

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Дзвінник Олександр  
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48  
(індекс)

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**  
**« Оцінка ефективності лазерного сканування та**  
**автоматизованого 3D-моделювання при створенні цифрових**  
**моделей складних територій »**  
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій  
(шифр і назва спеціальності)

О. Дзвінник, студент групи ГЗз-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

**Науковий керівник:** ст. викладач Віталій Ковтун  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**Рецензент**

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

*(повне найменування вищого навчального закладу)*

**Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА**

**Кафедра геодезії та землеустрою**

**Освітній рівень бакалавр**

**Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій**

*(шифр і назва)*

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри геодезії та землеустрою**

**проф. Микола ПРИХОДЬКО**

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

**Дзінник Олександр**

*(прізвище, ім'я, по батькові)*

**1. Тема роботи: «Оцінка ефективності лазерного сканування та автоматизованого 3D-моделювання при створенні цифрових моделей складних територій»**

**керівник роботи: \_\_\_\_\_ *ст. викладач Віталій Ковтун***

*(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)*

затверджена наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_

**2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ року**

**3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):**

1. Методи спостереження
2. Технологія збирання та обробки даних
3. Результати досліджень та зіставлення

**5. Перелік графічного матеріалу:**

**6. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_**

## 7. Календарний план

<b>№ з/п</b>	<b>Назва етапів магістерської роботи</b>	<b>Термін виконання етапів роботи</b>	<b>Примітки</b>
<b>1</b>	<b>Методи спостереження</b>		
<b>2</b>	<b>Технологія збирання та обробки даних</b>		
<b>3</b>	<b>Результати досліджень та зіставлення</b>		
<b>4</b>	<b>Оформлення бакалаврської роботи</b>		

Студент

\_\_\_\_\_ Дзвінник О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Ковтун В.

## Анотація

У контексті охорони культурної спадщини назріває необхідність у оперативному скануванні з періодичними вимірюваннями для відстеження змін у формі об'єктів у динаміці.

У зв'язку з різноманітними обставинами, зокрема й екстремими ситуаціями, вкрай важливо знайти оптимальний метод для оперативного та своєчасного сканування, що дозволить провести детальну цифрову реконструкцію об'єкта.

В межах нашого бакалаврського дослідження ми випробували та застосували два способи збору геометричної інформації: лазерне сканування, яке дає можливість оперативно отримати деталізовані 3D-скани, та фотограмметрію, що дозволяє конструювати 3D-моделі на основі фотографічних знімків.

Останнім часом з'явилася низка нових, зокрема безкоштовних та недорогих, підходів.

Таке програмне забезпечення дає можливість автоматично створювати 3D-реконструкції об'єктів на основі фотоматеріалів, формуючи щільні хмари точок, а іноді й сітчасті моделі поверхонь.

У нашому бакалаврському проекті виконано порівняльний аналіз цих двох методів на основі реального випадку.

Збір даних проводився з використанням фотограмметрії та лазерного сканування.

Здійснено аналітичний розбір для зіставлення точності, визначення прийнятних похибок та оцінки можливості покращення рівня деталізації з метою отримання кінцевої 3D-моделі.

## **Abstract**

In the context of cultural heritage protection, there is a growing need for rapid scanning with periodic measurements to track changes in the shape of objects in dynamics.

Due to various circumstances, including emergency situations, it is extremely important to find the optimal method for rapid and timely scanning, which will allow for a detailed digital reconstruction of the object.

As part of our bachelor's research, we tested and applied two methods of collecting geometric information: laser scanning, which makes it possible to quickly obtain detailed 3D scans, and photogrammetry, which allows you to construct 3D models based on photographic images.

Recently, a number of new, including free and inexpensive, approaches have appeared.

Such software makes it possible to automatically create 3D reconstructions of objects based on photographic materials, forming dense point clouds and sometimes mesh models of surfaces.

In our bachelor's project, a comparative analysis of these two methods was performed based on a real case.

Data collection was carried out using photogrammetry and laser scanning.

Analytical analysis was performed to compare accuracy, determine acceptable errors, and assess the possibility of improving the level of detail in order to obtain a final 3D model.

## **Зміст**

### **Вступ**

#### **1. Методи спостереження**

##### 1.1 Тестові досліджені

#### **2 Технологія збирання та обробки даних**

##### 2.1 Лазерне сканування

##### 2.2 Автоматизована обробка на основі зображень

##### 2.3 Критерії для зіставлення

#### **3 Результати досліджень та зіставлення**

##### 3.1. Місце проведення дослідження

##### 3.2 Фасади стін

##### 3.3 Фасад костелу Чесного Хреста і Святого Йосифа Великого

##### 3.4 Каплиця Юра

### **Висновок**

### **Список використаних джерел**

## Вступ

У царині охорони культурної спадщини спостерігається справжній прорив у методиках вивчення та відтворення об'єктів.

Наприклад, 3D-технології стрімко набирають популярності у таких напрямках, як архітектура та археологія, де двовимірне представлення інформації традиційно домінувало.

За останні роки лазерні сканери значно удосконалилися у швидкості збору даних, мобільності, простоті застосування та загальній доступності.

До того ж, сучасне програмне забезпечення дозволило обробляти величезні обсяги точкових хмар і здійснювати прецизійні вимірювання в реальному часі, навіть використовуючи стандартні комп'ютери, без потреби у надскладній обробці даних.

Окремої уваги заслуговує суттєвий прогрес у розвитку фотограмметрії ближньої дії.

Зокрема, завдяки появі нового, доступного або безкоштовного програмного забезпечення та алгоритмів, які можуть автономно обробляти дані у зручному для користувача форматі.

Ці рішення дають можливість отримувати точні та детальні результати за допомогою звичайних фотоапаратів, мінімізуючи необхідність у складному калібруванні.

Таке програмне забезпечення забезпечує повністю автоматичну 3D-реконструкцію об'єктів зі звичайних зображень та самостійно визначає контрольні точки для розрахунку параметрів зовнішнього орієнтування.

Воно генерує щільні хмари точок, а в деяких випадках – текстуровані сіткові моделі, без втручання оператора.

Ці функції роблять програмне забезпечення легким у використанні та значно розширюють сферу застосування 3D-реконструкції на основі зображень у контексті культурної спадщини.

Алгоритми автоматичного визначення орієнтації зображень та виділення контрольних точок здебільшого базуються на технологіях комп'ютерного зору.

По суті, це є поєднанням спеціального фотограмметричного програмного забезпечення та потужних інструментів автоматичного моделювання.

Однак, незважаючи на високу якість отриманих результатів, часто виникають складнощі з оцінкою точності реконструкції за допомогою цих методів, на відміну від традиційної фотограмметрії.

## 1. Методи спостереження

Методи лазерного сканування та фотограмметричного моделювання суттєво перетинаються та останнім часом значно зацікавили дослідників культурної спадщини, оскільки:

- використовують доволі поширене обладнання та зрозумілий програмний софт, що відчутно скорочує час на збір інформації та її опрацювання;
- дають змогу отримати деталізовані тривимірні цифрові копії об'єкта за невеликий проміжок часу, котрий залежить від складності об'єкта;
- дозволяють робити тривимірні виміри, а також двомірні креслення та ортофотоплани;
- створені 3D моделі застосовні для візуалізації, архівування та поширення.

