкова модель

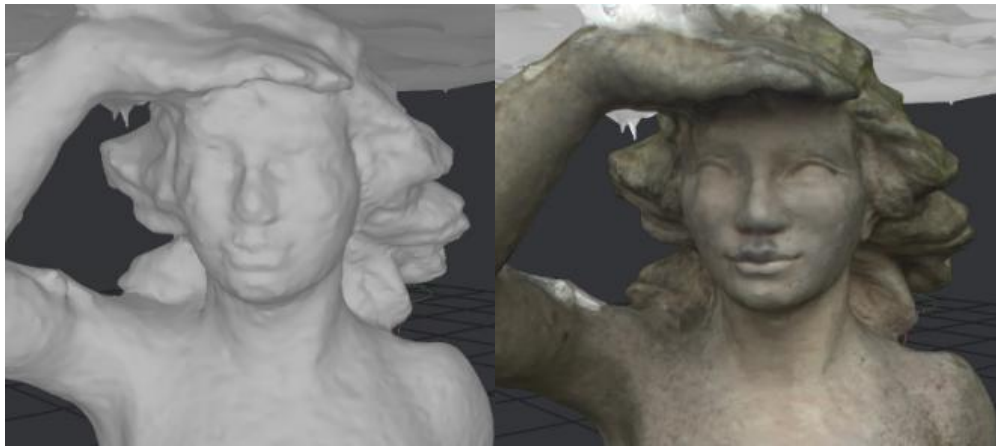


Рисунок 3.30 – Отримана модель в режимі Solid та Textured

Висновки.

Час обробки складає 1 година 15 хвилин. Якість отриманої моделі нижче середньої: архітектура, особливо в зоні обличчя та голови, є неоднорідною та має артефакти. Зона волосся та складок плаття через нестачу фото має пусті зони, які на текстурній карті відображаються як білі плями. Дрібні деталі є змазаними, а на текстурі видні переходи через незначну зміну освітлення.

Експеримент 4. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G із недостатньою кількістю кадрів та дотриманням рекомендацій щодо погодних умов та налаштувань камери.

Виконавши всі необхідні етапи було, отримано модель (рис. 3.31, 3.32).

Висновки:

Час обробки складає 1 година 5 хвилин. Якість отриманої моделі низька: геометрія має значні артефакти, деталі статуї або передані неправильно, або зовсім відсутні (частина руки, складки плаття). Текстура в цілому є задовільною в нижній і середній частині, але в зоні голови є відсутні частини, а також текстурна карта не є детальною, багато частин виглядають змазано. Дана модель не підходить для точних робіт, а також не рекомендовано її використовувати на першому чи другому плані.



Рисунок 3.31 – Підсумкова модель



Рисунок 3.32 – Отримана модель в режимі Solid та Textured

Експеримент 5. Використання Canon EOS 650D при яскравому сонці з автоматичними налаштуваннями.

Виконавши всі необхідні етапи, було отримано модель (рис. 3.33, 3.34).



Рисунок 3.33 – Підсумкова модель



Рисунок 3.34 – Отримана модель в режимі Solid та Textured

Висновки.

Час обробки складає 3 години 36 хвилин. Якість отриманої моделі низька. Через надмірне світло найбільше постраждала текстура: вона є неоднорідною та має артефакти, особливо в засвіченій зоні – деталі обличчя, волосся та торсу – вона має плями та нерівності. Архітектура теж має значні недоліки. Незважаючи на загальну деталізацію в нижній та середній частині статуї, вона виглядає погано у верхній частині. Текст, розташований на металевій табличці неможливо прочитати. Дану модель рекомендовано переробити, використовуючи обладнання, щоб не допустити різких тіней та ярих плям освітлення.

Експеримент 6. Використання Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G при яскравому сонці з автоматичними налаштуваннями.

Виконавши всі необхідні етапи було отримано модель (рис. 3.35, 3.36).



Рисунок 3.35 – Підсумкова модель

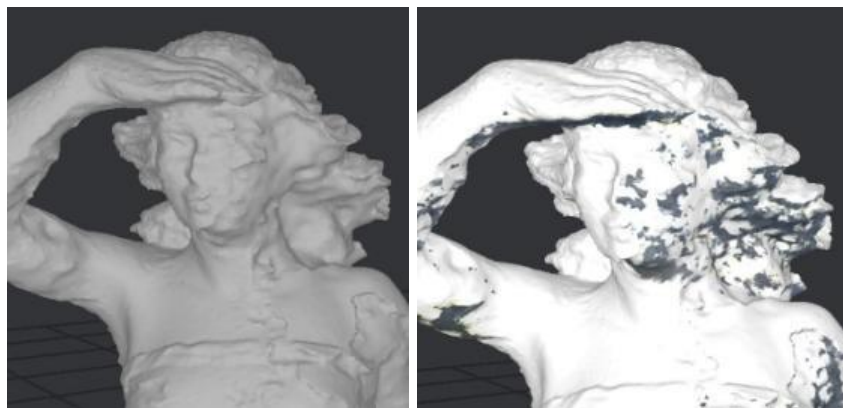


Рисунок 3.36 – Отримана модель в режимі Solid та Textured

Висновки.

Час обробки складає 4 години 36 хвилин. Якість отриманої моделі дуже низька: архітектура неоднорідна та має багато прогалин на місцях, де програма зчитала тінь як відсутній елемент. Так як програма є дуже чутливою до освітлення, найбільш через недотримання рекомендацій щодо сонця постраждала текстура: вона є взагалі не задовільною, верхня частина та бокова,

що були засвічені на фотографіях, відображаються білою плямою. Інші місця виглядають також незадовільно. В цілому дана модель взагалі не підходить для будь якого використання та має бути переробленою.

3.3.3 Висновок щодо використання програм

Під час дослідження були використані такі програми, як: RealityCapture, Agisoft Metashape та Meshroom. Всі програми показали різний результат з однаковими вхідними даними та налаштуванням.

Agisoft Metashape. Програма має дуже зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Користувачеві надається широкий контроль над налаштуваннями процесів, що дозволяє досягти якісних результатів, але може потребувати часу для того, щоб розібратися з налаштуваннями. В ході експерименту було досліджено, що ця програма не є дуже чутливою до недосконалості вихідних матеріалів, на відміну від інших, та дає гарний результат навіть за умов засвічених фотографій. Час обробки в середньому складав 25 хвилин, та є найменшим серед усіх. Програма не потребує потужного обладнання та додаткових дій через порушення перспективи на фотографіях в області голови. Як висновок, дана програма ідеально підійде як для новачків, так і для професіоналів, які бажають отримати якісні моделі за короткий час, не виконуючи при цьому додаткових маніпуляцій з даними, та не використовуючи додаткове обладнання, але готові платити високу вартість підписки.

