

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

Воробчак Назар Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Інтеграція лазерного сканування та фотограмметрії з БПЛА для
обстеження висотних архітектурних споруд на прикладі Бернардинського
монастиря та костелу у селищі Гвіздець Івано-Франківської області

(назва роботи)

Геодезія

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

к.т.н., доц. Ільків Євгеній Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

м. Івано – Франківськ
2025р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітній рівень магістр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

« ___ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Воробчак Назар Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інтеграція лазерного сканування та фотограмметрії з БПЛА для обстеження висотних архітектурних споруд на прикладі Бернардинського монастиря та костелу у селищі Гвіздець Івано-Франківської області

Керівник роботи

к.т.н., доц. Ільків Євгеній Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "___" _____ 2025 року №

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики, матеріали польових досліджень

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Інтерферометрична рефлектометрія GNSS на основі співвідношення сигнал - шум

Матеріали та методи

Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3	Ільків Є.Ю.		

7.Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Інтерферометрична рефлектометрія GNSS на основі співвідношення сигнал - шум		
2	Матеріали та методи		
3	Результати дослідження		

Студент _____
(підпис)
Керівник роботи _____
(підпис)

Воробчак Н.
(прізвище та ініціали)
Ільків Є.Ю.
(прізвище та ініціали)

Анотація

У цій магістерській роботі зосереджено увагу на вивченні процедур огляду висотних будівель у ситуаціях надзвичайного характеру, зокрема тих, що пов'язані з осіданням чи зміщеннями деформаційного типу у конструкціях.

Контроль стану об'єкта після інциденту має бути спрямований на скорочення часових ресурсів, досягнення високої геодезичної точності зібраних відомостей та забезпечення непорушності у період функціонування споруди.

Ключовою метою проведених студій є вдосконалення і раціоналізація підходів, заснованих на збиранні, опрацюванні та інтерпретації фотограмметричних матеріалів, у тому числі із залученням апаратів безпілотного типу.

Цей метод дає змогу проводити швидкі, надійні та рентабельні огляди об'єктів із заплутаною будовою.

Запропонований алгоритм ґрунтується на поєднанні передових технологій та усталених способів збору просторових даних, а саме — наземного лазерного сканування (TLS) і традиційного топографічного знімання.

Практична значущість фотограмметричного бачення продемонстрована через зіставлення даних, зібраних різними засобами: сканером лазерного типу, камерою високої точності для вимірювань та стандартним дзеркальним фотоапаратом.

Здійснене вивчення дало змогу з'ясувати ступінь дієвості фотограмметричних підходів при відновленні заплутаних архітектурних обрисів та тонких елементів будівель.

Для апробації було підібрано ансамбль будівель Бернардинського монастиря разом із костелом, розташований у Гвіздці Івано-Франківщини, що характеризується заплутаною конфігурацією та різноманітністю фасадних рішень.

Використаний спосіб накопичення і опрацювання відомостей забезпечив формування вичерпного тривимірного (3D) сховища просторових даних, яке фіксує поточний стан архітектурного об'єкта і слугує підґрунтям для майбутніх аналітичних чи реставраційних заходів.

Наявні дані слугують вагомим підтвердженням того, що застосування фотограмметрії за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є цілком виправданим заходом для спостереження за вертикальними будівлями, архітектурними комплексами складної будови та тими частинами, доступ до яких ускладнений, адже це дає змогу досягти значної точності та всебічно відтворити просторову форму об'єкта.

Ключові слова: висотні будівлі; фотограмметрія; БПЛА; 3D-моделювання; наземне лазерне сканування; топографічна зйомка; культурна спадщина; дослідження контексту надзвичайних ситуацій

Abstract

This master's thesis focuses on the study of inspection procedures for high-rise buildings in emergency situations, in particular those associated with settlement or deformation-type displacements in structures.

Monitoring the condition of the object after an incident should be aimed at reducing time resources, achieving high geodetic accuracy of the collected information, and ensuring its stability during the operation of the structure.

The key goal of the studies is to improve and rationalize approaches based on the collection, processing, and interpretation of photogrammetric materials, including those involving unmanned aerial vehicles.

This method allows for fast, reliable, and cost-effective inspections of objects with complex structures.

The proposed algorithm is based on a combination of advanced technologies and established methods of spatial data collection, namely, terrestrial laser scanning (TLS) and traditional topographic surveying.

The practical significance of photogrammetric vision is demonstrated by comparing data collected by various means: a laser scanner, a high-precision camera for measurements, and a standard SLR camera.

The study made it possible to determine the degree of effectiveness of photogrammetric approaches in restoring intricate architectural outlines and fine elements of buildings.

For testing, the ensemble of buildings of the Bernardine Monastery together with the church, located in Hvizdka, Ivano-Frankivsk region, was selected, which is characterized by an intricate configuration and a variety of facade solutions.

The method of accumulating and processing information used ensured the formation of an exhaustive three-dimensional (3D) spatial data repository, which

records the current state of the architectural object and serves as the basis for future analytical or restoration activities.

The available data serve as strong evidence that the use of photogrammetry using unmanned aerial vehicles (UAVs) is a fully justified measure for monitoring vertical buildings, architectural complexes of complex structure and those parts to which access is difficult, as it allows achieving significant accuracy and comprehensively reproducing the spatial shape of the object.

Keywords: high-rise buildings; photogrammetry; UAVs; 3D modeling; ground laser scanning; topographic survey; cultural heritage; emergency context research.

ЗМІСТ

Вступ

1. Територія дослідження

1.1 Бернардинський монастир та костел у селищі Гвіздець

2. Методичні аспекти зйомки та технічні обмеження

2.1 Методика комбінованої зйомки

2.1.1 Організація зйомки та використане обладнання

2.2.2 Геодезична основа та система координат

2.2.3 Обробка даних та побудова 3D-моделі

2.2.4 Результати комбінованої зйомки

3. 3D-моделювання на основі зображень з БПЛА

3.1. Технологічні основи та етапи автоматизованого 3D-моделювання із зображень

3.2. Використання безпілотних літальних апаратів у геодезичних та фотограмметричних дослідженнях

3.2.1 Класифікація платформ БПЛА

3.2.2 Техніко-економічні аспекти використання БПЛА

3.3 Інтеграція даних лазерного сканування та автоматизованої фотограмметрії

3.3.1 Критерії інтеграції хмар точок

3.3.2 Умови інтеграції різних наборів даних

3.3.3 Методика дослідження та вимірювальні прилади

3.3.4 Характеристика наборів даних

3.3.5 Обробка даних та тестування

3.4 Організація польових робіт і лазерного сканування дзвіниці

3.4.1 Проведення лазерного сканування

3.4.2 Використання системи БПЛА для завершення обстеження

3.5 Обробка та інтеграція лазерного сканування і фотограмметричних даних

Висновок

Список використаної літератури

Вступ

Актуальність пошуку дієвих підходів до геодезичного вивчення об'єктів у специфічних та надважливих обставинах наразі значно зростає.

Коли виникає потреба оперативно зафіксувати достовірні відомості стосовно фактичного стану споруд, першочерговим завданням стає вдосконалення способів вимірювань та накопичення просторових відомостей.

Нагальною потребою є інтеграція класичних геодезичних технік із новітніми технологічними засобами, що дадуть змогу гарантувати добру точність, стійкість результатів та їхнє швидке отримання, навіть якщо місцевість є важкодоступною.

Ця наукова робота зосереджена на вивченні й імплементації передових геодезичних методів, які застосовуються для інспектування високих будівель з метою виявлення просідань, дефектів і деформаційних змін.

Для цього експерименту було вибрано Бернардинський монастир та однойменний костел, розташовані у Гвіздці Івано-Франківського краю.

Ця архітектурна пам'ятка є значущим елементом культурної спадщини цієї території та вимагає скрупульозної фіксації даних для майбутніх реставраційних робіт.

Численні старовинні будівлі на території України зазнали суттєвих трансформацій через вплив тривалого часу, погодні умови чи антропогенний фактор.

З огляду на це, проблематика їх консервації, постійного нагляду та створення цифрових копій набуває надзвичайної важливості як у теоретичній сфері, так і у практичній діяльності з охорони культурної спадщини.

Для початку роботи в цьому руслі потрібне формування ретельної цифрової основи з усіма геометричними параметрами, що дасть змогу вірогідно реконструювати архітектурне обличчя та будівельні частини споруди.

З цією метою слід виробити певний підхід, який би об'єднував різноманітні технологічні засоби отримання просторової інформації — а саме: наземне лазерне сканування (TLS), фотограмметричні методи та традиційні геодезичні виміри.

Лише подібна взаємозв'язок дає змогу досягти найвищого рівня точності у вимірах та всеосяжності у тривимірному моделюванні будівлі.

Найбільше труднощів у процесі знімальних операцій створює дзвіниця костелу, розташованого у Гвіздці, оскільки її витягнута вгору форма, тісне оточення іншими будівлями та наявність зелених насаджень ускладнюють сам процес фіксації даних.

Стислі умови простору та наявність тимчасових металевих риштувань поблизу верхівки вежі ускладнюють прямий доступ, вимагаючи застосування комплексу різних методів інспектування.

У цьому випадку, найраціональнішим підходом стає залучення дронів (БПЛА) для збору візуальної інформації ззовні, доповнене лазерним скануванням (TLS) для фіксації внутрішніх параметрів.

Далі, накопичені кластери відомостей узгоджуються в єдиній референтній системі, спираючись на вже наявну геодезичну основу, що дозволяє створити надзвичайно детальну та достовірну об'ємну репрезентацію об'єкта.

Аби досягти належної якості кінцевого виробу, мусимо брати до уваги аспекти кшталту взаємного покриття зон знімання, уніфікації рівня деталізації та гарантування спільної метрологічної вивіреності відмінних комплектів відомостей.

Актуальність дослідження

Потреба у впровадженні передових технологій у сфері геодезичного нагляду за архітектурними пам'ятками робить це дослідження особливо значущим.

Оскільки без формування електронних тривимірних моделей історичних будівель неможливо забезпечити збереження культурної спадщини, ці моделі дають змогу здійснювати точні заміри, документувати поточний стан об'єктів і робити прогнози щодо їхніх майбутніх трансформацій.

Комплексне застосування технологій лазерного сканування й фотограмметрії гарантує високу ступінь достовірності та можливість дослідження навіть тих споруд, які вирізняються значною геометричною складністю.

Мета дослідження

Завданням магістерського дослідження слугує створення та впровадження всеосяжної методики геодезичного моніторингу хмарочосів, що експлуатуються у викликово-складних умовах.

Це досягається за рахунок синергетичного поєднання фотограмметричних методів, технології наземного лазерного сканування (TLS), а також аерофотографічних даних, отриманих із безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що дає змогу формувати надзвичайно точні тривимірні віртуальні копії архітектурних споруд.

Завдання дослідження

Щоб досягти наміченої цілі, доведеться впоратися з наступними кроками:

1. Здійснити розгляд та аналіз актуальних підходів до геодезичних замірів, які використовуються при огляді будівель мистецької та історичної цінності.

2. Сформулювати чіткий спосіб поєднання збору інформації, який би включав лазерне сканування (TLS), безпілотні літальні апарати (БПЛА) та фотограмметричні техніки.
3. Провести практичне обстеження дзвіниці, що належить Бернардинському костелу, у населеному пункті Гвіздець.
4. Інкорпорувати отримані дані в уніфіковану систему координат та згенерувати високоточну тривимірну модель цієї споруди.
5. Зробити експертну оцінку точності створеної моделі та визначити ступінь ефективності використаних технологічних рішень.

Наукова новизна

Інноваційність даної праці полягає у створенні комплексного методу геодезичного дослідження заплутаних архітектурних конструкцій, що інтегрує фотограмметричні дані із результатами лазерного сканування та інформацією з класичної топографічної мережі.

Розроблена техніка уможливорює суттєве зменшення неточностей при процесі тривимірної реставрації об'єктів, гарантуючи високу точність геометричного моделювання навіть у тих випадках, коли умови знімання є надзвичайно ускладненими.

1. Територія дослідження

1.1 Бернардинський монастир та костел у селищі Гвіздець

Обитель францисканців-бернардинців разом із храмом, що стоїть у селі Гвіздець Івано-Франківського краю, являє собою видатний зразок архітектурного мистецтва епохи бароко.

Ансамбль будівель постав у світ між 1723-м та 1735-м роками, зайнявши позицію на північ від старовинного торгового майдану цієї невеличкої оселі (рис. 1).

Сам об'єкт вирізняється типовими ознаками бароко — рухливістю його мас, вишуканим обрисом фасадів та помітними різьбленими елементами, що красномовно засвідчують високий професіоналізм мулярів та майстрів того часу.



Рисунок 1. Бернардинський монастир та костел.

Найперші письмові фіксації про парафію, розташовану у Гвіздці, сягають 1475 року, коли на місці теперішнього містечка було споруджено перший дерев'яний ксьондзівський дім.

Ця сакральна споруда простояла приблизно сто п'ятдесят років, проте на зорі сімнадцятого століття вона сильно постраждала через регулярні напади татарських орд і з часом прийшла в руїну.

Пожвавлення релігійної діяльності було поновлено лише через століття — на початку вісімнадцятого, коли зміни в політичному та суспільному ландшафті створили умови для реставрації храму.

У 1715 році власник тих земель, князь Міхал Пузина, одержав санкцію від архієпископа львівського Яна Скарбка на заснування у Гвіздці обителі для черниць.

