

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Сенів Тетяна Михайлівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**« Інтеграція наземного лазерного сканування та фотограмметрії для 3D-
моделювання об'єктів складної геометрії »**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Т. Сенів, студентка групи ГЗ-22-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

к.т.н., доц. Кравець Олена Ярославівна
(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.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Сенів Тетяна Михайлівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Інтеграція наземного лазерного сканування та фотограмметрії для 3D-моделювання об'єктів складної геометрії»

керівник роботи к.т.н., доц. Кравець Олена Ярославівна

(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. Методика інтегрованої зйомки та просторової орієнтації

2. Математичні моделі

3. Проведення дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Методика інтегрованої зйомки та просторової орієнтації		
2	Математичні моделі		
3	Проведення дослідження		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ *Сенів Т.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

У поточних науково-практичних розробках помітне посилення інтересу до використання наземного лазерного сканування (НЛС) для формування об'ємних макетів об'єктів та електронної фіксації даних про природні та створені людиною елементи, особливо в контексті охорони історико-культурних надбань та оцінки просторового розподілу рослинного покриву.

Ця технологія дає змогу швидко збирати дуже насичені просторові відомості у формі хмар точок, що дає можливість детально відтворити форму об'єктів із заплутаною геометрією.

Коли відбувається фіксація об'єктів, що мають поверхні складної будови, здебільшого постає потреба у проведенні низки сканувань із різноманітних точок огляду, що, своєю чергою, збагачує етап об'єднання цих даних у цілісну тривимірну репрезентацію.

Основна складність полягає у трансформації окремих масивів даних, зібраних у власних системах координат сканера, у єдину декартову систему координат для адекватного їх зведення у спільний набір точок.

У цьому дослідженні презентується методика реєстрації результатів наземного лазерного сканування, яка ґрунтується на застосуванні фотограмметричних принципів.

Просторове позиціонування установок TLS встановлюється завдяки аналізу цифрових зображень, зроблених камерою, вбудованою у сам лазерний сканер.

На першому етапі здійснюється взаємне орієнтування фотограмметричної схеми, а отримана інформація потім застосовується для обчислення зовнішнього орієнтування точок сканування.

Це дає можливість зареєструвати хмари точок за один процес, усуваючи потребу у використанні додаткових реперних маркерів.

Подані здобутки слугують доказом обґрунтованості висунутої нами методики, водночас демонструючи її значну ступінь достовірності та продуктивності у процесі формування об'ємних моделей, що базуються на поєднанні інформації, отриманої від наземного лазерного сканування, та фотограмметричних даних.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, фотограмметрія, реєстрація хмар точок, цифрові зображення, 3D-моделювання.

Abstract

Current scientific and practical developments have seen a noticeable increase in interest in the use of terrestrial laser scanning for the formation of three-dimensional models of objects and electronic recording of data on natural and man-made elements, especially in the context of the protection of historical and cultural heritage and the assessment of the spatial distribution of vegetation cover.

This technology allows you to quickly collect very rich spatial information in the form of point clouds, which makes it possible to recreate the shape of objects with complex geometry in detail.

When recording objects with complex surfaces, there is usually a need to conduct a series of scans from various viewpoints, which, in turn, enriches the stage of combining these data into a holistic three-dimensional representation.

The main difficulty lies in the transformation of individual data arrays collected in the scanner's own coordinate systems into a single Cartesian coordinate system for their adequate reduction into a common set of points.

This study presents a method for registering the results of terrestrial laser scanning, which is based on the application of photogrammetric principles.

The spatial positioning of TLS installations is established by analyzing digital images taken by a camera built into the laser scanner itself.

At the first stage, the photogrammetric scheme is mutually oriented, and the information obtained is then used to calculate the external orientation of the scanning points.

This makes it possible to register point clouds in a single process, eliminating the need to use additional reference markers.

The presented results serve as evidence of the validity of the methodology proposed by us, while demonstrating its significant degree of reliability and

productivity in the process of forming volumetric models based on a combination of information obtained from terrestrial laser scanning and photogrammetric data.

Keywords: terrestrial laser scanning, photogrammetry, point cloud registration, digital images, 3D modeling.

ЗМІСТ

Вступ

1. Методика інтегрованої зйомки та просторової орієнтації

2 Математичні моделі

2.1 Реєстрація хмар точок

2.2 Калібрування цифрової камери

2.3 Зв'язок між камерою та системами координат наземного лазерного сканування

2.4 Відносна орієнтація зображень

2.5 Реєстрація хмар точок

3. Проведення дослідження

3.1 Лабораторне випробування

3.2 Палац Потоцьких

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

Актуальний стан геоінформаційних розробок, цифрового відтворення та просторового дослідження зумовлює неухильне зростання потреби у формуванні надзвичайно точних тривимірних образів об'єктів, що існують у дійсності.

Неабиякої ваги набуває проблема 3D-реконструкції об'єктів із заплутаною структурою, наприклад, будівель, інженерних систем, пам'яток культури чи природних ландшафтних утворень, які відзначаються надзвичайною деталізацією, нерівномірними поверхнями та заплутаним розташуванням у просторі.

Лазерне сканування із наземних опор (TLS) поряд із фотограмметрією належать до найпоширеніших нинішніх способів збору просторових відомостей, необхідних для створення тривимірних (3D) макетів.

Лазерне сканування має перевагу у забезпеченні високої точності геометрії та значної насиченості хмар точок, що дає змогу ретельно відтворити конфігурацію об'єктів, навіть тих, що розташовані у місцях, складних для доступу чи традиційного фотографування.

Водночас, метод фотограмметрії, що ґрунтується на цифрових знімках, дарує здатність фіксувати високоякісну інформацію про фактуру поверхонь та кольорове оформлення моделей, при цьому залишаючись цілком рентабельним способом накопичення необхідних відомостей.

Проте, застосування кожного з цих підходів поодиноці накладає певні рамки.

Лазерне сканування може стикнутися з труднощами у відтворенні мініатюрних деталей, особливо якщо вони виготовлені з матеріалів зі специфічними властивостями, або коли об'єкт має виражені тіньові зони.

Фотограмметрія ж, натомість, критично залежить від характеру освітлення, якості отриманих знімків та конфігурації ракурсів зйомки.

З огляду на це, об'єднання 3D-сканування з землі та фотограмметричних методів дає змогу звести до купи сильні сторони обох технологій, нівелюючи при цьому їхні слабкі місця, що в результаті забезпечує формування всебічних, високоточних та естетично достовірних тривимірних моделей.

Важливість цієї дипломної роботи зумовлена постійним зростанням потреби у застосуванні всеохоплюючих методів цифрування об'єктів, що характеризуються складною формою, для таких завдань, як проєктування, відстеження технічного стану, відновлювальні роботи, містобудівна діяльність та охорона історико-культурних надбань.

Об'єднані стратегії збору та опрацювання просторової інформації набувають особливої ваги, зважаючи на чинні вимоги щодо показників точності, швидкості виконання та наочності отриманих результатів.

Бакалаврська робота має на меті вивчити потенціал поєднання наземного лазерного сканування та фотограмметрії задля формування тривимірних репрезентацій об'єктів, що характеризуються складною формою, а також здійснити оцінку дієвості цього методу.

Аби реалізувати поставлене завдання, у межах роботи заплановано здійснення наступних кроків:

- провести ґрунтовний аналіз теоретичних засад наземного лазерного сканування та фотограмметрії;
- дослідити актуальні техніки обробки та зведення даних, отриманих за допомогою TLS та фотограмметрії;
- здійснити практичне створення тривимірної моделі об'єкта з непростюю конфігурацією, використовуючи інтегровані дані;
- провести експертну оцінку точності й загальної якості згенерованої 3D-моделі;

- ідентифікувати сильні сторони та неминучі обмеження спільного (інтегрованого) методу у зіставленні з застосуванням кожного з методів окремо.

Те, що розглядається у цьому дослідженні, зосереджено на порядку збору та опрацювання просторової інформації задля спорудження тривимірних макетів.

Фокус уваги у цій роботі припадає на техніки поєднання інформації, отриманої від наземного лазерного сканування, та фотограмметричних даних, під час формування тривимірних моделей об'єктів, що мають заплутану форму.

Користь від цього дослідження полягає у потенціалі використання здобутих висновків у сферах геодезії, архітектурного проєктування, інженерної справи, відновлення історичних пам'яток та створення цифрових архівних копій споруд різного функціонального призначення.

1. Методика інтегрованої зйомки та просторової орієнтації

На рисунку 1 бачимо компонування апаратури для вимірювань, у яке входить цифрова фотокамера моделі Nikon D100, оснащена сенсором на 6 мегапікселів та об'єктивом із фокусною відстанню 18 міліметрів; ця камера зафіксована нерухомо на корпусі наземного лазерного сканера FARO, використовуючи для цього монтажний вузол.

Коли встановлюється необхідний функціональний зв'язок між системою координат, прив'язаною до фотокамери (позначення x, y, z), та загальною просторовою системою координат лазерного сканера (позначення X, Y, Z), відкривається змога застосовувати дані, отримані з фотографій, для точного визначення розташування однієї сканувальної позиції відносно іншої.