RealityCapture. Дана програма також має зрозумілий інтерфейс. Її основною перевагою може стати автоматизація більшості процесів, таких як вирівнювання фотографій, побудова сітки та текстуровання, що можна виконати, не розбираючись в налаштуваннях. Підказки в інтерфейсі допомагають користувачам краще зрозуміти кожен етап обробки. Дана особливість може знадобитись новачкам, які хочуть як скоріше почати експерименти. Середній час обробки склав 50 хвилин, що є задовільно, бо для більшості випадків довелось

провести додаткові налаштування. Якість отриманих моделей є високою, хоча деякі мають більше артефактів, порівнюючи з Agisoft Metashape. Також в ході експерименту отримані текстури виглядали більш деталізованими в порівнянні з моделями, отриманими в першій програмі. RealityCapture добре підходить як для новачків, так і для професіоналів, які шукають потужний і швидкий інструмент для створення високоякісних моделей. Програма орієнтована на продуктивні комп'ютери, тому на менш потужному обладнанні час обробки може збільшитися та вартість підписки для бізнес-підписки є високою.

Meshroom. Ця програма має сучасний інтерфейс із вузловою системою, яка дозволяє легко візуалізувати весь процес обробки. Загалом, достатньо натискання однієї кнопки, щоб розпочати процес побудови моделі, однак для отримання якісного результату потрібно розібратися в налаштуваннях, що вимагає часу а також деяких знань з області фотограмметрії. Середній час обробки є набагато довшим ніж в попередніх програмах та складає приблизно 3,5 години. Неправильно зроблені знімки або недостатнє перекриття кадрів можуть значно знизити якість моделі. До мінусів також можна віднести чутливість програми до освітлення об'єкту: навіть невеликі перемини в освітленні дають видимі недоліки на текстурній карті, тобто, щоб отримати якісну кінцеву модель, треба витратити додатковий час та спеціальне обладнання для створення рівномірного освітлення. Проте якщо фотографії гарної якості, дана програма дозволяє добитись дуже деталізованої та реалістичної текстури. Програма потребує потужного обладнання, особливо CUDA-сумісного GPU, без якого вона працювати не буде, що може ще більше подовжити час обробки. Meshroom є програмою, яка підійшла б початківцям, які б хотіли без значних фінансових витрат ознайомитись з даною сферою або для професіоналів зі знаннями щодо налаштувань, а також професійним обладнанням.

3.4 Аналіз якості отриманих моделей

Для того, щоб зробити висновки про якість моделей було проведено опитування методом експертних оцінок. Для цього обрано 10 експертів, яким потрібно було розподілити бали від 1 до 18 за такими параметрами для кожної отриманої моделі, як: якість архітектури, якість текстури, час обробки моделі, відтворення складних деталей, візуальна схожість з оригіналом.

Для початку експертам потрібно було визначити коефіцієнт важливості для кожного параметру. Для цього вони розподілили бали від 1 до 5 (де 1 – найменш важливий, а 5 – найбільш важливий показник). Результати розрахунків наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Визначення важливості параметрів

Параметри	Оцінка експертів										Сума оцінок	Коефіцієнт важливості
	Екс. 1	Екс. 2	Екс. 3	Екс. 4	Екс. 5	Екс. 6	Екс. 7	Екс. 8	Екс. 9	Екс. 10		
якість архітектури	3	3	2	4	5	2	4	5	5	4	37	0,25
якість текстури	4	5	3	3	2	4	5	3	4	3	36	0,24
час обробки моделі	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	13	0,09
відтворення складних деталей	2	2	4	1	4	3	3	1	2	2	24	0,16
візуальна схожість з оригіналом	5	4	5	5	3	5	2	4	3	5	41	0,27

Наступним етапом експерти за кожним з п'яти параметрів оцінили отримані моделі за шкалою від 1 до 18 (1 – найгірша якість, 18 – найліпша). Після занесення даних у таблицю можна розрахувати відносну вагу альтернатив. Оцінки за параметром «якість архітектури» наведено в табл. 3.3, оцінки за параметром «якість текстури» наведено в табл. 3.4, оцінки за параметром час обробки моделі наведено в табл. 3.5, оцінки за параметром відтворення складних деталей наведено в табл. 3.6, оцінки за параметром візуальна схожість з оригіналом наведено в табл. 3.7. Далі ці дані перенесено в підсумкову табл. 3.8.

Таблиця 3.3 – Оцінка якості архітектури

якість архітектури		Оцінка експертів											
	модель	Екс. 1	Екс. 2	Екс. 3	Екс. 4	Екс. 5	Екс. 6	Екс. 7	Екс. 8	Екс. 9	Екс. 10	Сума	Відносна вага
Програма Agisoft Metashape Professional	1 (Екс.1)	18	18	16	17	18	17	17	18	18	18	175	0,102
	2 (Екс.2)	13	13	15	14	13	14	13	8	13	16	132	0,077
	3 (Екс.3)	12	9	12	12	12	10	12	12	12	10	113	0,066
	4 (Екс.4)	6	7	7	6	7	7	6	5	7	6	64	0,037
	5 (Екс.5)	15	17	10	13	15	13	10	15	14	13	135	0,079
	6 (Екс.6)	9	12	13	7	8	12	9	13	15	15	113	0,066
Програма RealityCapture 1.5	7 (Екс.1)	16	16	18	16	16	15	16	16	16	14	159	0,093
	8 (Екс.2)	17	15	9	18	17	16	11	17	17	17	154	0,090
	9 (Екс.3)	8	8	11	9	9	11	8	9	9	11	93	0,054
	10 (Екс.4)	5	10	6	5	6	6	7	7	6	5	63	0,037
	11 (Екс.5)	10	14	17	15	11	18	18	14	11	12	140	0,082
	12 (Екс.6)	7	11	14	10	10	9	15	11	10	8	105	0,061
Програма Meshroom	13 (Екс.1)	14	6	8	11	14	8	14	10	8	9	102	0,060
	14 (Екс.2)	11	5	5	8	5	5	5	6	5	7	62	0,036
	15 (Екс.3)	3	3	2	2	2	3	1	1	1	2	20	0,012
	16 (Екс.4)	2	1	4	3	3	4	2	2	3	3	27	0,016
	17 (Екс.5)	4	4	3	4	4	1	4	4	4	4	36	0,021
	18 (Екс.6)	1	2	1	1	1	2	3	3	2	1	17	0,010