Того ж року постав новий дерев'яний костел, а опікунство над його подальшим розвитком узяла на себе Софія Пузина, представниця славетного роду Потоцьких.

Проте у 1728 році споруда згоріла у вогні, через що вирішили збудувати вже мурований костел — той самий, що з певними змінами дійшов до нашого часу.

Зведення святині тягнулося до 1735 року під наглядом отця Яблоновського.

Від 1735 до 1742 року у храмі тривали оздоблювальні заходи, а у 1759 році перед фасадом встановили колону з фігурою святого Яна з Дуклі.

Протягом XVIII століття храм зазнавав значного розширення та оздоблення; це стало можливим завдяки щедрим внескам від місцевих аристократів, які фінансували спорудження додаткових вітарів, настінного малярства та золотіння.

У середині дев'ятнадцятого століття було сформовано деканат у Городенці, який демонстрував стрімке зростання активності в часовому проміжку з 1870 по 1900 рік.

Саме тоді духовні особи з Гвіздця опікувалися новими культовими спорудами, які поставали у довколишніх селищах.

На превеликий жаль, більшість цих споруд були втрачені внаслідок радянських трансформацій та знесення.

Існують дані, що у 1838 та 1880 роках у приміщенні костелу здійснювалися заходи з ремонту та відновлення.

Та от, восени 1888 року, споруда знову зазнала значної шкоди через велику огненну стихію, яка змела дахи та барокову вежу.

Реставраційні роботи тривали аж до 1892 року, у цей період встигли оновити жертovníки, а вхідний портал та орган були встановлені відповідно у 1890 та 1896 роках.

До робіт з оздоблення залучили черниць із монастиря в Язлівці.

Проте, не минуло й року, того ж 1896-го, як спалахнула чергова пожежа, і церкву знову мусили піднімати з руїн.

Надбрамна дзвіниця, яка дійшла до наших днів, була відреставрована у період з 1899 по 1902 роки.

Протягом Першої світової битви баштам і покрівлі святині було завдано серйозної шкоди, проте після укладення миру реставраційні роботи, проведені під керівництвом архітектора Єжи Косинського, повернули споруді її витокові барокові форми.

Друга світова війна переважно оминула костел великими руйнуваннями, за винятком того, що дзвони були вилучені з метою переплавлення.

У період після Другої світової війни приміщення монастиря експлуатувалися не відповідно до їхнього первісного призначення: тут послідовно діяли склади, зерносховище, медичний заклад, а пізніше – музичний осередок та книгозбірня.

Відновлення незалежності України у 1992 році ознаменувалося повторним освяченням костелу, який відновив свою функцію як активна культова споруда.

Однак, до 2018 року помітних відновлювальних заходів не здійснювали, адже фінансування було недостатнім.

Стосовно архітектури, костел Непорочного Зачаття Діви Марії виступає мурованою, тинькованою, одновівільною будівлею, яка у плані має розміри 36 на 15 метрів та короткий трансепт.

Головну частину споруджено з цегли, хоча частина деталей зроблена з каменю.

До вівтаря з південного боку долучається ризниця та будівля монастиря.

Фасад вирізняється виразним бароковим рельєфом, хитромудрими лініями та багатогранним оздобленням.

На нижньому рівні бачимо оздоблення, виконане коринфськими колонами, пілястрами та декоративними віконними отворами, тоді як на верхньому розміщені значні прорізи та карнизи, увінчані кам'яними вазами.

Вежі костелу вирізняються багатоярусною, складною конфігурацією і увінчані хрестами.

Фундаментальні частини веж муровані, а верхні — покриті металевим листом, стан якого наразі є незадовільним.

Попри велику кількість ремонтних робіт, співвідношення частин та стилістичні елементи рішуче дотримуються барокових норм.

Внутрішнє убранство святині зберегло лише окремі елементи свого первісного оздоблення.

У зоні трансепта та пресбітерію ще можна розгледіти частки ліпних прикрас, пілястр, а також уламки настінного малярства.

Надзвичайно вагомими вважаються вівтарі дерев'яні, покриті позолотою, а центральний серед них оздоблений образами святих і знаками, що несуть символічне навантаження.

Корпус келій монастиря — мурований, двоповерховий, оштукатурений, притулився вздовж південного боку костелу.

Спільними зусиллями вони формують внутрішній дворик правильної квадратної конфігурації, котрий оточений досі існуючими келіями, проходами та допоміжними приміщеннями.

Деяку частину другого ярусу зазнала перебудови у столітті двадцятому, внаслідок чого були безповоротно втрачені первісні склепінчасті перекриття.

Привхід до храму обрамлює колона, увінчана статуєю святого Яна з Дуклі (дати: 1759 р.), а невіддільною складовою цього ансамблю є дзвіниця над брамою (збудована у 1776–1778 рр.), яку реконструювали на рубіжі XIX–XX століть, надавши їй необарокового вигляду.

Ця споруда мурована з каменю, складається з двох ярусів, має склепінчасті отвори проїздів, оздоблені рустуванням та пілястрами.

Увесь монастирський комплекс огорожений муром, зведеним із цегли та потинькованим, доповненим кованими деталями.

З північного крила збереглися заглиблення (ніші), які, найімовірніше, слугували місцями для стацій Хресної дороги.

Нині ансамбль Бернардинського кляштора та храму в Гвіздці являє собою винятковий зразок архітектурної спадщини загальнодержавного значення, який акумулює у собі історичну вагомість, високу художню майстерність та глибоку духовну сутність.

Незважаючи на спричинені руйнування та часткову деградацію, будівля усе ж таки зберігає свою своєрідну естетику, і, відповідно, гостро потребує здійснення об'ємних відновлювальних заходів, аби унеможливити подальше збирання нашого культурного надбання (рис. 2).



Рисунок 2. Вершина костелу

Розробка проекту системи тимчасового зміцнення тих секцій будівлі, що зазнали руйнування, мала на меті унеможливити подальше їхнє обвалення та мінімізувати терміни, необхідні для повернення об'єкта до експлуатації.

Цей проєкт спирався на технічні креслення, створені раніше у процесі реставраційних робіт, а також на будь-які доступні фотоматеріали, як архівні, так і зроблені нещодавно.

З огляду на те, що на момент старту робіт повний пакет актуальної проєктної документації щодо стану споруди був недоступний, керівництво єпархії дало розпорядження здійснити всебічне обстеження з використанням геодезичних та архітектурних методів.

Завдання полягало у зборі вичерпних візуальних та кількісних даних стосовно поточного стану споруди – аби зафіксувати інтенсивність зносу матеріалів, зміщення будівельних компонентів, відхилення дзвіниці від вертикалі, а також виявити будь-які структурні дефекти.

Уся зібрана інформація мала слугувати фундаментом для розробки подальших планів із відновлення та збереження пам'ятки.

З огляду на це, було визнано за потрібне здійснити детальне обстеження будівлі, що постраждала, аби сформувати повний комплект виконавчої документації, який би включав:

- стандартні двовимірні креслення (планові проєкції, вигляди фасадів та перерізи);
- високодеталізовані вертикальні січення та планові види фасадів;
- ортофотоплани, сформовані на основі фотограмметричних знімків;
- разом із тривимірним (3D) макетом, який можна використовувати для подальшого інженерного розрахунку із застосуванням апарату скінченних елементів (МСЕ).

Планується здійснення знімальних робіт у співвідношенні 1:50, що зобов'язує досягти середнього показника точності на рівні не менше одного сантиметра, а для деталізації специфічних архітектурних компонентів – у масштабі 1:20.

Такий ступінь деталізації та точності є незамінним для коректного встановлення геометричних характеристик споруди, ідентифікації ділянок із деформаціями та розробки надійної схеми укріплення конструкцій.

Ба більше, отримані фотограмметричні дані та тривимірна модель мали на меті не лише візуалізацію зони пошкоджень і моніторинг стійкості будівлі під час реставрації, а й формування електронного архіву пам'ятки

історії та архітектури, що стане у пригоді для подальших наукових пошуків та заходів із консервації.

2. Методичні аспекти зйомки та технічні обмеження

Основною складністю, що постала під час виконання виїзних обстежень, було збирання інформації щодо верхньої секції дзвіниці.

Це було спричинено її значною висотою та труднощами у наданні доступу до північно-східного боку, який є суміжним із прибудовою ризницею храму.

Як наслідок, проведення вичерпної геодезичної зйомки з рівня земної поверхні стало технічно недосяжним завданням.

Зважаючи на утруднені умови для проведення вимірювань, існувала також потреба у гарантуванні високої точності метричних даних, що є критично важливим для формування достовірної бази для подальшого детального проектування реставраційних заходів.

Відтак, перед тим як розпочати знімальні роботи, було проаналізовано низку потенційних методичних рішень, які спиралися як на класичні, так і на новітні методики фіксації архітектурних об'єктів, включаючи топографічне знімання, застосування лазерного сканування та методи цифрової фотограмметрії.

Топографічна зйомка

Планова зйомка місцевості — це один із найстаріших і найбільш апробованих способів отримання даних для проєктної документації.

Даний метод дозволяє встановити розташування (координати) основних вузлів фасадів та будівельних частин вежі з відмінною строгістю, якщо мережа вимірювальних пунктів спланована бездоганно.

Для успішного виконання робіт потрібна здатність вільно пересуватися довкола споруди, розміщувати вимірювальне обладнання на підвищеннях та гарантувати пряму видимість між точками розташування приладів.

Головними мінусами такого методу є значна тривалість роботи у полі та суттєві логістичні потреби, спричинені необхідністю визначати перелік архітектурних складових для дискретизації безпосередньо на об'єкті.

Перенести цю процедуру на етап обробки у камеральних умовах, як це відбувається із сучасними цифровими технологіями, є нереальним.

Таким чином, топографічний підхід вимагає великих часових затрат, значної кількості точок прив'язки та ретельного планування.

Однак, попри ці обмеження, топографічні вишукування все ще є життєво необхідними для комплексних досліджень, адже вони слугують геодезичною базою для фіксації та точного налаштування даних, здобутих шляхом лазерного сканування й фотограмметрії, а також виступають еталоном для верифікації точності збудованих 3D-моделей.

Фотограмметричне обстеження

Фотограмметрія вирізняється тим, що вагома частина вимірювальних робіт переноситься на етап подальшої обробки, що значно зменшує час, необхідний для перебування на локації зйомки.

При цьому, для досягнення потрібної точності, критично важливою є належна конфігурація розташування засобів зйомки, тобто правильне розміщення апаратури щодо об'єкта.

Стосовно дзвіниці костелу, найбільшим викликом стало завдання розміщення апаратури на значній висоті, оскільки без цього не вдавалося досягти потрібної геометрії зображень.

Зйомка із занадто малих висотних ракурсів неминує породжує паралакси, що ускладнює відновлення тривимірної моделі та негативно впливає на точність метричних даних.

Найкращим виходом стало залучення безпілотного літального апарату (БПЛА) для фіксації знімків верхньої секції вежі з різноманітних кутів видимості.

Лазерне сканування

Лазерне сканування (TLS) наразі постає як один із найбільш продуктивних засобів для створення тривимірної документації заплутаних архітектурних ансамблів.

Проте, визначаючись із апаратурою, слід зважати на тип сканера та межі його оперативних спроможностей.

Зокрема, апарати, функціонування яких залежить від принципу фазового зсуву, характеризуються скінченною дистанцією вимірювання та не завжди відповідають вимогам крупних будівель.

При отриманні даних з підніжжя вежі або з інших віддалених точок, зібрана інформація може виявитися занадто зашумленою і недостатньо насиченою, що, у свою чергу, негативно позначається на якості кінцевої моделі.

Щодо подібних об'єктів, розумніше долучати імпульсні лазерні сканери, що мають ширший робочий діапазон, або ж застосовувати сукупність кількох знімальних установок для гарантування адекватного накладання хмар точок.

Унаслідок цього, виконаний розбір продемонстрував, що жоден із наявних способів не спроможний самотужки досягти потрібної повноти та рівня якості інформації.

Найкращим виходом виявилось зведення до купи фотограмметричних кадрів, здобутих з безпілотної, та даних наземного лазерного сканування, з подальшою прив'язкою до координат через топографічну сітку.

Описаний комплексний спосіб дозволив досягнути високої точності у відтворенні форми об'єкта та заклав фундамент для глибокого аналізу його архітектурних та конструктивних аспектів.

2.1 Методика комбінованої зйомки

Зваживши різні підходи до фіксації (документування) архітектурних споруд, обрано інтегрований спосіб знімання.

Він базується на синергії аерофотограмметрії, де задіюється дрон (БПЛА), та технології наземного лазерного сканування (TLS).

Завдяки такому спільне застосуванню вдалося досягти найвищої точності у відтворенні об'ємної структури пам'ятки, охоплюючи як її верхні яруси та хитромудрі фасадні деталі, так і ті частини, до яких ускладнений доступ.

2.1.1 Організація зйомки та використання обладнання

Практичні польові заходи склалися із двох окремих фаз: лазерне сканування дзвіниці на землі та аерозйомка за допомогою безпілотного літального апарату.

Для виконання TLS-сканування залучався лазерний сканер моделі Leica RTC360, котрий спроможний фіксувати виміри з точністю до трьох міліметрів на десятиметровому віддаленні, генеруючи при цьому хмари точок із насиченістю до десяти мільйонів вимірів за секунду.