Порівняльне розташування знімків, зроблені з відмінних точок огляду за допомогою апаратури, що вже пройшла калібрування, дає можливість визначити характеристики просторового зміщення, що існує між парами відповідних систем відліку.

Знайдені характеристики орієнтування застосовуються з метою уніфікації супутніх кластерів точок, сформованих у процесі сканування з різних позицій, у спільний простір координат.

Цей метод гарантує правильне об'єднання лазерної інформації без потреби залучення штучно встановлених реперних позначок чи заплутаних методик покрокової синхронізації.



Рисунок 1. Камера Nikon D100, жорстко закріплена на системі FARO

Та процедура, яку в цій праці ми називаємо реєстрацією на базі образів (Image-Based Registration, IBR), втілюється як низка взаємозалежних кроків, кожен із яких є вагомим для точного зведення фотограметричних і лазерних знімків до купи.

Найспершим кроком є градування (калібрування) цифрової світлочутливої апаратури, що дає змогу встановити її внутрішні характеристики й гарантувати точність вимірювань на отриманих кадрах.

У реаліях українських теренів, де нерідко використовуються апарати невідповідної (неметричної) чи середньої кваліфікації, цей етап набуває вирішального значення для досягнення задовільної точності фінальних знімків.

Наступна стадія полягає у з'ясуванні просторового розташування камери стосовно системи координат наземного лазерного сканера (НЛС).

Якщо камера міцно змонтована на платформі TLS, таке взаємне позиціонування проводиться лише один раз перед початком знімальних заходів, і в подальшому його можна застосовувати до будь-яких сесій сканування без потреби у додаткових замірах.

Такий підхід є надзвичайно вигідним, особливо коли час на виконання польових робіт є лімітованим, що зазвичай спостерігається під час інженерно-геодезичних чи реставраційних обстежень на території України.

Коли збір даних із наземного лазерного сканування та фотограмметричних знімків, що мають просторове перекриття між собою, виконано з мінімум двох точок зйомки, розпочинається безпосередньо етап реєстрації.

Спершу встановлюється аналітична відносна орієнтація для кожної пари знімків, що частково накладаються.

Для досягнення цієї мети необхідно задіяти п'ять чи більше пар відповідним чином розташованих спільних точок.

Ці точки можуть бути автоматично знайдені та виміряні на знімках, якщо використовуються спеціальні репери або ж якщо на об'єкті присутні виразні штучні чи природні орієнтири.

Незважаючи на те, що наземний лазерний апаратура безперервно збирає дані про відстань у всій зоні видимості, для впровадження методології IBR вистачає застосування лише однієї фотографії з кожної точки знімання, якщо між сусідніми позиціями забезпечене адекватне накладання зображень.

Такий спосіб дає змогу значно скоротити обсяг фотограмметричних матеріалів та полегшити подальші етапи опрацювання, що є суттєвою

перевагою під час виконання завдань у реальних умовах або за умов обмежених можливостей обчислювальної техніки.

Виходячи з тотожних заданих величин відносної позиціонування, котрі охоплюють три кутові зміщення та два параметри просторового зсуву, а також за умов, коли відомі параметри афінного перетворення між координатними системами апарату знімання та TLS-сенсора, стає можливим обчислення зовнішнього позиціонування точок сканування.

Це, своєю чергою, уможлиблює приведення (реєстрацію) відповідних масивів лазерних відбиттів у спільний просторовий континуум, усуваючи потребу у відшукуванні спільних елементів між цими масивами або застосуванні обтяжливих рекурсивних методів на кшталт ICP, чутливих до випадкових похибок та первинних уявлень.

Якщо Вам доводиться працювати з трьома чи більше знімками, що накладаються, та відповідними хмарами точок, можна використати корекцію зв'язування для стартового встановлення фотограмметричної мережі.

Це дає змогу синхронізувати орієнтування одразу кількох станцій, чим суттєво збільшує стійкість кінцевого результату.

Застосування такого методу особливо виправдане тоді, коли йдеться про зйомку довгих або архітектурно насичених об'єктів, типових для нашої країни, як-от старовинні будівлі, великі промислові комплекси чи важливі елементи транспортної мережі.

У подальших частинах праці буде розкрито суть математичних моделей, які є фундаментом методології IBR, а також проаналізовано нюанси їх впровадження на практиці.

Значна увага буде зосереджена на демонстрації результатів випробувань, де було протестовано точність, стійкість та застосовність розробленого підходу в реальних робочих сценаріях.

2 Математичні моделі

2.1 Реєстрація хмар точок

Головною задачею процесу узгодження хмар точок є встановлення параметрів геометричного перетворення, що пов'язують дві тривимірні прямокутні системи координат.

Ці системи використовуються для представлення даних, отриманих під час наземного лазерного сканування.

У контексті цього дослідження, ми умовно називаємо ці системи координат Система 1, що оперує координатами (X_1, Y_1, Z_1) , та Система 2, з координатами (X_2, Y_2, Z_2) .

Кожна із вищезгаданих систем координат прив'язана до конкретного місця розташування сканера, звідки здійснювалося сканування об'єкта.

Так як наземний лазерний сканер створює своє хмарове скупчення точок у власній, локальній системі координат під час збору інформації, для формування цілісної, узгодженої тривимірної моделі вимагається інтегрувати усі зібрані масиви даних у єдиний спільний простір координат.

Математична відповідність, що встановлює зв'язок між позиціями відповідних точок у двох системах координат, реалізується через просторове перетворення.

Це перетворення бере до уваги взаємний зсув, обертання та зміну масштабу між відсканованими наборами даних.

З цією метою, у даній роботі застосовується семипараметрична трансформація Гельмерта, яка слугує усталеною моделлю для завдань вирівнювання геодезичних та лазерно-сканованих даних.

Ця трансформація містить сім ступенів волі: три для лінійного зсуву по осях, три для кутового обертання відносно кожної осі, а також один коефіцієнт масштабування, що компенсує можливу розбіжність у розмірності між системами.

Використання трансформації Гельмерта дає змогу належним чином вирівняти позиційні характеристики двох кластерів точок, що уможливорює їхнє подальше злиття в спільну об'ємну (3D) модель.

У математичному сенсі співвідношення між координатами точок у системі відліку "Скан 1" та системі "Скан 2" описується трансформацією Гельмерта:

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{pmatrix} + (1 + m) \cdot R \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

де:

X_1, Y_1, Z_1 — координати точки у системі координат **Скан 1**;

X_2, Y_2, Z_2 — координати відповідної точки у системі координат **Скан 2**;

t_X, t_Y, t_Z — параметри лінійного зсуву між системами координат;

m — масштабний коефіцієнт;

R — матриця обертання, що описує взаємну орієнтацію систем координат.

Матриця повороту, яку ми позначимо як R , формується за допомогою трьох кутів обертання навколо осей системи координат, і коли ці кути є невеликими, її можна наблизити таким виглядом:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -r_Z & r_Y \\ r_Z & 1 & -r_X \\ -r_Y & r_X & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

де:

r_X, r_Y, r_Z — малі кути обертання навколо осей X , Y та Z відповідно.

Отже, семипараметричне перетворення Гельмерта складається з трьох складових зсуву, трьох кутів повороту та одного коефіцієнта масштабування.

Це дозволяє повноцінно представити взаємозв'язок у просторі між двома наборами точок, знятими з різних точок стояння апаратури наземного лазерного сканування.

Орієнтація системи координат "Скану 1" стосовно загальної системи координат "Скану 2" задається векторами лінійного зміщення вздовж відповідних осей, які ми позначаємо як X_c , Y_c та Z_c .

Параметри, про які йдеться, встановлюють, як розташовані початки координат обох систем відносно одне одного, і вони є невід'ємною частиною просторового перетворення між хмарами точок.

Рівняння (1), коли коефіцієнт масштабування $k=1$ зафіксовано, моделює перетворення жорсткого тіла.

Це припущення є цілком логічним для даних, отриманих за допомогою наземного лазерного сканування, адже вимірювання відстані лазером гарантує відтворення об'єктів у їхньому справжньому масштабі, усуваючи потребу у будь-якому додатковому масштабуванні координат.

Осля поводження семи параметрів просторового зсуву Гельмерта, чи шести, якщо масштаб залишається незмінним, ми спроможні привести координати усіх точок, що перекриваються, до однієї спільної системи відліку.

Як наслідок, усі точки, здобуті лазерним скануванням, постають у спільному просторовому контурі.

Це, своєю чергою, дає змогу правильно з'єднати окремі проскановані ділянки та побудувати єдину, повну тривимірну модель досліджуваного об'єкта.

2.2 Калібрування цифрової камери

У цій роботі процес калібрування цифрової апаратури реалізується шляхом застосування техніки самокалібрування, що поєднується з пакетним вирівнюванням комплексу знімків.

Дана методика базується на спільному визначенні як внутрішніх, так і зовнішніх орієнтаційних характеристик камери, аналізуючи при цьому масив фотозображень.

