

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Західноукраїнський національний університет**  
**Навчально-науковий інститут інноватики, природокористування**  
**та інфраструктури**  
Кафедра економічної експертизи та землевпорядкування

**МІСИК Софія Олегівна**

**Методика виконання наземного лазерного сканування**  
**пам'яток архітектури // Method of ground laser scanning of**  
**architectural monuments**

спеціальність: 193 – Геодезія та землеустрій  
освітньо-професійна програма - Геодезія та землеустрій

Кваліфікаційна робота

Виконала студентка групи ГЗ-41  
С. О. Місик

---

Науковий керівник:  
к.т.н., доцент, К. Б. Смолій

---

Кваліфікаційну роботу допущено  
до захисту:

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Б. О. Язлюк**

**ТЕРНОПІЛЬ – 2024**

**ЗМІСТ**

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</b>	3
<b>ВСТУП</b>	4
<b>РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ</b>	7
1.1. Лазерне сканування, його історія виникнення та види	7
1.2. Наземні лазерні сканери, їх види та характеристика	15
Висновки до розділу 1	23
<b>РОЗДІЛ 2. ПАМ'ЯТКИ АРХІТЕКТУРИ ТА ЇХ ЗБЕРЕЖЕННЯ</b>	24
2.1. Пам'ятка архітектури та її значення для сьогодення	24
2.2. Лазерне сканування пам'яток архітектури та приклади їх виконання	29
Висновки до розділу 2	37
<b>РОЗДІЛ 3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ПАМ'ЯТОК АРХІТЕКТУРИ</b>	38
3.1. Опис об'єкту лазерного сканування	38
3.2. Методика виконання наземного лазерного сканування пам'яток архітектури	42
Висновки до розділу 3	53
<b>ВИСНОВКИ</b>	55
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	58
<b>ДОДАТКИ</b>	63

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КВМ - координатно-вимірювальні машини

НЗЛС - наземне лазерне сканування

НЛС - наземний лазерний сканер

ПЛС - повітряне лазерне сканування

МЛС - мобільне лазерне сканування

ІЕС - (International Electrotechnical Commission) Міжнародна електротехнічна комісія

ВІМ - (Building Information Model) інформаційна модель будівлі

ТІН - (Triangulated Irregular Network) нерегулярна триангуляційна мережа

ПВО - планово-висотне обґрунтування

ДГМ - державна геодезична мережа

ПЗ - програмне забезпечення

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Пам'ятки архітектури є невід'ємною частиною культурної спадщини суспільства, яка потребує збереження, документування та дослідження для подальшого передання майбутнім поколінням. Внаслідок військових дій на території України багато пам'яток архітектури було знищено, а іншим загрожує руйнування. У зв'язку з цим, методи збереження та аналізу архітектурних об'єктів постійно вдосконалюються, і одним з найефективніших інструментів в цьому процесі є наземне лазерне сканування.

Наземне лазерне сканування - це передова технологія, яка дозволяє отримати детальну інформацію про об'єкт без прямого контакту з ним. Вона використовує лазерні сканери для точного вимірювання розмірів та форми об'єкта за допомогою лазерного випромінювання, створюючи так звану "хмару точок", щоб в подальшому сформувані складне, деталізоване та високоточне тривимірне зображення, що відображає форму та структуру об'єкта.

Наземне лазерне сканування є потужним інструментом для збереження пам'яток архітектури. Ця технологія дозволяє здійснювати точний збір геометричних даних об'єктів будь-якої складності та розміру. Внаслідок чого можна отримати детальні 3D-моделі об'єктів з високою точністю та роздільною здатністю. Використання наземного лазерного сканування спрощує процес документування пам'яток архітектури, зменшує час і зусилля, необхідні для отримання високоякісних даних, і відкриває нові можливості для їх подальшого використання в різних областях, таких як реставрація, консервація, архітектурне проектування та візуалізація.

Більшість сучасних досліджень лише поверхнево торкаються теми наземного лазерного сканування. Серед українських науковців, які досліджували лазерне сканування є: Маліцький А.Ю, та Шульц Р. В. Проте, лазерне сканування є предметом дослідження багатьох зарубіжних вчених, серед яких найвідомішими є: Boehm J, та Lerma J. L.

**Метою дослідження** є розгляд методики виконання наземного лазерного сканування пам'яток архітектури з метою їх збереження.

**Основні завдання досліджень:**

- аналіз формування технології лазерного сканування на основі розробки лазерних сканерів;
- дослідження видів лазерного сканування за принципом розташування сканера;
- дослідження принципу дії та технічні характеристики наземних лазерних сканерів;
- аналіз поняття «пам'ятки архітектури» та важливість її збереження;
- аналіз технології лазерного сканування пам'яток архітектури та прикладів його виконання;
- дослідження методики виконання наземного лазерного сканування пам'ятки архітектури на прикладі Княжого Храму Святого Миколая.

**Об'єктом дослідження** є пам'ятка архітектури, яка потребує детального документування для збереження її історичної та культурної цінності.

**Предметом дослідження** є методика виконання наземного лазерного сканування пам'ятки архітектури, для отримання її точної 3D-моделі.

Для написання кваліфікаційної роботи використовувалися різні **методи дослідження**, що відображається у структурі розділів. У першому розділі застосовувався описовий метод для викладення теоретичних аспектів лазерного сканування, його аналіз та порівняння для оптимізації його використання. Другий розділ також базувався на описовому методі для представлення загальних відомостей про поняття «пам'яток архітектури» та їх значення в сучасному світі, а також на методах дослідження та спостереження для аналізу проектів, виконаних за допомогою технології наземного лазерного сканування. У третьому розділі застосовувалися описовий метод для викладення інформації про конкретний об'єкт - Княжий Храм Святого Миколая, а також систематизований метод та метод дослідження для опису методики сканування

пам'яток архітектури. Ці методи дозволили структурувати матеріал та передати зроблені дослідження та висновки чітко та зрозуміло.

**Практична значимість отриманих результатів** має велике значення у багатьох сферах. По – перше, результати цієї роботи можуть доповнювати сучасні дослідження щодо методики наземного лазерного сканування пам'яток архітектури, розширюючи розуміння про цей процес та його можливості. По – друге, ця робота надає конкретні методичні вказівки для виконання сканування, що корисно для спеціалістів у галузі консервації та реставрації пам'яток архітектури. По – третє, дана робота розширить розуміння про лазерне сканування за допомогою якого відбувається ефективно збереження пам'яток архітектури та саму важливість його використання, особливо в період повномасштабного вторгнення.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ

#### 1.1. Лазерне сканування, його історія виникнення та види

В останні роки цифрові технології стають необхідними в різних галузях. Росте важливість автоматизації контролю якості. З поширенням технологій, що вимагають реалістичних моделей об'єктів, все більш популярним стає 3D-сканування, яке швидко створює віртуальні моделі реальних об'єктів, що дозволяє здійснювати їх детальний аналіз.

3D-сканування за типом взаємодії сканерів з об'єктом можна поділити на два типи – контактне і безконтактне.

Контактне сканування використовує пристрої, які фізично контактують з об'єктом під час сканування для збору точкових даних про його форму та поверхню. Це здійснюється за допомогою дотику або контактних датчиків. Отримані дані використовуються для створення цифрової моделі поверхні об'єкта. Однією із найбільших переваг контактного сканування є здатність вивчати внутрішню структуру об'єктів, що мають отвори або поглиблення. Проте такий метод має ряд недоліків, а саме ризики пошкодження досліджуваної поверхні, якщо вона недостатньо тверда або крихка та відносно повільне сканування у порівнянні з безконтактним методом.

Координатно-вимірювальні машини (далі – КВМ) типу “руки” є високоточними контактними 3D-сканерами, які застосовуються на виробництві (рис. 1.1.). Ці пристрої отримали назву “руки” через свою здатність відтворювати рухи та дії людської руки під час вимірювання.

Принцип роботи такої машини досить простий. Оператор доторкається щупом до місця вимірювання і встановлює маніпулятор у зручному положенні. Це можна зробити за допомогою магнітної підставки прикріпивши її до металевої поверхні. Відомості про просторові координати вістря зонда (якщо використовується гостре вістря) або центр сфери (якщо використовується сферичне вістря) отримуються з використанням датчиків, які зазвичай

розташовані на шарнірах маніпулятора, і передаються на спеціальні комп'ютери.



Рис. 1.1. Загальний вигляд КВМ типу «рука» [1]

КВМ типу "рука" широко застосовується у таких областях, як 3D-моделювання, вирівнювання, перевірка геометрії, перевірка штампувальних і ливарних форм, калібрування, контроль деталей в процесі обробки, швидке прототипування та інспекцію поверхонь, збірних агрегатів, тощо.

Під час безконтактного сканування, сканери працюють без прямого контакту з об'єктом. Існують два підтипи цих сканерів: активні та пасивні. Для отримання рельєфу поверхні об'єкта у активних безконтактних сканерах використовуються лазерне, ультразвукове або рентгенівське випромінювання. У пасивних 3D-сканерах застосовують цифрові зображення. У нашій роботі ми зосередили увагу на активному підтипі безконтактного сканування (лазерне випромінювання), а саме на технології лазерного сканування.

Безконтактне лазерне сканування виникло в 1960-х роках з метою точного захоплення профілю поверхонь. Перші сканери використовували для цього завдання світло, камери та проектори. На той час вони не мали широкого спектру можливостей, але це були справжні сканери, які ефективно виконували свою функцію. Проте, через обмеження обладнання для точного сканування об'єктів часто потрібно було багато часу та зусиль і кінцевий результат на той момент був недостатньо точним.

Після 1985 року розвивалася нова технологія сканування. Сканери отримали змогу використовувати біле світло, лазери та тіні для захоплення певної поверхні, однак, вони були громіздкими та повільними, а вимоги до обчислювальної техніки на той час не задовільняли потреби камерального опрацювання результатів обмірів [2].

Компанія Mensi (яка через 11 років була продана Trimble) була фактично першою компанією, яка у 1992 році розробила 3D-лазерний сканер (рис. 1.2.). З практичної точки зору, сканер Mensi був відносно повільним (~100 точок/с). Сканування займало близько години. Сканер можна було використовувати лише при слабкому освітленні, що обмежувало його використання на відкритому середовищі. Однак сканер вирізнявся високою точністю на близькій відстані та гарним полем зору, що спрощувало процес налаштування. На близькій відстані (менше 5 м) ці сканери забезпечували найвищу точність, але збільшення дальності призводило до зниження точності, тому практична максимальна дальність для сканера Mensi з найбільшим радіусом дії становила приблизно 15 м або близьким до того. У 2001 році компанія Amec випробувала цей сканер на технологічному заводі, але виявилось, що він має занадто багато проблем, щоб розглядати його ефективним інструментом для роботи на той час [3, 4].

Компанія Cyra Technologies у 1998 році створила перший в історії лазерний сканер для використання геодезистами та інженерами – Cyraх 2400 (рис. 1.2.). Це був портативний сканер, хоча з акумулятором і ноутбуком він важив приблизно 40 кг. Він сканувався під полем зору  $40^\circ \times 40^\circ$  і отримував 1200 точок/с на відстані до 50 м від поверхні. Кілька років потому Cyraх продала технологію компанії Leica Geosystems [4]. В той же час у 1998 році компанія Riegl розробила свій перший 3D-сканер – LMS Z 210 (рис.1.2). Сильними сторонами Riegl LMS-Z210 були: більший радіус дії, який становив до 350 м, вища швидкість сканування (~9000 точок/с), а також стійкість до навколишнього середовища та надійність. Він також мав хороше поле зору ( $80^\circ \times 340^\circ$ ) [3].

Компанія Res-Tech також входила до числа компаній, що мали плани щодо створення приладів в області лазерних вимірювальних технологій. Компанію Res-Tech заснували Саймон Рааб і Грег Фрейзер 21 лютого 1981 року, і через два роки її назву змінили на FARO. Вони розпочали свою діяльність з розробки технологій та програмного забезпечення для підтримки хірургічних і діагностичних методів. У 2005 році був випущений їх перший лазерний сканер - Faro LS (рис. 1.2.), із радіусом дії до 80 метрів, точністю +/-3 мм та швидкістю сканування 120 000 точок/с [5].

Компанії надалі продовжували розробляти сканери та вдосконалювати саму технологію лазерного сканування, так у 2006 році Leica Geosystems випустила HDS 6000 (рис. 1.2.), з полем зору  $270^{\circ} \times 360^{\circ}$ , точністю 6 мм на відстань 50 м і часом сканування лише 3,5 хв для 500 000 точок/с. Це був перший сканер, який значно покращив діапазон вертикальної осі, збільшивши його з 80 градусів до 270 градусів, що істотно полегшило сканування стелі та об'єктів над сканером [4].



Рис.1.2. Розробка сканерів, як основа формування технології лазерного сканування\*

\* Розроблено автором

Приблизно 10 років тому на українському ринку геодезичних робіт, з'явилася технологія лазерного сканування, яка швидко здобула популярність і тепер успішно використовується у все більшій кількості геодезичних задач.

Лазерне сканування – це технологія вимірювання відстані від сканера до точок об'єкта, яка використовує лазерне випромінювання з високою швидкістю. Об'єднання горизонтальних і вертикальних кутів лазерного променя сприяє точному просторовому позиціонуванню кожної вимірюваної точки в умовній системі координат. Результатом одного сканування є мільйони таких вимірювань, що утворюють щільну «хмару точок». Ця «хмара точок», що містить безліч точкових даних, збирається, щоб сформувати складне, деталізоване та високоточне тривимірне зображення, що відображає форму та структуру об'єкта.

Лазерне сканування широко використовується завдяки його здатності збирати дані з об'єктів, поверхонь, структур і ландшафтів з високою точністю та деталізацією. Його основна мета - отримання максимально точних результатів у найкоротший час.

Сфери застосування лазерного сканування:

- створення 3D-моделей будівель інженерних споруд;
- сканування пам'яток архітектури, пам'ятників та унікальних об'єктів для їх реконструкції та збереження;
- дорожня та тунельна зйомка;
- сканування в гірничодобувній промисловості;
- моніторинг деформації будівель і споруд;
- фіксація наслідків надзвичайних ситуацій.

Лазерне сканування за принципом розташування сканерів поділяється на наземне, повітряне та мобільне (рис. 1.3.).



а)



б)



в)

Рис. 1.3. Види лазерного сканування за принципом розташування сканерів [6]:

- а) наземне лазерне сканування; б) повітряне лазерне сканування;  
в) мобільне лазерне сканування

Наземне лазерне сканування (далі – НЗЛС) (рис. 1.3, а) – здійснюється за допомогою наземних лазерних сканерів (далі – НЛС). Вони вимірюють вертикальні та горизонтальні напрямки розповсюдження лазерного променя, а також відстані до точок об’єкту. НЗЛС виконується із землі в дискретному режимі, з пересуванням приладу. Цей метод можна використовувати, як у відкритій місцевості, так і в закритих приміщеннях і середовищах, а саме в тунелях та печерах.

Технологія НЗЛС застосовується для створення детальних тривимірних моделей об'єктів, фасадів та топографічних планів місцевості масштабу 1:500. НЛС дозволяють знімати з точністю  $0,1 \div 1$  мм об'єкти  $0,5 \div 2$  см. НЗЛС може проводитись в будь-який час доби. Продуктивність сканування залежить від об'єму робочої площі і може становити  $1000 \div 4000$  м<sup>2</sup> під час зйомки фасадів в масштабі 1:50,  $4 \div 20$  га під час зйомки топографічних планів масштабу 1:500.

Недоліком технології НЗЛС є низька продуктивність.

Завдання, що вирішуються за допомогою НЗЛС:

- побудова 3D-моделей будівель;
- ведення будівництва і його контроль;
- постійний моніторинг над надзвичайно важливими об'єктами і небезпечними ділянками у режимі реального часу;
- розрахунок об'ємів зміщення ґрунту, зрушень схилів та інше [7, 8].