Вказані технології критично важливі в ситуаціях, де пріоритетом є швидкість збору та обробки даних.

Мета цієї роботи – проаналізувати ефективність Agisoft Photoscan, як одного з новітніх програмних продуктів, призначених для автоматизації роботи з фотоматеріалами.

В роботі подано порівняльний аналіз результатів, отриманих з використанням Agisoft Photoscan, з даними лазерного сканування, представлений у вигляді описових даних та чисел.

Розглянуто два практичних приклади, роблячи акцент на часовому факторі.

Це приклади реальних ситуацій, коли необхідно швидко виконати вимірювання, проаналізувати результати та прийняти відповідні рішення у максимально стислий термін.

## 1.1 Тестові досліджені

Первинне дослідження зосереджене на археологічних відкриттях в селі Підгірці, що розкинулось поблизу від Підгорецького замку у Львові.

Площа, що підлягає дослідженню та охоплює близько 850 м<sup>2</sup>, має надзвичайну історичну важливість.

У такому разі конче необхідно якнайшвидше здійснити збір інформації, задля збереження знайдених артефактів від руйнування та забезпечення можливості їх подальшої оцінки.

Головні цілі дослідження включали отримання типового археологічного матеріалу для дослідження знахідок (ортогональна проекція, повздовжні та поперечні розрізи) та створення детальної 3D-моделі.

Остання, своєю чергою, слугує цінним інструментом для майбутньої реконструкції виявлених артефактів.

Після створення та прив'язки ортофотографічних зображень до місцевості, з'являється можливість додати контури стін, вертикальні розрізи та плани.

Через особливості ландшафту місцевості, деякі частини розкопаної споруди, особливо поверхня стін, не можуть бути повністю досліджені під час одного етапу робіт.

Отже, процес прив'язки до місцевості відіграє ключову роль.

Для забезпечення повної картини усіх археологічних пластів та відстеження трансформацій на місцевості, кожен новий набір даних потрібно зіставляти з попередніми або майбутніми інформаційними масивами.

Другий дослідницький кейс присвячений фасаду церкви Воздвиження Чесного Хреста і Святого Йосифа УГКЦ в селі Підгірці, що знаходиться у Львівській області.

Було виділено окрему тестову ділянку для оцінки ефективності автоматизованої гібридної фотограмметричної системи, шляхом порівняння з методами лазерного сканування та топографічної зйомки.

## 2 Технологія збирання та обробки даних

### 2.1 Лазерне сканування

Методи збору даних, використовуючи лазерне сканування, є предметом ґрунтовних досліджень та широко висвітлені в наукових виданнях.

Цей підхід забезпечує можливість швидкого створення детальних хмар точок, які точно відтворюють геометрію об'єкта.

Водночас, головними бар'єрами для використання цього методу залишаються значні витрати на обладнання, а також проблеми з візуалізацією та обробкою великих масивів даних та необхідність витратити час на постобробку, потрібну для формування повноцінної 3D-моделі.

Завдяки сучасним технічним та програмним рішенням, щільні хмари точок тепер дозволяють здійснювати аналіз без додаткової обробки.

Якщо раніше для вимірювань та аналізу потрібно було деталізувати хмару точок, то на сьогоднішній день високий рівень деталізації дає змогу отримувати необхідну геометричну інформацію безпосередньо.[4]

На точність отриманих даних впливають різні чинники, серед яких:

- технічні параметри сканувального пристрою;
- дистанція між сканером та об'єктом;
- кут падіння лазерного променя на поверхню;
- матеріал об'єкта.

Окрім цього, можливі похибки, особливо на етапах постобробки, наприклад, при реєстрації окремих хмар точок, фільтрації даних та створенні мережевих моделей.

В більшості випадків важко оцінити кінцеву точність сканування, оскільки відсутній ідеальний референсний об'єкт для порівняння.

Проте, ці неточності можуть бути мінімізовані за умови використання вихідної хмари точок без внесення змін.

Разом з тим, якщо точність вимірювань наземного лазерного сканера відповідає заявленим специфікаціям, отримані результати будуть знаходитись у прийнятних межах.

З огляду на це, хмара точок, отримана за допомогою лазерного сканування, використовується в якості референсної моделі для порівняння у цьому дослідженні.

## **2.2 Автоматизована обробка на основі зображень**

За останнє десятиліття технологія відтворення тривимірних моделей об'єктів на основі зображень пережила значний розвиток.

Ключовим фактором у цьому прогресі є автоматизація процесів обробки зображень, зокрема, процедур орієнтування зображень та створення цифрових моделей поверхні.

Збільшення обчислювальної потужності відкрило можливості для генерації не лише складних 3D-моделей, але й обробки великих фотографічних серій у режимі вільного знімання.

Раніше фотограмметрія переважно асоціювалася з інструментом для точних вимірювань, що вимагало залучення висококваліфікованих спеціалістів.

Збір даних відбувався швидко, але подальша обробка та аналіз зображень потребували значних зусиль та часу.

Відтак, автоматизація була ключовим викликом у фотограмметрії, і з 1990-х років науковці активно працювали над оптимізацією цього підходу для потреб промисловості.

Особлива увага у 1988 році приділялася обговоренню потенціалу фотограмметрії у реальному часі та досяжної точності.[4]

На той час автоматизація базувалася на застосуванні спеціальних маркерів, що виступали контрольними точками для зшивання зображень.

Перший значний прорив у цій галузі стався дещо пізніше в сфері аерофотограмметрії.

Запровадження алгоритмів автоматичного пошуку відповідних точок на стереопарах значно спростило процес обробки.

Проте, цей метод все ще вимагав попереднього орієнтування знімків та значної ручної роботи для усунення невірних відповідностей між точками.

Основною перешкодою для прогресу наземної фотограмметрії була складність об'єктів зйомки.

На відміну від аерофотозйомки, яка оперує відносно плоскими поверхнями, архітектурні та археологічні об'єкти характеризуються складними формами, різним ступенем деталізації та значними розмірами.

Повне охоплення таких об'єктів часто потребує великої кількості фотографій, що ускладнює ручну обробку.[4]

Більше того, маркування таких об'єктів часто є неможливим з огляду на їх розміри та історичну цінність.

Відтак, розробка алгоритмів, здатних автоматично виявляти природні опорні точки на зображеннях, стала пріоритетним напрямком розвитку фотограмметрії.

Цей підхід особливо важливий для архітектурних та археологічних досліджень, де потрібна висока деталізація цифрових моделей.

На відміну від аерофотозйомки, яка створює цифрові моделі місцевості з середньою роздільною здатністю, моделювання пам'яток історії та культури вимагає збереження найдрібніших деталей, чітких контурів та складних форм.

У таких випадках традиційні методи обробки виявляються неефективними через великий обсяг даних і необхідність значних обчислень.

Відтак, виникає потреба у сучасних програмних рішеннях, які базуються на автоматичному аналізі зображень та мінімізують втручання користувача.

### **2.3 Критерії для зіставлення**

Існує безліч підходів та тестів для порівняння автоматизованих систем орієнтування та узгодження зображень, що визначаються конкретними задачами та вимогами до точності.

Мета нашої бакалаврської роботи – детальний аналіз Agisoft Photoscan, одного з найпопулярніших програмних продуктів.

Це програмне забезпечення є передовим інструментом для створення тривимірних моделей на основі фотографій та даних фотограмметрії.