Це забезпечує можливість проведення всієї процедури в повноцінно автоматичному режимі, без необхідності будь-якого залучення чи втручання людини-оператора.

Щодо опису конфігурації знімального процесу, використовується розширена модель рівнянь колінеарності.

Вона доповнена сукупністю характеристик, призначених для обліку ключових чинників систематичних викривлень, притаманних оптичному приладу камери.

Сумарно, ця модель апробації містить вісім додаткових коефіцієнтів, які дають змогу коректно представити як радіальне, так і тангенціальне викривлення лінзи, а також потенційні зміщення центрального пункту зображення.

Нехай (X, Y, Z) — це просторові координати об'єкта, (X_C, Y_C, Z_C) — розташування центру проєкції, іншими словами — позиція камери, s — фокальна довжина (основна відстань), (x_0, y_0) — координати головної точки зображення, а R — матриця повороту камери.

Отже, "ідеальні" (неспотворені) проєкційні координати точки на фотографії будуть:

$$x - x_0 + \Delta x = -c \frac{R_1}{R_3}, \quad y - y_0 + \Delta y = -c \frac{R_2}{R_3} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

Наявна модель фізичних додаткових змінних на теперішній час визнається однією з найдієвіших для здійснення автоматичного налаштування (самокалібрування) цифрових фотоапаратів.

Причина в тому, що вона дає змогу належним чином брати до уваги ключові оптичні й просторові викривлення утворені системою захоплення зображення.

Застосування даної моделі забезпечує покращення точності у визначенні складових внутрішнього орієнтування та стійкість отримуваних показників при груповому (пакетному) узгодженні.

Якщо розглядати це з погляду практики, то найрозумніше здійснювати калібрування камери тоді, коли її вже вилучено з корпусу апарату наземного лазерного сканування.

Причина полягає в тому, що коли камера міцно зафіксована на TLS, вона має значно меншу свободу для маневрування та обертання навколо будь-яких осей.

Між тим, для того, щоб достовірно й точно визначити параметри внутрішньої орієнтації камери, життєво необхідно забезпечити широкий спектр змін у кутах її нахилу та повороту під час процесу зйомки.

Для того, щоб процес самокалібрування давав змогу досягти належної розмаїтості кутів, під якими ведеться зйомка камерою, це вкрай важливо.

Причина полягає у тісній взаємозалежності між параметрами внутрішньої орієнтації – а саме фокусною відстанню, розташуванням головної точки та факторами, що впливають на спотворення.

Лише змінюючи ракурси й нахили зйомки, можна геометрично розділити ці кореляційні зв'язки та гарантувати надійне обчислення усіх необхідних калібрувальних величин.

Якщо ж камера перебуває у нерухомому стані, як це буває при її фіксації на наземному лазерному сканері, такого різноманіття знімальних конфігурацій досягнути неможливо, що, як наслідок, може негативно позначитися на точності та достовірності даних, отриманих під час самокалібрування.

2.3 Зв'язок між камерою та системами координат наземного лазерного сканування

Зважаючи на те, що наземний лазерний сканер під час знімального процесу обертається довкола своєї вертикальної осі, критично важливим є визначення просторового розташування та орієнтації цифрової камери стосовно системи координат наземного лазерного сканування.

Правильне налагодження цього взаємозв'язку є обов'язковою передумовою для наступного етапу – інтеграції отриманої фотограмметричної та лазерно-сканувальної інформації.

Щойно камеру знову закріплено на корпус сканера по завершенню калібрування, її просторове положення (орієнтацію) можливо встановити, застосувавши техніку просторового перерізу.

Ця операція потребує залучення маркерних (характерних) елементів об'єкта, чийі координати вже були визначені з масиву даних, отриманих від наземного лазерного сканера, і які безпомилково розпізнаються на зроблених знімках.

У математичному сенсі, завдання просторового зіставлення (перерізки) викладається через рівняння колінеарності.

Тут координати точок на знімку, позначені як (x, y) , трактуються як відомі виміри, тоді як невідомими змінними виступають параметри зовнішнього орієнтування фотоапарата.

До цих параметрів входять три кути, що формують матрицю повороту R , а також трилінійні координати позиції фокусної точки камери (X_c, Y_c, Z_c) відносно системи координат наземного лазерного сканування.

Щоб теоретично вирішити проблему просторового зіставлення, необхідно мати принаймні три точки об'єкта.

Проте, у контексті запропонованої методики реєстрації на основі зображень (IBR), для поліпшення точності та загальної надійності отриманих результатів, варто залучати щонайменше десять точок, які є просторово рівномірно розташованими.

Такий підхід допомагає мінімізувати вплив випадкових неточностей і гарантує стійкість отриманого розв'язку.

Початкові орієнтаційні параметри для ітеративного знаходження рішення методом найменших квадратів задачі отримуються через аналітичний розрахунок у явному вигляді.

Щойно зовнішня орієнтація камери щодо системи координат наземного лазерного сканера буде встановлена, з'являється можливість задати просторове перетворення, що зв'язує дві декартові системи координат, яке виконується, спираючись на застосовну математичну модель.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \lambda R_c \begin{pmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{pmatrix} \quad (5)$$

Якщо (X,Y,Z) — це координати певної точки, визначені у системі відліку наземного лазерного сканера.

Матриця, яку ми позначимо як R_C , відображає взаємне розташування осей системи координат камери стосовно системи координат сканера, що є ключовим для точної спільної реєстрації обох просторових систем.

Положення ж центру оптичної системи камери, виражене відносно початку координат наземного лазерного сканера, задається вектором (X_c, Y_c, Z_c) .

Згідно з цією моделлю, коефіцієнт масштабування, позначений як k , вважається постійною величиною, яка становить одиницю.

Такий вибір обґрунтовано тим, що лазерний далекомір, інтегрований у наземний лазерний сканер, самостійно забезпечує повну достовірність масштабу для всіх зареєстрованих вимірів.

2.4 Відносна орієнтація зображень

Щодо аналітичного відносного просторового вирівнювання зображень, то його можна здійснити, спираючись на дві головні математичні парадигми: або модель колінеарності, або модель компланарності.

Хоча обидві ці методики знаходять активне використання у фотограметричній практиці, вони мають суттєві розбіжності у тому, які вхідні дані вони вимагають, а також у специфіці їхнього практичного втілення.

Однією з ключових переваг моделі компланарності є здатність визначати параметри взаємної орієнтації так, що потреба у попередньому знанні просторових координат об'єктних точок повністю відпадає.

Це набуває особливого значення у контексті розробленого методу реєстрації, що ґрунтується на аналізі зображень (IBR), головна мета якого полягає у досягненні коректного накладання даних.

Це дозволяє уникнути затратних та часто ускладнених етапів ручного зіставлення точок у хмарах, отриманих лазерним скануванням.

Незважаючи на те, що хмари точок, захоплені наземним лазерним сканером, містять повну просторову визначеність, застосування цих даних для прямого встановлення парних точок може викликати труднощі, що зумовлені варіативністю щільності, присутністю артефактів (шумів) та нечіткістю у виборі репрезентативних ознак.

Навпаки, визначення відповідних точок власне на фотозображеннях через автоматичне зіставлення та подальше обчислення їхніх центрів, беручи до уваги специфіку налаштувань цифрової апаратури Nikon та лазерного сканера FARO, зазвичай дає змогу досягти кращої відносної точності та більшої сталості отриманих результатів.

Модель компланарності ґрунтується на геометричній умові, відповідно до якої промені, що з'єднують відповідні точки двох зображень із центрами проєкції камер, лежать в одній площині.

Математично ця умова може бути виведена з рівнянь перспективної проєкції та подана у вигляді відповідного рівняння, що використовується для визначення параметрів відносної орієнтації одного зображення відносно іншого, як наведено у рівнянні (3).

Уявлення про площинність, якщо дивитися з точки зору геометрії, полягає в тому, що напрямні лінії, проведені від відповідних точок обох зображень до фокусних центрів апаратів, а також лінія, що сполучає самі фокуси, мусять розміщуватися в одній площині.

Інакше кажучи, мішаний скалярний добуток цих трьох векторних величин мусить дорівнювати нулю.

Формально вимога співплощинності може бути виражена так:

$$(b \cdot r_1) \cdot r_2 = 0 \quad (6)$$

де:

b — напрямок, що сполучає осередки проєкції двох кадрів;

r_1 — вектор, що вказує від центру проєкції першого апарата до відповідної мітки на його знімку;

r_2 — напрямний вектор променя, що йде від центру другої камери до тієї самої позначки на об'єкті.

У формі координат, площинні співвідношення постають ось так:

$$\begin{vmatrix} b_X & b_Y & b_Z \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

Нехай (b_X, b_Y, b_Z) — це складові вектора нашої бази, тоді як (X_1, Y_1, Z_1) і (X_2, Y_2, Z_2) являють собою зведені (нормалізовані) координати векторів напрямку для променів, які відповідають певній точці, побаченій на першому та другому зображеннях відповідно.

Отже, рівняння компланарності дає змогу обчислити параметри взаємної орієнтації двох зображень, не вдаючись до координат об'єкта у просторі, що зумовлює особливу корисність цієї моделі у рамках процесу реєстрації, який ґрунтується на самих зображеннях (IBR).