Повітряне лазерне сканування (далі – ПЛС) (рис. 1.3, б) виконується з будь-якого повітряного носія, такого як літак, вертоліт, дрон, безпілотний літальний апарат та інші. Лазерні сканери випромінюють лазерний промінь до об'єктів місцевості та отримують відбитий сигнал. Цей метод зйомки відбувається у безперервному режимі, що особливо ефективно для малонаселених територій.

ПЛС використовується для детального картографування лінійних та площадних об'єктів з повітряних носіїв в масштабах  $1:500 \div 1:5000$ . Його точність становить  $5 \div 8$  см, детальність відтворення –  $20 \div 50$  см. ПЛС може охоплювати до 800 км, з шириною смуги  $1000 \div 1500$  м. Цей метод дозволяє уникнути значної кількості наземних робіт, що робить його особливо ефективним в малонаселеній місцевості або на небезпечних ділянках.

Недоліком ПЛС є низька деталізація під час зйомки вертикальних поверхонь (наприклад, стін).

Завдання, що вирішуються технологією ПЛС:

- розробка топографічних планів  $1:500 \div 1:5000$ , а також їх оновлення;

- дешифрування областей, де можуть відбуватися небезпечні геологічні явища;
- моніторинг будівель та споруд [7, 8].

Мобільне лазерне сканування (далі - МЛС) (рис. 1.3, в) збирає точні просторові дані у великому масштабі. Зйомка здійснюється з водного або наземного носія в безперервному режимі, це може бути автомобіль, човен, поїзд, тощо. Завдяки цьому методу, хоч і на короткий час, але є можливість виконувати сканування в закритих середовищах, це може бути проїзд під мостами, короткими тунелями, тощо. МЛС чудово підходить для використання на міських територіях.

Технологія використовується для масштабного картографування і створення 3D-моделювання лінійних об'єктів інфраструктури (автомобільних доріг, ліній електропередачі, залізниць, вулиць міст), для площадних об'єктів великої детальності і складної структури (населених пунктів, скелястих берегів, розв'язок дорожнього руху та естакад в кілька рівнів та інших). Точність сканування становить 5÷8 см, деталізація – 1÷5 см. Продуктивність знімання досягає до 500 км, з шириною смуги зйомки – 50÷250 м.

Недоліками МЛС є обмежена можливість під час зйомки дахів об'єктів, можливі перешкоди від об'єктів, що знаходяться поруч з носієм, наприклад, паркани чи кущі.

Завдання, що вирішуються технологією МЛС:

- розробка 3D-моделей великих промислово-територіальних комплексів;
- контроль інфраструктури, будівель та інших споруд;
- розробка профілів доріг та їх плани [7, 8].

Рішення про вибір конкретного виду сканування залежить від поставленої мети та завдань. Для досліджень нами було обрано технологію наземного лазерного сканування, оскільки на сьогоднішній день цей метод з високою швидкістю (сотні тисяч точок в секунду) вимірює координати значної кількості точок на поверхні об'єкта з точністю від кількох міліметрів до 4 см без великих спотворень поверхні та широко використовується для створення 3D-моделей

пам'яток архітектури. Наземне лазерне сканування є оптимальним способом знімання архітектурних, геологічних, певних археологічних об'єктів, результати якого дають змогу створити цифрові моделі відсканованих об'єктів. Маючи цифрову модель, можна задокументувати та вивчати об'єкт з різних ракурсів, проводити різні експерименти для перевірки гіпотез і створювати різноманітні графічні матеріали. Важливою перевагою є те, що ці дослідження можна проводити в камеральних умовах у будь-який зручний момент, не потребуючи відновлення знімальних робіт безпосередньо на об'єкті.

## **1.2. Наземні лазерні сканери, їх види та характеристика**

Наземне лазерне сканування виконується за допомогою наземних лазерних сканерів.

У сьогоdnішній час існує велика кількість наземних лазерних сканерів різної конструкції, які відрізняються між собою за дальністю, точністю та швидкістю. Тому, розглянемо основний принцип їх дії та види, які використовуються у геодезії, моніторингу, будівництві та при вирішенні інших інженерних завдань.

НЛС працюють за принципом вимірювання часу, необхідного для проходження лазерного променя від випромінювача до поверхні об'єкта і назад до приймача або фазового зсуву. Основними структурними елементами НЛС є:

- далекомірний блок. На шляху приймально-передавального пристрою далекоміра є перешкоди, далекомірний блок вимірює відстань до цих перешкод. Для випромінювання використовується напівпровідниковий лазер. Відстань можна визначити за часом проходження (імпульсний метод), за фазовим зсувом відбитого сигналу (фазовий метод) та триангуляцією;

- оптико-механічний блок розгортки лазера (блок розгортки). Цей блок розгортки відповідає за зміщення приймально-передавального тракту далекоміра і фіксацію кутів спрямованості випромінювання за допомогою оптико-механічної системи, що включає в себе дзеркальні призми і сервоприводи. Вертикальна розгортка виконується за допомогою плоскої або

багатогранної дзеркальної призми, а горизонтальна розгортка, зазвичай, здійснюється шляхом розвороту блоку розгортки навколо осі 2';

- канал передачі даних на керуючий комп'ютер [9].

За принципом дії лазерні сканери поділяються залежно від методів вимірювання відстаней, а саме на: імпульсні, фазові та триангуляційні.

Імпульсний метод вимірювання відстаней характеризується тим, що під час вимірювання випромінюваний промінь відбивається від поверхні об'єкту, а його повернення реєструється в детекторі (рис. 1.4.). На підставі вимірювання часу між моментом випромінювання та поверненням імпульсу згідно з рівнянням (1.1) розраховується відстань об'єкту від сканера [10]. Основним чинником, що визначає точність методу, є точність вимірювання часу, а саме реєстрація імпульсів. Сучасне обладнання вимірювання часу здатні реєструвати імпульси з точністю до  $10^{-12}$  с, що дає змогу проводити вимірювання відстаней з точністю до 1 мм.

$$L = \frac{c \times \Delta t}{2}$$

де (1.1)

$L$  – відстань точки від сканера [м],

$c$  – швидкість руху променя, що дорівнює швидкості світла [м/с],

$\Delta t$  – різниця в часі між моментом відправлення променя та його поверненням [с].

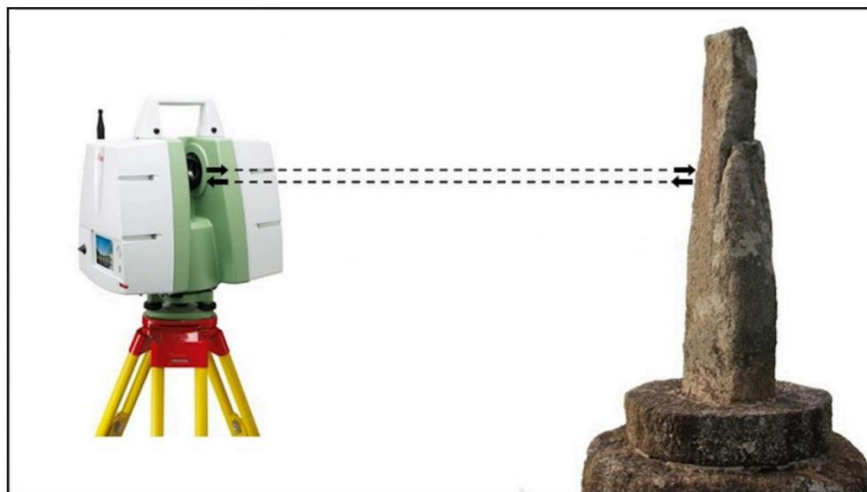


Рис. 1.4. Імпульсний метод вимірювання відстаней [11]

Перевагами імпульсного методу вимірювання відстаней є велика дальність дії при невеликій потужності імпульсу та однозначність отриманих результатів (довжини ліній пропорційні часу надсилання/прийому сигналів). Недоліками цього методу є обмежена частота надсилання імпульсів в залежності від відстані до об'єкта та менша точність [9].

Фазовий метод вимірювання відстаней виконується шляхом аналізу зсуву фази хвилі, що повертається до детектора після відбиття від об'єкта, порівняно з фазою надісланого променя (рис. 1.5.). Відстань від об'єкта до сканера розраховується за рівнянням (1.2) [10]:

$$L = \frac{1}{4\pi} \times \frac{c}{f} \times \phi \quad (1.2)$$

де

$L$  – відстань об'єкта від сканера [м],

$c$  – швидкість світла [м/с],

$f$  – частота хвилі [Гц],

$\phi$  – фазовий зсув [рад].

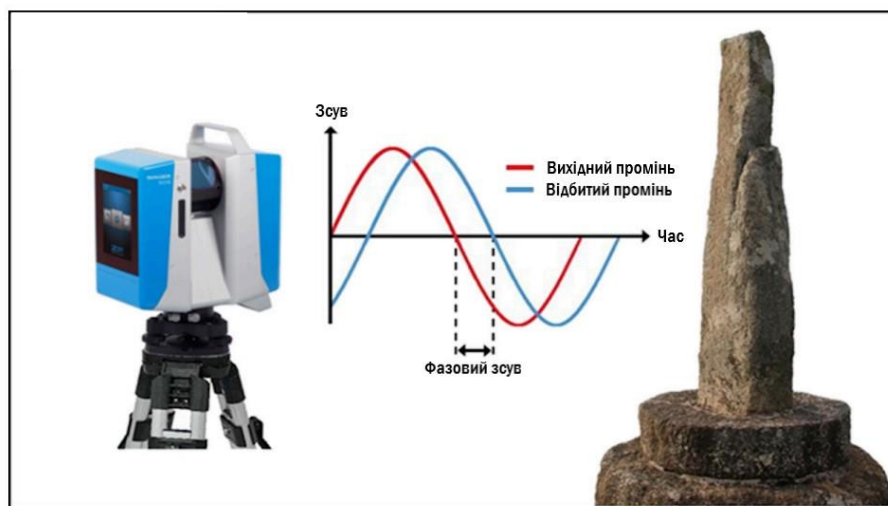


Рис. 1.5. Фазовий метод вимірювання відстаней [11].

Перевагами фазового методу вимірювання відстаней є велика точність вимірювань і більша продуктивність, оскільки можливо роздільно

демодулювати сигнали, що прийшли на приймач одночасно, за рахунок зміни закону модуляції несучого коливання в часі. Недоліками цього методу є необхідність великої потужності випромінювача і обмежена дальність дії [9].

Триангуляційний метод полягає у визначенні потрібної відстані шляхом співвідношення сторін трикутника із застосуванням відомих параметрів системи. Вимірювання здійснюється за допомогою лазерного променя, який після відбиття від об'єкта надходить на матрицю цифрової камери. Рисунок 1.6 показує, що на стороні трикутника ( $D$ ) відома відстань між камерою та лазерним випромінювачем. Також відомий кут лазерного випромінювача ( $\alpha$ ). Кут камери ( $\beta$ ) можна визначити, дивлячись на розташування лазерного променя в полі зору камери. Ці три частини інформації повністю визначають форму та розмір трикутника і забезпечують точне розташування об'єкта вимірювань. Це дозволяє вимірювати, як відносну зміну відстані від датчика до контрольованого об'єкта, так і абсолютну його величину. Контрольована відстань може мати масштаб від декількох мікрометрів до сотень і навіть тисяч метрів [12].

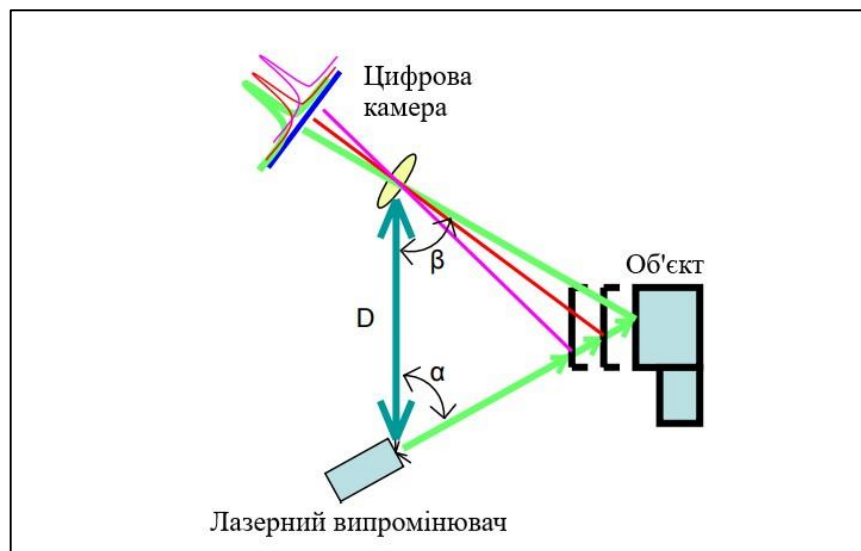


Рис. 1.6 Триангуляційний метод вимірювання відстаней [12]

Перевагами триангуляційного методу є висока точність та швидкість збору даних. Недоліками цього методу є нездатність оцифрувати прозорі об'єкти та малий радіус дії [13].

Принцип дії блоку розгортки наземних лазерних сканерів полягає в їх здатності працювати як у покроковому, так і у безперервному режимах.

Покроковий режим роботи блоку розгортки в НЛС означає, що реєстрація кутів спрямованості приймально-передавального пристрою відбувається одночасно з подачею імпульсу. У таких системах блок розгортки залишається нерухомим до моменту прийняття імпульсу або до закінчення певного проміжку часу, впродовж якого випромінювання пройде максимально можливу для даної моделі сканера відстань (якщо неповернення сигналу).

Характерною особливістю НЛС з покроковим режимом блоку розгортки є обмежена швидкість роботи, що виникає через потребу у часі для проходження сигналу на подвійну відстань до перешкоди.

Безперервний режим роботи блоку розгортки характеризується тим, що приймально-передавальний пристрій працює за рахунок безперервного обертання блоку розгортки в горизонтальній і вертикальній площинах.

Ці блоки розгортки гарантують високу швидкість вимірювань, оскільки часто саме частина, що відповідає за обертання, обмежує швидкість НЛС. Однак безперервне обертання блоку розгортки може створити деяку неоднозначність у вимірі відстаней, на яку потрібно звернути увагу, тому що блок розгортки зміщується на певний кут протягом часу, який необхідно випромінюванню для повернення на приймач [9].

На сучасному ринку геодезичного обладнання можна знайти широкий асортимент НЛС. Основні технічні характеристики, які дозволяють оцінити можливості цих приладів, включають: 1.) дальність дії; 2.) точність вимірювання відстаней; 3.) швидкість виконання вимірювань; 4.) мінімальний кутовий крок сканування; 5.) кут поля зору; 6.) діапазони допустимих температур і зовнішніх умов; 7.) клас безпеки лазера; 8.) споживання напруги НЛС; 9.) можливість геодезичного орієнтування НЛС.

Розглянемо більш детально вказані технічні характеристики НЛС.

Дальність дії НЛС визначає максимальну відстань за допомогою якої можна отримати чіткий результат роботи з необхідною точністю. Цей показник

залежить від методу вимірювань відстаней, потужності лазера та властивостей поверхні, яка відбиває промінь. Розрізняють:

- НЛС ближнього радіусу дії відзначаються високою точністю вимірювань (до сотих долей міліметра), але їх дальність дії обмежена до 2 м та/або кут поля зору знаходиться в межах кута поля зору об'єктива цифрової камери. Більшість таких НЛС є стаціонарними;

- НЛС середнього радіусу дії забезпечують точність до декількох міліметрів на відстанях до 150 м. Ці НЛС мають досить великий кут поля зору;

- НЛС дальнього радіусу дії виконують вимірювання на відстані від 150 м, з точністю  $1 \div 50$  мм. Ці НЛС мають високу швидкість вимірювань - до 500 000 точок за секунду та панорамний кут поля зору в горизонтальній площині. Дані сканери відомі, як «топографічні наземні лазерні сканери»;

- маркшейдерські НЛС забезпечують велику дальність дії – понад кілометр та характеризуються похибкою, яка сягає дециметрів [9, 14].