Воно володіє широким спектром функцій, таких як автоматичне орієнтування зображень, формування хмар точок з високою щільністю, створення текстурованих 3D-моделей, а також можливість генерувати ортографічні проекції та іншу геометричну інформацію.

У процесі дослідження, результати, отримані за допомогою Agisoft Photoscan, співставлялися з даними, зібраними шляхом лазерного сканування.[4]

Такий підхід дав змогу порівняти ефективність обох методів за різних умов, виявити їхні сильні сторони та обмеження.

Додатково, були вивчені різні сценарії застосування, що мають потенційну корисність для архітектурних та інших наукових досліджень.

Це комплексне програмне рішення, що автоматизує весь процес від орієнтування зображень до формування текстурованих 3D-моделей та експорту ортофотопланів, зводячи до мінімуму необхідність ручної взаємодії.

Завдяки цьому користувач отримує повністю автоматизовані та готові до використання результати в сфері фотограмметрії.

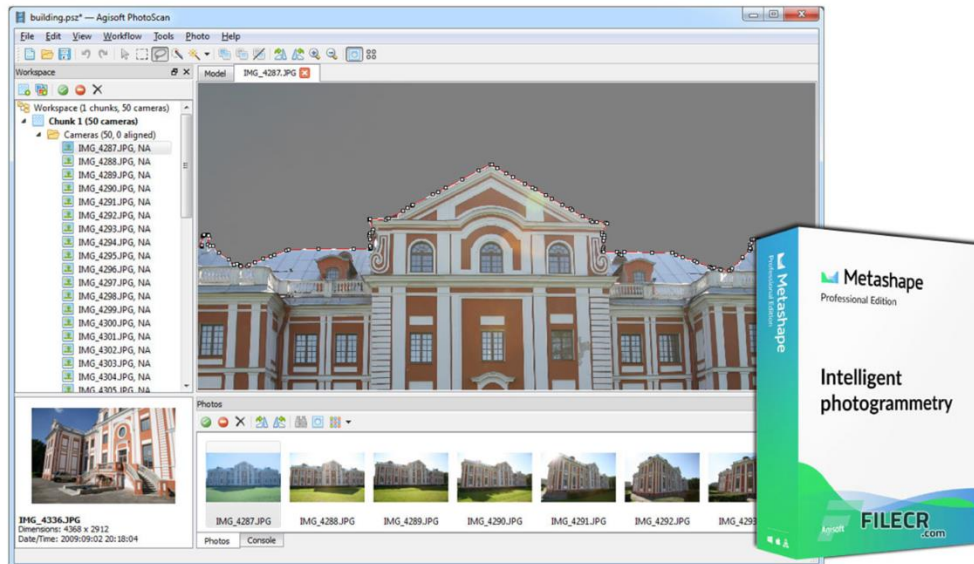


Рисунок 1 Програмний продукт Agisosoft Photoscan

Здатність обробляти багато високоякісних зображень робить інструмент зручним та результативним для швидкого відтворення 3D моделей.

Вбудована опція введення координат контрольних точок та налаштування зовнішніх і внутрішніх параметрів орієнтації дозволяє інтегрувати софт у звичні фотограмметричні процеси.

Ця функція дає змогу користувачеві контролювати параметри орієнтації фотографії та одразу перевіряти точність камери у процесі роботи, що гарантує географічну прив'язку даних.

У тестових випробуваннях алгоритм орієнтації зображень був застосований для попереднього відбору пар, що підвищує точність.

Згенерована 3D модель поверхні може мати різну деталізацію залежно від вибраних налаштувань, причому вищі налаштування

забезпечують більш точну геометрію, хоча і потребують більше часу на обробку.[6]

Цифрові моделі, отримані з використанням цих налаштувань, зазвичай виглядають прийнятно та демонструють хорошу якість.

Проте для подальшого використання в інших програмних комплексах або для створення прототипів може знадобитися їх доопрацювання для усунення дефектів сітки.

У таких випадках для покращення сітки застосовується середня роздільна здатність, до 20 мільйонів граней.

Основна мета цієї роботи – оцінка точності отриманої 3D моделі поверхні.

Процес порівняння містить три етапи:

1. Повністю автоматизована фотограмметрична обробка зображень, де масштаб визначається за вимірними відстанями. Для порівняння використовуються 3-4 точки, зібрані під час лазерного сканування, для масштабування та прив'язки до місцевості.

2. Обробка фотограмметричних даних, у якій опорні точки корегуються шляхом пакетного редагування. Ці дані отримують з використанням мішеней, що видно під час сканування.

3. Аналогічні порівняння також проводяться шляхом збору контрольних точок за допомогою тахеометра, що дозволяє зрозуміти вплив рельєфу місцевості на швидкість та точність автоматизованої обробки.

Для тестів була використана професійна дзеркальна камера з фіксованим об'єктивом: Canon EOS 5D Mark III з повнокадровим сенсором роздільною здатністю 21 та 22,3 мегапікселя відповідно (рис. 2).[4]

Оригінальні зображення з повною роздільною здатністю використовувалися без попередньої обробки.



Рисунок 2 Фотокамера Canon EOS 5D Mark III

Лазерне сканування виконане за допомогою приладу Leica Geosystems HDS7000 (рис. 3).



Рисунок 3 Лазерний сканер HDS7000 Leica Geosystems

## **3 Результати досліджень та зіставлення**

### **3.1. Місце проведення дослідження**

Дослідження було здійснене на території приблизно 500 квадратних метрів.

Окрім візуального огляду фасадів окремих стін комплексу, також було заплановано огляд усієї ділянки з висоти пташиного польоту.

Фотоапарат Canon 5D Mark III був закріплений на горизонтально переміщуваній алюмінієвій рамі, керованій механізмом, що забезпечував рух лише в одному напрямку.

Такий підхід не лише зменшив витрати, а й дозволив вирішити проблеми, пов'язані з висотою споруди відносно її фундаменту.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) було неможливим через велику кількість перешкод поблизу стін.[4]

Ділянка характеризується поєднанням високих стін (до 4 метрів) та низьких будівель.

Тому єдиний наземний підхід або фотографування з невеликої висоти не могли охопити всю територію та зкомпенсувати різні масштаби зображень.

Було отримано близько 500 фотографій з високим ступенем перекриття (близько 85%), що забезпечило охоплення всієї території, включаючи як віддалені деталі, так і стіни, розташовані близько до камери.

Лазерне сканування було проведено з двома цілями: збільшити кількість зображень з високою роздільною здатністю та покрити всю площу, а також отримати детальні зображення стін для точного визначення профілю та ідентифікації кожної цеглини або каменю, з яких складається стіна.

Перше було досягнуто шляхом коригування обробки зображень, а друге – шляхом ручного додавання 18 опорних та 7 контрольних точок для

покращення з'єднання ділянок зі значними перепадами висот, низькою текстурою або незадовільною якістю зображень.[4]

У першому випадку було використано п'ять точок для масштабування та прив'язки моделі до загальносвітової системи координат.

Всі точки були зібрані вручну за допомогою мішеней, розміщених на стінах, та видимих природних точок під час лазерного сканування.

3D-модель розраховувалась з низькою роздільною здатністю, в результаті чого була отримана сітчаста модель з приблизно 30 мільйонами поверхонь.