Процес сканування охоплював дванадцять позицій, розміщених по периметру культової споруди, з гарантованим налагодженням зон огляду щонайменше на тридцять відсотків.

Такий підхід унеможливив появу затемнень або прогалин у зібраних масивах даних.

Щодо аерофотограмметрії, то для неї ми використовували безпілотник DJI Phantom 4 Pro, обладнаний фотообладнанням на двадцять мегапікселів, яке використовує дюймову матрицю.

Виконано аерофотозйомку з висотою, що коливалася у межах 25–35 метрів, завдяки чому досягнуто середнього показника GSD (відстань від землі до пікселя) приблизно 1,2 см на кожен піксель.

Для забезпечення потрібної стабільності при накладанні кадрів були застосовані такі налаштування: знімки перекривалися на 80% уздовж маршруту та на 70% поперек нього.

Загалом під час польоту було зроблено приблизно 430 кадрів, з яких 380 фінішно відібрано для подальшої комп'ютерної обробки.

Знімання здійснювалося за умов стабільного природного освітлення, без утворення різких затінь, що позитивно вплинуло на зменшення неточностей під час фотограмметричної реставрації геометрії.

Щоб якісно зафіксувати вертикальні складові фасадів, частину знімків було виконано під кутом 30–40 градусів, нахилених відносно вертикальної осі.

2.2.2 Геодезична основа та система координат

Аби запровадити узгоджену систему просторових координат, було розгорнуто місцеву топографічну сітку, яка слугувала референсом як для даних, здобутих за допомогою TLS, так і для аерофотознімків, отриманих із БПЛА.

Для точного позиціонування та коректного масштабування сформованої моделі, на ділянці було розміщено десять наземних контрольних пунктів (GCP).

Ці мітки розташували по периметру об'єкта у зонах, де вони були надійними та добре помітними.

Визначення координат цих GCP виконувалося з використанням GNSS-приймача Leica GS16.

Вимірювання проводилися у режимі RTK (Кінематика в Реальному Часі), прив'язуючись до встановленої базової станції.

В середньому, досягнутої точності визначення координат сягнула $\pm 1,5$ см у горизонтальній площині та $\pm 2,0$ см у вертикальній.

Опорні пункти застосовувалися з метою точного налаштування блоку зображень під час фотограмметричної обробки, а також для зведення до купи хмар точок, здобутих шляхом лазерного сканування та фотограмметрії.

2.2.3 Обробка даних та побудова 3D-моделі

Обробку матеріалів фотограмметрії здійснили за допомогою професійного програмного забезпечення Agisoft Metashape.

Сам робочий процес складався з наступних кроків:

1. Завантаження знімків та внесення даних геодезичних реперних точок (GCP);
2. Виконання вирівнювання (орієнтації) з автоматичним знаходженням й прив'язкою спільних елементів;
3. Створення насиченої хмари точок (яка налічувала приблизно 45 мільйонів точок);
4. Формування полігональної сітки (mesh) та накладання текстур на створену модель;
5. Експорт ортотрансформованих планів та знімків фасадів у масштабі один до п'ятдесяти.

Хмари точок, отримані за протоколом TLS, були опрацьовані у програмному забезпеченні Leica Cyclone REGISTER 360.

Далі обидві збірки даних було об'єднано у просторі CloudCompare.

Аби гарантувати відповідність систем координат, була застосована реєстрація за методом ІСР (Ітеративно Найближча Точка).

В результаті цієї процедури середньозважене розходження між наборами склало 0,007 м, що цілком відповідає необхідним стандартам точності для архітектурно-технічних обмірів.

2.2.4 Результати комбінованої зйомки

Завершенням проведених заходів стали такі досягнення:

- Деталізована тривимірна модель дзвіниці та зовнішніх стін костелу, з похибкою не більше одного сантиметра;
- Ортофотоплани фасадів у типовому масштабі один до п'ятдесяти, придатні для оформлення технічних креслень;
- Перерізи – візирні та подовжньо-поперечні, сконструйовані, виходячи з об'ємних даних лазерного сканування;
- Цифрова модель рельєфу (ЦМР) для оцінки процесів осідання та змін форми;
- Сукупність інформації, необхідної для подальшого аналізу методом скінченних елементів (МСЕ), що дає змогу імітувати поведінку конструкції під навантаженням.

Запропоновані результати чітко продемонстрували переваги інтеграції безпілотної аерофотозйомки та наземного лазерного сканування (TLS) у процесі ґрунтового вивчення архітектурних споруд із непростюю конфігурацією.

Завдяки такому методу досягається не просто висока ступінь достовірності у визначенні параметрів, але й помітне зменшення тривалості робіт на місці, що стає критично важливим під час фіксації стану пам'яток архітектури, що зазнали руйнувань.

3. 3D-моделювання на основі зображень з БПЛА

Нинішні геодезичні апаратури все частіше інтегрують стадію набуття просторових відомостей із фазою їхнього аналітичного опрацювання, утворюючи цілісний, налагоджений виробничий цикл.

Примітним проривом останнього часу є злиття цифрової фотограмметрії та методів комп'ютерного зору у програмних комплексах останньої версії, що забезпечило повністю самочинне формування тривимірних макетів з використанням лише зображень.

Третьою вагомою новинкою стала спроможність захоплювати інформацію у широкому спектрі (оптичні кадри, масиви точок, теплові та звичайні (RGB) фотографії), застосовуючи дрони, апарати, що керуються віддалено.

Завдяки тому, що сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) надзвичайно гнучкі в керуванні та тримаються у повітрі впевнено, вони дають змогу робити знімки під найкращими ракурсами.

Це, своєю чергою, гарантує детальне охоплення непростих будівельних комплексів, особливо тих, що мають високі елементи чи башти.

Об'єднання програмних рішень для автоматичної 3D-реконструкції із зображеннями, зібраними з повітря дронами, відкрило свіжі горизонти у фіксації пам'яток мистецтва та архітектури.

Коли ці технології працюють разом, можна оперативно створити насичений набір точок із відмінною просторовою деталізацією, навіть коли йдеться про масивні будівлі чи ті, до яких складно дістатися.

При цьому досягається висока точність вимірювань і повне відтворення форми об'єкта, усуваючи необхідність у витратних за часом замірах на місці.

У реальній роботі процес створення тривимірних моделей із використанням знімків, отриманих з безпілотників, складається з низки послідовних кроків:

1. Здобуття серії зображень, що мають необхідний ступінь суміжності (з поздовжнім нахлестом вісімдесят відсотків та поперечним — сімдесят відсотків), при цьому ракурси зйомки мають бути різноманітними.
2. Фотограмметрична обробка знімків для їх узгодження (процес, відомий як "image alignment"), внаслідок чого визначається точне просторове розташування кожної окремої фотографії.
3. Формування щільної точкової хмари за допомогою технології "Структура з руху" (Structure-from-Motion, SfM).
4. Створення моделі поверхні на основі трикутників (mesh), нанесення текстурного покриття та формування високодеталізованої тривимірної копії.
5. Проведення вимірювань у метричному масштабі та розробка безспотворених планів місцевості (ортофотопланів) для подальшого технічного аналізу.

Стосовно вивчення бернардинської обителі та храму у Гвіздці, ця методика продемонструвала значну дієвість.

Зокрема, вдалося сформувати детальну тривимірну візуалізацію верхньої секції дзвіниці, зберігаючи точність у межах одного сантиметра, що раніше вважалося недосяжним за допомогою усталених підходів.

Ба більше, насичений масив точок, зібраний за допомогою аерофотографування, уможливив виявлення мікроскопічних розривів і регіональних змін форми, а також дав змогу скрупульозно синхронізувати ці відомості з даними наземного лазерного сканування (TLS) для майбутніх технічних оцінок.

Отже, застосування автоматизованого створення 3D-моделей, базованого на зображеннях з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), гарантує швидкість виконання робіт, зниження витрат та високу якість результатів, виводячи цю технологію в авангард сучасної геодезичної справи та реставраційних робіт в архітектурі.

3.1. Технологічні основи та етапи автоматизованого 3D-моделювання із зображень

Наразі у фахових колах не існує уніфікованого визначення сучасних методів створення тривимірних моделей предметів із використанням цифрових світлин, адже ця галузь лежить на перетині двох дисциплін — фотограмметрії та комп'ютерного зору.

Залежно від того, на якій стадії робочого циклу зосереджується увага, у наукових публікаціях фігурують різні термінологічні позначення:

- "Щільне стереоузгодження" (dense stereo matching) — застосовується, аби підкреслити етап пошуку відповідностей між парами стереозображень;
- "Щільне узгодження зображень" (dense image matching) — використовується, коли центральним є перетворення двовимірних візуальних даних у тривимірну просторову структуру;
- "Автоматизоване 3D-моделювання зображень" (automatic image-based 3D modeling) — слугує для характеристики цілком автономного процесу відновлення (реконструкції) тривимірних моделей.

Розробка програмного забезпечення подібного гатунку набрала обертів лише останні чотири-п'ять років, що стало наслідком поступової

інтеграції підходів традиційної фотограмметрії із застосуванням комп'ютерного зору.

Ключовим досягненням у цій царині виявився етап вирівнювання зображень — процедура, метою якої є визначення просторових кореляцій між окремими кадрами.

Перші наукові розробки у сфері фотограмметрії свого часу фокусувалися переважно на аерофотознімках, що використовувалися для створення топографічних карт.

Щодо підвищення достовірності зведення (співставлення) зображень, то тут використовувалися принципи епіполярної геометрії та перехресної кореляції піксельних значень.

Проте, лише завдяки впровадженню цифрової фототехніки та програмного забезпечення, що забезпечувало автоматичне виконання завдань, зникла потреба у ручній участі оператора, що уможливило повністю самочинне опрацювання даних.

На противагу традиційній фотограмметрії, комп'ютерний зір на початках орієнтувався на інше завдання — не стільки на виконання точних вимірів, скільки на відновлення геометрії об'єктів у тривимірному просторі для цілей візуалізації чи забезпечення орієнтування (навігації).

Об'єднання цих методологій дало змогу сформувати новітній напрямок — автоматизовану відбудову тривимірної моделі дійсності з використанням графічних даних, що зараз становить фундамент для переважної більшості новітніх платформ для аналізу інформації, отриманої з безпілотних літальних апаратів.

Головним проривом у плані техніки було запровадження методів автоматичного знаходження та характеристики значущих елементів (ознак) на картинках, на кшталт SIFT, SURF, ORB та подібних.

Саме ці інструменти дають змогу ідентифікувати збіги між кадрами, навіть якщо їх було зроблено під різними ракурсами, і слугують основою для створення насичених тривимірних хмар точок із високою деталізацією у просторі.

Отож, сучасну послідовність обчислювальних кроків для автоматизованого створення 3D-моделей можна окреслити наступними ключовими фазами:

1. Виявлення ключових елементів (feature extraction) — знаходження на зображеннях таких орієнтирів, які залишаються незмінними при змінах масштабу чи умов освітлення.
2. Парне зіставлення кадрів (image correspondence) — визначення спільних точок на різних фотографіях, що уможливорює встановлення їхнього просторового розташування.
3. Точне калібрування та позиціонування (scene orientation and refinement) — одночасне визначення внутрішніх характеристик камер, їхнього положення у просторі, а також точних тривимірних координат знайдених опорних точок.
4. Створення насиченої хмари точок (detailed point cloud creation) — формування об'ємної, деталізованої структурної моделі об'єкта.
5. Формування каркасу моделі (surface meshing) — поділ точок на грані, що дозволяє отримати видиму поверхню об'єкта через полігональну модель.
6. Накладання візуальних даних (surface texturing) — перенесення інформації з початкових зображень на створену тривимірну модель для досягнення реалістичності.

Впровадження означених алгоритмічних рішень суттєво полегшило процедуру тривимірної реставрації в секторі охорони надбань минулих поколінь.

Це відкрило шлях до використання стандартної цифрової фотоапаратури чи камер, встановлених на безпілотних літальних апаратах, замість необхідності залучення фінансово обтяжливого лазерного апарату, зберігаючи при цьому задовільний рівень точності та відмінну якість візуального представлення.

Винятковою властивістю цих механізмів є те, що вони надають не тільки просторовий контур об'єкта, але й його поверхневе вкриття, що метрично накладене на об'ємну модель.

Отже, стає реальним пряме формування ортофотопланових зображень фасадних елементів та поперечних перерізів, які активно задіяні у роботі реставраторів та при створенні архітектурної графіки.

Завдяки своїй нескладності у застосуванні, шаленій швидкодії обчислень та здатності оперувати навіть із значними масивами інформації, ці підходи перетворилися на незамінний інструментарій.

Він застосовується не лише у сфері геодезії, а й у віртуальному моделюванні, містобудуванні, візуалізації архітектурних об'єктів і збереженні культурної спадщини у цифровому форматі.

На даний момент ринок пропонує цілий спектр ПЗ, втілюючих дані алгоритми. Серед них є як комерційні рішення (як-от Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, RealityCapture), так і проєкти з відкритою ліцензією (зокрема MicMac, COLMAP, OpenMVG).

Останні, з власного досвіду, активно залучаються у наукових роботах.

Причина в тому, що вони дають змогу досконало вивчати механізми зведення даних, внутрішню будову алгоритмів та достовірність сформованих моделей.