Точність вимірювання відстаней визначається похибкою одного вимірювання і залежить від конструкції далекоміра та методу вимірювання відстаней. Великий вплив на точність має розбіжність лазерного випромінювання. Під час вимірювання відстаней до не перпендикулярних осі променя площин або об'єктів складної форми, відбитий сигнал може надходити від декількох елементів поверхні, що може викликати похибки у виміряних відстанях. У результаті виміряна відстань буде відповідати довільній точці поза межами об'єкта. Чим більший розмір лазерної плями, тим більша різниця між координатами виміряних точок та істинним значенням.

Швидкість виконання вимірювань визначається кількістю точок, які реєструються НЛС за одиницю часу. Цей показник залежить від конструкції блоку розгортки і методу вимірювання. Типові значення швидкості – 50 000 – 2 000 000 точок/с.

Мінімальний кутовий крок сканування – найменша кутова величина зміщення блоку розгортки, яка використовується при кожному вимірюванні. Він встановлює максимально можливу щільність зйомки об'єкта для

конкретної моделі НЛС і залежить від особливостей конструкції блоку розгортки.

Кут поля зору НЛС визначає максимальну область, яку можна охопити з однієї сканерної станції без переміщення і розвороту НЛС, він вимірюється в градусній мірі - в горизонтальній і вертикальній площинах. У протиположності до перших НЛС, які мали кут поля зору  $40^\circ$  в обох площинах, більша частина сучасних моделей НЛС наділені кутом поля зору, який близький до панорамного - це до  $360^\circ$  в горизонтальній і  $320^\circ$  у вертикальній площинах.

Діапазони допустимих температур і зовнішніх умов у кожній моделі НЛС різний. У силу конструкційних особливостей НЛС не мають підвищеної морозостійкості, що обмежує їх використання поза приміщенням взимку. Проте, останніми роками виробники активно вдосконалюють цей параметр НЛС, в певній мірі через підвищення попиту на НЛС. Сучасні моделі мають високий рівень захисту від пилу та вологи, що дозволяє їм працювати в умовах сильної запиленості та вологості. Більше використовуються НЛС, які мають рідинне охолодження, що забезпечує герметичність і захист від впливів зовнішнього середовища. Клас захисту сканера повинен відповідати стандарту ІЕС (International Electrotechnical Commission) 60825-1 [15]. Сучасними, удосконаленими НЛС можна працювати при температурах до  $-40^\circ\text{C}$  і вони мають клас захисту до IP66.

Споживана напруга. Більшість моделей НЛС можуть працювати, як від джерела змінної, так і від джерела постійної напруги. Робота від джерела змінної напруги зручна у закритих виробничих приміщеннях з мережею 220 В. На відкритих об'єктах НЛС живляться від спеціалізованих або будь-яких інших акумуляторних батарей, що надають стабільну напругу від 12 до 24 В. Деякі моделі НЛС вимагають мінімальної напруги 24 В, що може збільшити вагу джерела живлення і зменшує мобільність.





Можливість геодезичного орієнтування НЛС. Приведення результатів вимірів НЛС у відповідну систему координат здійснюється через процес орієнтування, за допомогою відомих точок з відомими координатами, які

називаються сканерними марками. Більшість НЛС не мають вбудованих пристроїв для обліку нахилу і розвороту, тому орієнтування здійснюється саме цим способом. На сьогоднішній день виробники НЛС прагнуть перейти на традиційний спосіб орієнтування, аналогічний тому, який використовують електронні тахеометри. Для цього деякі НЛС комплектують пристроями, що компенсують кути нахилу приладу в певному діапазоні або враховують їх. При наявності відомих значень кутів нахилу, дирекційного кута однієї осі і положення центру сканера, вимірювання можуть бути приведені до потрібної системи координат [9].

Наведемо приклад технічних характеристик лазерних сканерів відомих виробників (табл. 1.1) [6, 16, 17, 18, 19].

Таблиця 1.1

### Технічна характеристика лазерних сканерів\*

Характеристики	 Leica ScanStation P40	 FARO focus S 150	 Trimble TX8	 Topcon GLS- 2200 S
Тип сканера	імпульсний	фазовий	імпульсний	імпульсний
Клас безпеки	1	1	1	1
Точність вимірювання віддалі [мм/м]	1,2 + 10 ppm	1	<1/80	3,5/150
Кутова точність ["]	8"	19"	16"	6"
Мінімальна/максимальна віддаль [м]	0,4/270	0,6/150	0,6/340	1/130
Частота сканування [точ/с]	1 000 000	976 000	1 000 000	120 000
Поле зору по вертикалі (горизонталі) [°]	290/360	300/360	317/360	270/360
Час роботи акумулятора [год]	>2,5	4,5	2	2,5
Розмір сканеру [мм]	238×358×395	230×183×103	335×386×242	293×228×390
Маса [кг]	12,25	4,2	11	10
Пило - водозахищеність	IP54	IP54	IP54	IP54
Робоча температура [°C]	від -20 до 50	від -10 до 60	від 0 до 40	від -5 до 45
Ціна, грн	3 331 440	1 062 500	3 260 000	1 800 000

\* Розроблено автором

Розвиток НЛС стрімко продовжується, із постійним вдосконаленням алгоритмів обробки результатів вимірювань. Це призводить до розробки нових систем, що створює складнощі у стандартизації та класифікації для всіх типів сканерів в цілому. Вибір наземного лазерного сканера залежить від різноманітних факторів, таких як потреби проекту, характеристик об'єкта, бюджету, вимог до точності вимірювань, швидкості сканування та доступності технічної підтримки.

### **Висновки до розділу 1**

Лазерне сканування - це технологія, яка використовується для створення тривимірних моделей об'єктів або поверхонь з хмари точок за допомогою лазерного променя. Історія лазерного сканування починається з 1960-х років. З тих пір технологія постійно розвивалась і вдосконалювалась, і зараз вона широко використовується у багатьох галузях, включаючи будівництво, архітектуру, геодезію, археологію та інші. Лазерне сканування за принципом розташування сканерів поділяється на наземне, повітряне та мобільне. Вибір виду сканування залежить від поставленої мети та завдань.

Наземні лазерні сканери - це спеціальні пристрої, які використовуються для сканування поверхонь та об'єктів на земній поверхні. Наземні лазерні сканери представлені різноманітними моделями, кожна з яких має свої особливості і переваги. Їх можна класифікувати за багатьма критеріями, такими як дальність сканування, точність і швидкість сканування та ін.

Можна відзначити, що наземне лазерне сканування є важливою технологією для отримання точних тривимірних моделей об'єктів та поверхонь. Їхнє застосування допомагає зберегти культурну спадщину, покращує ефективність будівельних проектів та сприяє науковим дослідженням у різних галузях.

## РОЗДІЛ 2

### ПАМ'ЯТКИ АРХІТЕКТУРИ ТА ЇХ ЗБЕРЕЖЕННЯ

#### 2.1. Пам'ятка архітектури та її значення для сьогодення

Пам'ятка архітектури — це об'єкт архітектурної спадщини, який має велике культурне, історичне або архітектурне значення і є предметом особливого захисту та збереження.

Пам'ятки архітектури є невід'ємною частиною сучасного світу. Вони з'єднують минуле і сьогоденням, зображуючи подорож людської цивілізації крізь віки. Пам'ятка архітектури відображає геополітичні, соціально-культурні та економічні умови, в якій вона була побудована [20].

Загальновідомо, що збереження культурної спадщини може допомогти у вихованні молодих поколінь через історичні події. Крім того, історична пам'ятка, це щось успадковане від предків, те, з чим ми живемо сьогодні, і що ми передаємо майбутнім поколінням [21]. Вони дають нам розуміння про культуру, знання і спосіб життя людей у кожен період історії людства. Таким чином, необхідність вивчати, зберігати та візуалізувати історичні пам'ятки чи місця є високопріоритетними задачами. Охорона пам'ятки історії є важливим питанням через його високу історичну цінність. Ці об'єкти піддаються ерозії, вандалізму, і як старовинні артефакти, вони пройшли через багато етапів будівництва, пошкодження та ремонтів [22].

Причини руйнування пам'яток архітектури можуть бути дуже різними і включають в себе різні аспекти впливу як природного, так і техногенного характеру. До таких причин належить:

1. Руйнування під впливом природи. Воно охоплює різноманітні фактори, такі як перепад температур, кліматичні умови, вплив води і дощу, повені, дія вітру (вивітрювання), вплив сонця, зрушення ґрунту, пожежі, вібрації, а також вплив біологічних об'єктів (пліснява, гриби, мохи, водорості, бактерії) тощо. Крім того, з плином часу будівельні матеріали пам'яток архітектури піддаються старінню, відбувається постійна ерозія матеріалів, окисдування, вигорання

кольорів, втрата стійкості і міцності будівельних матеріалів – все це може спричиняти руйнуванню.

2. Руйнування внаслідок дій людини. Такі руйнування можуть бути наслідком різноманітних техногенних чинників, таких як: недбале ставлення до пам'яток архітектури, вандалізм, проведення наукових досліджень без належного дозволу та умов для цього, несанкціоновані забудови на території пам'яток архітектури або біля них, недостатній догляд за ними, забруднення, недостатнє фінансування на їх збереження та реставрацію, війни та збройні конфлікти.

В сьогоднішній найбільшій руйнуванні пам'яток архітектури в Україні завдає війна, активні бойові дії та ракетні обстріли. Тому, у зв'язку з повномасштабним російським вторгненням культурна спадщина України знаходиться під постійною загрозою знищення.

Російські війська знищують архітектуру українських міст, розстрілюють церкви і театри, спалюють книги і викрадають картини з музеїв. Ці військові злочини спрямовані на знищення української ідентичності, на позбавлення будь-якої згадки про Україну. Збереження історичної та культурної спадщини України є так само важливим завданням, як і збереження життя українців.

Українці, які працюють у культурному секторі, адаптуються до ризиків. Працівники музеїв переміщують колекції у безпечніші місця або тимчасово "консервують" їх, багато пам'ятників оточені вогнестійкими матеріалами, фанерними щитами та мішками з піском, що спрямовано на захист від можливих пошкоджень, які можуть бути спричинені вогнем, уламками чи вибуховою хвилею, а галереї та музеї пропонують онлайн-виставки.

Не можна передбачати, що росія припинить знищення історичних об'єктів. У разі відсутності атак на житлові будинки, ворожа армія спрямовує свою увагу на пам'ятки архітектури, намагаючись завдати шкоди цінним культурним об'єктам. Підрахувати навіть приблизно, скільки пам'яток архітектури Україна втратила під час війни, є складним завданням. Розглянемо

наймасштабніші та найжахливіші руйнації пам'яток української архітектури, які спричинила війна.

Маріупольський театр— це символ трагедії та гуманітарної катастрофи, спричиненої російською агресією (рис. 2.1). Війська росії свідомо нищили цю споруду, яка стала укриттям для тисячі людей міста. Будівля Маріупольського драматичного театру була збудована в 1956—1960 роках, це був осередок культурного життя Маріуполя. Цей театр є найбільшим театром у Маріуполі та одним із найдавніших театрів у східній частині України, в ньому проводились вистави різних жанрів, від класичних до сучасних. У березні 2022 російська бомба зруйнувала його майже повністю. Під його завалами загинули сотні невинних місцевих мешканців [23].



Рис. 2.1. Маріупольський драматичний театр

У селі Сквородинівка на Харківщині внаслідок прямого удару російської ракети було зруйновано Національний музей Григорія Сковороди (рис. 2.2). Це маєток, що належав XVIII століттю, де провів свої останні роки та де був похований відомий український письменник та філософ. Він містив особисті речі філософа, різні твори Сковороди, етнографічні предмети, картини, графічні роботи, пов'язані з життям та творчістю філософа. 6 травня 2022 року ракета терористів влетіла прямо у будівлю, спровокувавши пожежу, що швидко охопила всі приміщення музею. На щастя, колекцію вдалося врятувати — її вчасно перемістили до безпечного місця, а от само будівля зазнала серйозних руйнувань [24].

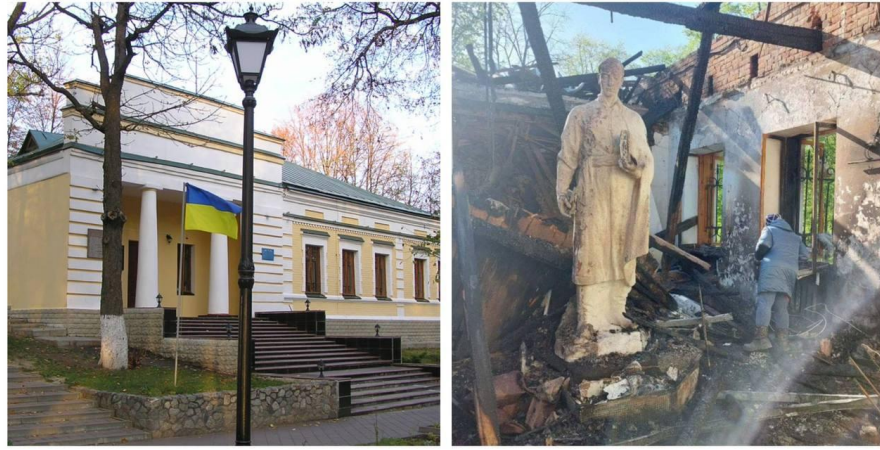


Рис. 2.2. Музей Григорія Сковороди

Церква Різдва Пресвятої Богородиці, що стояла у селі В'язівка Житомирської області, була побудована у 1862 році і вважалася пам'яткою архітектури національного значення (рис. 2.3). Церква збудована з дерева, на кам'яному фундаменті і величаво стояла над тихим берегом річки Жерев. Під час вторгнення російських військ в Україну у березні 2022 року, цей унікальний храм був повністю зруйнований ворогами, залишивши вцілілою лише дзвіницю, яка також зазнала пошкоджень. Варто зауважити, що саме у 2022 році, церква мала би відзначати своє 160-річчя [25].

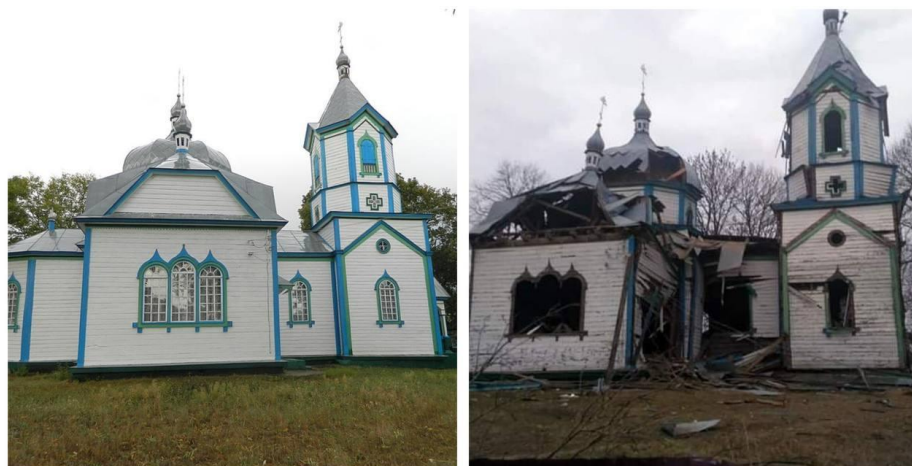


Рис. 2.3. Церква Різдва Пресвятої Богородиці

Музей присвячений головному командиру УПА Роману Шухевичу, він розташований у будинку де він загинув (рис. 2.4). Музей був відкритий 23 жовтня 2001 року і мав два поверхи. На першому поверсі розміщувалася тематична експозиція, яка розповідала про родину Шухевичів, його молоді роки, військово-політичну діяльність та участь у боротьбі за визволення

України. На другому поверсі відтворювалася побутова обстава того часу, коли Роман Шухевич перебував у цьому будинку (весна 1948 — початок 1950 року), що став головним меморіальним об'єктом музею. Останній бій Романа Шухевича з підрозділом МДБ відбувся саме тут 5 березня 1950 року. 1 січня 2024 року музей став жертвою масованої атаки дронів-камікадзе “Шахед”, що призвело до повного знищення історичної пам'ятки. Проте, бронзове погруддя Романа Шухевича, як символ незламного духа українського народу, залишилось майже неушкодженим [26].