Таблиця 3.4 – Оцінка якості текстури

якість текстури		Оцінка експертів											
	модель	Екс. 1	Екс. 2	Екс. 3	Екс. 4	Екс. 5	Екс. 6	Екс. 7	Екс. 8	Екс. 9	Екс. 10	Су ма	Відносна вага
Програма Agisoft Metashape Professional	1 (Екс. 1)	18	18	18	18	17	17	17	18	18	17	176	0,103
	2 (Екс. 2)	10	11	15	14	13	10	11	12	10	13	119	0,070
	3 (Екс. 3)	15	14	16	16	15	15	16	14	16	18	155	0,091
	4 (Екс. 4)	5	12	3	4	7	5	7	6	6	7	62	0,036
	5 (Екс. 5)	14	17	13	17	18	18	18	15	15	16	161	0,094
	6 (Екс. 6)	8	13	5	5	6	7	8	8	5	6	71	0,042
Програма RealityCapture 1.5	7 (Екс. 1)	17	16	14	15	16	16	15	16	17	15	157	0,092
	8 (Екс. 2)	12	9	11	13	12	12	14	11	11	11	116	0,068
	9 (Екс. 3)	16	8	12	11	14	14	13	13	14	14	129	0,075
	10 (Екс.4)	4	7	4	6	4	6	4	5	4	5	49	0,029
	11 (Екс.5)	9	6	17	12	9	9	9	9	8	8	96	0,056
	12 (Екс.6)	11	15	8	10	8	11	12	17	13	12	117	0,068
Програма Meshroom	13 (Екс.1)	13	3	9	9	11	13	10	10	12	10	100	0,058
	14 (Екс.2)	7	5	10	8	10	8	6	7	9	9	79	0,046
	15 (Екс.3)	6	10	6	7	5	4	5	4	7	4	58	0,034
	16 (Екс.4)	3	4	2	1	3	3	3	3	3	2	27	0,016
	17 (Екс.5)	2	2	7	3	2	1	2	1	2	3	25	0,015
	18 (Екс.6)	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	13	0,008

Таблиця 3.5 – Оцінка часу обробки

час обробки моделі		Оцінка експертів											
	модель	Екс. 1	Екс. 2	Екс. 3	Екс. 4	Екс. 5	Екс. 6	Екс. 7	Екс. 8	Екс. 9	Екс. 10	Су ма	Відносна вага
Програма Agisoft Metashape Professional	1 (Екс. 1)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	110	0,064
	2 (Екс. 2)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	120	0,070
	3 (Екс. 3)	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	180	0,105
	4 (Екс. 4)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	160	0,094
	5 (Екс. 5)	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	140	0,082
	6 (Екс. 6)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	130	0,076
Програма RealityCapture 1.5	7 (Екс. 1)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	60	0,035
	8 (Екс. 2)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	70	0,041
	9 (Екс. 3)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	150	0,088
	10 (Екс.4)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	170	0,099
	11 (Екс.5)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	90	0,053
	12 (Екс.6)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	100	0,058
Програма Meshroom	13 (Екс.1)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0,006
	14 (Екс.2)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	0,018
	15 (Екс.3)	5	8	8	8	8	5	5	8	8	5	68	0,040
	16 (Екс.4)	8	5	5	5	5	8	8	5	5	8	62	0,036
	17 (Екс.5)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	40	0,023
	18 (Екс.6)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	20	0,012

Таблиця 3.6 – Оцінка відтворення складних деталей

відтворення складних деталей		Оцінка експертів											
	модель	Екс. 1	Екс. 2	Екс. 3	Екс. 4	Екс. 5	Екс. 6	Екс. 7	Екс. 8	Екс. 9	Екс. 10	Су ма	Відносна вага
Програма Agisoft Metashape Professional	1 (Екс. 1)	18	18	17	18	18	17	18	17	18	18	177	0,104
	2 (Екс. 2)	17	11	9	11	16	18	17	18	16	17	150	0,088
	3 (Екс. 3)	7	17	7	10	7	8	9	11	9	10	95	0,056
	4 (Екс. 4)	3	9	6	6	6	7	4	5	4	4	54	0,032
	5 (Екс. 5)	14	16	13	16	15	16	14	13	15	14	146	0,085
	6 (Екс. 6)	12	10	16	13	14	12	12	12	13	13	127	0,074
Програма RealityCapture 1.5	7 (Екс. 1)	15	15	18	17	17	15	16	16	17	16	162	0,095
	8 (Екс. 2)	13	14	12	15	13	14	15	14	12	12	134	0,078
	9 (Екс. 3)	10	13	15	12	11	10	11	9	10	9	110	0,064
	10 (Екс.4)	8	12	8	8	8	9	8	8	7	8	84	0,049
	11 (Екс.5)	16	8	14	14	12	13	13	15	14	15	134	0,078
	12 (Екс.6)	11	7	11	9	9	11	10	10	8	7	93	0,054
Програма Meshroom	13 (Екс.1)	9	5	10	7	10	6	7	7	11	11	83	0,049
	14 (Екс.2)	6	6	4	5	5	5	3	4	6	6	50	0,029
	15 (Екс.3)	5	4	5	4	4	3	6	3	5	5	44	0,026
	16 (Екс.4)	1	3	1	1	2	1	2	1	1	1	14	0,008
	17 (Екс.5)	4	2	2	3	3	4	5	6	2	3	34	0,020
	18 (Екс.6)	2	1	3	2	1	2	1	2	3	2	19	0,011

Таблиця 3.7 – Оцінка схожості моделі з оригіналом

візуальна схожість з оригіналом		Оцінка експертів											
	модель	Екс. 1	Екс. 2	Екс. 3	Екс. 4	Екс. 5	Екс. 6	Екс. 7	Екс. 8	Екс. 9	Екс. 10	Су ма	Відносна вага
Програма Agisoft Metashape Professional	1 (Екс. 1)	18	18	18	18	17	18	18	18	17	16	176	0,103
	2 (Екс. 2)	13	11	12	12	13	12	11	15	13	14	126	0,074
	3 (Екс. 3)	8	10	9	8	9	8	10	9	9	10	90	0,053
	4 (Екс. 4)	4	9	8	5	6	4	3	5	5	8	57	0,033
	5 (Екс. 5)	17	17	16	17	18	17	16	16	18	18	170	0,099
	6 (Екс. 6)	11	16	17	16	15	16	17	17	16	12	153	0,089
Програма RealityCapture 1.5	7 (Екс. 1)	14	15	15	13	14	15	13	14	15	13	141	0,082
	8 (Екс. 2)	9	14	13	9	8	9	9	6	11	9	97	0,057
	9 (Екс. 3)	6	8	7	7	7	6	7	8	7	6	69	0,040
	10 (Екс.4)	3	7	4	4	3	5	4	3	3	4	40	0,023
	11 (Екс.5)	12	13	11	15	16	14	15	13	14	15	138	0,081
	12 (Екс.6)	10	12	10	14	10	10	12	10	6	11	105	0,061
Програма Meshroom	13 (Екс.1)	16	6	14	11	12	13	14	12	12	17	127	0,074
	14 (Екс.2)	15	5	6	10	11	11	8	11	10	7	94	0,055
	15 (Екс.3)	7	4	5	6	5	7	6	7	8	5	60	0,035
	16 (Екс.4)	2	3	1	3	2	3	2	2	2	3	23	0,013
	17 (Екс.5)	5	2	3	2	4	1	5	4	4	2	32	0,019
	18 (Екс.6)	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	12	0,007