Масштабування фотограмметричної мережі, прив'язаної до орієнтованої системи, здійснюється шляхом залучення проміжків, встановлених між ключовими точками.

Ці точки попередньо визначені за допомогою наземного лазерного сканування та безпомилково встановлені на відповідних кадрах.

Як наслідок, відносне позиціонування, здобуте з аналізу зображень, трансформується у абсолютний масштаб, що досягається завдяки точності вимірювань лазерного далекоміра.

Рівняння спільної площинності (компланарності) знаходять своє рішення за допомогою ітераційного методу найменших квадратів.

Щодо встановлення характеристик взаємного розташування, а саме трьох кутів обертання та двох параметрів зсуву, у теорії вистачає застосування п'яти точок, що знаходяться у відповідності та розташовані належним чином.

Проте, з позицій практичного застосування, для покращення точності обчислень та їхньої нечутливості до похибок, раціонально використовувати десять або більше таких відповідних точок, котрі добре розкидані у просторі.

Аналогічно до інших завдань у фотограметрії, якість результатів при розв'язанні системи рівнянь за методом найменших квадратів значною мірою визначається тим, наскільки вдало підібрані початкові приблизні значення для невідомих величин.

Це набуває особливого значення при впровадженні автоматизованих систем обробки, де прагнуть максимально зменшити втручання людини.

Аби розв'язати проблему визначення вихідних даних, у цій праці використано методологію Монте-Карло.

Цей спосіб дає змогу згенерувати сукупність найбільш вірогідних первинних станів відносної орієнтації через серію повторюваних спроб.

Здобуті перші наближення потім доводять до досконалості, застосовуючи техніку найменших квадратів.

Після цього оптимальний результат виявляється самотійно, спираючись на заздалегідь встановлені критерії збіжності та умови найменшого залишку помилок.

Подібна послідовність дій гарантує стійкість і достовірність знаходження параметрів взаємної орієнтації в рамках процедури узгодження на основі візуальних даних.

Як уже згадано, коли застосовується низка зображень, що накладаються одне на одне, разом із супутніми даними наземного лазерного сканування, є опція для подальшого доопрацювання параметрів зовнішнього орієнтування через процедуру блок-ректифікації.

Цей підхід широко визнаний у фотограмметрії, і в рамках цього дослідження ми не заглиблюємося в нього, оскільки його математичне формулювання впливає з рівнянь, представлених у виразі (3).

2.5 Реєстрація хмар точок

Коли вже визначено параметри співвідношення позиціонування між парою зображень, а саме i та j , відкривається шлях до формування просторового сполучення між відповідними наборами точок наземного лазерного сканування.

У такому випадку процес приведення цих хмар точок до єдиної системи координат реалізується через застосування просторового зміщення, чий керуючі величини (параметри) виводяться шляхом інтеграції даних, отриманих із фотограмметричного визначення взаємного розташування, та попередньо відомої позиції фотокамери відносно системи координат сканера.

Параметри, які вдалося здобути, дають змогу цілком точно окреслити взаємне розташування станцій сканування в межах однієї спільної системи координат, усуваючи потребу у прямому підборі співставних точок між хмарами лазерних даних.

Отже, процес реєстрації протікає аналітичним методом, що гарантує значну стійкість отриманого результату та мінімізує вплив випадкових похибок, притаманних лазерним вимірюванням.

З погляду математики, ця процедура зіставлення хмаринок точок виконується через застосування просторового перетворення, яке виводиться шляхом об'єднання таких рівнянь:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i = R_{A_i}^{-1} \cdot \left(R_C^{-1} \cdot \left[R_{j,i}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_i + \begin{pmatrix} bx \\ by \\ bz \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} \right) \quad (8)$$

Тут індекс "i" співвідноситься з референсною хмарою точок (опорним скануванням), тоді як "j" вказує на набір даних, чії координати потребують трансформації у систему відліку опорної хмари.

Матриця повороту R_C , що має розмірність 3×3 , спільно з вектором зсуву (X_c, Y_c, Z_c) визначає взаємне розташування та орієнтацію камери стосовно системи координат сканера для усталеного вирівнювання "камера–сканер".

Визначення цих параметрів здійснюється для початкового положення сканера, коли його кут обертання A (проілюстрований на рисунку 2) приймається як нульовий.

Матриця обертання $R_{j,i}$ розміром 3×3 разом із вектором зсуву $b = (b_x, b_y, b_z)$ виводяться із даних зовнішньої орієнтації.

Вони описують положення камери j у системі координат камери i (тобто визначають перетворення між двома позиціями камери в межах пари зображень, для якої виконано взаємну орієнтацію).

Зважаючи на те, що сканування сканером відбувається шляхом обертання навколо вертикальної осі, у модель інтегрується додатково

матриця, яка є матрицею 3×3 , що характеризує поворот системи координат сканера навколо осі Z на кут A саме в той момент, коли було зроблено відповідне зображення (здійснено експозицію).

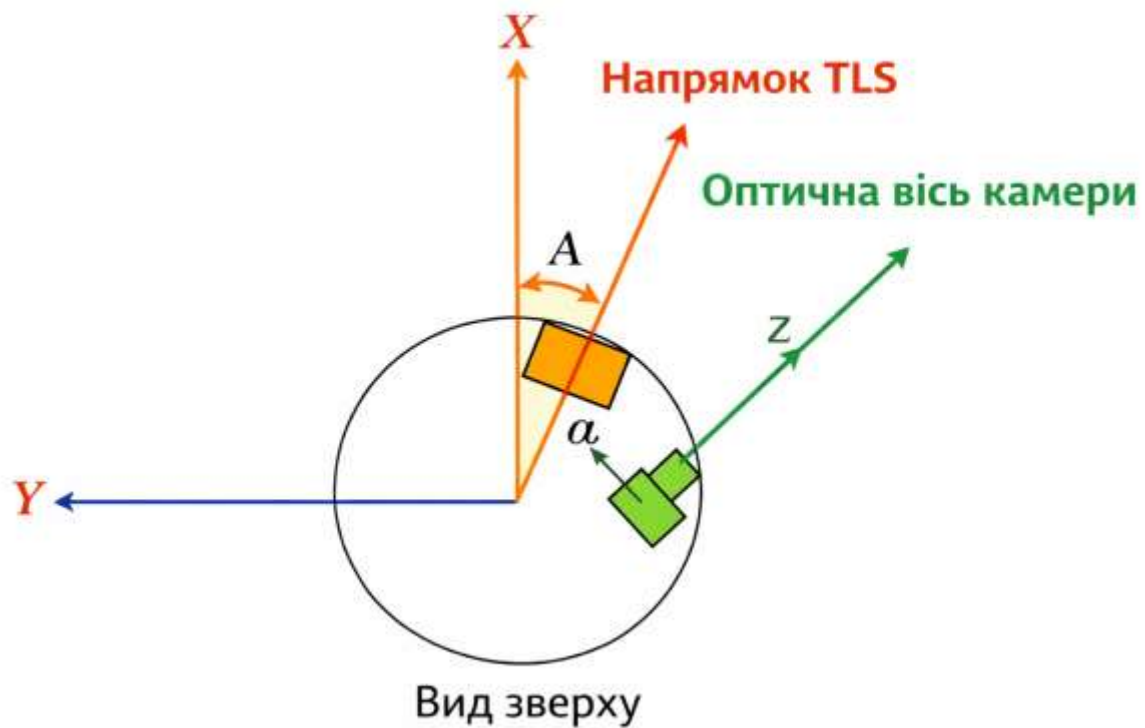


Рисунок 2 Зв'язок між системою координат TLS та оптичною віссю камери

3. Проведення дослідження

У цій частині ми представляємо здобутки трьох практичних прикладів впровадження розробленого образу-базованого методу вирівнювання (IBR).

Метою цих випробувань було підтвердити життєздатність концепції, а також визначити рівень її точності та застосовності у реальних умовах.

Кожне випробування було ретельно сплановане для охоплення різноманітних умов знімання та типових ситуацій, які зустрічаються під час наземного лазерного сканування.

Початковий експеримент здійснили, застосовуючи лабораторну базу та спеціально підготовлений випробувальний майданчик, оснащений низкою цілей, чиї просторові координати були заздалегідь визначені.

Ця побудова забезпечила можливість верифікації точності ідеї, що пропонується, під повним контролем, а також дала змогу чисельно виміряти зсув (або похибку) при реєстрації.

Другий дослідницький етап охоплював типові прикладні завдання, яке зазвичай розв'язують через наземне лазерне сканування: це трьохвимірне вимірювання та створення цифрової моделі пам'ятки культурної спадщини.

Метою цього вивчення було показати, наскільки добре метод IBR працює у практичній діяльності та чи годиться він для фіксації архітектурних об'єктів із складною геометрією.

Третє випробування також передбачало сканування історичної споруди, проте його було цілеспрямовано скомпоновано для оцінки

сценаріїв, де проміжки між окремими скупченнями точок сканування є невеликими або повністю відсутні.