Рис. 2.4. Музей Романа Шухевича

Пам'ятки архітектури мають велике значення для сьогодення, особливо в період повномасштабного вторгнення, оскільки вони є не лише свідченням минулих епох і культурних традицій, але й важливим елементом нашої спадщини та ідентичності. Пам'ятки архітектури також можуть мати значний вплив на економіку держави через розвиток туризму та створення робочих місць у сфері культурної спадщини. Без їхнього збереження ми втрачаємо можливість вивчати і розуміти минуле, а також втрачаємо джерело натхнення та естетичного задоволення. Тому, збереження пам'яток архітектури є не лише

моральним і естетичним обов'язком перед минулими та майбутніми поколіннями, але й важливим фактором у розвитку та збереженні культурної ідентичності суспільства.

## **2.2. Лазерне сканування пам'яток архітектури та приклади їх виконання**

Захист пам'яток архітектури від стихій та плину часу — це одна справа, а захистити їх від війни — цілком інша. Щодня в Україні знищують її культурне та історичне надбання. Є спеціальний ресурс, що був створений Міністерством культури й інформаційної політики, на який можна надсилати фото та відео докази руйнувань пам'яток [27]. Такі матеріали можуть слугувати доказами у суді, але як джерело інформації, але для відновлення вони є малоінформативні. Реставрація за допомогою старих фотографій та ескізів була актуальною до появи новітніх технологій. Тепер на перше місце виходить лазерне сканування.

Наземне лазерне сканування пам'яток архітектури - це процес використання лазерних технологій для створення тривимірної моделі будівель, споруд або інших архітектурних об'єктів. Під час лазерного сканування спеціальні пристрої, відомі як лазерні сканери, використовуються для відправлення лазерних променів на поверхню об'єкта і вимірювання відстаней до точок на цій поверхні. По мірі руху сканера лазерний промінь переходить через об'єкт, збираючи дані про форму і контури будівлі. Отримані дані потім обробляються комп'ютерними програмами для створення точної тривимірної моделі архітектурного об'єкта. Ця модель може бути використана для реставрації, консервації, подальшої відбудови та вивчення архітектурної спадщини без необхідності фізичного контакту з об'єктом.

У процесі збереження пам'яток архітектури наземне лазерне сканування має безліч переваг:

- лазерне сканування дозволяє точно документувати пам'ятки, що є надзвичайно важливим у разі пошкодження, втрати або необхідності реконструкції;

- лазерне сканування може зафіксувати найдрібніші деталі будівель та споруд з великою точністю, включаючи архітектурні деталі, рельєф та текстури;

- лазерне сканування відбувається без необхідності безпосереднього торкання пам'яток, що мінімізує ризик їх пошкодження;

- завдяки лазерному скануванню ми можемо проводити детальні дослідження та аналіз пам'яток, що дозволяє нам краще зрозуміти їх історію, структуру та можливі пошкодження;

- лазерне сканування дозволяє віртуально ділитися пам'ятками, дозволяючи широкій аудиторії досліджувати спадщину та знайомитися з нею.

Лазерне сканування дозволяє оцифрувати різноманітні об'єкти культурної спадщини, такі як історичні будівлі, церкви, замки, скульптури, пам'ятники та навіть археологічні комплекси. Це дозволяє зберегти їх зовнішній вигляд і структуру, що сприяє їх подальшому дослідженню, вивченню та доступності для широкої аудиторії. Лазерне сканування також відіграє важливу роль у процесі відновленні пам'яток архітектури, забезпечуючи точні тривимірні моделі, які можна отримати за допомогою лазерного сканування, для реконструкції їхнього вигляду та деталей. Це сприяє відродженню та поверненню колишньої слави місцям, які втратили свій первісний вигляд [28].

Розглянемо реальний приклад, який показав нам і всьому світу наскільки корисним є лазерне сканування для відновлення пам'ятки всесвітнього значення, а саме Собору Паризької Богоматері (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Собору Паризької Богоматері до та під час пожежі

У 2019 році, коли вогонь охопив дах Паризького собору, весь світ із страхом спостерігав за руйнуванням цього шедевра французької готичної архітектури, його 93-метровий шпиль обвалився, а весь дерев'яний інтер'єр Нотр-Даму був повністю знищений. Проте були ті, хто вірили у відновлення Нотр-Даму завдяки 3D-моделі, створеній на основі лазерного сканування. Цю модель створив історик Ендрю Теллон ще у 2015 році для майбутніх реставрацій. Для отримання «хмари точок» було виконано 50 сканувань у різних місцях собору та створено тривимірну модель Собору (рис. 2.6) [29].

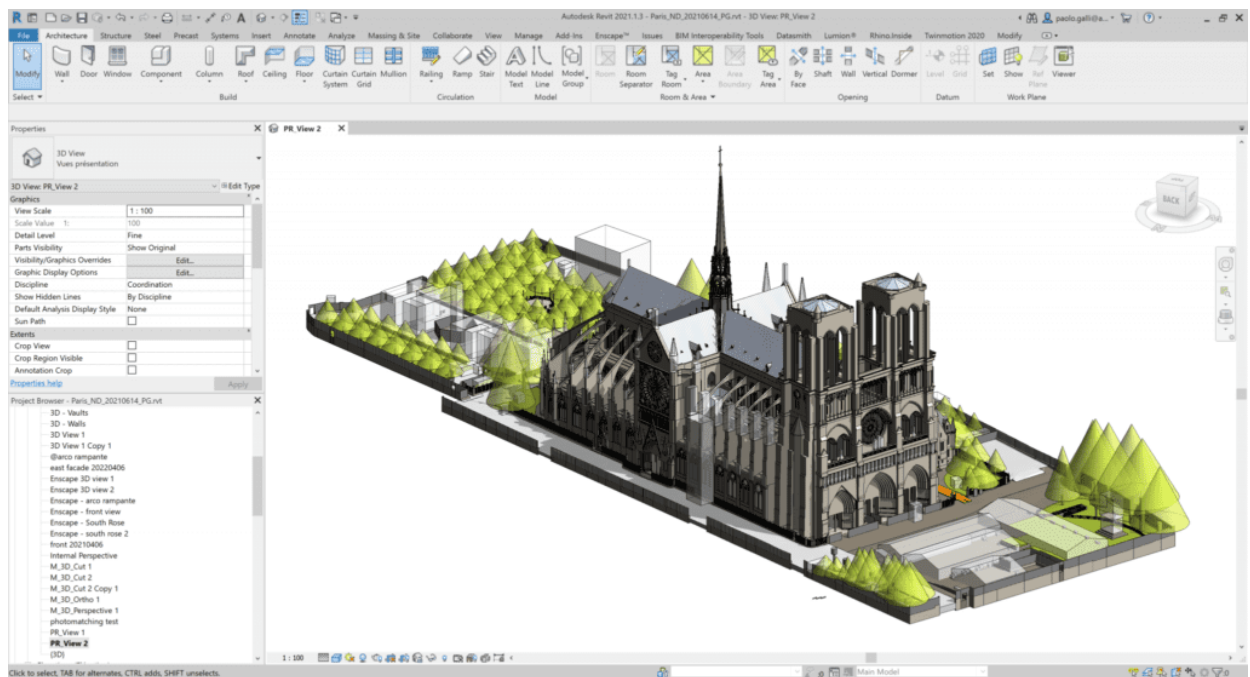


Рис. 2.6. 3D-модель собору Нотр-Дам [30]

Собор Паризької Богоматері є символом Парижа і відомою пам'яткою архітектури на весь світ, тому після пожежі відновлення його до первісного вигляду. Однак це складне завдання, оскільки Нотр – Дам будувався та змінювався протягом сотні років, будь-які креслення чи архівні матеріали про його будівництво будуть неповними. Але виконане сканування допоможе архітектором розробити точні креслення для реставрації та відновити всі втрачені деталі. Можливо, саме це сканування стало ключовим у відродженні Нотр-Даму.

В Україні на сьогоднішній день є організації, які займаються лазерним скануванням пам'яток архітектури та створенням їх 3D-моделей, що допоможе в збереженні і реставрації цих пам'яток.

Однією з таких організацій є компанія Skeiron заснована у Львові в 2016 році. Вона спеціалізується на наданні послуг для культурних інституцій, в тому числі оцифровує музейні колекції та розробляє віртуальні тури. Крім того, команда використовує лазерне сканування для створення 3D-моделей пам'яток архітектури України, щоб мати можливість їх відновлення у майбутньому, якщо це буде необхідно. Серед їх робіт є лазерне сканування Софійського собору у Києві (рис. 2.7) [32].

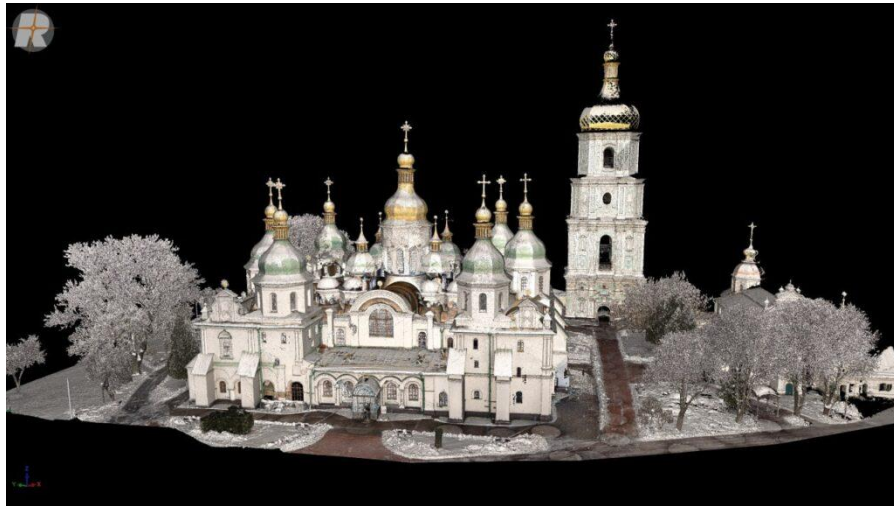


Рис. 2.7. Цифрова модель Софійського собору [32]

Від початку повномасштабного вторгнення Софійський собор перебуває під щоденною загрозою пошкодження або знищення. За літописами, цей собор був збудований у 1037 року за часів князювання Ярослава Мудрого і отримав свою назву від Софійського собору, що у Константинополі. Храм був важливим релігійним, політичним та культурним центром, де відбувалися великі події, такі як інавгурація князів, святі собори, прийом послів та укладення політичних угод. Собор також служив сховищем для літописів і містив першу відому бібліотеку на території Русі [31]. Тому, в грудні 2022 року за підтримки Європейської асоціації архітекторів кафедральних соборів було проведено сканування Софійського собору. Сканування здійснювалося з наземного лазерного сканера Riegl VZ-400 з каліброваною камерою Sony. Команда Skeiron

діджиталізувала екстер'єр та інтер'єр собору у понад 800 позиціях сканування протягом одного тижня. Зібрані «хмари точок» можуть слугувати основою для створення тривимірної моделі Собору. Ці дані значно збільшують наше розуміння культурної спадщини, відкриваючи нові можливості для дослідження, контролю та збереження [32].

Ще однією важливою роботою компанії Skeiron є колишня резиденція митрополитів у Чернівцях. Сьогодні там Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. Діджиталізація цього закладу відбулася у рамках проекту, спрямованого на охорону культурних цінностей та спадщини Буковини (рис. 2.8) [34]. Ці роботи були фінансовані Федеральним Уповноваженим з питань культури та медіа Німеччини.

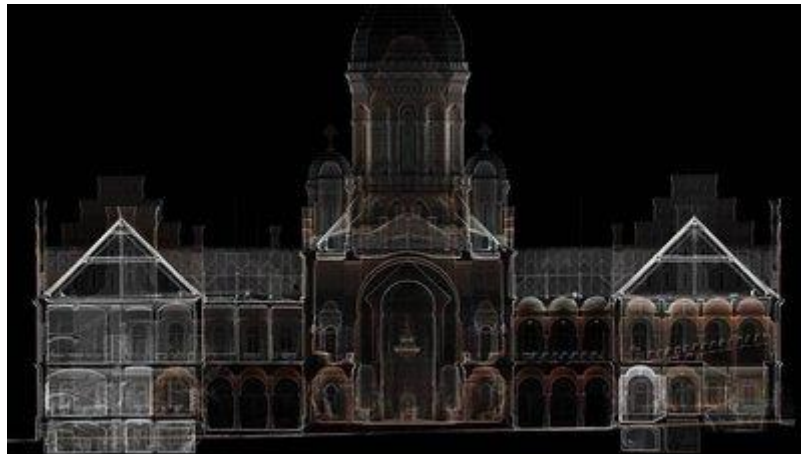


Рис. 2.8. 3D-модель Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича [34]

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича — це один найстаріший класичний університет в Україні. Будівля споруджувалася в період з 1864 по 1882 рік та виконана за проектом відомого чеського архітектора Йосифа Главки як резиденція буковинських митрополитів. 13 років тому було прийнято рішення включити Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича до списку світової спадщини ЮНЕСКО, це стало його унікальною відзнакою, зробивши його сьомим у світі та єдиним українським університетом, який є пам'яткою всесвітньої спадщини та діє як освітній заклад. Цей університет являє собою архітектурний ансамбль, який об'єднанням культур усіх народів, що проживали у даній місцевості. В архітектурі

з'єднуються різноманітні стилі - від візантійських елементів до масивності романського стилю, від готичних вертикалей до мавританського ажурі, утворюючи захопливий ансамбль, який зачаровує. Університет став важливим центром освіти, науки та культури не лише для Буковинського краю і всього західного регіону України [33]. Команда Skeiron створила точну тривимірну модель його фасаду, внутрішніх приміщень та території, під час сканування зробили понад 3000 станцій сканером. На проведення робіт знадобився понад місяць, а для обробки отриманих даних знадобилось близько чотирьох місяців. На основі отриманих даних було створено 3D-модель, за допомогою якої можна проводити різноманітні наукові дослідження, розробляти проекти та планувати реставраційні роботи [34].

ТзОВ геодезично-геологічна група «Мірничий» сучасна компанія з надання послуг топографічного знімання, геології та лазерного сканування, яка працює на ринку з 2009 року. Однією з відомих їх робіт є лазерне сканування Львівського національного академічного театру опери та балету ім. Соломії Крушельницької (рис. 2.9) [36].



Рис. 2.9. ВІМ-модель Львівського національного академічного театру опери та балету ім. Соломії Крушельницької [36]

Львівський оперний театр є одним з найбільш відомих споруд міста Львів, адже це не просто будівля, це справжній шедевр архітектури, який відображає найкращі традиції європейського будівництва та є живим символом культурної ідентичності України. Будівництво театру здійснювалося за

проектом архітектора Зигмунта Горголевського і тривало з 1897 по 1900 роки, а керівництво будівництвом здійснював львівський інженер Іван Левинський. Будівля виконана в класичних традиціях з елементами зухвалого бароко і стриманого ренесансу, і прикрашена вражаючим декором, над яким працювали найкращі майстри Львова і всього Старого Світу. Фасад будівлі щедро прикрашений скульптурами, колонами, нішами і балюстрадами, а на його вершині знаходяться три крилаті бронзові фігури, які символізують Генія драми і комедії, Генія музики і Слави з золотою пальмовою гілкою в руках. Часто в театрі проходять екскурсії, фестивалі та інші культурні заходи, у самому залі можуть розміститися 1100 глядачів. Його відвідувачі завжди прагнуть побачити цей архітектурний витвір, щоб насолодитися його величчю та відчути глибину культурних традицій, тому його збереження, особливо в період повномасштабного є напрочуд важливим [35]. За допомогою лазерного 3D сканування команда ТЗОВ геодезично-геологічна група «Мірничий» працювала над створенням BIM-моделі (Building Information Model) Львівського оперного театру з метою отримання обмірних креслень для розробки проєкту реставрації, створення декорацій та світлових шоу на фасад будівлі. Сканування було складним через велику кількість декоративних елементів та самою висотою об'єкта. Терміни реалізації завдання становив для польових робіт – 1 день, для пост обробки даних – 1 день [36].