На основі отриманих результатів було розраховано значення рейтингів альтернативних варіантів моделей, рейтинги наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Оцінка якості створених моделей

Ваги критеріїв							Середнє значення рейтингу
	Модель	П1	П2	П3	П4	П5	
Програма Agisoft Metashape Professional	1 (Експ 1)	0,026	0,025	0,006	0,017	0,028	0,020
	2 (Експ 2)	0,019	0,017	0,006	0,014	0,020	0,015
	3 (Експ 3)	0,017	0,022	0,009	0,009	0,014	0,014
	4 (Експ 4)	0,009	0,009	0,008	0,005	0,009	0,008
	5 (Експ 5)	0,020	0,023	0,007	0,014	0,027	0,018
	6 (Експ 6)	0,017	0,010	0,007	0,012	0,024	0,014
Програма RealityCapture 1.5	7 (Експ 1)	0,023	0,022	0,003	0,015	0,022	0,017
	8 (Експ 2)	0,023	0,016	0,004	0,013	0,015	0,014
	9 (Експ 3)	0,014	0,018	0,008	0,010	0,011	0,012
	10 (Експ 4)	0,009	0,007	0,009	0,008	0,006	0,008
	11 (Експ 5)	0,020	0,013	0,005	0,013	0,022	0,015
	12 (Експ 6)	0,015	0,016	0,005	0,009	0,017	0,012
Програма Meshroom	13 (Експ 1)	0,015	0,014	0,001	0,008	0,020	0,011
	14 (Експ 2)	0,009	0,011	0,002	0,005	0,015	0,008
	15 (Експ 3)	0,003	0,008	0,004	0,004	0,009	0,006
	16 (Експ 4)	0,004	0,004	0,003	0,001	0,004	0,003
	17 (Експ 5)	0,005	0,004	0,002	0,003	0,005	0,004
	18 (Експ 6)	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002

Аналіз отриманих результатів показує, що експерти оцінили якість моделей 1 та 5 як найвищу та моделі 16 та 18 як найгірші. Програма Agisoft Metashape Professional, за опитуванням показала найкращі результати. На другому місці, з невеликою різницею, розташована RealityCapture, та на останньому опинилась програма Meshroom.

Моделі, отримані в умовах експериментів 1 та 5 (хмарна погода, достатня кількість фото), займають найвищі позиції, моделі експериментів, проведених при яскравому сонці (5, 6), займають середні позиції.

Як виявилось, умовою, що більш негативно вплинула на якість моделей, є недостатня кількість фото (умови експериментів 3 та 4). З невеликим відривом моделі на основі фотографій, зроблених на фотоапарат, розташовані вище за моделі на основі фотографій, зроблених на камеру смартфона. З цього можна зробити висновок, що умови експерименту 1 та використання програмного забезпечення Agisoft Metashape Professional є найоптимальнішими для проведення сканування об'єктів методом наземної фотограмметрії, що означає, що дані умови є сенс занести до рекомендацій.

4 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ

Сьогодні збереження пам'яток, відновлення та реставрація історичних будівель і споруд є невід'ємною частиною національної культури. Але така робота вимагає серйозних зусиль багатьох спеціалістів та залучення великих ресурсів.

Ці рекомендації спрямовані на те, щоб допомогти підприємствам, які мають ціль застосовувати можливості фотограмметрії для оцифрування культурної спадщини, у використанні оптимальних вихідних матеріалів та програмних налаштувань для створення якісних моделей за умов обмеженого бюджету. Дотримання цих порад покращить якість та скоротить час створення моделі.

1. Підготовка до зйомки.

Процес починається з дослідження об'єкту для сканування. Рекомендується визначити, чи має об'єкт чіткі геометричні деталі та текстури (наприклад, статуя, фасад будівлі, споруда). Об'єкт має бути доступним для зйомки з усіх сторін, якщо необхідна повна 3D-модель, фасад сканується з однієї ліцевої сторони, можливо знадобиться зйомка зверху з використанням БПЛА. Якщо об'єкт має гладкі або відбивні поверхні, які можуть створювати проблеми під час текстурування, необхідно нанести додаткове маркування, щоб полегшити текстурування.

Для зйомки можна використовувати як цифрову дзеркальну або бездзеркальну камеру із роздільною здатністю не менше 18 Мп, так і смартфон. Незважаючи від того що саме буде використовуватись для зйомки, слід провести ручні налаштування:

– постійна фокусна відстань (наприклад, 35 мм). Постійна фокусна відстань забезпечує однакову перспективу на всіх знімках, що сприяє точному вирівнюванню;

– значення діафрагми $f/8$ забезпечить достатню глибину різкості. Це є оптимальним значенням для забезпечення великої глибини різкості, що дозволяє всім частинам об'єкта залишатися у фокусі;

– значення ISO 100–200 для уникнення шумів. Високі значення ISO можуть створювати цифрові шуми, які спотворюють текстури та ускладнюють знаходження ключових точок;

– фіксоване значення балансу білого відповідно до умов освітлення (наприклад, "Денне світло"). У автоматичному режимі баланс білого може змінюватися, особливо якщо освітлення змінюється, що створює різнокольорові плями на текстурі;

– при проведенні зйомки фокус має бути зафіксованим на обраній точці. Ручний фокус дозволяє уникнути автоматичного переналаштування фокусу під час зйомки, яке може призводити до розмиття деяких кадрів.

Слід проводити зйомку в похмурий день для уникнення сильних тіней і бликів та уникати яскравого сонця або дощу, які можуть вплинути на якість текстури.

2. Проведення зйомки.

Для створення якісної моделі вкрай важливо зробити достатню кількість фото (для детальної моделі невеликого об'єкта (статуї) щонайменше 150-200 кадрів, для більших об'єктів (фасади будівель) може знадобитися 300-400 знімків).

Потрібно забезпечити перекриття знімків на 60–80% для кожного ракурсу. Для цього, наприклад для зйомки статуї, рекомендовано проводити її на трьох рівнях висоти (основа, на рівні очей, та вище), рухаючись навколо об'єкта по колу, поступово змінюючи кут зйомки, та додатково зверху, щоб було видно верхні точки статуї. Відстань має бути такою, щоб весь об'єкт поміщався в кадрі з невеликим запасом (5–10% простору навколо), якщо це можливо, слід використовувати однакову відстань для кожного ракурсу. Для того, щоб проконтролювати це, можна зробити коло навколо об'єкта, що буде визначати лінію руху.

3. Обробка фотографій.

Після отримання фотографій, слід перевірити їх, визначити їх якість, залишити для моделювання прийнятні (як на рис. 4.1), та видалити неякісні фотографії, що можуть заважити створенню моделі. До них відносяться змазані фотографії, засвічені, або ті, що мають забагато шумів (рис. 4.2).