У рамках цього дослідження продемонстровано, що залучення додаткових фотограмметричних знімків дає змогу значно удосконалити процедуру вирівнювання хмар точок і гарантувати точне їхнє зведення навіть у тих випадках, коли геометричні умови є складними.

3.1 Лабораторне випробування

На рисунку 3 можна побачити полігон для випробувань у лабораторних умовах.

Він містить шістнадцять десятків (160) відбивних мішеней.

Ці мішені розташовані як на вертикальній площині стіни, що має невелике заглиблення, так і на суміжній частині стелі.

Цей майданчик регулярно задіяний у дослідницьких роботах, особливо тих, що стосуються фотограмметрії малих відстаней, зокрема для налаштування та визначення якості роботи різноманітного сенсорного обладнання.

Унаслідок цього, воно виявилось ідеальним майданчиком для первинної апробації розробленого підходу до реєстрації зображень.

Ключове завдання, поставлене перед лабораторним дослідженням, полягало у з'ясуванні потенціалу автоматизованого визначення взаємної орієнтації між групами даних, отриманих за допомогою наземного лазерного сканування, і подальшої стиковки зон їхнього накладання у рамках уніфікованого процесу реєстрації.

Щоб гарантувати надійне автоматичне розпізнавання об'єктів у лазерному наборі даних, дев'ять великих квадратних реперів, що помітно контрастували з оточуючим середовищем, були закріплені на стіні.

Ці репери слугували точками прив'язки для виконання операції просторової орієнтації.

На першому етапі ця процедура використовувалася для встановлення геометричного співвідношення між камерою та референчною системою координат, яку надавав наземний лазерний сканер, відповідно до формули (5).

Це дозволило досягти необхідної колінеарності між фотограмметричною та лазерною системами координат.

На початковій фазі дослідження було здійснено процедуру самокалібрування цифрового фотоапарата.

Фотографування було організовано за конвергентною схемою, залучивши чотирнадцять знімків, зроблених близько чотирьох метрів від об'єкта випробувань.

Для полегшення автоматичної побудови фотограмметричної сітки та успішного виконання самокалібрувальних розрахунків застосовувалися спеціальні кодовані репери, які візуально представлені на рисунку 3 у формі невеликих квадратних елементів.

Аналіз отриманих даних виконувався за допомогою програмного комплексу, який є загальновизнаним стандартом у сфері фотограмметричного калібрування.

Свідченням високої якості проведеного калібрування є незначні залишки похибок у координатах зображень, середнє квадратичне значення яких сягнуло приблизно 0,05 пікселя, що еквівалентно близько 0,4 мкм у площині, де формується зображення.

По закінченні етапу калібрування, апаратура цифрової камери Nikon D100 була змонтована на лазерний сканер наземного типу FARO (як ілюструє Рисунок 1) для виконання наступних спільних (інтегрованих) вимірювальних операцій.

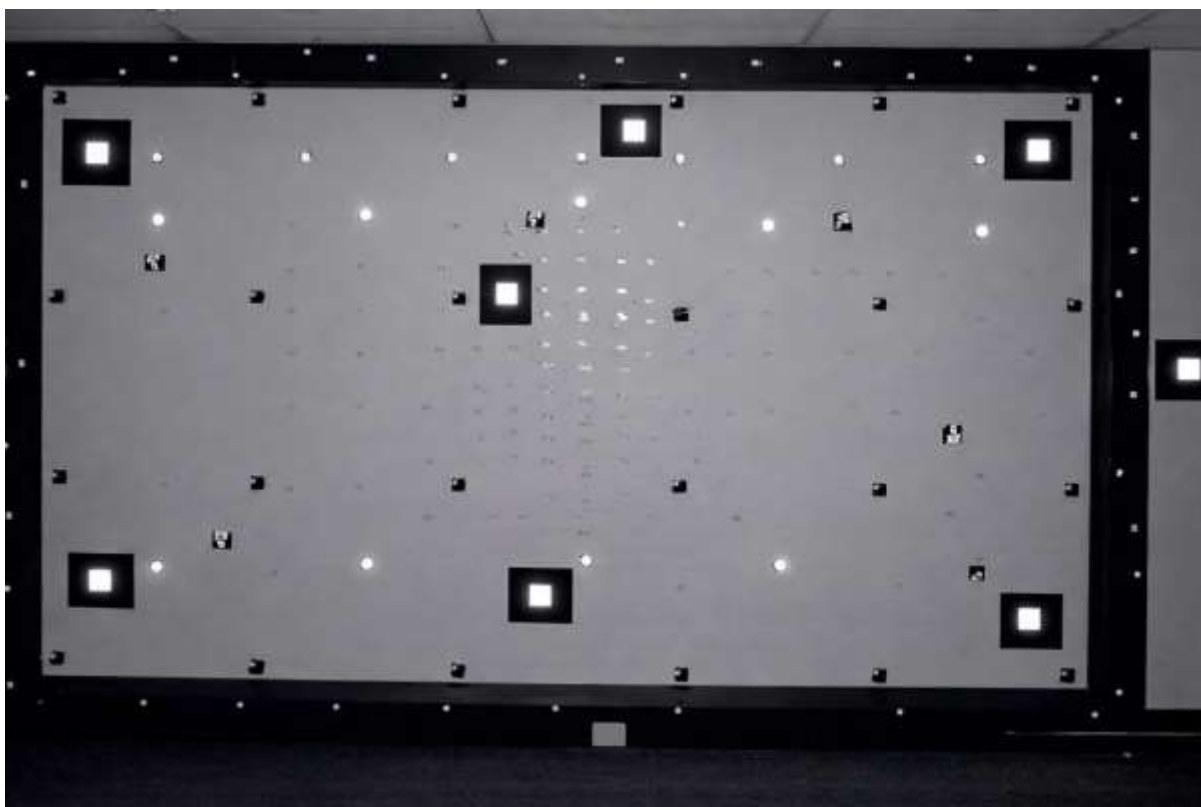


Рис. 3. Калібрування камери та сканера

Черговий щабель наших досліджень, що проводились на практиці, полягав у встановленні просторової відповідності між апаратурою цифрової фотозйомки та системою відліку наземного лазерного сканера.

Для досягнення цього завдання було здійснено єдиний сеанс сканування полігону в межах лабораторії, паралельно з фіксацією одного зображення.

На перших етапах планувалося покладатися виключно на дев'ять великих відбивачів, які можна побачити на рисунку 3.

Однак, під час опрацювання отриманої інформації виявилось, що й менші за габаритами мішені здатні бути автоматично ідентифіковані у точковому хмарі завдяки їхнім показникам інтенсивності.

На отриманому зображенні ідентифікували центри 79 об'єктів, а потім здійснили просторове орієнтування з метою визначення параметрів зовнішнього орієнтування апаратури.

Здобуті показники дали змогу оцінити точність у межах середньоквадратичного відхилення: позиціонування камери було визначено з похибкою близько 0,5 мм, а кути її нахилу (по кожному з трьох напрямків) з точністю приблизно в 10 дугових секунд.

Беручи до уваги заявлену виробником точність лазерного сканера FARO (близько 25 мм на дистанції 4 метри), точність просторового орієнтування була визнана задовільною для подальшої процедури злиття точкових хмар.

Передбачалося, що застосування комплексного методу IBR забезпечить вищу якість реєстрації порівняно з даними, отриманими лише за допомогою сканера.

Ранні випробування стосовно апробації методики IBR здійснили, застосовуючи три взаємозалежні просканування тестової ділянки, що демонструється на рисунку 4.

На першій фазі, сканування під номерами 1 та 2 були взаємно вирівняні, ґрунтуючись на виразі (6) та використовуючи більше сорока об'єктних точок, виявлених автоматично на відповідних знімках.

Після встановлення просторових координат тривимірної моделі точок, що стосуються скану 3, було здійснено його повторне просторове співвіднесення, а невдовзі після цього – фінальну корекцію ув'язки, залучаючи до процесу всі три отримані зображення.

Трансформація координат точок, отриманих лазерним скануванням із апаратів 2 та 3, у систему координат сканера 1 була виконана згідно з формулою (7).

Це дало змогу успішно завершити процес реєстрації, що базувався на аналізі зображень.

У зв'язку з тим, що ретрорефлекторні мішені були чітко виявлені за показником потужності відбитого сигналу, з'явилася можливість зіставити обчислені фінальні значення координат X, Y, Z із еталонними показниками,

які раніше були встановлені під час високоточної фотограмметричної зйомки.

На основі обстеження 130 контрольних пунктів, загальна середньоквадратична помилка вирівнювання хмар точок методом IBR склала $3 \pm 0,3$ мм. Д

ля контексту, аналогічний показник RMSE, досягнутий за застосуванням ітеративного методу ICP, становив $3 \pm 0,7$ мм.

Ці здобуті показники були розцінені як цілком задовільні та такі, що відповідають прогнозованій точності наземного лазерного сканування.

Розподіл залишків помилок у позиціонуванні точок сканування, згенерованих за допомогою IBR-методики, проілюстровано на рисунку 5.