ТОВ НВП "Навігаційно-геодезичний центр" (НГЦ) створений у 1991 році, займається топографічною і кадастровою зйомкою, лазерним скануванням житлових будинків, промислових об'єктів, пам'яток архітектури та ін. Однією з їх робіт є сканування Дальніх і Варязьких печер Києво-Печерської Лаври (рис. 2.10). Києво-Печерська Лавра, внесена до списку пам'ятників всесвітнього значення ЮНЕСКО, є унікальним монастирським комплексом, який включає як наземну частину (з комплексом релігійних споруд), так і підземну (печери). Печери складаються з декількох частин – Ближніх, Дальніх і Варязьких, що являють собою складну і протяжну систему підземних коридорів. Перші літописні згадки про печери датуються 1051 роком. Печери спочатку заселяли

монахи, а пізніше там стали ховати померлих поселенців монастиря. Насельники Києво-Печерської лаври запропонували створити тривимірну модель лаврських печер.

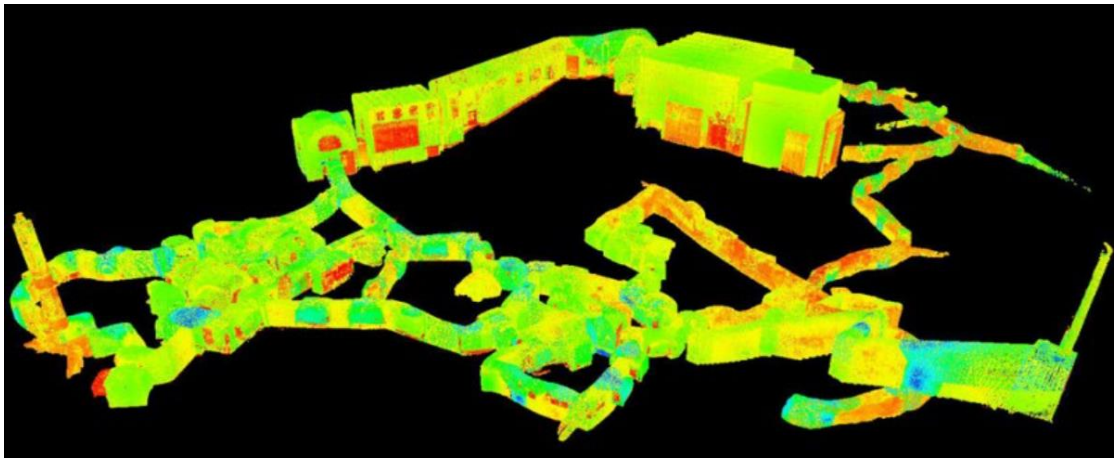


Рис. 2.10. TIN-поверхня моделі Дальніх і Варязьких печер Києво-Печерської Лаври [37]

У липні 2007 р. фахівці НВП «Навігаційно-геодезичного центру» виконали лазерне сканування комплексу Дальніх і Варязьких печер за допомогою лазерного 3D сканера Leica Geosystems (Швейцарія) - Leica ScanStation для створення TIN (Triangulated Irregular Network)-поверхні моделі об'єкта. Для цього було зроблено понад 130 сканів відвідуваної частини Дальніх печер і близько 30 сканів закритих для відвідування Варязьких печер. Близько 450 метрів склала протяжність знятих печер. Отримані дані лазерного сканування відіграють ключову роль у збереженні історико-культурної спадщини та можуть бути використані для створення повноцінної тривимірної цифрової моделі комплексу печер [37].

Організації, які займаються лазерним скануванням пам'яток архітектури роблять велику справу, тому що їхні послуги дозволяють зберігати цінну культурну спадщину у формі точних цифрових моделей, які можуть бути використані для реставрації та реконструкції об'єктів. Крім того, лазерне сканування дозволяє виявити потенційні проблеми та пошкодження на ранніх етапах, що допомагає запобігти подальшому руйнуванню. Такі підприємці сприяють збереженню історичної та архітектурної спадщини для майбутніх поколінь.

## Висновки до розділу 2

Пам'ятка архітектури - це будівля, споруда або місце, яка має велике історичне, архітектурне або культурне значення. Пам'ятка архітектури має важливе значення для сьогодення в Україні, оскільки вона є свідченням історичної та культурної спадщини країни, відображає духовні та матеріальні цінності українського народу, та сприяє збереженню національної ідентичності. У сучасних умовах, особливо під час повномасштабного вторгнення, такі пам'ятки слугують символами стійкості та надії, стимулюючи патріотичні настрої та національну єдність. Вони також мають туристичну та освітню цінність, допомагаючи поширювати знання про багате минуле України серед громадян та гостей країни.

Лазерне сканування пам'яток архітектури є важливим інструментом для збереження, дослідження та популяризації культурної спадщини. Його значення полягає у здатності створювати точні тривимірні моделі історичних об'єктів, допомагаючи зберегти їх у цифровій формі та вивчати їх стан безпосередньо на місці.

Лазерне сканування також сприяє розробці стратегій збереження, реставрації та консервації пам'яток, допомагаючи археологам, історикам та консерваторам розуміти структуру та стан об'єктів. Відтворення тривимірних моделей дозволяє створювати віртуальні тури та візуалізації, що розширюють доступ до історичних об'єктів для широкої аудиторії.

Таким чином, підприємці, які спеціалізуються на лазерному скануванні пам'яток архітектури, виконують важливу місію збереження культурної спадщини. Їхні послуги дозволяють створювати детальні цифрові копії історичних об'єктів, які можуть бути використані для реставрації, досліджень та віртуальних турів. Такі інноваційні методи збереження сприяють збереженню унікальної спадщини для майбутніх поколінь, забезпечуючи її доступність та захищеність у відповідності з сучасними технологіями.

## РОЗДІЛ 3

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ПАМ'ЯТОК АРХІТЕКТУРИ

#### 3.1. Опис об'єкту лазерного сканування

Об'єктом наземного лазерного сканування був Княжий Храм Святого Миколая, що знаходиться у м. Львів, вул. Богдана Хмельницького 28А (рис. 3.1). Це найстаріша церква Львова, що є частиною культурної спадщини України та є джерелом вивчення духовних і естетичних уявлень суспільства певного історичного періоду, що є неабияк актуальним у наш час. Ця архітектурна пам'ятка відображає не тільки високий духовний рівень, але й майстерність художнього ремесла, будівельних технологій та архітектурно-пластичне трактування стін, що має історико-культурну цінність.

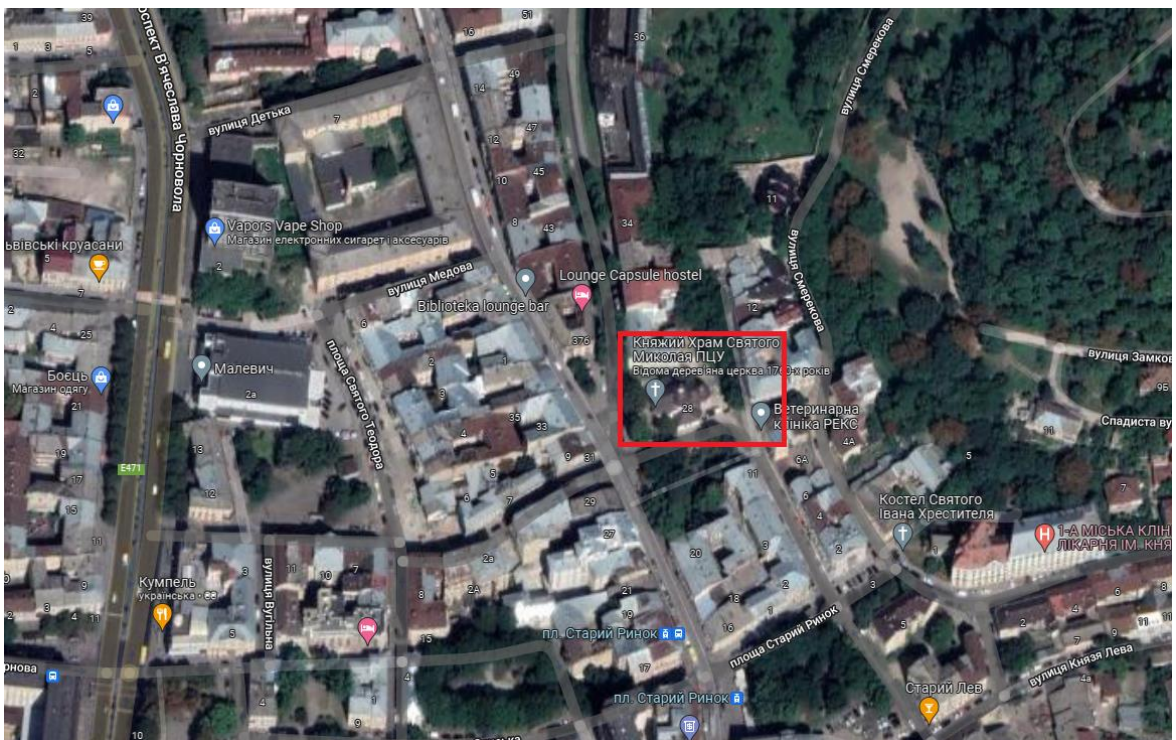


Рис. 3.1. Схема розташування Княжого Храму Святого Миколая

Недалеко від підніжжя гори Будильниці (так звали Замкову гору або Княжу гору у княжі часи) наші предки побудували храм Господній із білого тесаного каменю. За першими писемними згадками, зокрема грамотою князя Лева Даниловича з 1292 року, дізнаємось, що Храм вже був частиною

комплексу великокняжої замкової резиденції, тому його називають Княжий храм [38]. Точна дата будівництва Княжого Храму залишається невідомою і є предметом багатьох теорій та припущень. Розташування Храму на території однієї з найстаріших історичних частин міста, його планувальна структура та документальні докази, що походять ще з 1292 року у вигляді привілею князя Лева щодо надання церкві земельних угідь, свідчать про можливість того, що будувалась споруда в ранньому періоді історії міста, приблизно між 1264 і 1340 роками [39].

Після відновлення в кінці XVII ст. Княжий Храм отримав свій сучасний вигляд (рис. 3.2) [40]. Найстаршою його частиною є мури з гарного тесаного каміння, які були виявлені під час відновлення 1924 р., вони свідчать про те, що церква мала план так званого грецького (рівнораменного) хреста. У другій половині XVII ст., після пожежі 1623 р., Княжий Храм Святого Миколая ґрунтовно перебудували, завершивши роботи у 1701 р., про що свідчить напис на центральній арці головної нави. В 1776 році прибудовано захристію. У XVIII ст. Княжий Храм був покритий гонтом і тоді було побудовано теперішні ренесансні бані, які були вкриті бляхою, може бути, що на зразок давніх [41].



Рис. 3.2. Загальний вигляд Княжого Храму Святого Миколая [38]

В архітектурі Княжого Храму виділяється простота форм, практично не маючи декоративних деталей (рис. 3.2). У його зовнішньому вигляді можна побачити вплив візантійсько-романського зодчества, що вказує на історичні зв'язки Галицько-Волинського князівства з середньовічною Європою. Проте у

плануванні та організації простору церкви можна відзначити спільні риси з українськими п'ятикамерними дерев'яними церквами.

Княжий Храм має хрещату форму та складається з трьох частин (рис. 3.3). Основна квадратна нава має трохи видовжену півкруглу вівтарну апсиду (пресвітерію) на сході, із заходу до неї прилягає прямокутний притвор (бабинець), а з півдня і півночі - бічні каплиці, які перекриті хрещатим склепінням, де права закінчується півкруглою апсидою, ліва має закінчення у вигляді плоскої стіни, яка була зрізана в кінці XVIII ст., під час будівництва захристії [40]. Нава та вівтарна апсида мають характерні для української архітектури бані з ліхтарями. Дві каплиці, різноманітні з розміром, що прилягають до головної нави з куполом, утворюють пірамідальну композицію архітектурних елементів храму [42].

Інтер'єр Княжого Храму Святого Миколая вражає своєю простотою, все це через численні пожежі у XVII ст. та XVIII ст. (рис. 3.4). У темряві, викликаний замуруванням чотирьох вікон у великій копулі, виділяються два рококових престоли в бокових навах, дві такі ж сповідальниці, амвон та іконостас у псевдовізантійському стилі, виготовлений в 1947-1949 роках (у XVIII ст. іконостас був рококовий), що вражає глибокою давниною. За словами українського історика Іван Крип'якевича, у Храмі знаходиться: «...ікона Богородиці з Дитям у вівтарі лівої нави ... XVII ст, на золотому фоні з тиснутим ренесансним орнаментом, друга, менша і мабуть новіша Богородиця у лівому крилосі перед іконостасом, уся покрита золоченою «суконкою», а далі погруддя св. Теодора Тірона, храмовий образ знесеної церкви св. Теодора, св. Миколай Чудотворець теж закритий золоченою суконкою та ікона Покрова Богородиці на стіні головної апсиди... . «Свята Родина» біля входу з бабинця до головної нави. На стінах лівої нави повішено два академічні мальовила - голова пророка Ісаї та "Христос в дорозі до Емаусу"- пожертвовані для церкви галицьким намісником гр. А. Голуховським в 1857 р. У великому вівтарі стоїть два ажурно - різьблених хрести в срібній гравірованій оправі, з яких більший має кириличні та молдавські написи.» [40].

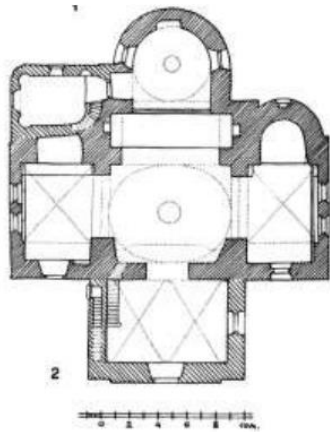


Рис. 3.3. План Храму [42]



Рис. 3.4. Інтер'єр Княжого Храму [43]

Княжий Храм є домом для різних історичних реліквій. Серед них - мощі Святого Миколая Чудотворця, які були подаровані Храму антиохійським Патріархом Йоакимом V в 1586 році під час його перебування у Львові, різьблені дерев'яні хрести XV-XVI століть, требник митрополита Петра Могили 1719 року, хоругва виготовлена 1760 році, яка на одному боці має зображення Ісуса Христа з пристоячими, а на другому — святого Миколая [42].

Головний вхід Княжого Храму знаходиться на головному західному фасаді і представлений у вигляді порталу. Цей портал, що веде до головної нави, побудований в романському стилі з білого пісковика, він оштукатурений і пофарбований у сірий колір. Портал, виконаний у формі арки і виділяється монументальним пластичним оформленням, де дві симетрично розташовані пілястри слугують основним декором, що завершуються аркою. Над аркою порталу розміщена фреска Петра Холодного, яка має велику художню цінність, її було створено в 1924 році разом із зображенням Розп'яття, св. Миколая, св. Івана та Богородиці (рис. 3.5) [42].

Завдяки своїм архітектурним деталям та художньому оформленню, Княжий Храм привертає увагу багатьох шанувальників мистецтва та історії. Його унікальні елементи та багатовікова історія роблять цей храм особливо привабливим для дослідників і туристів, які цінують культурну спадщину України.