Рисунок 4.1 – Приклад фото, що підходять



Рисунок 4.2 – Приклад фото, що не підходять (змазана та засвічена)

Обробку фото рекомендовано проводити за допомогою програми Agisoft Metashape, так як вона є дуже простою та зрозумілою і є не занадто чутливою до недосконалостей вихідних фотографій, як наприклад з невеликим порушенням перспективи чи можливими тінями. Час обробки в даній програмі є дуже коротким, що дає змогу проводити експерименти з налаштуваннями. За обмеженим бюджетом слід використати програмне забезпечення RealityCapture, що є безкоштовним для приватних осіб та малих бізнесів.

Створення моделі складається з декількох етапів: додавання фотографій, вирівнювання фотографій, створення хмари точок, будування моделі, будування текстури.

Етапи створення моделі в програмі Agisoft Metashape.

1. Додавання фотографій. Для цього потрібно обрати команду Workflow > Add Photos. Список доданих фотографій, а також їх властивості можна побачити на панелі Photos.

2. Вирівнювання фотографій. Для цього треба обрати команду Workflow > Align Photos. При цьому в діалоговому вікні слід встановити наступні параметри (рис. 4.3).

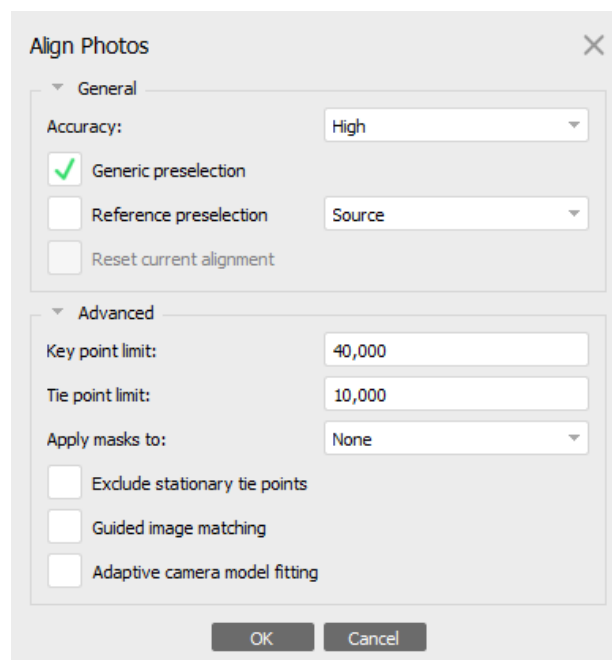


Рисунок 4.3 – Налаштування вирівнювання

Якщо оброблюється велика кількість зображень (більше 100), рекомендовано включити опцію *Generic preselection*, щоб скоротити час обробки.

Для *Key point limit* рекомендований діапазон від 20000 до 100000, для *Tie point limit* рекомендований діапазон від 2000 до 40000.

Після завершення цього етапу має сенс видалити зайві точки, щоб прискорити подальший час обробки.

3. Створення хмари точок. Для цього треба обрати команду *Build Point Cloud* з меню *Workflow* та налаштування, як на рис. 4.4.

4. Будування моделі. Для цього слід обрати команду *Workflow > Build Model*. При цьому в діалоговому вікні рекомендовані параметри, як на рис. 4.5.

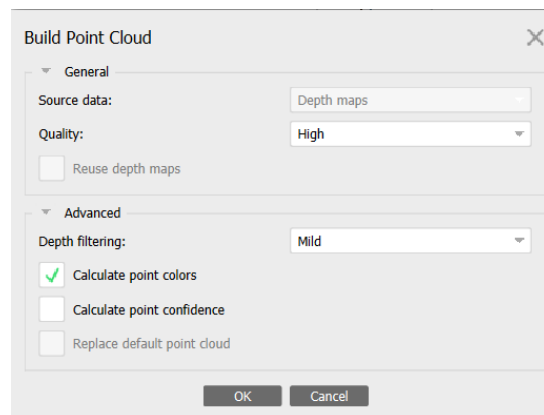


Рисунок 4.4 – Налаштування хмари точок

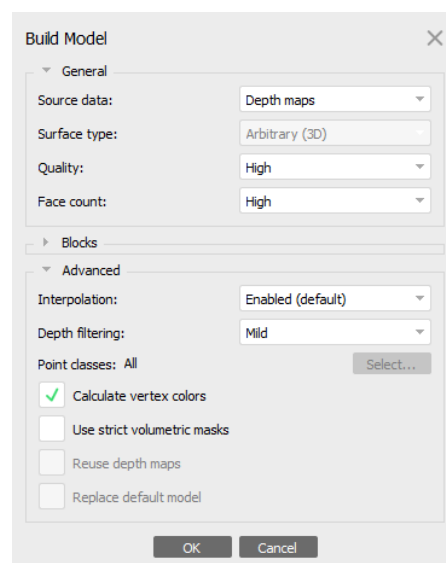


Рисунок 4.5 – Налаштування побудови моделі

5. Будування текстури. Для цього слід обрати команду **Workflow > Build Model** та вибрати параметри згідно рис. 4.6.

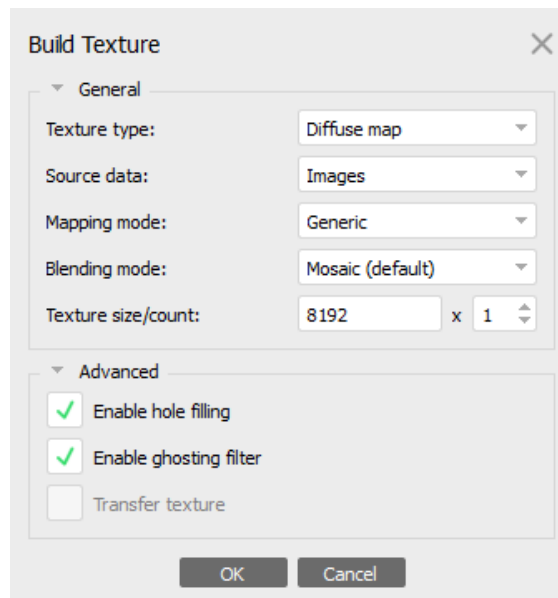


Рисунок 4.6 – Налаштування побудови текстур

Зазвичай достатньо розміру текстури від 4096 до 16 384 пікселів.

Останнім етапом є експорт отриманої моделі. Програма дає можливість обрати зі списку можливих варіантів формату для експорту: OBJ, 3DS, PLY та інші. Вибір слід зробити, враховуючи вимоги програми для наступної обробки. Так наприклад Blender підтримує такі формати для імпорту, як: OBJ, FBX, 3DS, PLY.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Характеристика науково-дослідного рішення

Метою даного розділу є економічне обґрунтування витрат на проведення науково-дослідної роботи (НДР), в межах якої передбачається дослідження можливостей фотограмметрії для 3D сканування архітектурних об'єктів. Під час такого обґрунтування буде здійснено: розрахунок трудовитрат та заробітної плати працівникам, розрахунок одноразових витрат і прибутку, оцінку результатів НДР. Реалізація НДР передбачає такі етапи:

- аналіз предметної області, аналіз існуючих технологій фотограмметрії;
- визначення алгоритму реалізації проєкту;
- дослідження можливостей фотограмметрії для 3D сканування архітектурних об'єктів;
- вибір обладнання та програмного забезпечення;
- виконання експериментів;
- оцінка точності 3D-моделей;
- розробка рекомендацій щодо підготовки та виконання фотограмметрії для складних архітектурних форм.