Такий вибір був обумовлений необхідністю прискорити процес, оскільки основною метою було створення ортографічної карти місцевості.

Навіть якщо точність, необхідна для моделі з низькою роздільною здатністю, є достатньою, цей процес потенційно може створити модель з такою ж роздільною здатністю, як і лазерне сканування.

Описаний вище метод показав схожі результати.

Додавання точок з'єднання не вимагало втручання людини, оскільки алгоритм зміг зібрати достатню кількість точок та забезпечити надійні результати навіть на основі зображень низької якості.

Порівняння двох моделей із застосуванням алгоритму реєстрації поверхні показало максимальне відхилення менше 1 мм (зелена область на рисунку 4), але також і піки до 3 мм (червона область на рисунку 4), більшість з яких знаходилися поблизу отворів та країв.[4]

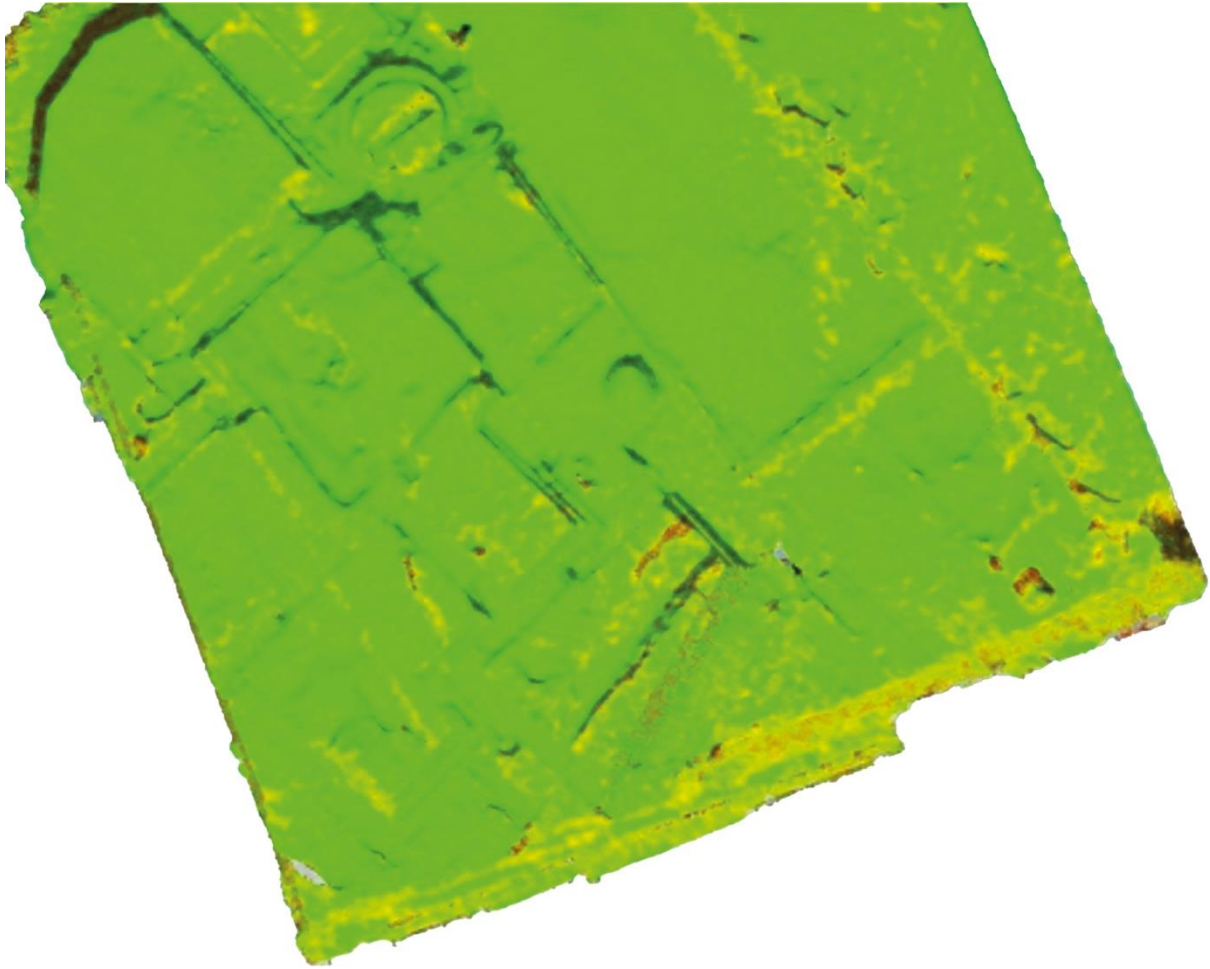


Рисунок 4. Порівняння двох фотограмметричних моделей виявило: зелені ділянки вказують на найбільші розбіжності, що не перевищують 1 міліметр.

Незначні розбіжності, ймовірно, виникають через похибки при формуванні сітки.

Зіставлення двох моделей підкреслило відсутність значущих відмінностей між ними.

Проте, при порівнянні лазерної та фотограмметричної моделей встановлено, що на 85% площі відмінність не перевищує 1 см (див. Рис. 5).[4]