Рис. 3.5. Головний портал Княжого Храму Святого Миколая та фрески над ним [42]

Княжий Храм Святого Миколая хоча і зберігся до наших днів у перебудованому вигляді, він залишається важливим об'єктом національної культурної спадщини. Він має велику історико-архітектурну цінність, відображаючи про духовну та матеріальну культуру, а також традиції українського народу у його історичному минулому. Збереження цього Храму є вкрай важливим, особливо у період повномасштабного вторгнення, коли культурна спадщина потребує особливої уваги та захисту.

### **3.2. Методика виконання наземного лазерного сканування пам'яток архітектури**

Наземне лазерне сканування Княжого Храму Святого Миколая виконувалось згідно проекту по збереженню Львівської архітектури та історичної спадщини для побудови 3D-моделі.

Процес виконання наземного лазерного сканування пам'яток архітектури можна умовно поділити на три етапи: планування, польові роботи (сканування), камеральні роботи (опрацювання даних) [44, 45, 46]. Розглянемо кожний з них детально.

1. Планування. Процес НЗЛС починався з ретельного планування та підготовки, це дає можливість зрозуміти скільки часу необхідно для виконання поставленого завдання. Перед початком вимірювання ми спланували його так,

щоб вимірювання були максимально ефективними. Оцінили пам'ятку архітектури, її форму, розміри, складність об'єкта, стан, включаючи наявність пошкоджень, визначили цікаві області та оптимальні позиції сканування для збору повних даних. Враховували такі фактори, як умови освітлення, доступність, погодні умови і заходи безпеки.

Для найкращого запису даних об'єкт сканування має бути належним чином підготовлений. Будь-які предмети, які не підлягають скануванню, по можливості ми вилучили. Забрали будь-які забруднення, такі як павутина, товсті шари пилу тощо, також елементи, які можуть потрапити на шлях лазерного променя, спричиняючи запис небажаних даних, що ускладнює процес фільтрації даних у подальшій обробці. Переконалися, що зона вимірювання закрита для сторонніх осіб. Люди та тварини, які проходять повз можуть перерізати лазерний промінь, спричиняють запис небажаних даних, які необхідно буде відфільтрувати під час обробки. Вони також призводять до неможливості реєстрації бажаних спостережень, що призводить до втрати частини даних про об'єкт, які необхідно отримати.


Важливим елементом, який слід враховувати вже на етапі планування сканування, є кут падіння лазерного променя на сканований об'єкт. Чим гостріший кут, під яким промінь падає на поверхню, тим більше зменшується роздільна здатність, з якою поверхня записується. У випадку об'єктів, сканованих під малим кутом, можна помітити, що навіть незначне зниження номінальної роздільної здатності призводить до значного зменшення кількості точок, виміряних на об'єкті сканування. Це особливо помітно на скануваннях площин, паралельних або близьких площині горизонту сканера. Зменшення роздільної здатності сканування може відбуватися також у випадку поверхонь, перпендикулярних до площини горизонту сканера і в той же час розташованих відносно близько до сканера.

Під час планування відповідно до технічного завдання відбувався підбір обладнання, яке буде використовуватись під час сканування.

2. Польові роботи (сканування). Польові роботи зайняли 0,5 дня, сканування виконувалося з 18 станцій, де було охоплено зовнішній фасад Княжого Храму Святого Миколая та його інтер'єр. Лазерне 3D сканування виконувалося за допомогою приладу Faro Focus 3D x130 (табл. 3.1) [47]. Принцип роботи лазерного сканера Focus3D X 130 оснований на подачі інфрачервоного лазерного променя в центр дзеркала, яке обертається. Дзеркало відбиває лазерний промінь, переміщаючи його в середовищі, яке сканується, розсіяне від навколишніх об'єктів світло потім потрапляє назад в сканер.

Таблиця 3.1

Технічна характеристика лазерного сканера Faro Focus 3D x130\*

Характеристики	 <b>Faro Focus 3D x130</b>
Тип сканера	фазовий
Клас безпеки	1
Точність вимірювання відаллі [мм]	+2
Кутова точність ["]	19"
Мінімальна/максимальна віддаль [м]	0,6/130
Частота сканування [точ/м]	976 000
Поле зору по вертикалі (горизонталі) [°]	300/360
Час роботи акумулятора [год]	4,5
Розмір сканера [мм]	240×200×100
Маса [кг]	5,2
Пило - водозахищеність	IP54
Робоча температура [°C]	від 5 до 40
Ціна	8999 \$

\* Розроблено автором

Основні етапи вимірювання НЛС в себе включають:

1.) Встановлення наземного лазерного сканера на станцію.

Перед початком вимірювань ми встановили сканер на штатив та привели у робочий стан за допомогою круглого рівня, а потім ще внутрішнього електронного рівня. Сканер спрямували на об'єкт, який потрібно відсканувати.

Станції розташували так, щоб можна було зафіксувати якомога більшу площу сканованого об'єкта. (рис. 3.6.). Також важливо не віддалятися надто далеко від об'єкта без необхідності, оскільки в міру віддалення приладу від сканованої поверхні роздільна здатність сканування зменшується. Для забезпечення однозначності отриманих даних, що полегшує роботу при обробці даних, кожній станції було присвоєно окремий ідентифікатор на рівні меню вимірювань приладу. Сканування проходило із різних станцій, що забезпечило відтворення споруди у хмарі точок.



Рис. 3.6. Встановлений лазерний сканер на станції

## 2.) Створення планового висотного обґрунтування.

При роботі з НЛС створили планово-висотне обґрунтування (далі - ПВО) для здійснення вимірювань у заданій системі координат. Цей процес включає два етапи: створення основного ПВО і створення робочого ПВО для сканера.

Основне ПВО формується від пунктів державної геодезичної мережі (ДГМ) або мережі згущення, щоб забезпечити потрібну кількість точок робочого ПВО на ділянці робіт.

Робоче ПВО складається з точок, які мають відомі координати та можуть бути однозначно розпізнані на точковій моделі, і за якими надалі будуть обчислюються параметри орієнтування НЛС. Для цього використовуються сканерні марки (опознаки) (рис. 3.7.). Це чорно-білі мішені, які надані виробником. Роздруковані сканерні марки ми прикріпили звичайним двостороннім скотчем на різні місця будівлі. Стабільність сканерної марки надзвичайно важлива, оскільки вона представляє точку орієнтування.



Рис. 3.7. Сканерна марка (опознак)

Розташування точок робочого ПВО щодо НЛС повинно бути рівномірною, а збільшення їх кількості додає надлишкові вимірювання.

За допомогою програмного забезпечення (далі - ПЗ) здійснили орієнтування точкових моделей, які отримані з різних сканерних станцій у зовнішній системі координат. Це здійснювалося за допомогою алгоритму, який шукає спільні сканерні марки в обох системах координат (зовнішньої і системи координат сканера), і після цього встановлює зв'язки між ними і здійснює орієнтування. Для того, щоб оцінити точність і якість орієнтування ми використали значення помилок визначення кутових і лінійних елементів

орієнтування або помилки розташування марок, які знаходяться в зовнішній системі координат [9].

### 3.) Виконання вимірювань НЛС.

Процес НЗЛС на станції включає наступні етапи:

- встановлення з'єднання НЛС з керуючим ПЗ. Для керування процесом сканування та обміну даних між сканером і керуючим комп'ютером застосовувалося відповідне ПЗ, після запуску якого встановлюється з'єднання з НЛС та виконується сканування [9];

- налаштування області сканування. Воно відбувається за допомогою керуючого ПЗ, яке має функції для вибору режимів сканування та обміну даними. За полем зору сканера здійснюється встановлення області сканування. Сканер Faro Focus 3D x130 охоплює поле зору  $360^\circ \times 300^\circ$  (рис. 3.8.), але перед виконанням робіт було зроблено сканування в межах поля зору цього сканера з великим кутовим кроком, це дозволило точно визначити область сканування, відповідну реальним параметрам;

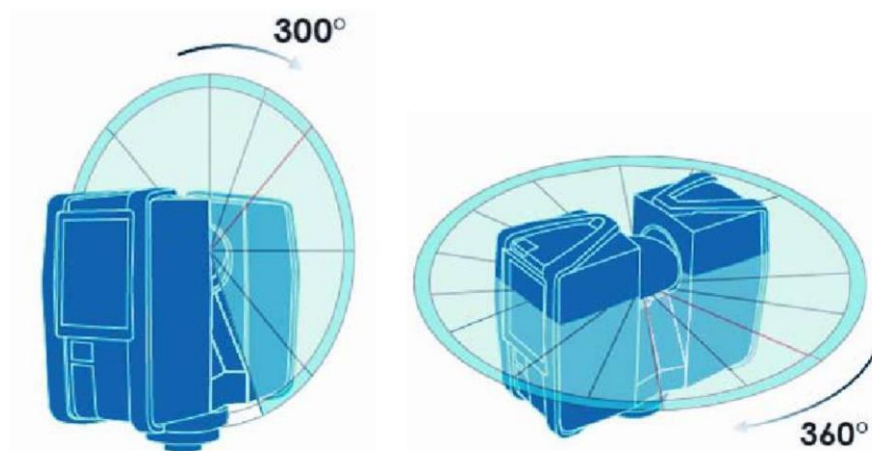


Рис. 3.8. Поле зору Faro Focus 3D x130 по вертикалі та горизонталі [48]

- вибір роздільної здатності. Роздільна здатність визначається як відстань між двома наступними вимірними точками, і таким чином визначає щільність точок у хмарі точок. Слід зазначити, що чим вище обрана роздільна здатність, тим більше точок потрібно відсканувати, а отже, тим довше часу це займе. Роздільна здатність сканера визначається на певній відстані до сканера. Цю відстань було ведено вручну за допомогою програмного забезпечення сканера.

Після визначення області сканування та встановлення відповідної роздільної здатності почалося саме сканування. Процес сканування майже повністю автоматизований. Після натискання кнопки на панелі керування починається саме сканування. Лазерний сканер розташовується на різних точках огляду і випромінює лазерні промені, які проносяться поверхнями Княжого Храму. Коли лазер потрапляє на поверхні, він вимірює відстань і записує мільйони точок даних, створюючи щільну «хмару точок». Ця «хмара точок» зберігається у внутрішній пам'яті самого сканера.

Всі роботи на об'єкті виконувалися приладами та інструментами, які пройшли метрологічний контроль в акредитованих організаціях Державної метрологічної служби України відповідно до графіку проведення повірок.

### 3. Камеральні роботи (опрацювання даних).

Камеральна роботи здійснювалася за матеріалами польових робіт (рис. 3.9.) з допомогою програмних забезпечень Autodesk ReCap, Autodesk Revit, Faro Scene та тривали 0,5 дня.

Ім'я	Дата змінення	Тип	Розмір
Hranm0000.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0001.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0002.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0003.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0004.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0005.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0006.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0007.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0008.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0009.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0010.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0011.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0012.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0013.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0014.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0015.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0016.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0017.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	
Hranm0018.flr	10.05.2024 16:35	Папка файлів	

Рис. 3.9. Файли сканування із сканера Faro Focus 3D x130

Autodesk ReCap - це ПЗ для роботи з хмарами точок, яке дозволяє користувачам імпортувати, візуалізувати, редагувати та аналізувати дані НЛС

Autodesk Revit - це ПЗ для автоматизованого проектування, що впроваджує концепцію інформаційного моделювання будівель (BIM) та надає можливість тривимірного моделювання елементів будівлі та двовимірного креслення.

Faro Scene - це ПЗ для перегляду та обробки великої 3D хмари точок з великою роздільною здатністю.

Камеральні роботи з НЗЛС в ПЗ можна умовно поділити на такі етапи:

1.) Імпорт даних. Хмара точок, отримана в результаті сканування, імпортується в ПЗ Scene (рис. 3.10.). Програма дозволяє імпортувати дані сканування в різних форматах (у нашому випадку формат fls) та дає можливість налаштувати параметри імпорту, такі як масштаб, одиниці вимірювання, щільність хмари точок та точність. Проте, перед імпортом потрібно переконатися, що дані НЛС у правильному форматі та не пошкоджені.

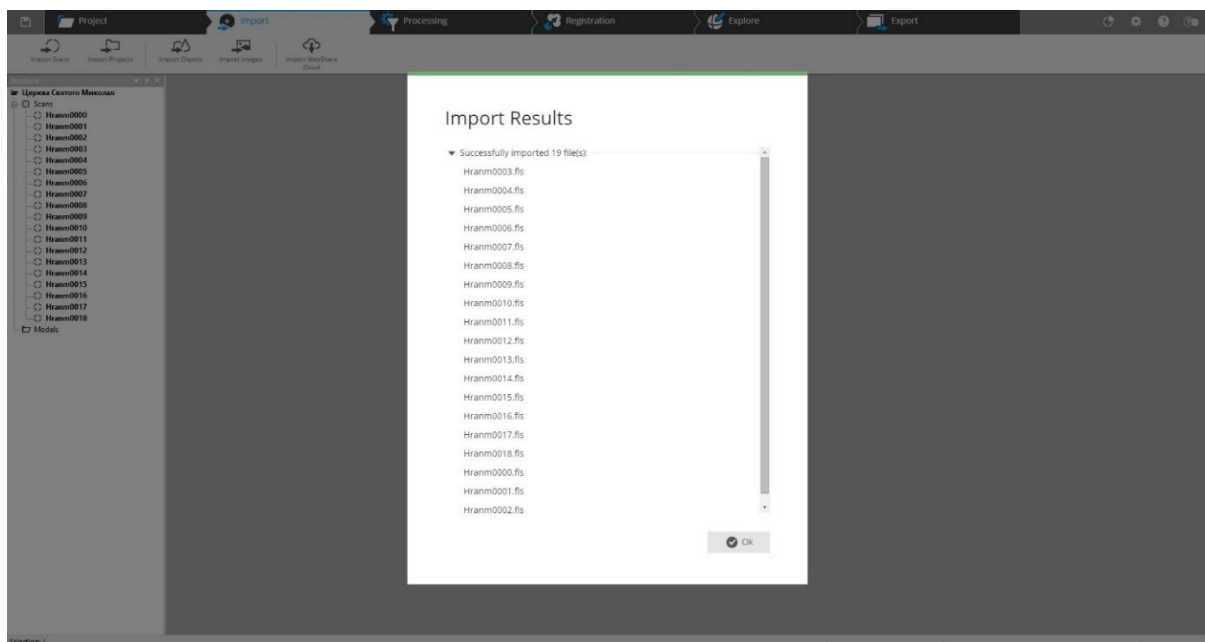


Рис. 3.10. Імпорт даних в програму Scene

2.) Реєстрація сканів (рис. 3.11). Скани з різних місць розташування сканера об'єднуються (зшивають) в єдину «хмару точок». Програма Scene автоматично реєструє скани, вона шукає подібне розміщення геометричних елементів між сканами. Але виникла необхідність, ще додатково вручну коригувати реєстрацію, вказуючи при цьому відповідні точки сканування, для більшої деталізації та точності. Після завершення реєстрації було перевірено

точність отриманого результату (рис. 3.12., 3.13.), щоб в подальшому отримати точну 3D-модель об'єкту (Додаток А).