5.2 Етапи виконання НДР, їх трудомісткість та заробітна плата

Під час виконання НДР було проведено аналіз існуючих рішень у сфері фотограмметрії, проведено експериментальне створення 18 моделей об'єктів та порівняльний аналіз отриманих моделей, розроблено рекомендації. Умовно НДР можна розділити на три етапи: підготовчий, основний і заключний.

На стадії виконання підготовчого етапу було виконано підбір і аналіз інформації для проведення відповідних до постановки завдання робіт.

Проведено пошук інформації в мережі Internet та у фаховій літературі.

На етапі виконання основної частини НДР було здійснено такі роботи:

- підготовка до фотозйомки (вибір об'єкта дослідження, вибір обладнання);
- зйомка об'єкта (проведення зйомки в різних умовах освітлення та з використанням різного обладнання);
- обробка фотографій (завантаження знімків в обрані програми та налаштування параметрів для побудови);
- аналіз отриманих моделей.

У заключній частині проводяться: аналіз результатів виконання НДР, складання звіту з НДР та його захист.

Найбільш складною та відповідальною частиною при плануванні НДР є розрахунок трудомісткості робіт, тому що трудові витрати часто становлять основну частину вартості науково-дослідних робіт і безпосередньо впливають на строки розробки. Дану роботу виконували 3 фахівці: фотограф, обробник даних, аналітик. Середня заробітна плата фотографа становить 30 000,00 грн, обробника даних – 50 000,00 грн, аналітика – 60 000,00 грн.

Проведемо розрахунок трудовитрат і заробітної плати виконавця робіт.

Середньоденна заробітна плата виконавця робіт ($Z_{\text{ср.дн.}}$):

$$Z_{\text{ср.дн.}} = \frac{Z_{\text{ср.міс.}}}{n}, \quad (5.1)$$

де $Z_{\text{ср.міс.}}$ – середньомісячна зарплата виконавця роботи;

n – число робочих днів у місяці, ($n = 22$).

Підставивши дані до (5.1), отримаємо середньоденну заробітну плату фотографа у розмірі 1 363,64 грн, обробника даних – 2 272,73 грн, аналітика – 2 727,27 грн.

Етапи виконання НДР, перелік і зміст робіт, трудомісткість їх виконання, заробітна плата виконавців робіт представлені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахунок трудовитрат і заробітної плати виконавців робіт

Перелік робіт	Кількість виконавців	Посада виконавця	Трудо-місткість робіт, люд.-днів	Середньоденна заробітна плата, грн	Сума заробітної плати, грн
1. Підготовчий етап					
1.1. Підбір об'єкту для дослідження	1	Фотограф	0,5	1 363,64	681,82
1.2 Підготовка обладнання	1	Фотограф	0,5	1 363,64	681,82
2. Основний етап					
2.1 Зйомка статуй	1	Фотограф	6	1 363,64	8181,84
2.2 Обробка знімків у програмі	1	Обробник даних	10	2 272,73	22727,3
2.3 Аналіз отриманих моделей	1	Аналітик	3	2 727,27	8181,81
3. Заключний етап					
3.1 Складання звіту	1	Аналітик	2	2 727,27	5454,54
3.2 Підготовка рекомендацій	1	Аналітик	1	2 727,27	2727,27
Усього			23		48636,40

5.3 Розрахунок одноразових витрат на розробку НДР

Калькуляція собівартості розраховується відповідно до існуючих нормативних актів України. До складу калькуляції входять такі статті витрат:

- матеріальні витрати;
- витрати на оплату праці;
- єдиний соціальний внесок;
- амортизація основних засобів (вартість машинного часу);
- витрати на спожиту електроенергію;
- інші витрати.

Матеріальні витрати визначаються витратами на матеріали, визначені їх потребою для виконання робіт, і цін, що діють на момент складання калькуляції. Для проведення НДР потрібно: носії даних (2 шт.), механічний олівець (1 шт.) та блокнот (1 шт.). Дані матеріальні витрати потрібні для фотографа та аналітика.

Матеріальні витрати розраховуються за такою формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n Q_j \times U_j \quad (5.2)$$

де M – сумарні витрати на матеріали, в тому числі малоцінні предмети, що швидко зношуються (носії, папір, канцелярське приладдя тощо), або на літературу, яка необхідна для проведення роботи, тощо;

Q_j – кількість використаних одиниць j -го виду матеріалів, $j = (1 \div n)$;

U_j – ціна одиниці j -го виду матеріалів.

Розрахунок матеріальних витрат представлено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахунок матеріальних витрат

Найменування	Од. вим.	Кількість, (Q_j)	Ціна (U_j), грн	Сумарні витрати на матеріали (M), грн
Носії даних	шт.	2	200,00	400,00
Олівець механічний	шт.	1	8,00	8,00
Блокнот	шт.	1	40,00	40,00
Усього				448,00

Витрати на оплату праці розраховуються виходячи з необхідного для виконання робіт складу й кількості працівників, а також із середньомісячної заробітної плати. Відповідно до проведених розрахунків витрати на оплату праці виконавців роботи дорівнюють 48636,40 грн.

Єдиний внесок на загальнодержавне соціальне страхування (ЄСВ) – консолідований страховий внесок, збір якого здійснюється в систему загальнообов'язкового державного соціального страхування в обов'язковому порядку і на регулярній основі з метою забезпечення захисту у випадках, передбачених законодавством, прав застрахованих осіб і членів їх сімей на отримання страхових виплат (послуг) за діючими видами загальнообов'язкового державного соціального страхування.

Ставка єдиного соціального внеску (ЄСВ) дорівнює 22 % від витрат на оплату праці, тобто розмір ЄСВ дорівнює 10700,01 грн.

При виконанні НДР застосовувалися комп'ютер вартістю 35 000,00 грн, фотоапарат вартістю 16 000 грн, смартфон вартістю 18 500 грн.

Вищенаведене устаткування є власністю організації виконавця, тому доцільно розрахувати суму амортизаційних відрахувань на період виконання НДР. Амортизація основних засобів розраховується за формулою:

$$AB = \sum_{k=1}^L \frac{BO_k}{TE_k} \times T \quad (5.3)$$

де AB – сума амортизаційних відрахувань, нарахованих під час проведення науково-дослідницької роботи;

BO_k – вартість основних засобів k -го виду;

TE_k – термін експлуатації основних засобів k -го виду, днів;

T – термін науково-дослідницької роботи, днів;

L – кількість видів обладнання.