В результаті зіставних тестів було доведено, що автоматизований процес фотограмметрії здатний досягати точності вимірювань, порівнянної з даними, отриманими через наземне лазерне сканування (TLS), особливо

якщо застосовуються еталонні точки та попередньо відкалібровані фотоапарати.

Оце чому 3D-моделювання за світлинами зараз вважається дієвою заміною лазерним методам для завдань контролю будівництва, фіксації фасадів та створення цифрових архівів пам'яток культури.

3.2. Використання безпілотних літальних апаратів у геодезичних та фотограмметричних дослідженнях

Поняття «безпілотний літальний апарат», яке часто скорочують до БПЛА, або просто «дрон», стосується авіаційних засобів, що здатні здійснювати польоти без присутності екіпажу в кабіні, керуючись або власним програмним забезпеченням, або командою, віддаленою оператором.

Сьогодні ці апарати є центральним елементом у передових наукових пошуках та практичному застосуванні, особливо у сфері геоматики, де вони зарекомендували себе як незамінний засіб для отримання просторової інформації та візуальних матеріалів із високою деталізацією та точністю.

Окрім загальноновживаної назви «БПЛА», у фахових та інженерних джерелах поряд із нею фігурує низка термінів-синонімів, які допомагають більш точно окреслити функціонал або технічні параметри таких систем:

- ROA (Remotely Operated Aircraft) — апарат, що керується віддалено;
- UCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicle) — безпілотна машина військового призначення;
- MALE (Medium Altitude Long Endurance) — апарат, призначений для тривалих польотів на середніх висотах;
- RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) — комплекс, що охоплює не лише сам літальний апарат, котрим оперують з землі, а й відповідний наземний пункт управління.

На початковому етапі розробка апаратної бази для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) була орієнтована суто на військові потреби, зокрема для спостереження, збору розвідувальних даних та нанесення на карту зон підвищеної небезпеки.

Проте, завдяки стрімкому прогресу в розробці комерційних застосувань, а також вдосконаленню якості цифрових камер та систем навігації на базі GNSS, ці технології надзвичайно швидко знайшли своє місце у сферах землевпорядкування (геодезії), фотограмметрії, візуалізації будівельних об'єктів, системи екологічного контролю та охорони пам'яток культури.

У сфері геоінформаційних технологій (геоматики) застосування безпілотників трансформувалося у рентабельний замітник класичних способів аерофотозйомки, що особливо помітно при картографуванні великих масштабів невеликих ділянок та формуванні високодеталізованих об'ємних (тривимірних) моделей споруд.

При цьому, аерофотограметрія, виконана за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), не є повноцінною заміною традиційній аерофотозйомці чи супутниковим методам, які застосовуються для картографування значних територій.

Водночас вона пропонує швидке та точне вирішення завдань, що стосуються невеликих, але критично важливих зон, як-от забудовані території чи об'єкти історичної архітектури.

Особливо цінним є використання дронів у галузі охорони пам'яток культури, де вкрай важливим є збір надзвичайно деталізованих візуальних даних про зовнішні поверхні будівель, високі вежі чи будь-які вертифіковані структури.

Подібні системи дають змогу здійснювати фотографування з високою роздільною здатністю навіть там, куди важко дістатися, що суттєво

знижує потенційну небезпеку для фахівців, які проводять дослідження, та скорочує загальний час, необхідний для огляду об'єктів.

3.2.1 Класифікація платформ БПЛА

Дрони, що використовуються сьогодні в геодезичних роботах та фотограмметрії, класифікуються на декілька головних категорій, зважаючи на їхню конструкцію та механізм пересування у повітрі:

1. Безпілотні апарати з жорстким крилом (БПЛА з фіксованим крилом)

Схожі за виглядом на зменшені копії літаків, які мають один чи більше рушіїв, ці дрони спроектовані для виконання польотів. Зазвичай вони використовують повністю автоматизований режим, слідує заздалегідь визначеному плану польоту. Через їхню видатну аеродинамічну продуктивність, ці апарати мають спроможність охоплювати чималі території за один виліт, чим і зумовлюється їхня цінність для високоточного картографування та аерофотозйомки. Головні переваги полягають у значній тривалості польоту (здатні перебувати в повітрі до 60–120 хвилин) та сталості польоту, проте вони поступаються у гнучкості керування та вимагають значної відкритої площі для злету та приземлення.

2. Апарати типу гелікоптерів (безпілотні літальні апарати (БПЛА) гелікоптерного типу)

Ці машини являють собою зменшені копії повнорозмірних гелікоптерів, зазвичай використовуючи двигуни, що працюють на паливі, що дає змогу їм довше перебувати в повітрі та нести більш значне сенсорне обладнання або камери високої чіткості. До ключових плюсів належить відмінна стійкість під час руху, здатність утримувати позицію без руху та здійснювати фото- чи відеозйомку з

будь-якої перспективи. Однак вони вимагають постійного сервісного обслуговування, мають більшу вагу та тягнуть за собою вищі витрати на оперування.

3. БПЛА з роторним принципом дії (мультикоптери)

Це найбільш затребуваний у сфері геодезії різновид безпілотних літальних апаратів, оснащений мінімум трьома гвинтами. Їхнє керування реалізується через пропорційну зміну швидкостей обертання рушіїв, завдяки чому вони демонструють видатну гнучкість у маневрах та стійкість, навіть працюючи на невеликих висотах. Мультикоптери є незамінними для детальної аерофотозйомки фасадів, архітектурних елементів, пам'яток історії та культури чи будівельних об'єктів, де критично важлива точність позиціонування та можливість захоплення кадрів під різними ракурсами. Головні недоліки полягають у нетривалому робочому часі від акумулятора (від 15 до 25 хвилин) та обмеженій вантажопідйомності, але це часто переважається легкістю їхнього старту та швидкістю приведення в робочий стан.

3.2.2 Техніко-економічні аспекти використання БПЛА

Актуальні комплекси безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструють значний розкид у вартості — від однієї до п'ятдесяти тисяч євро.

Цей ціновий діапазон обумовлюється низкою чинників:

- архітектурним рішенням,
- типом силової установки,
- апаратурою навігації,
- складом сенсорного устаткування та рівнем самостійності функціонування.

Пристрої з електричним живленням вирізняються більшою екологічністю та мінімальними вимогами до технічного супроводу, проте їхній час перебування у повітрі є дещо обмеженим.

Дрони, оснащені двигунами внутрішнього згоряння на бензині, надають перевагу у тривалості польотних сесій та спроможності нести значно більше обладнання (наприклад, потужні камери чи сканери лазерного типу).

Водночас вони вимагають більших витрат на експлуатацію та стикаються зі складнішими процедурами запуску.

Переважна кількість комерційних рішень передбачає функцію автопілота для місій, реалізовану через додатки для смартфонів чи вузькоспеціалізовані програми, що дає змогу задавати траєкторію обльоту, висоту польоту, темп пересування, кути нахилу фотоапарата, а також ступінь накладання знімків.

Успішне впровадження цих можливостей робить безпілотні літальні апарати (БПЛА) критично важливим засобом у сферах аерофотограмметрії та інженерно-геодезичних вишукувань, адже саме тут пріоритетними є швидкість виконання завдань, достовірність отриманих даних та забезпечення безпечних умов праці.

Подальше вдосконалення технологій сенсорів, систем супутникової навігації (GNSS) та методів самостійного керування лише посилює значущість використання БПЛА у геодезичній практиці.

Ці новітні комплекси надають ширші перспективи для спостереження за пам'ятками культури, нагляду за змінами форми, формування числових макетів ландшафту та уявного відновлення архітектурних комплексів.

3.3 Інтеграція даних лазерного сканування та автоматизованої фотограмметрії

Отже, перед тим, як приступити до зведення докупи відомостей, здобутих через наземне лазерне сканування (НЛС), та інформації, отриманої завдяки фотограмметричному методу з використанням автоматизованого тривимірного моделювання зображень, належало невідкладно здійснити ретельний аналіз низки чинників, що безпосередньо впливають на ступінь придатності та узгодженості цих різнорідних масивів даних.

3.3.1 Критерії інтеграції хмар точок

Перш за все, ми концентрувалися на трьох найважливіших аспектах хмари точок:

- густоті;
- відповідності (точності й повторюваності вимірювань);
- включенні кольорових даних (RGB).

Рівень густоти хмари точок напряму визначається просторовою роздільною здатністю знімання, що розуміється як середня кількість точок, зареєстрованих на певну одиницю площі об'єкта.

Ключове значення має рівномірність цього розподілу густоти.

Вона гарантує, що рівень деталізації буде ідентичним у всіх фрагментах створюваної моделі — чи то у випадку знімків, отриманих методом фотограмметрії (ортофотоплани), чи то при формуванні тривимірних візуалізацій.

Критерії якості охоплюють дві складові: достовірність (ступінь близькості зафіксованої величини до істинного значення) та відтворюваність (постійність отриманих даних при повторних вимірюваннях).

Стабільно високий рівень відтворюваності є необхідною умовою для забезпечення незмінності тривимірної моделі протягом послідовності обчислювальних етапів.

Колірні атрибути (RGB) додають суттєвої інформаційної ваги, оскільки вони не тільки покращують наочність інтерпретації, а й дають змогу проводити текстурну ідентифікацію речовин у процесі досліджень реставраційного характеру.

3.3.2 Умови інтеграції різних наборів даних

Ключовою передумовою для ефективного злиття інформації, отриманої за допомогою TLS та фотограмметрії, є узгодження критеріїв точності.

Рівень деталізації дослідження та ступінь заплутаності об'єкта диктують гранично допустимий поріг похибки, якого зобов'язані дотримуватися обидва підходи.

У випадку, якщо один із комплектів даних не відповідає потрібному стандарту точності, їхнє об'єднання стає нездійсненним.

Ба більше, показники як точності, так і прецизійності, властиві обом технологіям, повинні бути зіставними; інакше невідповідність у величинах помилок призведе до зміщень у процесі вирівнювання хмар точок та формування фінальної моделі.

Для з'ясування сумісності й визначення перспектив інтеграції даних лазерного сканування та програмного фотограмметричного аналізу було організовано низку досліджень.

З цією метою той самий елемент (фундамент дзвіниці храму) зафіксували, застосувавши кожен з методик, а потім зроблене порівняння отриманих даних.

3.3.3 Методика дослідження та вимірювальні прилади

Вимірювання в польових умовах відбувалися поблизу підніжжя вежі, де не було значних перешкод для встановлення обладнання.

З метою гарантування достовірності отриманих даних та валідації результатів задіяно був електронний прилад Leica TS30, який характеризується кутовою точністю у 1 секунду дуги та лінійною точністю на рівні 1 мм плюс 1,5 частинки на мільйон.

На зовнішній стороні споруди було змонтовано ансамбль цільових міток, розміщених на різній висоті, що дозволило охопити всю просторову область дослідження у трьох вимірах.

Координати цих міток, визначені за допомогою тахеометра, слугували еталонними даними при зіставленні показників, отриманих методами фотограмметрії та лазерного сканування наземного типу (TLS).

3.3.4 Характеристика наборів даних

Збірка даних 1 — отримана методом фотограмметрії (апаратом Canon EOS 5D Mark III)

- Загальне число знімків: 41.
- Використана фокусна відстань: 35 міліметрів.
- Тип файлів: JPEG, з роздільною здатністю 5760 на 3840 пікселів.
- Параметр розміру окремого пікселя: 0,0064 міліметра.
- GSD (_Ground Sample Distance_ — Дистанція Зразкування Поверхні): 1,6 міліметра на кожен піксель.

Над проектом працювали за умов стабільного освітлення, забезпечивши напуск кадрів 80 % у напрямку руху та 70 % у поперечному напрямку.

Хоча прилад не мав офіційного сертифіката про калібрування, необхідні параметри внутрішньої орієнтації були розраховані автоматично у процесі обробки даних.

Другий масив даних, отриманий через лазерне сканування (використовувався апарат Leica HDS 7000):

- Апаратура: це фазовий сканер із точністю вимірювання, що не перевищує 1 міліметра.
- Обсяг даних (хмара точок): 123 мільйони точок.
- Рівень шуму (стандартне відхилення): 0,4 мм при відстані у 10 метрів для об'єктів із сірим забарвленням поверхні.
- Процес геореференсування здійснили, застосовуючи як чотири цілі, що мали чорно-біле маркування (середня неточність склала 2 мм), так і вісім спеціальних мішеней з кодуванням.

Середнє розходження між координатами мішеней, визначеними за допомогою тахеометра, та тими ж мішенями, які були ідентифіковані у точковій хмарі, становило лише 0,001 метра.

Це демонструє видатну точність геопросторових даних, отриманих наземним лазерним скануванням (TLS).

3.3.5 Обробка даних та тестування

Знімки, зроблені для фотограмметрії, були піддані обробці у спеціалізованому софті Agisoft PhotoScan (який тепер відомий як Metashape).

Цей процес охоплював вирівнювання окремих фотографій, прив'язку їх до геопростору за допомогою помічених міток (маркерів) та створення деталізованої хмари точок.

Крім того, низка цих маркерів була задіяна як незалежні контрольні одиниці, що дало змогу верифікувати отриману точність.

З метою з'ясування ефекту від застосування як цілей для реєстрації, так і внутрішнього вдосконалення, було виконано серію із трьох окремих випробувань:

- Випробування №1 — проводилося машинне моделювання без залучення будь-яких цільових орієнтирів;
- Випробування №2 — машинне моделювання із залученням цілей, прив'язаних до рельєфу;
- Випробування №3 — машинне моделювання з рельєфними цілями, після чого слідувала процедура оптимізації блоку зображень.