Рис. 3.11. Реєстрація сканів

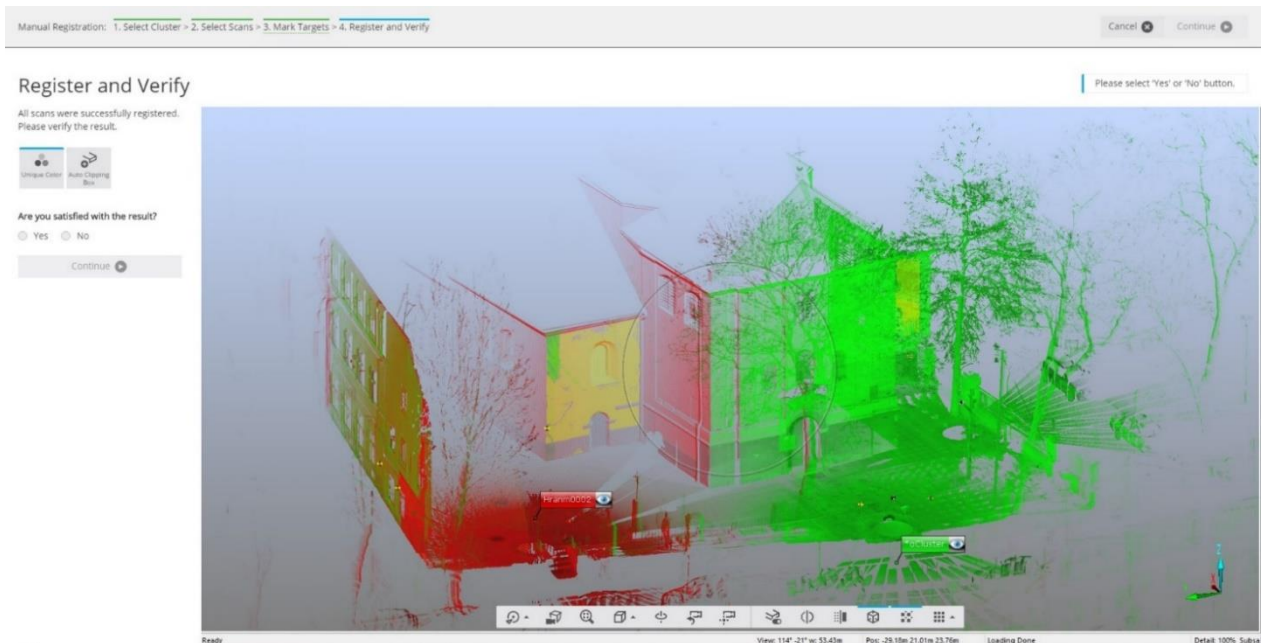


Рис. 3.12. Реєстрація та верифікація сканів Княжого Храму із заходу

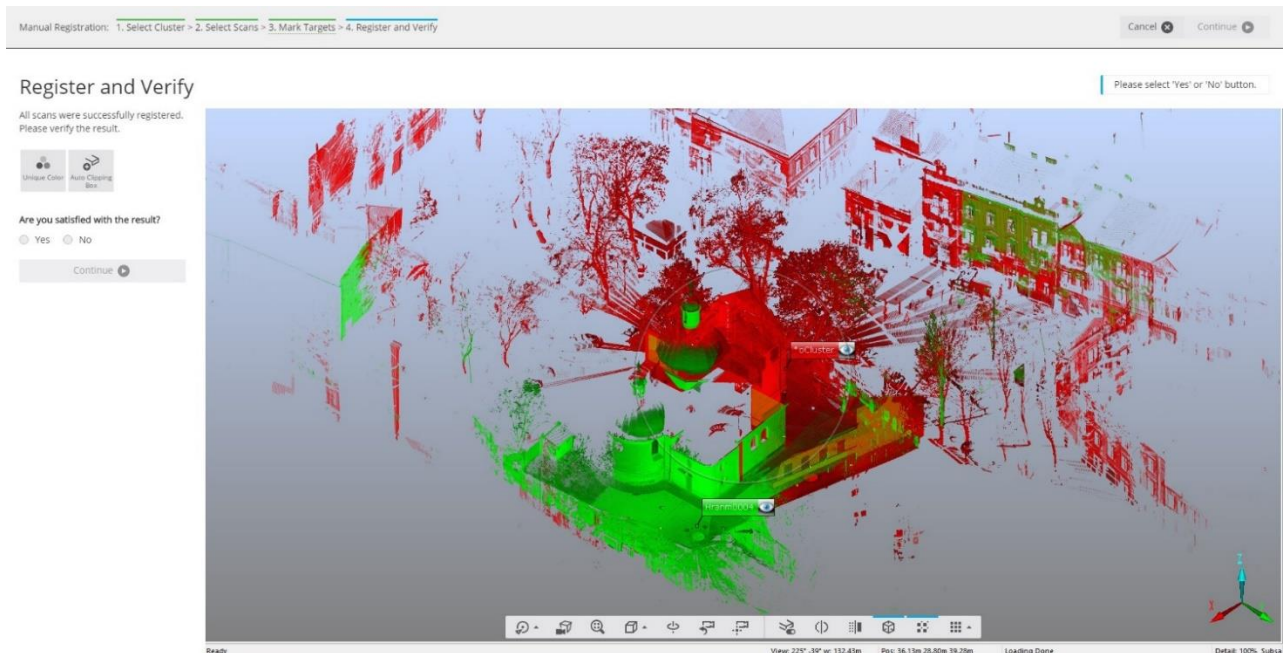


Рис. 3.13. Реєстрація та верифікація сканів Княжого Храму із сходу

Після впевненості у правильності реєстрації сканів їх можна вважати успішно зареєстрованими і готовими для подальшого використання.

3.) Очищення «хмари точок». Після реєстрації «хмара точок» потребує очищення від зайвих елементів (рис. 3.14.). З «хмари точок» було видалено шум, тобто невизначені об'єкти та непотрібні дані, такі як люди, тварини, рослинність та інші елементи, які не є частиною відсканованого об'єкта. Існує багато причин шуму, основним з них є тимчасовий пошук непотрібних об'єктів у зоні сканування, наприклад випадкових перехожих, птахів, тварин, транспортних засобів або крапель дощу. Якщо ці елементи знаходяться в русі, то часто вони будуть видні у вигляді «смуг» або ліній точок, розташованих у просторі. Найчастіше буває складно охарактеризувати специфічні ознаки даного типу об'єктів і їх необхідно вручну ідентифікувати та вилучати. Для очищення «хмари точок» використовувалися різні інструменти, такі як фільтри для видалення шуму, а також ластик для ручного видалення непотрібних даних. «Хмара точок» була сегментована на окремі частини - стіни, дах, вікна, двері, для більш детальної обробки. Очищення «хмари точок» є найбільш трудомісткою роботою у процесі отримання даних лазерного сканування.

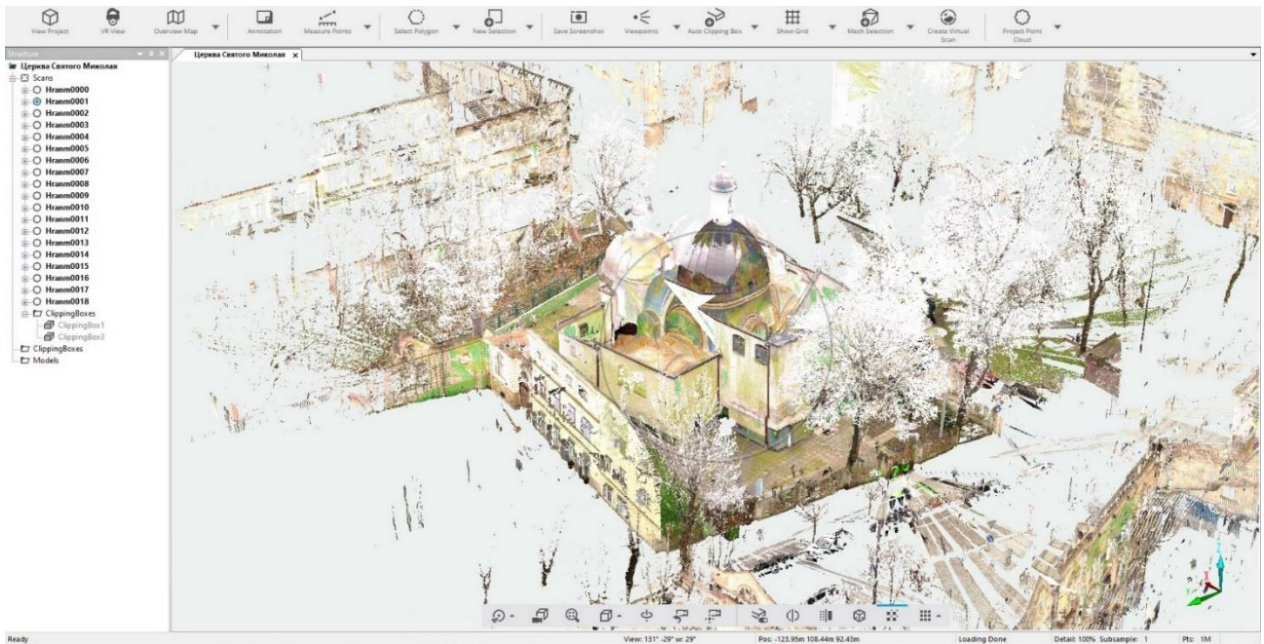


Рис. 3.14. «Хмара точок» Княжого Храму Святого Миколая без фільтрації шумів

4.) Створення 3D-моделі. З очищеної «хмари точок» створюється 3D-модель пам'ятки архітектури (рис. 3.15.). Можна використовувати різні методи для створення 3D-моделей, такі як сітка, NURBS-поверхні та тверді тіла. Вибір методу створення 3D-моделі залежить від складності об'єкта, необхідної точності та деталей, а також від того, як 3D-модель буде використовуватися в подальшому. 3D-модель Княжого Храму була деталізована за допомогою додавання елементів, таких як вікна, двері, архітектурні деталі та була текстурована для отримання більш реалістичного зображення.



Рис. 3.15. 3D-модель Княжого Храму Святого Миколая



Рис. 3.16. 3D-модель інтер'єру Княжого Храму Святого Миколая

Створена 3D-модель Княжого Храму Святого Миколая відкриває широкі можливості для збереження, дослідження, проектування та планування реставраційних робіт. Вона стане не лише віртуальним відображенням цієї пам'ятки архітектури, але й важливим інструментом для вивчення та аналізу її архітектурних деталей і оцінки стану конструкцій. Ця модель дозволить фахівцям детально дослідити кожен елемент храму, ідентифікувати проблемні зони, що потребують реставрації, та забезпечити точне планування ремонтних робіт, зберігаючи автентичність та історичну цінність об'єкта. Вона також стане корисною для освітніх і наукових цілей, сприяючи популяризації культурної спадщини та залученню нових технологій у сферу архітектурної консервації.

### **Висновки до розділу 3**

Княжий Храм Святого Миколая відзначається своєю старовинною архітектурою та культурним значенням для Львова. Ця церква є однією з найстаріших у місті, і її історія тісно пов'язана з історією міста та його мешканців. В період повномасштабного вторгнення Княжий Храм Святого Миколая знаходиться під загрозою руйнування. Проведене наземне лазерне сканування Княжого Храму Святого Миколая є надзвичайно важливим кроком у збереженні та документуванні цієї визначної пам'ятки архітектури.

Процес виконання наземного лазерного сканування пам'ятки архітектури можна умовно поділити на три етапи: планування, польові роботи (сканування), камеральні роботи (обробка даних). Кожен із цих етапів потребує особливої уваги, щоб забезпечити якісне та ефективне виконання сканування. На етапі планування визначаються цілі та обсяги сканування, вибирається оптимальне обладнання та методика роботи. Польові роботи включають у себе встановлення сканера та виконання самого лазерного сканування. На камеральному етапі проводиться обробка отриманих даних, усунення шумів, реєстрація сканів, а також створення тривимірної моделі об'єкту. Кожен з цих етапів має велике значення для успішного завершення процесу сканування та отримання якісних результатів.

Однією з важливих переваг лазерного сканування є можливість зафіксувати точні розміри та деталі об'єкта без прямого контакту з ним. Це забезпечує високу точність та достовірність результатів сканування. Таким чином, створена 3D-модель Княжого Храму Святого Миколая дозволить зберегти цей унікальний об'єкт для майбутніх поколінь та використовувати його для наукових досліджень, розробки проектів та планування реставраційних робіт.

## ВИСНОВКИ

В ході дослідження кваліфікаційної роботи для досягнення поставленої мети ми виконали усі поставлені завдання.

Проаналізували формування технології лазерного сканування та дослідили види лазерного сканування. Звідси, лазерне сканування - це метод створення тривимірних моделей об'єктів або поверхонь за допомогою лазерних променів, що знаходить своє застосування в будівництві, архітектурі, геодезії, археології та інших галузях. Технологія лазерного сканування за принципом розташування сканера поділяється на наземне, повітряне та мобільне, вибір конкретного виду залежить від поставлених завдань та цілей.

Дослідили принцип дії та технічні характеристики наземних лазерних сканерів. Це спеціальні пристрої, що вимірюють відстані до об'єктів за допомогою лазерного випромінювання і поділяються на імпульсні, фазові та триангуляційні. Наземні лазерні сканери представлені різними моделями з унікальними характеристиками, які класифікуються за дальністю, точністю і швидкістю сканування, тощо.

Проаналізували поняття «пам'ятки архітектури» та важливість її збереження. Отже, пам'ятка архітектури - це споруда, місце або будівля з історичним, архітектурним або культурним значенням. Вона є свідченням історії та культурної спадщини країни, що відображають духовні та матеріальні цінності, сприяючи збереженню національної ідентичності та підтримці патріотичних настроїв. Пам'ятки архітектури мають значення для туризму та освіти, розширюючи знання про минуле України серед громадян та гостей.

Проаналізували технологію лазерного сканування пам'яток архітектури та дослідили приклади його виконання. Це важливий інструмент для збереження пам'яток архітектури, створені точні тривимірні моделі сприяють розробці стратегій збереження, реставрації та консервації пам'яток, допомагаючи розуміти структуру та стан об'єктів.

Дослідили методику виконання наземного лазерного сканування пам'ятки архітектури. Цей процес складається з трьох етапів: планування, польові роботи

(сканування), камеральні роботи (опрацювання даних), кожен з яких потребує особливої уваги для досягнення якісних результатів.

Для того, щоб наземне лазерне сканування пам'яток архітектури було ефективним потрібно:

1. Розробити і впровадити національні стандарти для методики наземного лазерного сканування пам'яток архітектури, що включають стандартизовані процедури підготовки, сканування та обробки даних.

2. Запровадити державні програми фінансування для підтримки проектів з лазерного сканування пам'яток архітектури, зокрема для закупівлі обладнання та навчання фахівців.

3. Створити навчальні програми в університетах та професійних навчальних закладах для підготовки спеціалістів у галузі лазерного сканування, консервації та реставрації архітектурних пам'яток.

4. Сприяти використанню лазерного сканування в наукових дослідженнях, залучаючи академічні установи до проектів з документування та аналізу архітектурних пам'яток.

5. Розширити співпрацю з міжнародними організаціями, такими як ЮНЕСКО, ICOMOS та ін., для обміну досвідом та залучення міжнародної підтримки у збереженні культурної спадщини.

6. Розробити національний реєстр оцифрованих пам'яток архітектури, де зберігатимуться та будуть доступні для громадськості та фахівців всі отримані дані з лазерного сканування.

7. Запровадити використання даних лазерного сканування у всіх реставраційних проектах як обов'язкову складову для точного відтворення та планування реставраційних робіт.

8. Розробити спеціальні протоколи для сканування та документування пам'яток у зонах бойових дій, включаючи заходи безпеки, швидке збирання даних та їх евакуацію.

9. Сприяти регіональним ініціативам у збереженні культурної спадщини шляхом надання грантів, технічної підтримки та навчальних ресурсів для локальних проектів сканування.

10. Організувати виставки, семінари та інформаційні кампанії для підвищення обізнаності громадськості про важливість лазерного сканування у збереженні культурної спадщини.

11. Використовувати отримані 3D-моделі для створення віртуальних турів по пам'яткам архітектури, що дозволить широкій громадськості отримати доступ до культурної спадщини навіть у випадках, коли фізичний доступ обмежений.

12. Впровадити регулярний моніторинг стану пам'яток архітектури за допомогою лазерного сканування для вчасного виявлення та усунення пошкоджень.