Підставивши відомі значення до (5.3), отримаємо величину амортизаційних відрахувань для комп'ютеру – 1 246,58 грн, для фотоапарату 383,56 грн, для смартфона 354,79 грн. Відповідно загальна величина амортизаційних відрахувань дорівнює 1 984,93 грн.

Витрати на використану обладнанням електроенергію (B_e):

$$B_e = M \times t \times T_{\text{кВт}} \quad (5.4)$$

де M – потужність устаткування, тобто кількість енергії, споживаної за одиницю часу (кВт/година);

t – кількість годин використання устаткування за період проведення науково-дослідницької роботи;

$T_{\text{кВт}}$ – тариф, тобто вартість використання 1 кВт електроенергії.

Споживна потужність комп'ютера складає 0,5 кВт за годину. Тариф складає 4,32 грн/кВт. Підставивши значення до формули (5.4), визначимо величину витрат на спожиту електроенергію для комп'ютера у розмірі 224,64 грн. За цією ж формулою розраховано споживання електроенергії для

зарядки смартфона та фотоапарату у розмірі відповідно: 1,20 грн та 1,21 грн. Відповідно загальні витрати на спожиту електроенергію складають 227,05 грн.

До інших статей витрат відносяться адміністративні витрати (водопостачання, водовідведення, освітлення, опалення), які прийнято у розмірі 20 % від витрат на оплату праці, та вартість оплати послуг зв'язку, що становить 9 727,28 грн. Вартість оплати послуг зв'язку (безлімітний пакет Інтернет) становитиме 402,50 грн за 23 дні виконання НДР.

Обробка зображень здійснювалась в трьох програмах: Agisoft Metashape, RealityCapture та Meshroom. Річна підписка на дане програмне забезпечення становить 9 298,83 грн, 0,00 грн для малого бізнесу та приватних осіб та 0,00 грн. Вартість підписки для виконання НДР становить 254,76 грн.

За час виконання НДР витрати на відрядження, інформаційні послуги та маркетингові заходи не мали місця.

Результати розрахунку кошторису витрат, тобто одноразових витрат, на виконання НДР «Дослідження можливостей фотограмметрії для 3D сканування архітектурних об'єктів» наведені в табл. 5.3.

Таким чином, кошторис витрат на виконання даної НДР визначає сумарні витрати за статтями п.1÷п.6 та складає 72 380,93 грн.

Таблиця 5.3 – Кошторис витрат на розробку НДР

№ з/п	Стаття витрат	Сума, грн
1	Заробітна плата	48 636,40
2	Єдиний соціальний внесок (22 % від п.1)	10 700,01
3	Матеріальні витрати	448,00
4	Амортизація основних засобів	1 984,93
5	Витрати на спожиту електроенергію	227,05
6	Інші витрати, у тому числі:	
6.1	адміністративні витрати (20 % від п.1)	9 727,28
6.2	вартість послуг зв'язку	402,50
6.3	вартість підписки на програмне забезпечення	254,76
	Усього витрати на розробку (Вр)	72 380,93

5.4 Оцінка результатів науково-дослідної роботи

Результат – це завершальний наслідок послідовності дій, виражений якісно або кількісно. В загальному випадку оцінка результатів НДР – це визначення ефективності отриманих рішень порівняно з сучасним науково-технічним рівнем.

Відповідно до теми даної роботи можна зробити висновок про те, що результатом впровадження НДР є зменшення часу на створення якісної 3D моделі методом фотограмметрії.

Результат від впровадження НДР визначається за формулою:

$$\Delta P_j = |X_{бj} - X_{нj}| \quad (5.5)$$

де ΔP_j – покращення j -ої характеристики досліджуваного процесу за рахунок впровадження результатів НДР ($j = 1, m$);

m – кількість досліджуваних характеристик;

$X_{бj}$ – базове значення j -ої характеристики;

$X_{нj}$ – нове значення j -ої характеристики після впровадження НДР.

У якості досліджуваної характеристики обрано час створення 3D моделі. В ході експерименту було створено 18 моделей, досліджуючи вплив вихідних матеріалів та програмного забезпечення, час створення кожної в середньому склав 4 години 40 хвилин, враховуючи підготовку обладнання, фотографування та обробку фотографій. Час створення моделі, що була обрана в ході експертного опитування як найкраща і стала основною для створення методики, складає 3 години 32 хвилини. Таким чином, до впровадження методики створення моделі займало 280 хвилин, а після – 212 хвилин.

Підставивши відповідні значення часу створення 3D моделі до (5.5), визначимо результат від впровадження НДР у чисельному вигляді:

$$\Delta P = |280 - 212| = 68 \text{ хв.}$$

Таким чином, отриманий результат свідчить про те, що завдяки результату від впровадження НДР час, на створення якісної 3D моделі, отриманої за допомогою розробленої методики, є суттєво коротчим.

5.5 Визначення економічної ефективності результатів НДР

Для визначення економічної ефективності результатів НДР необхідно порівняти витрати на розробку НДР з отриманими результатами.

Основним показником економічної ефективності науково-дослідної роботи є коефіцієнт «ефект-витрати», який розраховується за формулою:

$$K_{ев} = \frac{\Delta P_j}{B_p}, \quad (5.6)$$

де B_p – витрати (кошторисна вартість) на виконання НДР, грн;

$K_{ев}$ – коефіцієнт «ефект-витрати», який відбиває, наскільки кожна гривня витрат НДР змінює j -ту характеристику досліджуваного процесу.

Підставивши раніше визначені значення до (5.6), розрахуємо чисельне значення коефіцієнту «ефект-витрати» розробленого рішення порівняно з загальними рішеннями:

$$K_{ев} = \frac{68}{72\,380,93} \times 100 \% = 0,094 \%$$

У результаті проведених досліджень, можна зробити висновок про те, що дана НДР має позитивний показник економічної ефективності. Використовуючи розроблену методику, можна стверджувати, що кожна гривня витрат на розробку забезпечує зменшення часу на створення якісної 3D моделі методом фотограмметрії на 0,094 %. Роботу можна вважати ефективною та такою, що має науковий і технічний рівень.

ВИСНОВКИ

В ході виконання даної кваліфікаційної роботи було досліджено можливості фотограмметрії для 3D сканування архітектурних об'єктів. Для цього було поставлено та виконано наступні завдання: аналіз предметної галузі та літератури за темою дослідження, проведено аналіз існуючих підходів до фотограмметрії та її використання для архітектурних об'єктів, досліджено вплив якості та кількості фотографій на точність отриманих моделей, порівняно результати, отримані за допомогою різних програм для фотограмметрії, надати практичні рекомендації щодо створення 3D-моделей методом фотограмметрії.