Аналіз досягнутих показників засвідчив, що як використання еталонних точок, так і реалізація етапу внутрішньої корекції значно підвищують точність просторового збігу між даними, отриманими фотограмметричним методом, та хмарою точок лазерного сканування.

Погляньмо на Таблицю 1: середнє розходження у координатах вирівняних реперних точок виявилось меншим за 2 міліметри.

Звідси випливає, що обидва незалежні підходи продемонстрували значний ступінь збіжності.

Цей факт якраз і довів, що можна успішно поєднати дані, отримані фотограмметричним шляхом та за допомогою лазерного сканування (TLS), задля формування єдиної, високоточної моделі дзвіниці монастиря Бернардинців.

Таблиця 1 Аналіз даних що були оброблені різними способами

Тест	Кількість фото	Оптимізація	СКП	Реєстрація	Контрольн і точки	Середнє значення [м]	σ_{xyz} [м]
Тест 1	41	ні		9	4	0.000925	0.000480
Тест 2	41	ні	0.145	9	4	0.000876	0.000415
Тест 3	41	так	0.145	9	4	0.000876	0.000415

Внаслідок проведених експериментальних зіставлень виявилось, що ступінь точності, досягнута при автоматизованому формуванні тривимірних моделей за зображеннями, є безперечно високим.

Розбіжність у розташуванні реперних точок, отриманих фотограмметричним шляхом, та показників лазерного сканування у середньому не сягає й кількох міліметрів, що цілком задовольняє технічним критеріям, встановленим для архітектурних знімальних робіт у масштабах 1:50 та 1:20.

Це, своєю чергою, доводить можливість застосування автоматизованого створення моделей на основі візуальних даних, зібраних безпілотними апаратами, як незалежного та достовірного способу фіксації архітектурних споруд підвищеної конструктивної складності.

Беручи до уваги метричні властивості нагромаджень точок, одержаних як із терестрового лазерного сканування (TLS), так і з фотограмметрії, можна впевнено констатувати повну взаємоузгодженість цих двох типів вихідних даних для їх подальшого об'єднання.

Серед них розбіжність у критеріях точності не перевищує двох міліметрів, що свідчить про відсутність значущих викривлень форми чи планомірних зсувів за умов їхнього сумісного опрацювання.

Окрім етапу географічного прив'язування, ми здійснили ще один етап чисельного зіставлення.

Його метою була не просто верифікація розташування у просторі, а й експертна оцінка адекватності відтворення конфігурації поверхні.

З цією метою було використано спосіб Евклідової метрики, завдяки якому можна визначити відстань між відповідними точками двох наявних точкових масивів у тривимірному континуумі.

Ця методика надає глибше розуміння ситуації, бо вона розглядає цілісну площину об'єкта, а не лише перевіряє фіксовані орієнтири.

Обрання саме хмар точок як базового об'єкта для зіставлення було зумовлене тим, що вони є вихідним та найбільш "необробленим" результатом як фотограмметричних, так і лазерних методів.

Це дає змогу нівелювати дію подальших програмних обробок, наприклад, триангуляції, інтерполяції чи накладання текстурних шарів, які нерідко спричиняють систематичні неточності.

Дослідження продемонструвало, що найбільші розходження між згенерованими хмарами точок не виходять за межі 5–6 міліметрів, при цьому лєвова частка точок (понад 85 %) демонструє розбіжність не більше 2 мм.

Отже, густота й просторова відповідність моделі, створеної фотограмметрично, цілком співзвучні даним, зафіксованим за допомогою високоточного лазерного апарату Leica HDS 7000.

Отримані висновки свідчать про те, що об'єднана модель, сформована шляхом синтезу інформації з двох різних підходів, демонструє значну точність у кількісних показниках і придатна для використання у проєктах з архітектурного оформлення, відновлювальних робіт, а також для проведення аналізу конструкцій із застосуванням методології скінченних елементів.

Щоб чисельно зіставити дві масиви даних — зроблені фотограмметриєю та отримані лазерним скануванням — було здійснено дослідження геометричних розбіжностей між відповідними точковими хмарами у програмній оболонці CloudCompare.

Цей інструмент, що є у вільному доступі, спеціально призначений для зіставлення, взаємного вирівнювання та зведення статистичних даних хмар точок чи сіток із трикутників, що позиціонує його як багатофункціональний засіб у процесі перевірки достовірності результатів просторового моделювання.

Під час зіставлення хмари точок, згенерованої із фотограмметричних даних Canon EOS 5D, її було прив'язано до тієї самої геодезичної системи координат, що використовувалася лазерним сканером Leica HDS 7000.

Після просторової узгодженості, ми розрахували евклідові відстані між парними точками обох наборів, що дало змогу виявити ступінь розбіжностей у межах усього досліджуваного об'єкта.

Аналіз продемонстрував, що найбільші розбіжності, які маркуються червоним на карті похибок (рис. 3), не перевищують трьох сантиметрів і спостерігаються здебільшого на крайових частинах або у площинах, де дані були відсутні.

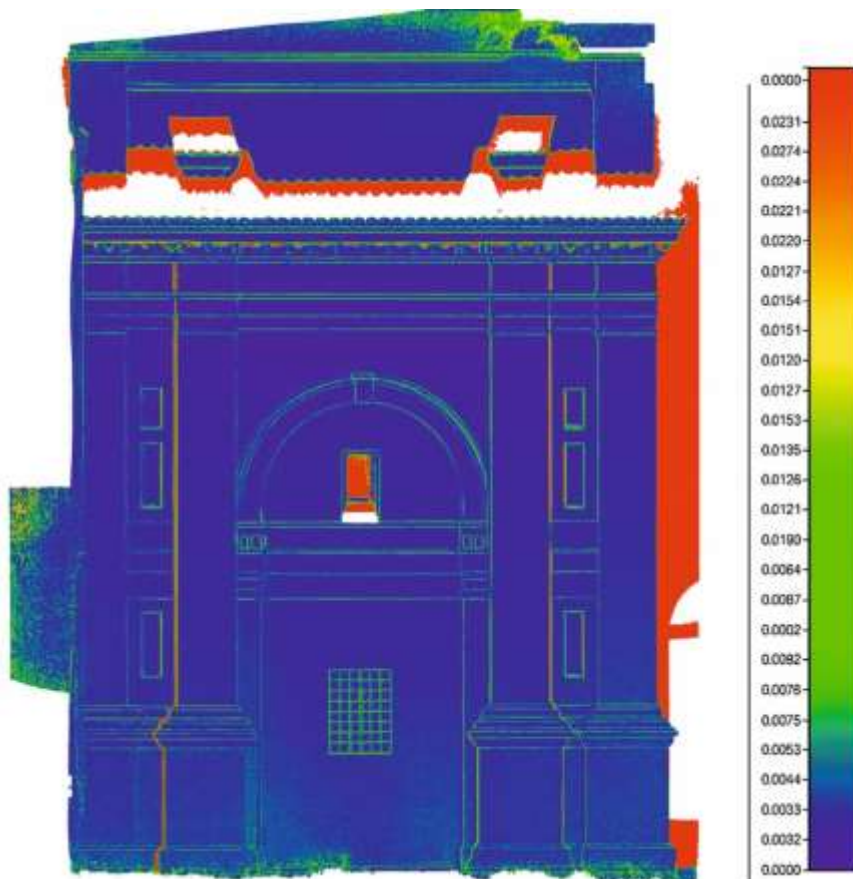


Рисунок 3. Порівняння фотограмметричних хмар точок з хмарами лазерного сканера.

Ці незначні розбіжності можна списати на те, що лазерний сканер менш достовірними виявляється на периферії сканованої ділянки, коли сигнал послаблюється або спотворюється через надто малі кути падіння.

Там, де зйомки обома методами накладаються у середній частині об'єкта, середнє розходження між утвореними хмарами точок не перевищило 2 мм, що, власне, і демонструє високу ступінь метричної злагоди між даними, отриманими фотограмметричним шляхом та за допомогою TLS.

Здобутий висновок дає підстави стверджувати: навіть якщо використовувати звичайну фотокамеру без офіційного калібрування, можна досягти показників точності та детальності, які фактично не поступаються тим, що дає лазерне сканування, за умови належного прив'язування до місцевості та добору оптимальних налаштувань для зведення даних.

Отже, порівняння, яке було здійснено, свідчить про значну узгодженість між фотограмметричним та TLS-методами, уможливіючи їхнє зведення в одну спільну просторову систему координат.

Така методика надає змогу проводити всебічний огляд об'єктів складної архітектури, де інформація з різних датчиків може бути консолідована в уніфікованому тривимірному сховищі геопросторових відомостей.

Це, у свою чергу, створює фундамент для формування деталізованих віртуальних моделей, виконання необхідних аналітичних обчислень та розробки високоточних ортофотопланів, що є критично важливим для реставраційних, архітектурних чи інженерних завдань.

3.4 Організація польових робіт і лазерного сканування дзвіниці

Як уже згадувалося, при огляді дзвіниці Бернардинського монастиря використали комплексний спосіб, що об'єднав класичні топографічні, фотограмметричні та сучасні лазерні техніки збору відомостей.

Цей метод дозволив здобути надзвичайно точні просторові дані щодо різних елементів будівлі та успішно впоратися з викликами, зумовленими її заплутаною архітектурою.

Фіксація даних з внутрішнього простору башти й нижніх зовнішніх зон пройшла без проблем — ці фрагменти були зафіксовані за допомогою усталених методів вимірювання.

Найбільша халепа спіткала нас при зйомці верхівки дзвіниці, особливо купольної частини та зовнішніх оздоблень ротонди, де було критично важливо безпечно та вивірено розмістити апаратуру.

Початком усіх заходів було формування та втілення топографічної основи, яка стала спільною системою координат для прив'язки усіх майбутніх знімків.

Ця мережа будувалася із застосуванням електронного тахеометра Leica TS30, що дає змогу визначати координати точок з надзвичайною точністю (кутове вимірювання – 1 секунда, лінійне – 1 мм + 1,5 частин на мільйон).

Загалом, було розміщено 21 точку у даній мережі, а саме:

- 5 точок згрупувалися довкола дзвіниці ззовні — їхнє призначення полягало у зовнішньому орієнтуванні та моніторингу фасадних елементів;
- 16 точок інтегрували у внутрішній простір будівлі, розташували їх на різних висотах (від підвалин аж до верхнього ярусу).

Із задіяної мережі було отримано дані по 95 цільових об'єктах (маркерах), які слугували для геодезичного прив'язування як фотограмметричних знімків, так і результатів TLS-сканування.

Щодо найвищої частини споруди, то для неї додатково встановили одну наземну станцію безпосередньо перед лицьовим боком дзвіниці.

Ця додаткова точка була згодом прив'язана до головної мережі mediante зворотних вимірювань.

3.4.1 Проведення лазерного сканування

Для нагромадження просторових відомостей застосовувався лазерний далекомір Leica HDS 7000, який є пристроєм фазового зсуву, оснащеним інтелектуальною системою керування.

Цей апарат класифікується як лазерний прилад першого класу безпеки.

Діапазон його вимірювань простягається від 30 сантиметрів до 187 метрів, а охоплення поля складає повні 360 градусів у горизонтальній площині та 320 градусів — у вертикальній.

Це дає змогу всебічно фіксувати дані з об'єктів значних розмірів.

Агрегат здатний накопичувати інформацію зі швидкістю до одного мільйона точок на секунду, формуючи дуже насичені хмари точок, де просторове розділення досягає 3–5 міліметрів при фіксації на відстані десяти метрів.

Реальна точність отриманих даних обумовлювалася сукупністю різних умов: дистанції до об'єкта огляду, кута, під яким лазерний промінь потрапляв у поверхню, властивостей матеріалів, з яких збудований фасад, а також інтенсивності навколишнього освітлення.

Аби охопити геометрію дзвіниці цілком, здійснили п'ятдесят сканувань, котрі розподілилися так:

- П'ятнадцять відбулися ззовні; дев'ять із них фіксували з рівня ґрунту, а шість — із балконів розташованих поруч споруд, аби захопити верхів'я;
- Двадцять три скани були внутрішніми, покриваючи територію нави, ризниці та простору, де розташовані дзвони;
- Дванадцять додаткових знімків скерували на ліхтар та баню, їхньою метою було зафіксувати важкодоступні фрагменти верхнього ярусу.

На рисунку 4 представлена частина дзвіниці, отримана шляхом зведення внутрішніх та зовнішніх відсканованих даних, що засвідчує повне покриття об'єкта при умові мінімальної наявності "сліпих плям".

Під час виконання процедури лазерного сканування виявилось, що деталізація зібраної інформації для внутрішніх та зовнішніх граней дзвіниці значно варіюється.

Щодо внутрішніх площин, їхня характеристика полягала у стабільній концентрації точок сканування — близько 3 мм при робочій дистанції 4,5 м, що зумовлене невеликими габаритами приміщень та постійним віддаленням апаратури від об'єкта дослідження.

Рівень деталізації, досягнутий завдяки цьому, дав змогу сформувати надзвичайно точну модель внутрішніх перегородок та склепінь, яка ідеально підходить для подальшого розроблення архітектурних креслень, профілів та інженерно-конструктивних розрахунків.