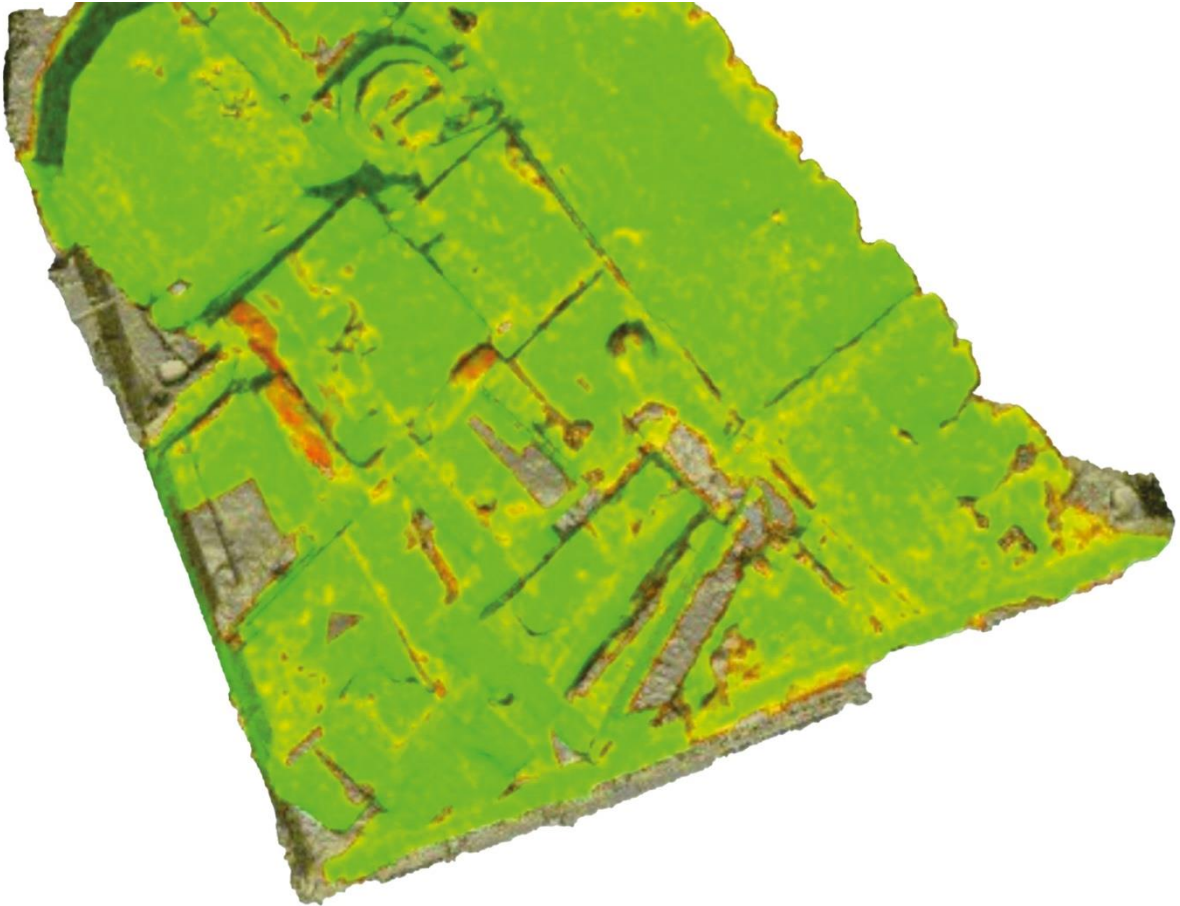


Рисунок 5 Порівняння моделей, отриманих лазерним скануванням, з фотограмметричними.

Проаналізуємо порівняння моделей, згенерованих лазерним скануванням, з моделями, що базуються на фотограмметрії.

Витоки цього крилися у:

- рішенні застосувати низьку роздільну здатність під час 3D-моделювання;

- використанні лише мішеней для реєстрації кількох хмар, без подальшого уточнення, що й привело до створення глобальної хмари сканування.

Проте, належна реєстрація хмар не передбачалася, бо їх точність виявилася недостатньою для проведення вимірювань необхідного масштабу.

Вивчення фінальних ортофотографій продемонструвало максимальне відхилення у 3 мм від хмари точок лазерного сканування, разом з ретельно розподіленим набором контрольних точок, визначених вручну (рис. 6).[4]



Рисунок 6. Переміщення контрольних точок (червоних точок) в межах робочої області

### 3.2 Фасади стін

Для кожного з фасадів було підготовлено ортофотоплан.

Розмір пікселя на плані відповідав 1 мм, виміряно від поверхні землі.

Окрім того, було згенеровано 3D-модель високої деталізації.



Рисунок 7. Візуальне зіставлення фотограмметричної сітчастої моделі (зліва) та кольорової хмари точок сканера (справа).

Зокрема, з огляду на надзвичайно високу щільність хмар точок, розбіжності між лазерною та фотограмметричною моделями мінімальні, що дозволяє чітко розпізнати всі деталі фасадів в обох.

Також, з огляду на стислі терміни обстеження фасадів, використання автоматизованих та ефективних методів обробки даних дозволило значно скоротити час польових робіт.[4]

Тоді як лазерне сканування формувало модель кожного фасаду шляхом інтеграції з глобальною хмарою точок, фотограмметрична модель передбачала індивідуальну обробку кожного фасаду.

Відтак, час обчислень було суттєво зменшено завдяки застосуванню кількох зображень та єдиного проекту для моделювання фасаду.

У цьому дослідженні проводилося порівняння фотограмметричної моделі та моделі фасаду, створеної за допомогою лазерного сканера, використовуючи описані вище методи.

Зображення оброблялися в Agisoft Photoscan без додаткових даних.

Для масштабування та прив'язки моделі фасаду було вручну зібрано чотири опорні точки з хмари сканування.

На першому зображенні, що представлено на рисунку 8, показано, що різниця між моделями не перевищує 3 мм (позначено зеленим кольором).[4]

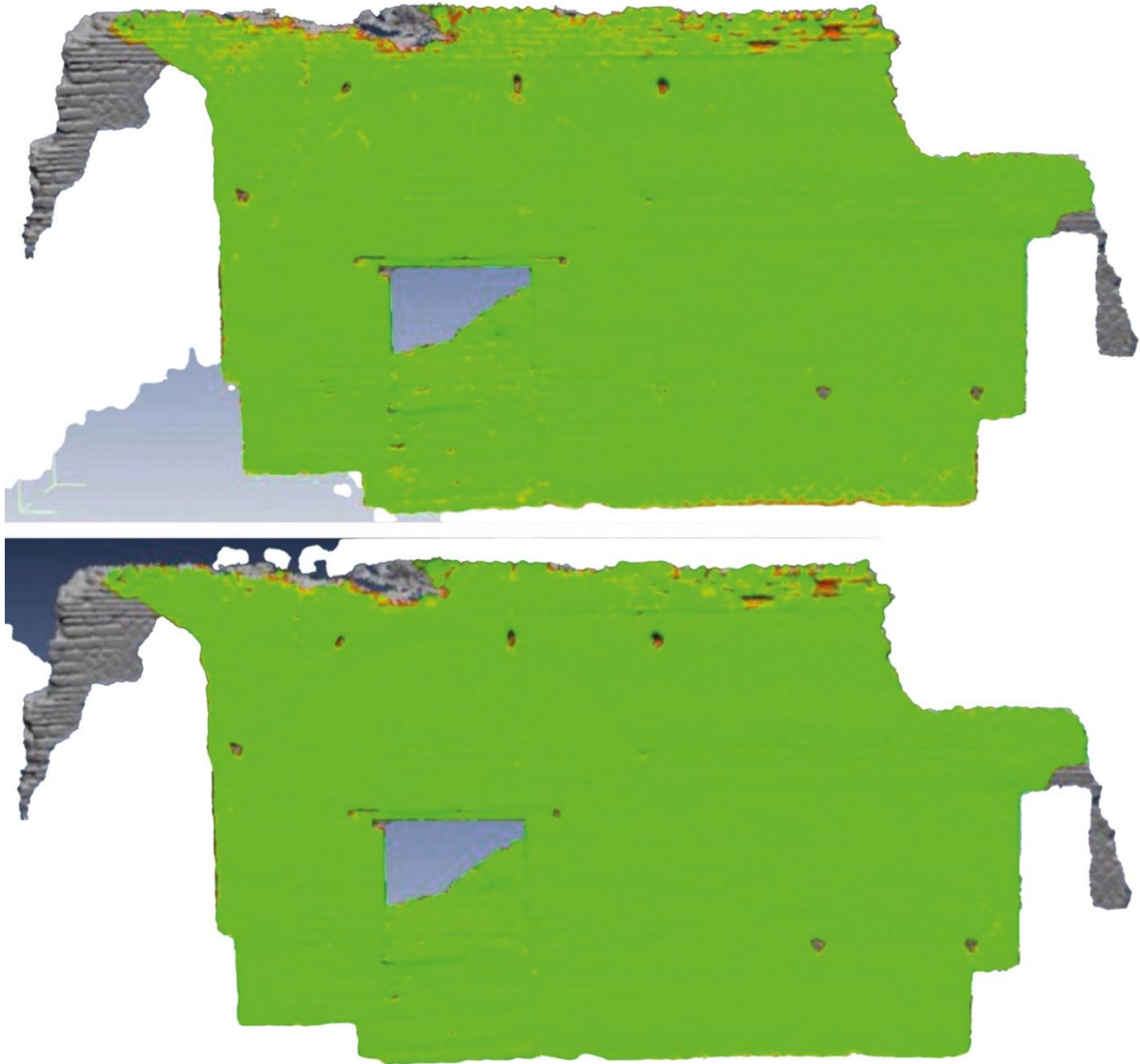


Рисунок 8. Фотограмметрія проти лазерного сканування: порівняльний аналіз моделей.