Аналізуючи предметну галузь було знайдено та проаналізовано наукові статті за такими напрямками, як: огляд методології та технологій 3D-сканування, включаючи фотограмметрію, лазерне сканування та інші підходи; фотограмметрія, її застосування в архітектурі та проблеми, які виникають під час 3D-сканування; порівняння точності фотограмметрії та лазерного сканування; використання безпілотних літальних апаратів для вимірювання деформацій. Було розглянуто такі методи 3D сканування, як: лазерне сканування, фотограмметрія, сканування структурованим світлом та LiDAR, та проаналізовано переваги та недоліки кожного методу. В процесі ознайомлення з літературою було зроблено висновок, що на сьогодні фотограмметрія вважається перспективним напрямом в сфері оцифрування та вимірювання архітектурних пам'яток. Можливі прогалини в якості моделей чи часу обробки даний метод компенсує своєю доступністю та невибагливістю щодо кваліфікації.

В процесі дослідження сутності методу фотограмметрії було проаналізовано спосіб роботи та принципи фотограмметрії та алгоритми для обробки фотограмметричних даних.

В експериментальному розділі було проведено дослідження впливу різних факторів, а саме якості та кількості вихідних фотографій та використаного

програмного забезпечення, на якість створеної моделі. В процесі було створено 18 моделей. Щоб визначити їх якість, було використано метод експертних оцінок. В результаті опитування було виділено моделі, зроблені в умовах достатньої кількості фото та зйомки в хмарний день, як найкращі. Це означає, що саме цей підхід є найоптимальнішим і його описано в рекомендаціях.

При створенні рекомендацій було проаналізовано всю попередню роботу та зібрано поради, що стосуються всього процесу створення 3D моделі: при підготовці до зйомки (вибір обладнання, налаштування камери, вибір об'єкту), при зйомці (рекомендована кількість фото, спосіб фотографування, перекриття кадрів), під час обробки зображень (вибір програмного забезпечення, налаштування). Дані рекомендації можуть допомогти скоротити час створення моделі, а також покращити її якість.

В процесі виконання економічного обґрунтування науково-дослідної роботи було охарактеризовано етапи його виконання, розраховано їх трудомісткість та заробітну плату для виконавців. Розраховано кошторис витрат на виконання роботи та проведено оцінку її результатів. Роботу можна вважати економічно ефективною, адже вона має достатній науковий рівень обґрунтування та високий показник економічної ефективності.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ковальов В.В., Грабовий А.Г. Застосування 3D фотограмметрії для обстеження об'єктів культурної спадщини // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2018. № 2 (234). С. 48-54.
2. Remondino F., Guarnieri A., Vettore A. 3D modeling of Close-Range Objects: Photogrammetry or Laser Scanning? // Proc. Of Electronic Imaging 2005, Vol. 5665, Videometrics VIII; 56650M San Jose, California, United States, 2005. <https://doi.org/10.1117/12.586294>.
3. Desa H., Azizan M., Zulkepli N., Romeli N. Heritage Building Modelling: Photogrammetry Challenges in Producing an As-Built Drawing (AD) Using Unmanned Aerial System (UAS) // Journal of Robotics, Networking and Artificial Life. 2020. № 7(4).
4. Chiabrando F., Spano A. Uav oblique photogrammetry and LiDAR data acquisition for 3d documentation of the hercules fountain // Virtual Archaeology Review. 2017. № 8 (16): 83. <https://doi.org/10.4995/var.2017.5961>.
5. Tas D., Özkar M. Embedded Shape Matching in Photogrammetry Data for Modeling Making Knowledge // MSTAS 2019, XIII Computational Design in Architecture National Symposium, Kocaeli, Turkey. 2019. P. 313-326. <https://arxiv.org/abs/2312.13489>.
6. Maboudi M., Backhaus J. Very High-Resolution Bridge Deformation Monitoring Using UAV-based Photogrammetry. 2024. <https://arxiv.org/abs/2410.18984>.
7. Tian G., Chen C., Huang H. Comparative Analysis of Novel View Synthesis and Photogrammetry for 3D Forest Stand Reconstruction and extraction of individual tree parameters. 2024. <https://arxiv.org/abs/2410.05772>.
8. Kong X. Monitoring Time-Varying Changes of Historic Structures Through Photogrammetry-Driven Digital Twinning // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-2-2024, 181–186, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-181-2024>, 2024.

9. Zachos A., Anagnostopoulos C.-N. Using Terrestrial Laser Scanning, Unmanned Aerial Vehicles and Mixed Reality Methodologies for Digital Survey, 3D Modelling and Historical Recreation of Religious Heritage Monuments. 2023. <https://www.alphaxiv.org/abs/2401.01380v1>.
10. Remondino F. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning // Remote Sens. 2011. № 3(6). P. 1104-1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>
11. Habib A. Integration of LIDAR and photogrammetry for close range applications // Department of Geomatics Engineering, University of Calgary 2500, University Drive NW, Calgary AB T2N 1N4 Canada, 2004. <https://www.researchgate.net/publication/240774233>.
12. Pirotti F., Piragnolo M. Comparing accuracy of ultra-dense laser scanner and photogrammetry point clouds. // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B1-2022. – Pp.353 – 359. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-353-2022>, 2022.
13. Theban Mapping Project. URL: <https://thebanmappingproject.com> (дата звернення: 03.12.2024 р.).
14. Notre Dame after the Fire // National Geographic. URL: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/graphics/notre-dame-after-the-fire-feature> (дата звернення: 04.12.2024 р.).
15. Digital Documentation of the Reconstruction of Notre Dame De Paris // ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/379538523_Digital_Documentation_of_the_Reconstruction_of_Notre_Dame_De_Paris (дата звернення: 04.12.2024 р.).
16. Preserving Historic St. Peter's Basilica with a Digital Twin // GIM International. URL: <https://www.gim-international.com/content/article/preserving-historic-st-peter-s-basilica-with-a-digital-twin> (дата звернення: 03.12.2024 р.).
17. Кулішова Н.Є., Дейнека Д.В. Основні етапи технології розробки тримірних моделей архітектурних об'єктів для мультимедійних видань // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті. 2022. Т. 6. С. 53-54.

18. Vexcel Imaging Enters the Lidar Market // Lidar Magazine. URL: <https://lidarmag.com/2024/09/22/vexcel-imaging-enters-the-lidar-market/> (дата звернення: 08.12.2024 р.).

19. Lerma J.L., Muir C., Lorna B. Close Range Photogrammetry // Academia. 2019. URL: https://www.academia.edu/40752745/Close_Range_Photogrammetry (дата звернення: 11.12.2024 р.).

20. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. Berlin: De Gruyter, 2023. 852 p.

21. Agisoft. URL: <https://www.agisoft.com/> (дата звернення: 11.12.2024 р.).

22. Capturing Reality. URL: <https://www.capturingreality.com/> (дата звернення: 13.12.2024 р.).

23. AliceVision Meshroom. URL: <https://alicevision.org/#meshroom> (дата звернення: 13.12.2024 р.).