3.2 Палац Потоцьких

Щоб перевірити правильність використаного методу реєстрації, що спирається на візуальні дані (IBR), була проведена зйомка одного із будинків палацу Потоцьких за допомогою наземного лазерного сканера.

Цей об'єкт є значущою культурною спадщиною та однією з відомих архітектурних пам'яток Івано-Франківська.

Роботи виконувалися із застосуванням лазерного сканера, синхронізованого з цифровою фотокамерою Nikon D100, що забезпечило об'єднане отримання просторових відомостей.

Як можна побачити з ілюстрації 6, знімання об'єкта здійснювалося із застосуванням чотирьох точок сканування, з кожної з яких було отримано по одному зображенню.

Загальний обсяг даних, накопичених під час натурних вимірювань, сягнув приблизно двох мільйонів лазерних відбиттів, що дало змогу детально реконструювати форму архітектурної споруди.

Вибір позицій для станцій був продиктований потребою гарантувати відповідний ступінь накладання між отриманими знімками, що є критично важливим для точного вирахування параметрів взаємної орієнтації та наступного етапу узгодження даних.

Переважно апаратуру для зйомки налаштовували таким чином, щоб лазерний сканер був скерований уздовж осі X , що еквівалентно застосуванню одиничної матриці обертання $R_A=1$.

Відхилення від цього правила настало лише під час другого сканування, коли сканер повернули на кут $A=10^\circ$.

Це зробили, щоб оцінити, наскільки надійним є метод IBR, який ми пропонуємо, коли система координат сканування змінює своє положення вже в процесі експозиції зображень.

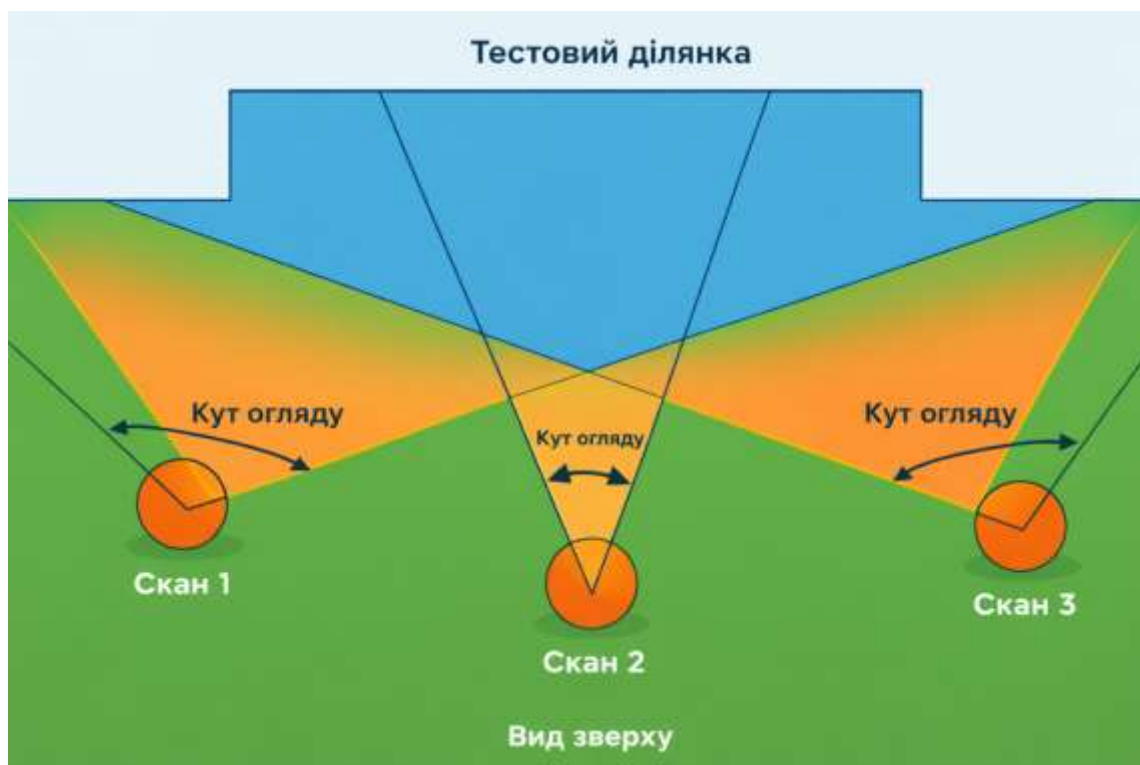


Рисунок 4 Скановане покриття тестового поля



Рис. 5. Помилки позиціонування точок

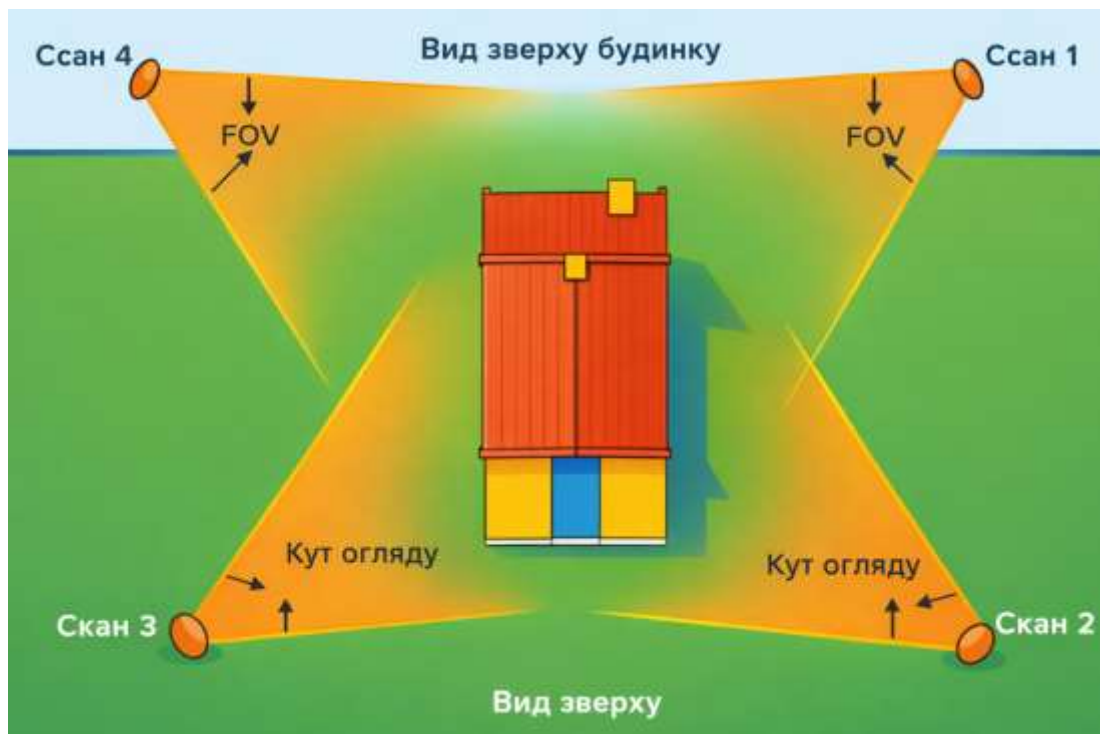


Рис. 6. Геометрія станції сканера та камери для обстеження палацу
Потоцких.

На першій фазі, коли визначалася взаємна орієнтація, за початкову систему відліку для формування фотограмметричної мережі була обрана система координат, що стосувалася зображення, отриманого з однієї з камерних станцій.

Згодом, групове доопрацювання всіх чотирьох знімків проводилося саме у цій системі координат, яка у цьому конкретному випадку збігалася із системою відліку Scan 1.

У зв'язку з тим, що фасади мають природну фактуру, а при зйомці палацу Потоцького не використовувалися спеціальні мітки, процес визначення точок на знімках довелося проводити вручну.

Початковий етап включав відносну орієнтацію фотографій, знятих зі станцій Scan 1 та Scan 2, спираючись на тридцять парних точок, знайдених оператором.

При цьому добір цих точок здійснювався так, щоб принаймні чотири з них можна було достовірно знайти і на кадрах, отриманих зі станцій Scan 3 і Scan 4.

Збіг спільних орієнтирів дозволив здійснити повторне просторове співставлення для двох інших знімків.

Після додаткового визначення ще двадцяти відповідних маркерів, фотограмметричну схему піддали спільній оптимізації.

У підсумку, середня квадратична помилка визначення координат зображення склала значення менше одиниці пікселя, що повністю збіглося з прогнозованими критеріями точності.

Такий результат є абсолютно логічним, беручи до уваги той факт, що переважна частина залучених для прив'язки природних точок — це були кути мурування з цегли та інші добре помітні складові архітектурних форм.

Приблизна похибка просторових координат точок об'єктів, визначених фотограмметричним методом, не перевищувала двох міліметрів

за критерієм однієї стандартної відхилення, що цілковито відповідає заявленим експлуатаційним характеристикам лазерного сканера FARO.

Подальша процедура зведення (реєстрації) отриманих лазерних знімків реалізована згідно із залежністю (7), а формування сукупної тривимірної проєкції точок ілюструє Рисунок 7.