Фотограмметрія та лазерне сканування — два ключові способи тривимірного моделювання, кожен з яких базується на власних принципах, проте часто застосовуються задля досягнення схожих результатів.

Визначення оптимального варіанту визначається специфікою задачі, наявним обладнанням, бюджетом та рівнем деталізації, який необхідно отримати.

Кожен з методів має свої позитивні та негативні аспекти, які потрібно враховувати при виборі.

Лазерне сканування, зокрема, славиться високою точністю та щільністю отриманих даних, що надзвичайно важливо при розробці моделей з чіткими контурами та розмірами.

Цей метод дає змогу швидко отримувати інформацію навіть у важкодоступних зонах, не залежить від рівня освітленості.[4],[6]

З іншого боку, обладнання для лазерного сканування часто є дорогим та може бути менш придатним для сканування об'єктів з неоднорідною текстурою.

Фотограмметрія, у свою чергу, базується на обробці фотографій, що робить її більш фінансово вигідною та простою у застосуванні, особливо для об'єктів з вираженою текстурою.

Цей метод ідеально підходить для створення реалістичних візуалізацій та моделей з багатою текстурною поверхнею.

Разом з тим, якість фінального результату може суттєво залежати від якості фото, умов освітлення та кількості чітких деталей на поверхні.

У підсумку, як фотограмметрія, так і лазерне сканування — важливі інструменти у процесі створення тривимірних моделей.

Вибір конкретного методу залежить від цілей проєкту, особливостей об'єкта та наявних ресурсів.

Інколи їх вдале поєднання дає змогу досягти оптимальних результатів, поєднуючи переваги обох технік.

Досягнення цих результатів стало можливим завдяки використанню точно зафіксованої системи координат з простим вибором точок вирівнювання.

Власне, автоматична реєстрація точності між двома моделями призвела до покращених результатів - понад 95% точок було отримано з похибкою менше 3 мм.

Отже, первинна реєстрація є достатньою для масштабування моделей, навіть за відсутності ідеальної прив'язки між двома моделями (SCP = 4,5 мм).

На рисунку 8 демонструється відсутність певних частин фотограмметричної моделі (виділених сірим кольором) в моделі, отриманій за допомогою лазерного сканера.[4]

Ці ділянки, що розташовані зліва та справа від головного фасаду, характеризуються вузькістю та складністю у порівнянні з основною частиною будівлі.

Доступ до цих зон за допомогою лазерного сканера був практично неможливим, проте гнучкість методу, що базується на зображеннях, дозволила охопити ці складні ділянки.

### **3.3 Фасад костелу Чесного Хреста і Святого Йосифа Великого**

Костел Чесного Хреста та Святого Йосипа Великого, розташований у селі Підгірці, з'явився на світ у проміжку між 1752 та 1766 роками.

Ініціатором та активним учасником будівництва був гетьман Вацлав Жевуський.

Спочатку храм виконував роль замкового, але парафіяльним став лише у 1861 році.

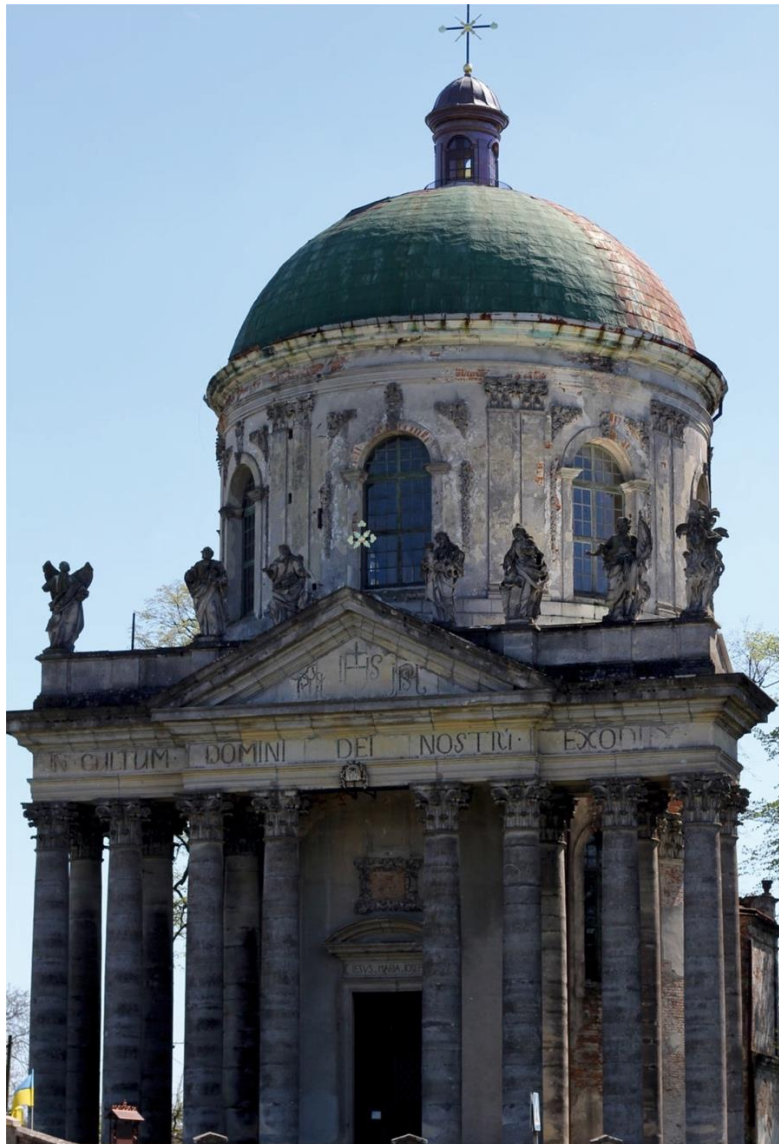
Архітектура костелу виконана з цегли та має форму ротонди, тобто кола.

Висота споруди сягає 27 метрів.

Фасад костелу спроектовано ширшим, аніж сама ротонда.

Він включає в себе 14-рядний портик з вісьмома колонами у першому ряду та шістьма у другому.

З південної сторони до основної ротонди прибудовано додаткове приміщення.



Малюнок 9. Храм Воздвиження Чесного Хреста і Святого Йосифа.

Храм Воздвиження Святого Хреста пережив чимало лиха протягом століть.

Найбільше постраждала верхня частина фасаду, що нині в аварійному стані та ризикує завалитися в будь-яку мить.

Задля термінового проведення робіт та збереження цілісності споруди, було здійснено близько двадцяти одного обстеження фасадів.

Отримані результати дали можливість оцінити реальний стан будівлі та скласти план першочергових робіт для її укріплення.