Ці пропозиції спрямовані на комплексний підхід до впровадження та використання методики наземного лазерного сканування пам'яток архітектури в Україні, враховуючи актуальні виклики та потреби країни.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. FARO Prime URL: <https://www.faro.com.ua/oborudovanie/faro-arms/faro-prime/>
2. History of 3D-scanners URL: <https://www.modena.co.za/history-of-3d-scanners/>
3. Early 3D Scanning Competition: 1998 – 2000, Part 13 URL: <https://www.xyht.com/lidarimaging/early-3d-scanning-competition-1998-2000-part-13/>
4. Timeline of 3D Laser Scanners URL: <https://scantech-international.com/blog/timeline-of-3d-laser-scanners>
5. Толкунов І. О., Метьолкін О. О., Толкунова В. І. Удосконалення методики створення топографічного плану місцевості за даними лазерного сканування. Шифр “Лідар”: матеріали підсумкової наук.-практ. конфер. за результатами ІІ туру Всеукр. конкурсу студ. робіт зі спец. 193 “Геодезія та землеустрій”. Нац. університет цивільного захисту України, Львів. нац. аграрний університет. Харків, Львів: 26–27 березня 2020 р..
6. Pakuła-Kwiecińska K., Przywara J., Królikowski J., Czekaj D., Grzechnik B. Skanowanie laserowe. *Miesięcznik geoinformacyjny GEODETA*. 2022. Nr 1 (8). URL: [https://fliphtml5.com/kkuh/kkwb/SKANOWANIE\\_LASEROWE\\_2022/](https://fliphtml5.com/kkuh/kkwb/SKANOWANIE_LASEROWE_2022/)
7. Пілічева М. О. Сучасні технології геоінформатики, фотограмметрії та дистанційного зондування : конспект лекцій для здобувачів третього (освітньонаукового) рівня вищої освіти спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій) / М. О. Пілічева ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 110 с
8. Місик С. Наземне лазерне сканування пам’яток архітектури. Експертна оцінка землі та нерухомого майна: від теорії до практики: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. (м. Тернопіль, 5 груд. 2023 р.). Тернопіль, 2023.
9. Намінат О.С. Удосконалення методів геодезичного забезпечення моніторингу лінійних об’єктів в зонах впливу підземних гірничих робіт : дис.

... канд. техн. наук : 05.24.01 / Національний університет «Львівська політехніка» МОН України. Львів, 2019. 197 с.

10. Bernat M., Byzdra A., Chmielecki M., Laskowski P., Orzechowski J., Rzepa S., Szulwic J., Ziółkowski P., Zastosowanie naziemnego skaningu laserowego i przetwarzanie danych: inwentaryzacja i inspekcja obiektów budowlanych, Wydawnictwo Polskiego Internetowego Informatora Geodezyjnego I-NET. PL & Katedra Geodezji WILiS Politechnika Gdańska, 2016, str. 1-120. URL: <http://www.geomatyka.eu/publikacje/isbn9788393460960/isbn9788393460960.pdf>

11. Spring, A.P. «A History of Laser Scanning Part 2: The Later Phase of Industrial and Heritage Applications», Photogramm. Eng. Remote Sens. 2020. Vol. 86, No. 8. PP. 479–501. URL: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/asprs/pers/2020/00000086/00000008/art00011?crawler=true&mimetype=application/pdf>

12. García, José Luis Lerma, Bjorn Van Genechten, Erwin Heine, and Mario Santana Quintero, ed. Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications, Version 4. Valencia, Spain: Universidad Politécnica de Valencia, June 2008.

13. Laser Scanning and the Different Types of Laser Scanners URL: <https://bimexeng.com/blog/technology/laser-scanning-and-the-different-types-of-laser-scanners>

14. Нестеренко С. Г. Сучасні дистанційні методи та геоінформаційні технології в дослідженні територій : конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій / С. Г. Нестеренко, О. В. Афанасьєв, М. Л. Мироненко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 127 с.

15. ДСТУ EN 60825-1:2019 Безпека лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги (EN 60825-1:2014, IDT; IEC 60825-1:2014, IDT) [Чинний від 2021-01-01]. Вид. офіц. Київ : Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації,

сертифікації та якості», 2019. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=89167](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=89167)

16. Високоточний лазерний 3D сканер Leica Scanstation P40 URL: [https://ngc.com.ua/p/717-leica-scanstation\\_p40.html](https://ngc.com.ua/p/717-leica-scanstation_p40.html)

17. FARO Laser Scanner Focus S 150 The world's most popular terrestrial laser scanner with ultra-high accuracy and ingress protection URL: [https://www.laserscanning-europe.com/sites/default/files/redakteur\\_images/focus-s-150-tech-sheet\\_1.pdf](https://www.laserscanning-europe.com/sites/default/files/redakteur_images/focus-s-150-tech-sheet_1.pdf)

18. 3D сканер Trimble TX8 URL: <https://geomagazin.com.ua/ua/p195276135-skaner-trimble-tx8.html>

19. Лазерний сканер Topcon GLS-2200S URL: <https://ukrgeomc.com/products/lazernij-skaner-topcon-gls-2200s>

20. How is 3D Laser Scanning Helping Effective Heritage Documentation? URL: <https://www.novatr.com/blog/3d-laser-scanning-for-heritage-documentation>

21. Prentice, R. (1993). Tourism and Heritage Attraction. London : Routledge, pp. 5

22. Sgrenzaroli, M.(2005). Cultural Heritage 3D Reconstruction Using High Resolution Laser Scanner: New Frontiers Data Processing. CIPA 2005 XX International Symposium, 26 September – 01 October, 2005, Torino, Italy

23. Храми, палаци та маєтки. Найкрасивіші пам'ятки України, зруйновані росією під час війни URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/c4n033zvqlqo>

24. Загарбати або знищити: 18 пам'яток української архітектури, які зруйнувала росія URL: <https://rubryka.com/article/18-pamyatok-arhitektury-yaki-zrujnuvala-rosiya/>

25. Втрати історичної та культурної спадщини України під час війни URL: <https://history.rayon.in.ua/news/501852-vtrati-istorichnoi-ta-kulturnoi-spadshchini-ukraini-pid-chas-viyni#group=redactor&photo=11>

26. Музей генерал-хорунжого УПА Романа Шухевича URL: <https://www.lhm.lviv.ua/location/shuhevych.html>

27. МКІП оголошує збір інформації про руйнування об'єктів культурної спадщини України URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/mkip-ogoloshuye-zbir-informaciyi-pro-rujnuvannya-obyektiv-kulturnoyi-spadshchini-ukrayini>

28. Skaning laserowy: nowa era w digitalizacji zabytków URL: <https://bimfaktoria.pl/wiedza/skaning-laserowy-nowa-era-w-digitalizacji-zabytkow/>

29. У гру вступають лідари. Як лазерне сканування рятує пам'ятники від війни, стихії та часу URL: <https://focus.ua/uk/opinions/517147-kak-lazernoe-skanirovanie-spasaet-pamyatniki-istorii-i-arhitektury>

30. How digital modeling plays a key role in restoring the Notre Dame cathedral URL: <https://www.fastcompany.com/90881189/digital-modeling-restoring-notre-dame-cathedral>

31. Софія Київська URL: <https://www.worldhistory.org/trans/uk/1-20180/>

32. Лазерне сканування Софійського собору URL: <https://st-sophia.org.ua/uk/novini/lazerne-skanuvannya-sofijskogo-soboru/>

33. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича URL: <https://www.chnu.edu.ua/universytet/zahalni-vidomosti/pro-universytet/>

34. Львівські фахівці оцифрували резиденцію митрополитів у Чернівцях URL: <https://pragmatika.media/news/lvivski-fakhivtsi-otsyfruvaly-rezydentsiiu-mytropolytiv-u-chernivtsiakh/>

35. Львівський національний академічний театр опери та балету ім. Соломії Крушельницької URL: <https://afisha.lviv.ua/theatre/lvivskyy-nacionalnyy-akademichnyy-teatr-opery-ta-baletu-im-solomiyi-krushelnyckoyi>

36. ТзОВ геодезично-геологічна група «Мірничий» URL: <https://mirnychyj.com.ua/vikonani-roboti/vikonani-roboti-po-lazernomu-skanuvannyu/>

37. ТОВ НВП "Навігаційно-геодезичний центр" URL: <https://ngc.com.ua/ua/info/skanirovaniye-kiyevo-pecherskoy-lavry.html>

38. У Львові існує храм ПЦУ, датований кінцем XIII століття URL: <https://df.news/2021/07/22/u-lvovi-isnuie-khram-ptsu-datovanyj-kintsem-xiii-stolittia/>

39. Експедиція Львовом URL: <https://pilgrimage.in.ua/ekskursiya-lvovom/>
40. Голубець М. (1925) Львів: Провідник. - Жовква, 179с.
41. Крип'якевич І. (2007) Історичні проходи по Львові. – Львів: Априорі, – 116 с.
42. Комплексні наукові дослідження в реставрації пам'яток архітектури: Колективна монографія під ред. проф., д. арх. Миколи Бевза – Львів: НУ «Львівська політехніка», вид-во «Растр-7», 2022 – 142-148 с.
43. Княжий Храм Святого Миколая ПЦУ URL: <https://guide.in.ua/business/58117/%D0%BA%D0%BD%D1%8F%D0%B6%D0%B8%D0%B9-%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BC-%D1%81%D0%B2%D1%8F%D1%82%D0%BE%D0%B3%D0%BE-%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B0%D1%8F-%D0%BF%D1%86%D1%83-%D0%BB%D1%8C%D0%B2%D1%96%D0%B2>
44. Шульц Р. В., Білоус М. В., Гончерюк О. М. Моніторинг пам'яток архітектури за допомогою даних наземного лазерного сканування. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2016, Вип.46, С. 202-207.
45. Бубняк І., Голубінка Ю., Маліцький А. (2017). Використання наземного лазерного сканування для збереження пам'яток архітектури та геології. / Матеріали науково-практичної конференції “Культурна спадщина нафтової столиці Передкарпаття”. – С. 71–73
46. Budroni, A., & Boehm, J. (2010). Automated 3D reconstruction of interiors from point clouds. International Journal of Architectural Computing, 8(1), 55-73. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1260/1478-0771.8.1.55>
47. Tech Sheet FARO Laser Scanner Focus3D X 130 URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/faro-europe/tech-sheet-faro-laser-scanner-focus3d-x-130/21421-25052-2.html>
48. Faro FOCUS3D X 130 User Manual URL: <https://www.manualslib.com/manual/874563/Faro-Focus3d-X-130.html#manual>

## Registration Report

Project	Церква Святого Миколая
Cluster	Scans
Recording Period	1/1/2002, 12:18:20 AM - 1/1/2002, 3:32:26 AM
Location	
Report Date	5/10/2024, 6:30:55 PM

### Color Coding

Point Error	< 0.008 m	> 0.020 m
Overlap	> 25.0 %	< 10.0 %

## Overview

### Scan Point Statistics

Maximum Point Error	0.0071 m
Mean Point Error	0.0017 m
Minimum Overlap	9.8 %

## Scan Errors

### Scan Point Statistics

Cluster/Scan	Connections	Max. Point Error [m]	Mean Point Error [m]	Min. Overlap
Hranm0001	4	0.0051	0.0034	25.4 %
Hranm0018	6	0.0008	0.0007	44.5 %
Hranm0000	5	0.0071	0.0033	18.2 %
Hranm0002	4	0.0051	0.0033	25.4 %
Hranm0003	4	0.0050	0.0031	11.7 %
Hranm0004	4	0.0035	0.0027	34.4 %
Hranm0005	3	0.0018	0.0015	49.3 %
Hranm0006	3	0.0022	0.0014	48.1 %
Hranm0007	3	0.0032	0.0018	34.4 %
Hranm0008	3	0.0071	0.0051	9.8 %
Hranm0009	7	0.0050	0.0024	9.8 %
Hranm0010	4	0.0017	0.0010	26.8 %
Hranm0011	5	0.0018	0.0009	19.0 %
Hranm0012	8	0.0010	0.0007	41.6 %
Hranm0013	4	0.0010	0.0007	42.9 %
Hranm0014	4	0.0010	0.0007	44.4 %
Hranm0015	8	0.0017	0.0008	26.8 %
Hranm0016	5	0.0018	0.0008	38.3 %
Hranm0017	4	0.0008	0.0006	45.6 %

## Detailed Errors

### Scan Point Statistics

Cluster/Scan 1	Cluster/Scan 2	Point Error [m]	Overlap
Hranm0018	Hranm0012	0.0007	63.5 %
Hranm0018	Hranm0015	0.0007	58.1 %
Hranm0018	Hranm0014	0.0006	47.8 %
Hranm0018	Hranm0016	0.0008	44.5 %
Hranm0018	Hranm0017	0.0008	45.6 %
Hranm0000	Hranm0001	0.0030	48.8 %
Hranm0000	Hranm0009	0.0015	51.7 %
Hranm0000	Hranm0002	0.0033	47.9 %
Hranm0000	Hranm0008	0.0071	18.2 %
Hranm0002	Hranm0001	0.0051	25.4 %
Hranm0002	Hranm0009	0.0030	37.7 %
Hranm0003	Hranm0000	0.0019	45.1 %
Hranm0003	Hranm0002	0.0020	82.9 %
Hranm0003	Hranm0004	0.0035	47.8 %
Hranm0003	Hranm0009	0.0050	11.7 %
Hranm0004	Hranm0005	0.0018	72.1 %
Hranm0004	Hranm0006	0.0022	48.1 %
Hranm0004	Hranm0007	0.0032	34.4 %
Hranm0005	Hranm0006	0.0013	60.5 %
Hranm0005	Hranm0007	0.0014	49.3 %
Hranm0006	Hranm0007	0.0007	76.3 %
Hranm0008	Hranm0001	0.0037	42.5 %
Hranm0008	Hranm0009	0.0044	9.8 %
Hranm0009	Hranm0001	0.0017	51.6 %
Hranm0009	Hranm0010	0.0007	29.2 %
Hranm0009	Hranm0011	0.0007	19.0 %
Hranm0010	Hranm0011	0.0006	72.1 %
Hranm0010	Hranm0015	0.0017	26.8 %
Hranm0012	Hranm0010	0.0010	41.6 %
Hranm0012	Hranm0011	0.0006	52.4 %
Hranm0012	Hranm0015	0.0006	77.2 %
Hranm0012	Hranm0014	0.0007	74.1 %
Hranm0012	Hranm0016	0.0005	56.9 %
Hranm0013	Hranm0018	0.0007	51.0 %
Hranm0013	Hranm0012	0.0007	71.4 %

Hranm0013	Hranm0015	0.0006	42.9 %
Hranm0013	Hranm0014	0.0010	44.4 %
Hranm0014	Hranm0015	0.0006	51.2 %
Hranm0015	Hranm0011	0.0010	33.6 %
Hranm0015	Hranm0016	0.0006	54.3 %
Hranm0016	Hranm0011	0.0018	38.3 %
Hranm0017	Hranm0012	0.0006	55.0 %
Hranm0017	Hranm0015	0.0007	54.9 %
Hranm0017	Hranm0016	0.0004	71.8 %

## Inclinometer Mismatches

Cluster/Scan	Scan	Mismatch [deg]
Hranm0013	Hranm0013	0.0188
Hranm0018	Hranm0018	0.0030
Hranm0003	Hranm0003	0.0271
Hranm0017	Hranm0017	0.0094
Hranm0000	Hranm0000	0.0168
Hranm0008	Hranm0008	0.0096
Hranm0012	Hranm0012	0.0059
Hranm0004	Hranm0004	0.0176
Hranm0002	Hranm0002	0.0081
Hranm0009	Hranm0009	0.0247
Hranm0014	Hranm0014	0.0059
Hranm0010	Hranm0010	0.0296
Hranm0015	Hranm0015	0.0092
Hranm0005	Hranm0005	0.0220
Hranm0016	Hranm0016	0.0067
Hranm0006	Hranm0006	0.0105
Hranm0011	Hranm0011	0.0148
Hranm0007	Hranm0007	0.0113
Hranm0001	Hranm0001	0.0152