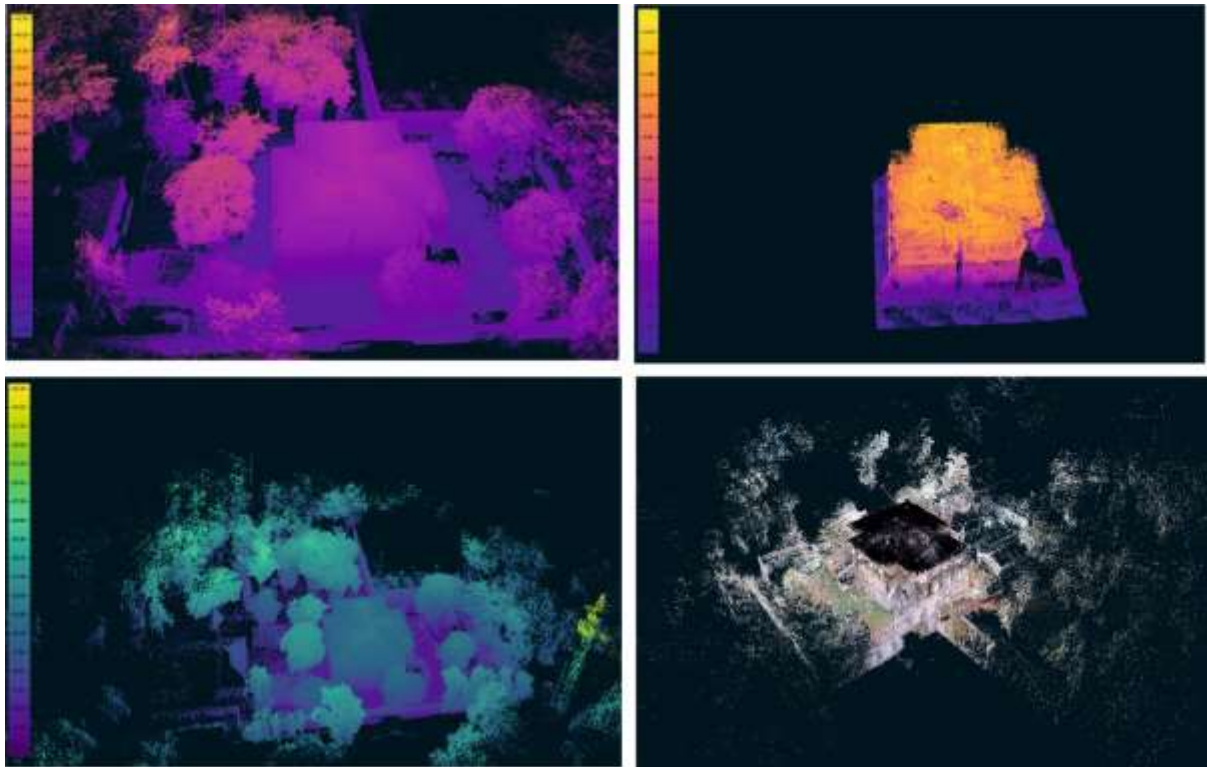


Рис. 7. Отримана лазерно-сканована 3D-модель палацу Потоцьких.

Під час другої фази знімальних робіт палацу Потоцьких, контрольні точки, що були визначені незалежно різними способами, лишалися не задіяними.

З огляду на це, визначити ступінь точності реєстрації можна було лише зіставивши дані, отримані з використанням методології IBR, з тими показниками, що були зафіксовані під час реєстрації із застосуванням ітераційної процедури ICP.

З метою проведення порівняльного розбору, ми зупинилися на модифікації алгоритму ICP, що залучає поверхневі градієнти.

Такий підхід суттєво покращує збіжність знайденого рішення до істинного мінімуму, мінімізуючи ризик застрягання у локальних мінімумах.

Для визначення рівня просторової кореляції та геометричної відповідності між наборами точок, отриманими за допомогою методів IBR та ICP, було використано повторне застосування самого алгоритму ICP як еталонного критерію для кількісної оцінки.

Згідно з виконаним аналізом, середнє квадратичне відхилення між збіжними точками у двох фінальних моделях склало $2 \pm 0,7$ мм.

Найбільші величини похибок сягали, приблизно, 4 мм і фіксувалися здебільшого на ділянці з трав'яним покривом перед будівлею, що обумовлюється нерівномірною будовою та варіативною конфігурацією поверхні.

Під час візуального огляду діаграм розбіжностей не було зафіксовано жодних організованих зміщень чи закономірностей у відмінностях між даними, отриманими за допомогою IBR, та початковим рішенням, яке надав ICP.

З практичного погляду, це ілюструє, що обидві методики дали ідентичні результати щодо вирівнювання для цього конкретного зразка.

Водночас, якщо розглянути розташування станцій наземного лазерного сканування, як це зображено на малюнку 8, стає очевидним, що взаємне вирівнювання (реєстрація) станцій Scan 4 та Scan 5 за допомогою методу ICP може мати певні складнощі.

Це зумовлено тим, що межа накладання між даними, отриманими з цих двох сканерів, є доволі невеликою.

Саме тому підхід, заснований на використанні реперних елементів (IBR), стає особливо цінним, адже він дає змогу досягти надійної реєстрації навіть тоді, коли суміжні хмари точок перекриваються мінімально.

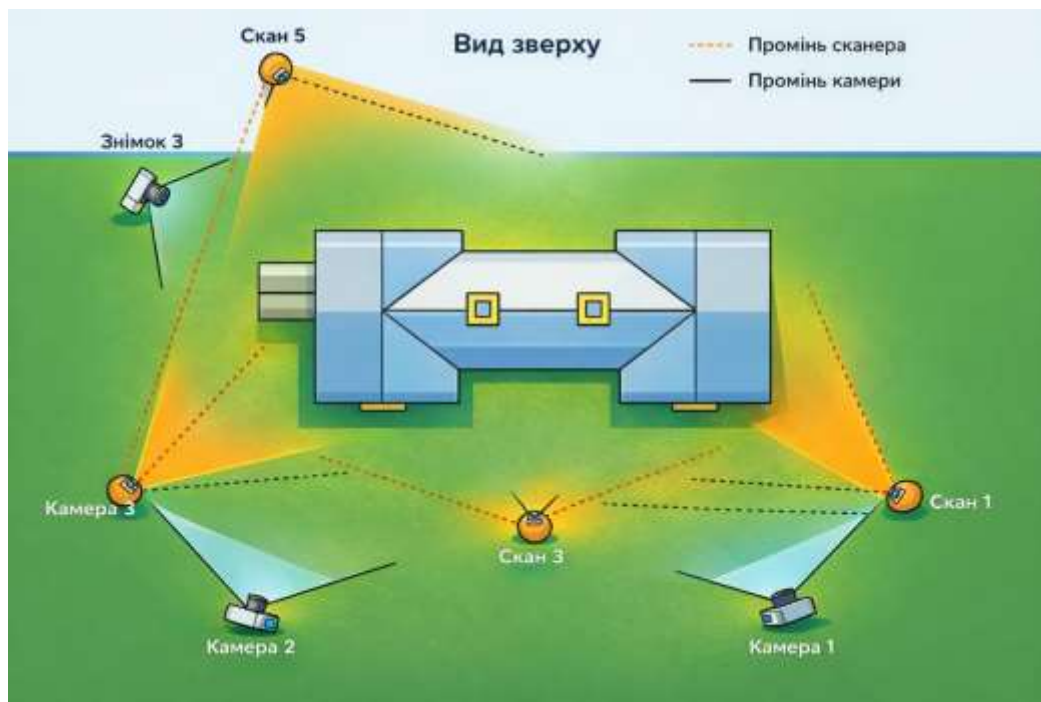


Рис. 8. Геометрія станції сканера та камери для обстеження

На початковій стадії ми здійснили взаємне вирівнювання знімків, здобутих із апаратів Scan 1 та Scan 3. Це дало нам можливість визначити базову конфігурацію фотограмметричної системи.

Далі було проведено первинне просторове зшивання (перетин) для зображень, отриманих зі станцій Scan 2, Scan 4 та Scan 5, включно з додатковими кадрами, знятими з допоміжних позицій апаратури (Images 1, 2 та 3).

Далі перейшли до етапу спільного вирівнювання фотограмметричної мережі, залучивши знову ж таки всі вісім наявних знімків.

В середньому на кожен кадр припадало приблизно 20 точок, що забезпечило необхідний рівень кратності вимірювань.

Після обробки, середня квадратична помилка невязок у координатах зображень вимірювалася дробом пікселя, а оцінена середня квадратична точність просторового позиціонування об'єктних точок становила близько 2 міліметрів.

На фінальному етапі відбулося поєднання точкових хмар, отриманих від наземного лазерного сканера, використовуючи метод IBR.

Тривимірна модель об'єкта, що постала після їхньої спільної обробки, візуалізована на ілюстрації 9.