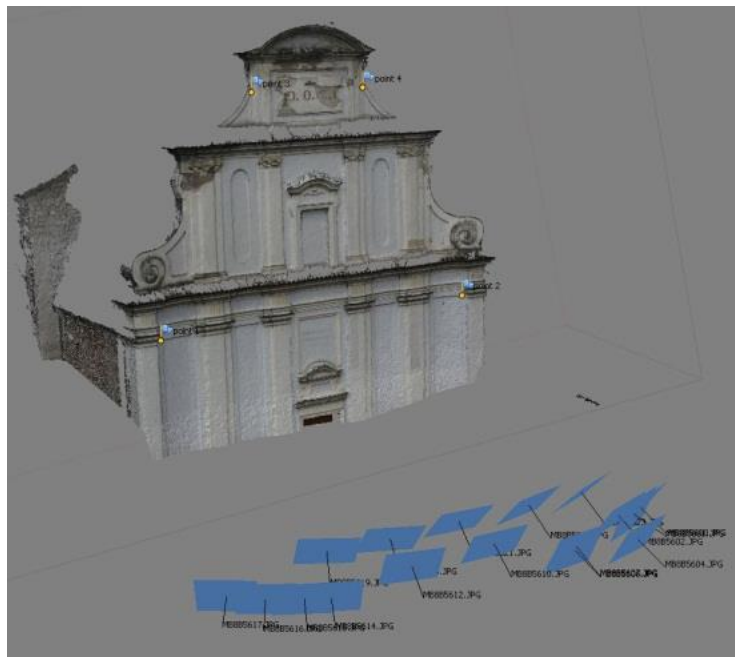


Рисунок 10. Зображення моделей фасадів та використаних мереж камер.

Ця ситуація була викликом, оскільки мала особливості, які в ідеалі не сприяли застосуванню аерофотозйомки.

Висота стіни та архітектурна складність суттєво ускладнювали визначення точної геометрії для зйомки.

Тільки обмежена кількість фотографій, виконаних з рівня землі, було зроблено з одного напрямку та відносно близько до фасаду.

Додатково, якість поверхні була незадовільною, що потенційно могло негативно вплинути на точність збіжності.[4]

Проте, процес виявився більш результативним, ніж прогнозувалося, дозволивши отримати деталізовану модель з високою точністю та правильними геометричними параметрами.

У порівнянні з моделлю, сформованою лазерним сканером, максимальна похибка складала менше 3 мм на 95% площі.

Зіставлення оцифрованого фасаду з даними сканування та ортофотопланами, як продемонстровано на рисунку 11, показало, що найбільше відхилення для деяких декоративних деталей по краях фасаду досягає приблизно 2 пікселів (4 мм).[4]

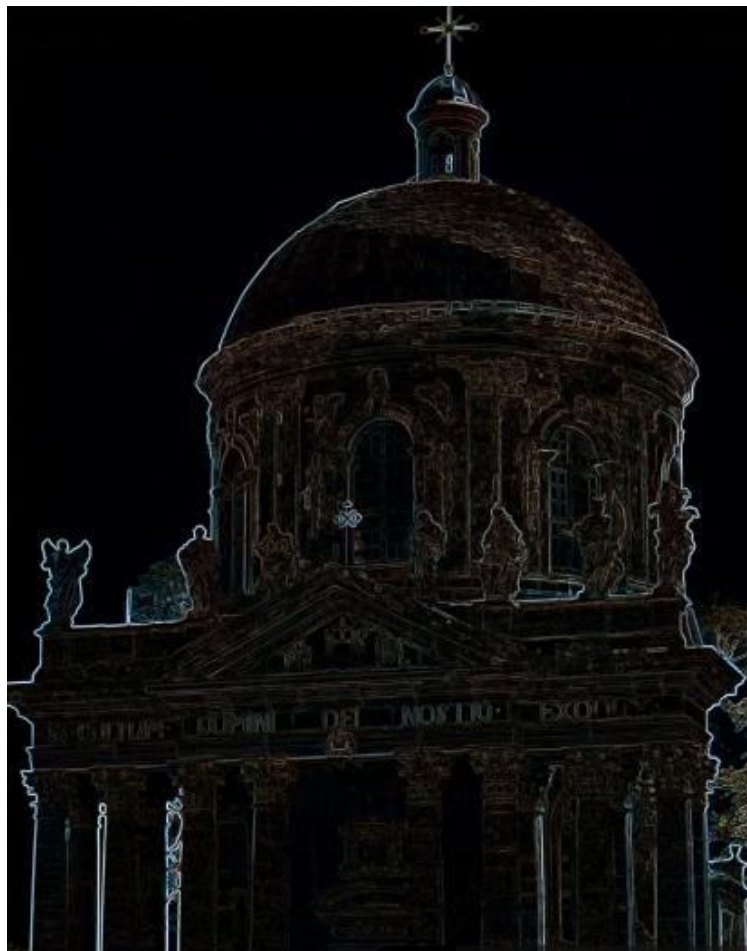


Рисунок 11: Порівняння орто-зображень фасаду та цифрових зображень, отриманих із хмари точок сканера.

### 3.4 Каплиця Юра

Задля підтвердження коректності викладених методик, було відновлено та піддано випробуванням для зіставлення юрську каплицю, яка знаходиться на подвір'ї церкви Святого Йосифа Воздвиження Чесного Хреста.

Каплицю було визначено тестовим об'єктом для порівняння трьох відмінних способів аналізу.

Метою обстеження було встановити поточний стан каплиці.

Каплиця знаходиться на значній віддалі від фасадної частини церкви, яка зазнала серйозних ушкоджень та має викривлення на кілька сантиметрів.

Для цього було зроблено 78 фотографій у трьох окремих блоках:

1. 35 фото з горизонтальним розташуванням оптичної осі;
2. 25 фото, з нахилом камери  $+45^\circ$  відносно горизонтальної площини;
3. 18 фотографій з напрямком оптичної осі в zenit.

На стінах каплиці було закріплено 22 закодовані мітки, що автоматично розпізнавалися програмним забезпеченням для фотосканування.

Мітки використовувались виключно на етапі порівняння і не брали участі в орієнтації зображень.

Незважаючи на застосування двох джерел світла, складні умови освітлення ускладнювали процес фотографування.

Відповідно виникала необхідність у тривалому витримку та великих значеннях ISO.

Це призводило до отримання зашумлених зображень з великою похибкою, а також фотографій, які були не повністю сфокусованими по краях.[4]

У результаті, процес узгодження зображень міг закінчитись неуспіхом та призвести до погрішностей у фінальній мережевій моделі.

Вибір хмар точок для орієнтації зображень також виявився невдалим, що спричинило надмірну кількість шуму (Див. Рис. 12).[4]



Рисунок 12. Хмара зв'язних точок

Завдяки надмірності інформації (близько 250 000 тривимірних точок) та можливості модуля самостійно визначати несправності, кінцева модель відзначалася високою надійністю.

Алгоритм Agisoft Photoscan продемонстрував вражаючу точність навіть за умови низької якості вихідних зображень, спираючись на цей великий обсяг даних.

Отже, незважаючи на початкові складнощі з фотоматеріалами, було досягнуто бажаних точних результатів.

У рамках другого дослідження лазерний сканер Leica HDS7000 встановили в центральній частині каплиці, аби згенерувати модель приміщення високої деталізації одним скануванням.

Мішені-орієнтири, призначені для подальшого порівняння, розташовувалися по периметру.