Щодо зовнішніх поверхонь вежі, картина виявилася дещо заплутанішою.

Внаслідок того, що сканування проводилося з точок, розташованих біля підніжжя споруди, з використанням незмінного кроку кута огляду, показник розрізнення (або деталізації) залежав від висоти: чим вищим був елемент фасаду, тим менш щільним ставало точкове покриття.

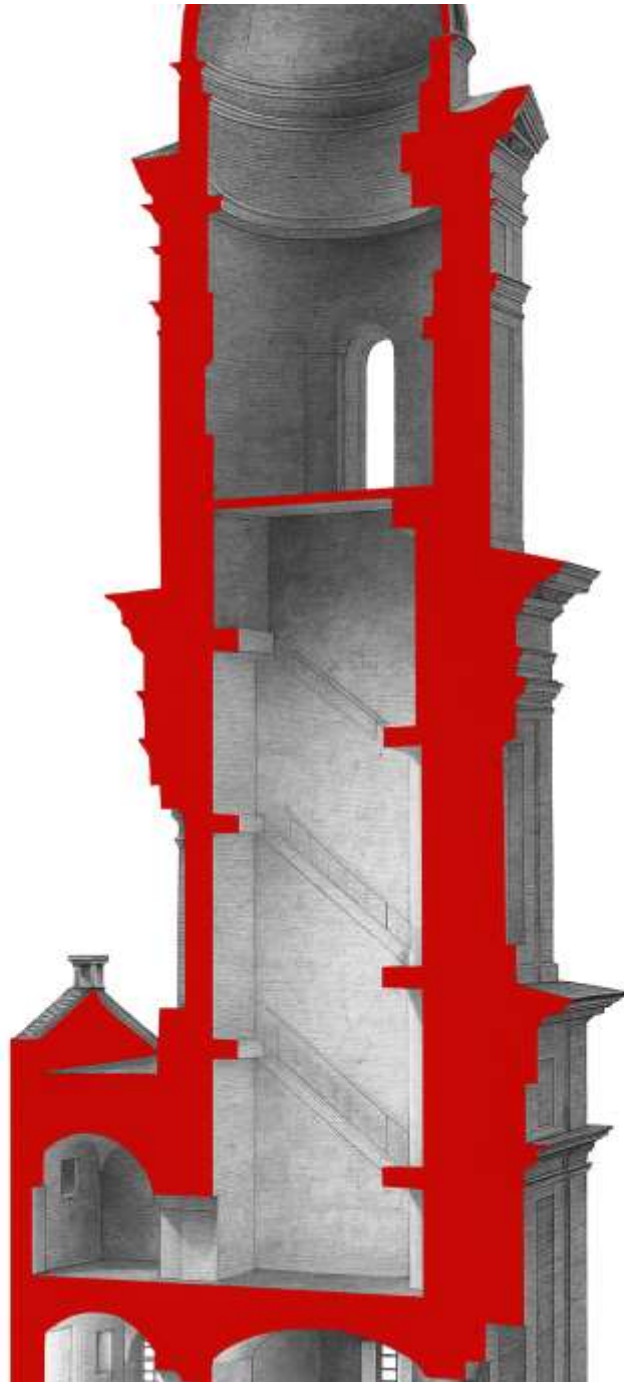


Рисунок 4. Хмари точок лазерного сканера внутрішньої та зовнішньої частини, зареєстровані в локальній системі відліку для розробки розрізу

Цей відбиток часто спостерігається у фазозсувних апаратах із обертанням по горизонталі, де ступінь точності та насиченість інформації падають прямо залежно від віддалення лазерного променя від площини поверхні.

Ще один аспект, який потребує уваги на більших висотах, полягає у погіршенні метрологічних характеристик через зміну кута, під яким падає промінь.

На височинах промінь потрапляв на вертикальні площини стін під значно вираженим кутом, що призводило до розширення кола, яке утворював лазер, і, як наслідок, зменшення коректності фіксації координатних точок.

З метою подолання згаданих труднощів та покращення просторової моделі було вирішено закріпити лазерний апарат на рівні найвищої частини дзвіниці, орієнтуючи його безпосередньо навколо ротонди.

Завдяки цьому вдалося зафіксувати верхній ярус будівлі, який включає аркові отвори, колонади та оздоблювальні деталі, а також отримати вичерпну інформацію про даховий купол.

Знімання виконувалося з найвищої досяжної балкона, що мінімізувало «сліпі плями» й гарантувало всеохоплююче сканування горішньої частини об'єкта.

Водночас, саме ця фаза виявилася найбільш проблематичною стосовно планування діяльності та забезпечення техніки безпеки.

Верхній майданчик, де монтувалося сканувальне обладнання, знаходився на висоті близько 38 метрів від земної поверхні.

Її діаметр становить приблизно 4 метрів, і вона знаходиться на квадратній основі площею близько 10 м², причому відсутні будь-які бар'єри чи захисні огорожі.

Ці обставини суттєво ускладнювали доставку апаратури та забезпечення її нерухомості у фіксованому положенні у процесі сканування.

Складність посилювалася через наявність тимчасових металевих та дерев'яних споруд, зведених послідовно після надзвичайних руйнувань дзвіниці для закріплення сферичного елемента (мал. 5).



Рисунок 5. Умови проведення сканування верхньої частини дзвіниці: перешкоди у вигляді металевих риштувань та дерев'яної підпірної конструкції.

Ці підпірні конструкції, які здебільшого склалися зі сталевих труб, суттєво займали площу довкола святині та заважали коректному встановленню лазерного далекоміра.

Додатково, через те що металеві площини відбивали лазерний промінь, певні зняті дані були забруднені шумами та сторонніми елементами.

У певних контрольних точках, розміщених по зовнішніх кутах виступу, металеві труби унеможлилювали повний огляд для апаратури, що спричинило відсутність деяких архітектурних елементів у накопичених точкових масивах.

Жодна з найвищих терас, що могла б бути ідеальною точкою для фіксації сферичної криші, не була використана, оскільки гвинтові сходи були хиткими, а вхід блокувала дерев'яна опорна структура.

Отже, скрутні умови праці на висоті, використання тимчасових опорних конструкцій, а також брак безпечних майданчиків для встановлення обладнання – усе це спричинило певні обмеження на якість збору геометричної інформації щодо верхньої секції дзвіниці.

Попри ці складнощі, отримана інформація виявилася цілком достатньою за рівнем точності та деталізації.

Це, у свою чергу, дало змогу успішно зіставити ці дані з фотограмметричними моделями, що уможливило формування цілісної тривимірної моделі вежі.

На візуальних матеріалах чітко видно проблеми, що ускладнювали процес знімання: наявність металевих риштувань і дерев'яних підтримуючих елементів суттєво звужувала огляд і негативно позначилася на характеристиках зібраної інформації.

3.4.2 Використання системи БПЛА для завершення обстеження

Впровадження безпілотного літального апарату (БПЛА) виявилось надзвичайно успішним методом для фіналізації детального огляду дзвіниці.

Залучення аерофотознімальних технологій дало змогу подолати низку труднощів, які раніше супроводжували застосування наземного лазерного сканування, зокрема, це стосується складнощів із доступом до високих елементів будівлі та перешкод, створених тимчасовими металевими конструкціями.

Ключовим плюсом такої методики стало те, що відпала необхідність залучати габаритне підймальне обладнання чи спеціалізовану техніку для

будівництва, завдяки чому вдалося істотно пришвидшити виконання робіт на об'єкті та зменшити загальні фінансові витрати.

Ба більше, навіть при використанні кранів, фіксація зображень вертикальних смуг фасадів була б проблематичною, зважаючи на обмеженість кута зору та відсутність можливості надійно закріпити апаратуру під час процесу знімання.

Застосування ж безпілотних літальних апаратів (БПЛА) подарувало змогу здійснювати маневри навколо споруди з більшою свободою, особливо у тісних проміжках між будівельними риштуваннями та самою стіною.

Внаслідок цього стало можливим зібрати набір кадрів, зроблених під різноманітними ракурсами, охоплюючи й ті зони, які були недосяжними при використанні традиційних методів із землі, що в кінцевому підсумку дозволило повноцінно задокументувати усю геометрію дзвіниці.

Аерофотознімальні роботи проводилися за допомогою апарату DJI Phantom 4 Pro, який є мультикоптером, укомплектованим фотокамерою з однодюймовим CMOS-сенсором, що забезпечує роздільну здатність у 20 мегапікселів.

Знімання здійснювалося на висоті від 10 до 25 метрів над рівнем фасаду, забезпечуючи 80% поздовжнє та 70% поперечне покриття зображень.

Оператор утримував камеру у фіксованому положенні під час ручного керування апаратом, завдяки чому було зібрано вичерпні фотографічні послідовності, необхідні для подальшої фотометричної інтерпретації.

Схема, що ілюструє, як саме безпілотний літальний апарат фіксував верхню секцію вежі, представлена на рисунку 6.



Рисунок 6. Коптер, що використовувався для зйомки дзвіниці

Рішення застосувати безпілотний літальний апарат мультироторного типу (квадрокоптер) як головний засіб аерофотографування було зумовлене низкою технічних, просторових та безпекових чинників.

Головною підставою слугувала сама конструктивна особливість споруди — це була висока будівля з вираженою вертикальною орієнтацією та заплутаним зовнішнім виглядом.

Саме ця просторова конфігурація диктувала необхідність використання апарату, спроможного до вертикального зльоту та посадки, що, своєю чергою, забезпечило можливість фіксації послідовних вертикальних зрізів зображень, гарантуючи повне покриття усіх поверхонь дзвіниці.

Наступним важливим аспектом була прив'язка споруди до місця — вона опинилася серед щільної міської забудови.

Дзвіниця розміщена практично у серці селища, а оточуючий її простір стиснутий забудовою різноманітної висоти, що унеможливило застосування звичних літальних апаратів.

В цих обставинах найкращим вибором виявився невеликий за габаритами, неважкий та легкий в експлуатації безпілотник, спроможний безпечно переміщатися у тісних повітряних коридорах.

Задіяний безпілотний літальний апарат, що належав до класу мультикоптерів, мав чотири гвинти, розміщені на рамі у формі хреста, і був обладнаний системою гіроскопічної стабілізації, окрім того, він мав телеметричні датчики — приймач GPS та висотомір на основі барометра.

Тривалість польоту в середньому перебувала в діапазоні 5–15 хвилин, і цей показник змінювався відповідно до ваги корисного вантажу.

Живлення апарата здійснювалося за рахунок літій-полімерних акумуляторних батарей напругою 16 В та ємністю 4,0 А·год, що гарантувало можливість проведення нетривалих, але надійних сесій польоту.

У комплектацію коптера входила дзеркальна цифрова апаратура Canon EOS 650D, оснащена APS-матрицею з роздільною здатністю 18 мегапікселів, сенсором габаритами 22,3 × 14,9 мм та об'єктивом із фокусною відстанню 18 міліметрів.

Кріплення фотоапарата було реалізовано на стабілізованій підвісці, яка надавала можливість зміни кута нахилу оптики на 90 градусів — від площини, паралельної землі (горизонтальної), до положення, спрямованого

прямо вниз (зенітного), що забезпечувало високу маневреність у виборі ракурсу зйомки фасадних конструкцій.

Дистанційне керування як самим польотом, так і процесом фотографування було реалізовано.

Екіпаж, залучений до польотних робіт, включав пілота та фахівця з фотограмметрії.

Останній здійснював нагляд за знімальним циклом, використовуючи зовнішній дисплей, що транслював відеопотік із камери практично миттєво.

Такий підхід дозволяв на місці верифікувати коректність композиції, ступінь накладання кадрів та обраний кут зору, що значно мінімізувало ймовірність зафіксувати матеріали, які б не відповідали вимогам.

Ключовим етапом у підготовці заданого завдання виступила розробка ретельно проправльованого сценарію польоту, де були чітко регламентовані висота, маршрут руху, необхідний рівень перекриття знімків та технічні параметри фіксації зображень.

Головне завдання полягало у гарантованому охопленні всієї площини фасадів дзвіниці, при цьому досягаючи економії на загальній кількості зроблених знімків та максимізуючи ефективність витраченого часу польоту.

Зйомку було здійснено з такими налаштуваннями:

- Апертура: $f/9$;
- Світлочутливість (ISO): 400;
- Розмір зображення: 5184×3456 пікселів;
- Віддаленість від цілі: приблизно 8 метрів;
- Передбачувана метрична роздільна здатність (GSD): близько 3 мм на піксель;
- Нахлест кадрів: 80 % у напрямку польоту, 70 % у поперечному напрямку.

Щодо кожного боку будівлі, метою було зафіксувати три паралельні вертикальні серії знімків, які підсилювалися двома похилими смугами у кутах.

Це забезпечувало цілісний охоплення території зображеннями та дозволяло точно стикувати сусідні поверхні при подальшій фотограмметричній обробці даних.

Для формування повної тривимірної моделі споруди, навколо святині було виконано три повні кругові обльоти (360°).

У процесі цих маневрів здійснювалась серійна зйомка кадрів відповідно до заздалегідь спланованого маршруту (див. мал. 7).