Рис. 9. Отримана лазерно-сканована 3D-модель

По завершенні IBR-реєстрації, ми здійснили також й іншу реєстрацію хмар точок, застосовуючи ідентичний алгоритм ICP, що був задіяний під час роботи з даними знімання Потоцького Палацу.

Завдяки цьому стало можливим отримати другий, окремий об'ємний набір даних, призначений для наступного порівняльного дослідження.

Аби визначити, наскільки точними є просторові координати, здобуті завдяки IBR-реєстрації, було залучено дванадцять ретельно відібраних, рівномірно розташованих контрольних точок.

Ці точки спершу визначили фотограметрично, маючи заявлену точність приблизно у 2 мм, а потім їх вручну знайшли у тривимірних моделях, створених обома методами: і за допомогою IBR, і застосовуючи алгоритм ICP.

Здійснивши зіставлення координат реперних точок із їхніми еквівалентами у верифікованих моделях, було розраховано середньоквадратичні відхилення для обох підходів до реєстрації.

У Таблиці 1 представлено зведення розрахованих середньоквадратичних відхилень для моделей, створених як із використанням методу IBR, так і ICP.

Таблиця 1 – Середньоквадратичні похибки реєстрації хмар точок методами IBR та ICP для досліджуваного об’єкта

Метод	Кількість контрольних точок	СКП X (м)	СКП Y (м)	СКП Z (м)
ICP	12	0,042	0,043	0,031
IBR	12	0,027	0,025	0,025

Зважаючи на точність лазерного сканера за паспортом та здатність надійно виявляти реперні точки у його вибірках, можна констатувати, що отримані показники абсолютно збігаються з проєктними.

При цьому варто підкреслити: метод суміщення на основі зображень (IBR) виявився більш точним, аніж метод, що спирається на ітераційний алгоритм ICP.

Водночас слід підкреслити, що це випробування на практиці було цілеспрямовано організоване з метою формування обставин, які ускладнюють роботу алгоритму ICP.

Ключове завдання цієї стратегії полягало у явному виявленні сильних сторін підходу IBR у тих випадках, коли збіг (інтерференція) між

наборами точок, зібраних із суміжних позицій лазерного сканування землі, виявляється мізерним або не забезпечує стійкого вирівнювання.

Висновки

У цій бакалаврській роботі було проведено вивчення й упровадження технології прив'язування даних наземного лазерного сканування, що базується на фотограмметричній орієнтації зображень, захоплених інтегрованою у систему наземного лазерного сканування цифровою камерою.

Використаний метод реєстрації, що ґрунтується на аналізі зображень (IBR), пройшов етап апробації та детального розгляду завдяки трьом практичним експериментам, які охопили різноманітні умови збору даних та варіанти складності.

У пілотному зведенні, проведеному *in vitro* з застосуванням випробувального простору, де тривимірні координати були заздалегідь відомі, реалізовано цілковиту автономність процедури.

Маркери на візуальному матеріалі ідентифікувалися та визначалися автоматично, що уможливило незалежну фотограмметричну орієнтацію кадрів та наступне зведення суміжних точкових масивів, отриманих шляхом наземного лазерного сканування.

При цьому середня квадратична помилка зведеного масиву точок, розрахована згідно з методикою IBR, коливалася навколо позначки 3 мм, що узгоджується з прогнозованою точністю скануючого обладнання.

Друга спроба експериментального характеру імітувала типовий сценарій, що застосовувався на практиці, залучаючи природні орієнтири об'єктів та ручне визначення координат на зображеннях із точністю до половини пікселя.

Отримані дані свідчили про те, що тривимірна модель, реконструйована за допомогою підходу IBR, демонструє високий ступінь збігу з моделлю, досягнутою через використання ітеративного алгоритму ICP.

Це, своєю чергою, засвідчує ефективність методу IBR у контексті отримання даних з реальних зразків об'єктів, що становлять культурну цінність.

У рамках третього, найбільш вимогливого тесту було доведено працездатність методики IBR у випадках, коли сусідні хмари точок сканування мають невелику ступінь взаємного накладання.

Експериментальні дані засвідчили, що IBR спроможний гарантувати стійке та впевнене вирівнювання навіть за складних просторових конфігурацій, де звичні підходи, як-от ICP, схильні до деградації продуктивності.

Ба більше, з'ясовано, що метрологічні показники вирівнювання за IBR можна покращити, інтегруючи додатковий візуальний матеріал із фотограмметричних знімків у процес позиціонування.

Метод IBR, у цілому, виявився доволі швидким, надійним та дієвим замісником традиційного алгоритму ICP, особливо якщо застосовуються такі специфічні маркери, як світловідбиваючі мішені, що дає змогу довести процес вирівнювання до повної автономності.

Навіть тоді, коли жодних спеціальних об'єктів не використовується, знаходження співставних елементів на фотографіях виявляється простішим завданням і має меншу схильність до хиб, аніж спроби встановити відповідності напрямку в масивах точок, отриманих із лазерних сканерів, адже вони містять величезну кількість як просторових, так і значень інтенсивності.

У ситуаціях, де впровадження алгоритму ICP є виправданим чи обов'язковим, скажімо, коли фотометрична мережа має слабку орієнтацію, підхід IBR здатний виступити в ролі дієвого інструменту для швидкого та впевненого попереднього узгодження.

Щодо апаратури наземного лазерного сканування, яка має вмонтовані цифрові камери, метод IBR постає як слушний і цілком

реалістичний варіант для вирішення проблеми реєстрації точкових масивів, демонструючи його потенціал для майбутнього використання у сферах геодезії, документування архітектурних об'єктів та збереження культурної спадщини у цифровому форматі.

Список використаної літератури

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. Тревого І. С., Глотов В. М., Бalandюк А. В. Лазерне сканування та його застосування в інженерній геодезії // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2020. – № 1(39). – С. 34–42.
5. Третьак К. Р., Перій С. С. Використання наземного лазерного сканування для створення високоточних 3D-моделей споруд // *Геодинаміка*. – 2021. – № 2(31). – С. 76–85.
6. Глотов В. М., Марченко О. М. Фотограмметричні технології у задачах просторового моделювання // Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 256 с.
7. Перій С. С., Кучер О. В. Інтеграція даних лазерного сканування та цифрової фотограмметрії для моделювання архітектурних об'єктів // *Інженерна геодезія*. – 2022. – № 70. – С. 55–64.
8. Третьак К. Р., Смірнов В. М. Аналіз точності комбінованих методів 3D-моделювання на основі TLS та UAV-фотограмметрії // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – 2023. – Вип. 97. – С. 88–97.

9. Луманн Т., Робсон С., Кайл С., Харлі І. Фотограмметрія зблизька та 3D-зображення. – Берлін: De Gruyter, 2019. – 944 с.
10. Некс Ф., Ремондіно Ф. БПЛА для 3D-картографування: огляд // Прикладна геоматика. – 2014. – Том 6(1). – С. 1–15.
11. Грюен А. Розвиток та стан зіставлення зображень у фотограмметрії // Фотограмметричний запис. – 2012. – Том 27(137). – С. 36–57.
12. Пеші А., Касула Г., Боскі Е. Лазерне сканування веж Гарізенда та Азінеллі в Болоньї (Італія): Детальні картини деформації двох стародавніх нахилених будівель // Журнал культурної спадщини. – 2011. – Том 12(2). – С. 117–127.
13. Ремондіно Ф. Запис спадщини та 3D-моделювання за допомогою фотограмметрії та 3D-сканування // Дистанційне зондування. – 2011. – Том 3(6). – С. 1104–1138.
14. Белер В., Марбс А. 3D-скануючі інструменти // Матеріали Міжнародного семінару CIPA WG 6 зі сканування для запису культурної спадщини. – 2002. – С. 9–18.
15. Вер А., Лор У. Авіаційне лазерне сканування – вступ та огляд // Журнал фотограмметрії та дистанційного зондування ISPRS. – 1999. – Том 54(2–3). – С. 68–82.
16. Ліхті Д. Д., Гордон С. Дж., Стюарт М. Моделювання та поширення помилок у безпосередньо геоприв'язаних наземних мережах лазерного сканування // Журнал геодезичної інженерії. – 2005. – Том 131(4). – С. 135–142.
17. Раббані Т., ван ден Хойвель Ф., Воссельман Г. Сегментація хмар точок з використанням обмеження гладкості // Міжнародний архів фотограмметрії, дистанційного зондування та просторової інформаційної науки. – 2006. – Том 36. – С. 248–253.
18. Вестобі М. Дж., Брасінгтон Дж., Глассер Н. Ф., Хамбрі М. Дж., Рейнольдс Дж. М. Фотограмметрія структури з руху: недорогий,

ефективний інструмент для геологічних застосувань // Геоморфологія. – 2012. – Том 179. – С. 300–314.

19. Джеймс М. Р., Робсон С. Пряма реконструкція 3D-поверхонь та топографії за допомогою камери: точність та геологічне застосування // Журнал геофізичних досліджень. – 2012. – Том 117(F3). – С. 1–17.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**«Інтеграція наземного лазерного сканування та фотограмметрії для
3D-моделювання об'єктів складної геометрії»**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____рік

(дата)

(підпис студента)