Третій етап збору даних здійснювався з тієї ж точки збору, застосовуючи тахеометр Leica TCRM1203 та використовуючи як фотограмметричні, так і лазерні мішені.

Аналіз результатів лазерного сканування та моделі, побудованої на основі зображень, продемонстрував, що розбіжність між двома підходами не перевищує 3 мм на 95% площі (Рисунок 13).[4]



Рисунок 13. Порівняння даних лазера з фотограмметричною моделлю.

Цей факт додатково засвідчив правильність обраної методики.

Ділянки, що позначені зеленим кольором на візуалізації, вказують на те, що максимальне відхилення не перевищує 3 мм.

Це чітко демонструє високу ступінь відповідності моделі реальному об'єкту.

Водночас, виявлено основні проблеми з структурою сітки, зокрема в місцях, де кути, ділянки з недостатнім освітленням або внутрішні частини об'єкту (над склепінням).

Через це спостерігалися неточності в геометрії сітки, а також хибні траєкторії руху програми поблизу незамкнених країв.

Додатковий аналіз вихідних зображень показав, що 22 маркери, які були спочатку недоступні, потрібно було виміряти за допомогою як лазерного сканера, так і тахеометра.

Всі 78 зображень успішно пройшли процес автоматичної орієнтації та ідентифікації з високою точністю за допомогою фотосканування.[4]

Після цього були виконані додаткові зовнішні коригування орієнтації, включно з використанням координат опорних точок, які були отримані з хмари точок лазерного сканування.

В рамках даного дослідження було розглянуто декілька варіантів конфігурацій.

Результати представлені у таблиці 1.

Вони дозволяють комплексно оцінити продуктивність і точність кожного окремого підходу для різноманітних типів збору даних та зображень.

Таблиця 1. Результати тестування автономного наведення та наведення з використанням координат лазерного сканування.

	Калібрування	СКП	3D сканер	СКП контрольних точок	$\sigma_{xyz}$ контрольних точок
01		0.567	0		
02	ні	0.763	3	0.00103	0.00054
03	так	0.699	3	0.00114	0.00072
04	ні	0.889	12	0.00136	0.00052
05	так	0.705	12	0.00092	0.00037

Відхил координат фотоапарата визначали зіставляючи з тестовим випадком 02, що став мінімальною умовою для взаємного узгодження між фотограмметричною та лазерною системами координат, котрі слугували орієнтирами.

Простіше кажучи, тестовий приклад 02 був еталоном для оцінювання точності взаємної орієнтації обох систем; натомість, орієнтування третього знімку здійснювалось з використанням тої ж точки відліку, що й координати, виміряні за допомогою тахеометра.

Це забезпечило додатковий контроль точності та відповідності результатів, здобутих різними способами збирання даних.

Результати цього тесту, разом з подробицями різних налаштувань орієнтації знімків, представлено у таблиці 2.

Згідно з результатами зіставних випробувань, безкоштовна фотограмметрична система продемонструвала кращу точність, особливо у визначенні орієнтації знімка та побудови фотограмметричної моделі в подальшому.

Таблиця 2. Результати порівняльних випробувань з використанням координат, зібраних тахеометрами.

	Калібрування	СКП (пікс)	3D сканер	3D CP	СКП контрольних точок	$\sigma_{xyz}$ контрольних точок
06	ні	0.765	13	23	0.00142	0.00041
07	так	0.702	13	23	0.00121	0.00064

Це підтверджується оцінкою точності, виконаною на основі кореня з середньоквадратичної похибки (RMSE) між передбаченими та отриманими даними, що представлені в табл. 1 і табл. 2.

Точність визначення  $\sigma_{xyz}$  можна значно покращити, збільшивши кількість наземних контрольних точок (НКТ) і покращивши їх розподіл у просторі.

При використанні лазерних координат  $\sigma_{xyz}$  оцінюється в межах  $\pm 1$  мм за умови точного збору даних, що свідчить про надзвичайно високу точність.

Результати порівняння підтверджують, що визначення орієнтації фотограмметричної моделі відповідає очікуванням та узгоджується з вихідними даними, доводячи правильність роботи методу.

У випадку калібрування камери, оптимізація PhotoScan показала стабільні результати, нівелюючи зміни внутрішніх параметрів та зовнішньої орієнтації.[4]

Хоча це демонструє ефективність калібрування, подальші тести могли б бути проведені з використанням метричних камер з відомими внутрішніми параметрами для більш точного аналізу впливу зовнішньої орієнтації на внутрішні параметри камери.

## Висновки

Наші висновки підкреслюють надзвичайну результативність автоматизованої обробки фотограмметричних відомостей для формування високодеталізованих 3D-моделей об'єктів, що мають складну архітектуру.

Даний спосіб представляє собою цілковито автоматизований процес, що використовує некорумповані опорні точки та процедури самокалібрування, підтверджуючи свою високу точність та здатність ефективно працювати навіть з зображеннями невисокої якості.

Метод має змогу конструювати прецизійні моделі з щільністю та точністю точок, що порівнювана з показниками, досяжними при застосуванні лазерного сканування.

Ключові переваги цього підходу полягають у:

1. Високій швидкості та точності, що значно переважають можливості ручного орієнтування зображень;
2. Універсальності: його адаптивність до різноманітних типів зображень та використовуваної фототехніки;
3. Надійності: здатності працювати з зображеннями низької якості, незважаючи на варіації освітлення та текстур;
4. Автономності, що виявляється у самостійній обробці даних.

Мінімальне залучення людини обмежується масштабуванням та прив'язкою до реальної місцевості.

Разом з тим, для отримання максимально позитивних результатів необхідно звернути увагу на правильність збору вихідних даних:

- Важливе значення має коректна геометрія захоплення зображень для формування високоякісних моделей.
- Невеликі відстані між точками зйомки та однаковий масштаб сприяють правильному вирівнюванню фотоапарата.

- Рекомендується вибір оптимальної кількості зображень. Надмірне їх збільшення уповільнить процес, а недостатня кількість може призвести до помилок у моделі.

Варто також наголосити, що незважаючи на точність, що гарантується системою для вимірювань, одержані дані вимагають перевірки та доопрацювання в рамках кожного конкретного дослідницького проекту.

Отже, незважаючи на високий ступінь автоматизації процесів, контроль і координація з боку людини залишаються критичними для досягнення бажаних кінцевих результатів.

## Список використаних джерел

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).
4. Fassi, Francesco & Fregonese, Luigi & Ackermann, S & Troia, V. (2013). Comparison between laser scanning and automated 3d modelling techniques to reconstruct complex and extensive cultural heritage areas. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XL-5/W1. 10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-73-2013.
5. Heipke C., 1997. Автоматизація внутрішньої, відносної та абсолютної орієнтації. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 52 (1997) 1-19
6. Remondino F., Del Pizzo S., P. Kersten T., Troisi S., 2012. Недорогі та відкриті рішення для автоматизованої орієнтації зображень – критичний огляд. У: Lecture Progress in Cultural Heritage Preservation. Notes in Computer Science Volume 7616, стор. 40-54

## **БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА**

Тема бакалаврської роботи:

**« Оцінка ефективності лазерного сканування та автоматизованого 3D-модельювання при створенні цифрових моделей складних територій ».**

Обсяг пояснювальної записки: \_\_\_\_\_ аркуша.

\_\_\_\_\_ рік  
(дата)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)