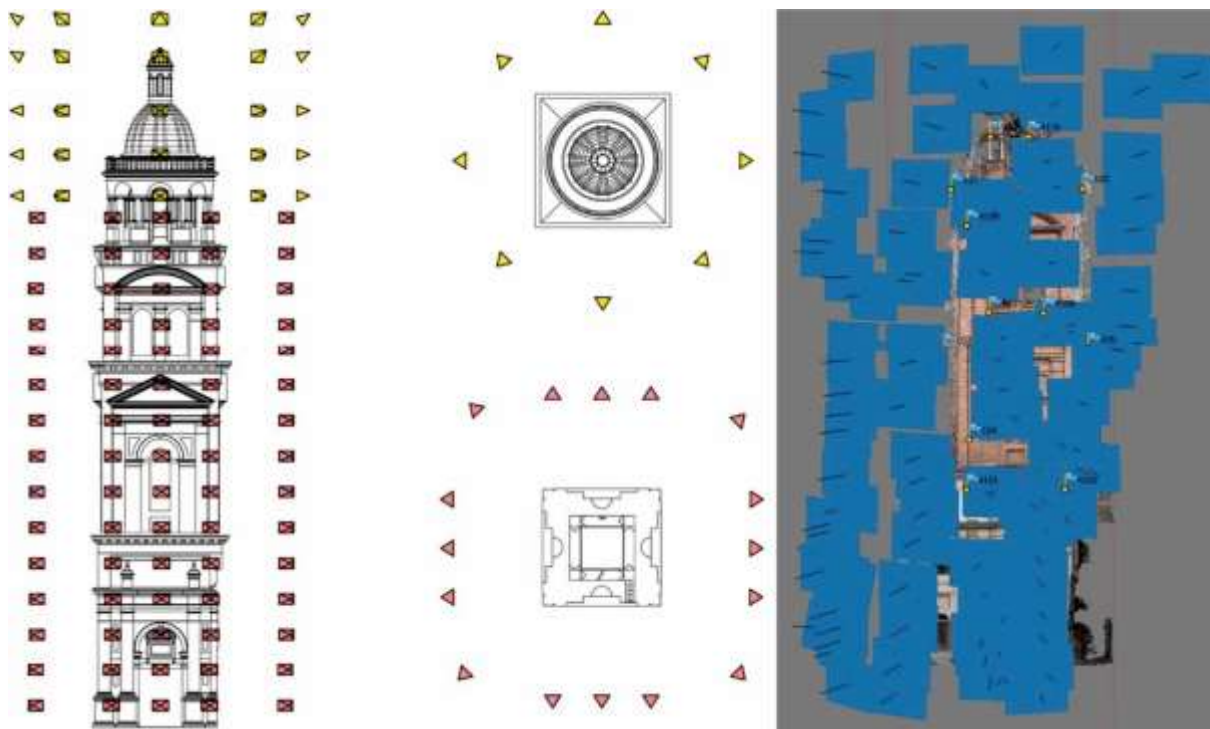


Рисунок 7. Схема отримання зображень з БПЛА.

На рис. 7 відтінком червоного виділено території, з яких здійснювалося фотографування фасадів дзвіниці, а жовтим – області, що охоплюють сферичний дашок.

Таке розмежування дало змогу оптимізувати послідовність збору візуальних даних та забезпечити повне охоплення усіх елементів будівлі.

При виконанні аерозйомки важливість надавалася кліматичним умовам освітлення, бо вони є критичним фактором для подальшого якісного фотограмметричного моделювання.

З метою досягнення однакової фактури поверхні та рівномірного підсвічування стін було запропоновано здійснювати фіксацію зображень, дотримуючись ідентичних умов освітлення.

Слишком велика різниця у яскравості між темними та світлими частинами знімків могла спричинити нерівномірність передачі кольору на окремих фотографіях, що, своєю чергою, призвело б до викривлень при створенні ортофотопланів.

Аби уникнути появи затінених та переекспонованих ділянок, зйомку було проведено у похмуру погоду.

Це забезпечило розсіяне природне освітлення, яке є ідеальним для фіксації текстур із збалансованими показниками яскравості та кольору.

Такий підхід допоміг досягти значної візуальної узгодженості моделей, отриманих після фотограмметричної обробки даних.

Загальна кількість зроблених фотографій сягнула 441 одиниці, а саме:

- на північний бік припадає 110 кадрів,
- південний — 19,
- східний — 70,
- західний — 83,
- на круглий купол було зроблено 159 фотографій.

Нерівномірний обсяг отриманих фотографій обумовлений конфігурацією та розмірами фасадів, а також наявністю навколишніх споруд, що обмежували можливість вільного маневрування апарату.

Під час аерофотографування було зафіксовано збіг кадрів на рівні 77 %, при цьому середня відстань між кадрами по вертикалі становила 2,35 м, а по горизонталі — 3,48 м.

Найбільшу ефективність продемонструвала центральна ділянка, яка покривала понад 90 % ширини лицьової частини будови, забезпечуючи багаторазове (до восьми разів) фіксування кожного фрагмента площини з різноманітних точок огляду.

Це забезпечило міцну просторову кореляцію та високу ступінь достовірності у відтворенні тривимірної моделі усєї конструкції дзвіниці.

3.5 Обробка та інтеграція лазерного сканування і фотограмметричних даних

Роботи з лазерного сканування та здійснення топографічних вимірів були виконані за три доби напруженої праці у полі.

Як свідчить досвід геодезичних спостережень, етап обробки матеріалів у спокої (камерально) зазвичай займає набагато більше часу, ніж їхнє накопичення безпосередньо на місцевості.

Це пояснюється як солідним масивом просторової інформації, так і потребою у скрупульозній ручній верифікації при ідентифікації архітектурних складових та деталізації конструкцій.

Конкретно, зведена база даних, отримана лазерним сканером, налічувала орієнтовно 2,3 мільярда точок, що вимагало залучення чималих обчислювальних потужностей та багатоетапного вдосконалення процедур опрацювання.

Аби цілком і повністю відтворити конфігурацію дзвіниці, було задіяно змішаний підхід, що полягав у спільній роботі даних лазерного

сканування та хмар точок, знятих фотограмметричним методом за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Цей спосіб дав змогу повною мірою скористатися силами обох технік:

- Лазерне сканування послугувало для здобуття надзвичайної точності та деталізації внутрішніх обрисів, а також нижніх зон будівлі, куди аерозйомка дістатися не могла;
- Фотограмметрія ж дозволила сформувати насичені текстурами зразки зовнішніх поверхонь і елементів склепінь, окрім того, забезпечивши ортофотоплани з однорідним підсвічуванням.

Зокрема, для формування ортофотопланів нижніх фасадних зовнішніх ділянок застосовували здобуті фотограмметричними методами відомості, тоді як внутрішнє оздоблення дзвіниці моделювалося винятково на основі результатів лазерного сканування.

Такий підхід сприяв збереженню високої точності метрики, паралельно скорочуючи часові витрати на обробку.

Фотограмметричні роботи були реалізовані в апаратному комплексі Agisoft Photoscan (який зараз відомий як Metashape), що дає змогу здійснити увесь технологічний процес — починаючи з автоматичного приведення у відповідність знімків і закінчуючи генерацією насиченої хмари точок, сітчастої моделі та нанесеної текстури.

З огляду на велику кількість вхідних зображень, ми вирішили розділити проєкт на менші, незалежні складові (сегменти).

Це суттєво пришвидшило загальний час, необхідний для завершення роботи, і, що важливо, дало змогу залучити для обчислень кілька робочих станцій одночасно.

Зовнішня частина дзвіниці була поділена на п'ять ключових модулів: це чотири вертикальні грані та верхня сферична частина, увінчана куполом (див. Рис. 8).

Такий підхід до організації даних не просто полегшив роботу з масивними даними, але й відкрив шлях до індивідуального налаштування параметрів рендерингу для кожного окремого фасаду.

В результаті, ми досягли кращого зведення текстурних даних та більш точного узгодження геометричних елементів.



Рисунок 8. 3D модель на основі зображення та фронтальний ортофотоплан.

Фаза орієнтування фотографій у програмному забезпеченні Agisoft Photoscan (Metashape) передбачала залучення фізичних реперних точок, розміщених безпосередньо на елементах конструкції дзвіниці.

Визначення їхніх просторових координат здійснювалося шляхом ручного збору даних за допомогою технології лазерного сканування, що гарантувало високоякісне метрологічне узгодження між двома різними масивами даних.

Даний підхід ґрунтувався на результатах попередніх експериментів, які довели успішність застосування уніфікованої системи референції для досягнення суцільності геометричної моделі.

По закінченні процедури вирівнювання з'ясувалося, що середнє зміщення місць розташування знімків складає приблизно три тисячні частки метра, ця величина задовольняє жорсткі критерії, закладені у кресленнях архітектурного спрямування у масштабі один до п'ятдесяти.

Оптимізація параметрів калібрування камери призвела до того, що середня неточність внутрішньої орієнтації склала близько однієї цілої та восьми десятих пікселів, що підтверджує правильність побудови фотограмметричної моделі.

Під час переведення зазначеної моделі у локальне геодезичне поле координат (рототрансляція) середня похибка прив'язки до місцевості сягнула приблизно одинадцять міліметрів, що вважається цілком прийнятним показником для інтеграції даних, отриманих як із аерофотозйомки, так і за допомогою лазерного сканування.

Після обробки матеріалу було отримано як насичені масиви точок, так і моделі, складені з трикутників, які стали основою для подальшого створення ортофотопланів (див. рис. 8).

Перш ніж вносити дані фотограмметрії до загальної системи, їх ретельно звільнили від небажаних артефактів та аномальних значень, що забезпечило сумісність із лазерним хмарним скануванням без шкоди для геометричної достовірності.

Аби покращити якість текстур та нівелювати ефекти освітлення, було здійснено скрупульозний відбір вихідних зображень.

Ті кадри, що демонстрували суттєві зміни кольору або були зроблені під невдалими ракурсами, не включалися до обробки, адже вони ризикували призвести до нерівномірності колористики або викривлення текстурних елементів на лицьовій поверхні.

З метою формування остаточних ортофотопланів застосовувалися:

- 125 знімків для проєкції на південь,
- 83 знімки задля відображення північної сторони,
- 69 знімків, що стосуються східного боку,
- 99 знімків для західної частини (зокрема, південно-західної ділянки),
- 154 знімки, призначені для сферичного склепіння.

Така комплектація гарантувала цілісне охоплення предмету обстеження та належний рівень резерву даних – критичний для точного стереоскопічного відновлення.

Початок обробки відомостей, отриманих від лазерного сканера Leica HDS 7000, полягав у приведенні хмар точок до єдиної системи координат, прив'язаної до наявної топографічної основи.

Сформований масив даних, що налічував 2,3 мільярди окремих вимірів, був розбитий на дві категорії:

- Збір внутрішніх даних — це становило близько півтора мільярда точок;
- Збір зовнішніх даних — приблизно 800 мільйонів точок, що покривали нижні яруси фасадних частин.

Після орієнтування, ці хмари точок пройшли етапи усунення зайвих повторів, фільтрації шумів та візуальних артефактів, а також вибіркового видалення елементів металевого риштування, які частково перешкоджали видимості архітектурних деталей.

Робота з очищення виявилася надзвичайно обтяжливою, оскільки необхідно було відокремлювати точки споруди від точок риштування по кожному елементу, особливо це стосувалося зон верхнього ярусу дзвіниці.

Щойно етап очищення було закінчено, згруповані хмари точок та ортофотоплани стали основою для формування вичерпної метричної документації по даному об'єкту.

Зокрема, інтеграційний процес допоміг у виготовленні докладних архітектурних планів у масштабі один до п'ятдесяти, які охоплювали:

- Планування усіх ярусів дзвіниці, включаючи три додаткові поперечні розрізи, сфокусовані на найбільш деформованих територіях;
- Два повні поздовжні розтини (секції) усієї будівлі;
- Комплексні фасадні відображення, об'єднані з ортофотознімками (див. ілюстрації 9–11).

Ці досягнуті результати забезпечили вичерпну фіксацію поточного стану дзвонової вежі після її просідання та, що не менш важливо, сформували стійку цифрову платформу для подальших інженерних розрахунків із застосуванням методології скінченних елементів (FEM) і підготовки плану реставраційних заходів.

Щоб відтворити проєкти поверхів, розрізи по довжині та поперек, а також детальні зображення складових частин дзвіниці, були задіяні насичені скупчення точок, здобуті методом лазерного сканування.

Оскільки ці масиви даних вирізнялися високою деталізацією та точністю вимірювань у метрах, вони лягли в основу збору всієї необхідної просторової інформації для цифровізації споруди.

Згідно із загальноприйнятим порядком роботи з геодезичними вимірами, ці хмари точок були завантажені у програмне забезпечення AutoCAD, слугуючи відправною точкою для формування креслень у векторному форматі.



Рисунок 9. Порівняння даних лазерного сканера верхньої частини дзвіниці та відповідної ортофотознімки поверхні, розробленої на основі фотограмметричної 3D-моделі.

У ході виконання робіт було впроваджено багатошарову систему, завдяки чому вдалося чітко відокремити структурні компоненти архітектури за їхньою природою (зокрема, стіни, віконні прорізи, аркові конструкції, склепіння, східні марші тощо), що значно спростило подальше включення креслень до загального плану реставраційних заходів.

Для точного документування фасадів зовнішніх поверхонь, а також окремих фрагментів верхньої частини дзвіниці, було задіяно комбінацію даних, отриманих шляхом лазерного сканування та фотограмметричних методів.

Такий підхід забезпечив найвищий рівень деталізації та точну передачу кольорової палітри відповідно до реального вигляду споруди.

Зосередившись на етапі трансформування даних у векторний формат, ми потім приступили до поєднання проєктів фасадів із картографічною основою, що являла собою ортофотоплани, які були згенеровані з аерофото матеріалів, знятих із застосуванням безпілотників.

Ця спільна робота дозволила об'єднати точні геометричні виміри з реальним кольором поверхні, значно збагативши змістовність та візуальну правдивість створених планів.

Сформовані таким чином матеріали лягли у підґрунтя для формування архітектурно-геодезичної документації.

Цей пакет даних може використовуватися як для детального інженерного обстеження стану конструкції, так і для планування робіт із відновлення та укріплення деформованих елементів будівлі.

Інформація, здобута шляхом лазерного сканування та фотограмметричних спостережень, була інтегрована задля формування цілісної тривимірної репрезентації дзвіниці, що охоплює як фасадні, так і інтер'єрні просторові характеристики будівлі.

Базуючись на обох джерелах даних, було здійснено фінальне доопрацювання вертикального перерізу, що дало змогу привести у відповідність усі компоненти конструкції стосовно їхньої висотної координати та розміщення у просторі, суттєво зменшивши розбіжності між вимірами, отриманими обома методами.

З огляду на метрологічні вимоги та необхідний вигляд кінцевого продукту, тривимірна модель була сформована як об'ємна модель (solid model).

Реалізація цієї конструкції ґрунтувалася на використанні основних геометричних форм, таких як куби, циліндри, конуси та тіла, утворені обертанням, які потім зазнали змін через логічні (булеві) операції (додавання, вилучення, спільна частина) задля досягнення складних архітектурних контурів дзвіниці.

Подібна методика дала змогу не тільки гарантувати значну точність відтворення справжнього об'єкта у цифровій формі, але й розробити упорядковану за своєю структурою модель, придатну для подальшого опрацювання у спеціалізованому програмному забезпеченні для інженерії та архітектури (приміром, Revit від Autodesk чи Civil 3D від Autodesk).

Створена модель, яку можна побачити на рисунку 10, об'єднує високу точність вимірювань, властиву лазерному скануванню, із візуальною достовірністю, що досягається фотограмметрією.

Завдяки цьому вона стає гнучким засобом для виконання різноманітних задач — чи то розробка проєктів відновлення чи відстеження змін у стані будівельних елементів.

По завершенню створення твердотілого тривимірного зразка дзвіниці, наступним кроком стала стадія візуалізації.

Її завданням було подати здобуті дані у вигляді, що є максимально придатним для подальшого вивчення й аналізу.

Завдяки цій візуалізації стало цілком можливо не просто показати загальну просторову організацію споруди, але й дати можливість наочно зрозуміти її фактичний стан щодо геометрії, оцінити рівень руйнувань та викривлень, що зачепили окремі складові частини.

Для того, аби належним чином представити цю модель, були використані реалістично виконані фактури, які були здобуті шляхом фотограмметричної обробки знімків.

Це дало змогу точно відтворити натуральний відтінок, властивості матеріалу та те, як світло падає на ці поверхні.

Така методика дала змогу отримати візуальну правдоподібність реконструйованого предмета, дуже близьку до його реального образу.

Окрім нерухомих кадрів, розробили рухомі візуалізації й 3D-тури, які демонструють макет у динаміці та надають можливість досконало його дослідити під будь-яким кутом зору.



Рисунок 10. 3D-модель для аналізу методом скінченних елементів.

Ці робочі засоби продемонстрували виняткову практичність у ході доповідей, фахових нарад та під час огляду технічного стану будівель.

З метою проведення аналізу, тривимірну модель було з'єднано з програмними комплексами, що надають можливість здійснювати такі операції:

- визначати довжини та об'єми елементів конструкції;
- формувати поздовжні та поперечні розрізи для зіставлення з документацією, що зберігається в архівах;
- досліджувати просідання та зміни форми, спираючись на розбіжності між параметрами моделі та даними, отриманими під час польових вимірювань;
- генерувати високоточні цифрові аерофотоплани та карти фасадів з накладеною текстурою.

Отримані унаслідок візуалізації та метричного огляду відомості засвідчили: найбільш вдалим методом фіксації об'єктів зі складною архітектурою є об'єднання інформації, здобутої фотограмметричними засобами та лазерним скануванням.

Синергія обох технологічних методів дала змогу створити цілісну цифрову копію дзвіниці, охоплюючи як її фасадні частини, так і внутрішні простори.

Точність такої реконструкції виявилася цілком задовільною для проведення як робіт із відновлення, так і для подальших інженерних обчислень та постійного контролю експлуатаційного стану будівлі (рис. 11).

Отож, створена об'ємна модель слугує не просто підсумком геодезичних вишукувань, а й цілком робочим засобом для закладання планів майбутніх оновлень, формування стратегій збереження та охорони надбань культури.

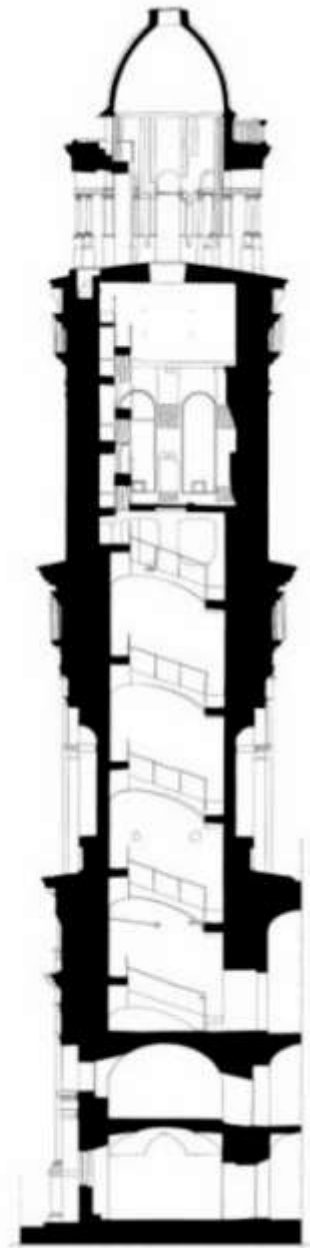


Рисунок 11. Дзвіниця костелу

Висновок

Опрацювання наукової роботи фокусувалося на інспектуванні високих будівель у кризових умовах, зокрема на прикладі дзвіниці, що належить Бернардинському монастирю, розташованому у селищі міського типу Гвіздець, що на Івано-Франківщині.

З'ясовані дані засвідчили значну результативність використання апаратаційних засобів безпілотного польоту (тобто дронів) спільно з програмними інструментами для автоматизованого створення тривимірних візуалізацій об'єктів з метою фіксації та вивчення заплутаної архітектурної спадщини.

Здобутий у межах цього вивчення досвід переконливо засвідчив, що використання аерофотозйомки безпілотними літальними апаратами, доповнене фотограмметричною ректифікацією, дає змогу оперативно, з високою достовірністю та у безпечний спосіб збирати просторову інформацію, навіть якщо йдеться про заплутані конфігурації міської забудови чи об'єкти, що зазнали часткових руйнувань.

Суттєвою детермінантою кінцевої якості отриманих даних виступає детально розроблений план виконання польотних робіт.

Такий план має забезпечити оптимальне накладання кадрів, необхідний рівень деталізації зображення та достатній, але не надмірний, обсяг знімків, щоб це гарантувало повну відбудову геометричних параметрів будівель без накопичення зайвих масивів інформації.

Застосований підхід демонструє низку вагомих плюсів, якщо порівнювати його із застарілими підходами:

- Фінансова вигода — досягається завдяки залученню негеодезичних фотоапаратів та програмного забезпечення, що працює в автоматичному режимі, значно зменшуючи кількість залучених фахівців;

- Швидкість роботи й мінімізація ризиків — збір усієї необхідної інформації можливий віддалено, усуваючи необхідність у зведенні риштувань чи застосуванні підйомних механізмів;
- Ретельність вимірювань — дані, отримані методом фотограмметрії з використанням дронів, повністю узгоджуються з об'ємами даних лазерного сканування, що підтверджено низкою проведених випробувань.

Злиття інформації, отриманої лазерним скануванням та фотограмметричними методами, підтвердило свою життєздатність та високу продуктивність.

Це дало змогу досягти повної відповідності у метричних вимірах, унаслідок чого сформувалася уніфікована сховище просторових відомостей, придатної для створення як графічних продуктів (креслень, фасадів, перерізів), так і цифрових зображень (ортофотопланів, моделей з текстурами).

Ключовим моментом є те, що об'єднання цих технологічних підходів не лише покращує якість кінцевих даних, а й гарантує більш безпечне робоче середовище для фахівців із геодезії, особливо коли йдеться про обстеження споруд, що постраждали від руйнувань, чи об'єктів, доступ до яких є ускладненим.

Розроблений операційний підхід цілком може бути вбудований у процедури оцінки архітектурних та конструктивних ушкоджень, а також у фази планування робіт з реставрації та подальшого обслуговування пам'яток історії.

Отже, здобуті у магістерській роботі висновки засвідчують, що використання аерофотограмметрії з безпілотних літальних апаратів та лазерного сканування являє собою життєздатний вектор для еволюції сучасних геодезичних методів у царині контролю, збереження та ревіталізації об'єктів культурної спадщини.

Список використаної літератури

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012
2. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. — Львів, 2008.
3. Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. — Львів, 2003.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. — К.: ГКНТА, 1999.
5. Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії — Львів, 2001.
6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.
7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. "Геодезія" (частина перша). Чернівці 2002р.
8. Achille, Cristiana & Adami, Andrea & Chiarini, Silvia & Cremonesi, Stefano & Fassi, Francesco & Fregonese, Luigi & Taffurelli, Laura. (2015). UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications—Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy). *Sensors*. 15. 15520-15539. 10.3390/s150715520.
9. Манфредіні, А.М.; Ремондіно, Ф. Огляд методів створення 3D-моделей на основі реальності, сегментації та веб-візуалізації. *Int. J. Herit. Digit. Era* 2012, 1, 103–123.
10. Ахілле, К.; Фассі, Ф.; Фрегонезе, Л. 4 роки історії: від 2D до BIM для СН: головний шпиль Міланського собору. У працях 18-ї Міжнародної конференції 2012 року з віртуальних систем та мультимедіа ISEE [VSMM], Мілан, Італія, 2–6 вересня 2012 р.; с. 377–382.
11. Фассі, Ф.; Ахілле, К.; Фрегонезе, Л. Зйомка та моделювання головного шпиля Міланського собору з використанням кількох джерел даних. *Photogramm. Rec.* 2011, 26, 462–487.

12. Ремондіно, Ф.; Джирарді, С.; Ріцці, А.; Гонзо, Л. 3D-моделювання складної та детальної культурної спадщини з використанням даних з різною роздільною здатністю. *АСМ J. Comput. Cult. Herit.* 2009, 2, doi:10.1145/1551676.1551678.

13. Фрегонезе, Л.; Скайоні, М.; Таффуреллі, Л. Створення просторової інформаційної системи для архітектури з даними лазерного сканування. У працях Міжнародного архіву фотограмметрії, дистанційного зондування та просторової інформаційної науки, Париж, Франція, 1–2 вересня 2009 р.; Том XXXVIII-3/W8, с. 87–92.

14. Фрегонезе, Л.; Барб'єрі, Г.; Біолці, Л.; Боччареллі, М.; Фріджері, А.; Таффуреллі Л. Геодезія і Моніторинг для оцінки вразливості старовинної будівлі. *Датчики* 2013, 13, 9747–9773.

15. Барб'єрі, Г.; Біолці, Л.; Боччареллі, М.; Фрегонезе, Л.; Фрігері, А. Оцінка сейсмічних вразливостей історичної будівлі. *інж. Структура.* 2013, 57, 523–535.

16. Гварнієрі, А.; Мілан, Н.; Ветторе, А. Моніторинг складної структури для використання структурного контролю Наземне лазерне сканування (Tls) і фотограмметрія. *Міжн. J. Arch.* 2013, 7, 54–67.

17. Пілот Л.; Монті, С.; Балетті К.; Guerra, F. Il Rilievo del Torrizzo di Cremona. У працях *Atti della 2° Conferenza Nazionale Della Federazione Della ASITA “Rilevamento, Rappresentazione e Gestione dei Dati Territoriali e Ambientali»*, Больцано, Італія, 24–27 листопада 1998 р.

18. Фассі, Ф.; Фрегонезе, Л.; Акерман, С.; de Troia, V. Порівняння між лазерним скануванням і автоматизовані методи тривимірного моделювання для реконструкції складних і великих територій культурної спадщини. У матеріалах Міжнародного архіву фотограмметрії, дистанційного зондування та просторового дослідження Інформаційні науки, Тренто, Італія, 25–26 лютого 2013 р.; Том 40-5/W1, стор. 73–80.

19. Ремондіно, Ф.; дель Піццо, С.; Керстен, Т.П.; Troisi, S. Недорогі та відкриті рішення для Автоматична орієнтація зображення — критичний огляд. У працях EuroMed 2012, Лімасол, Кіпр, 29 жовтня – 3 листопада 2012 р.; с. 40–54.

20. Гвіді, Г.; Ремондіно, Ф. 3D-моделювання з реальних даних. У книзі «Моделювання та симуляція в інженерії»; ред.; InTech: Ріска, Хорватія, 2012; с. 69–102.