

*С.В. Скиба, О.А. Бобарчук, к.т.н.,
(Національний авіаційний університет, Україна)
Н.М. Куковальська, О.В. Шульга,
(Національний заповідник «Софія Київська», Україна)
А.С. Скиба
(Відкритий міжнародний Університет розвитку людини «Україна», Україна)*

Особливості створення репозиторію цифрових моделей архітектурних пам'яток України

Виконаний пілотний проект створення 3D моделі дзвіниці Софійського собору в Києві на основі аерофотознімків. Проведений практичний кількісно-якісний аналіз трудомісткості і необхідних ресурсів для розробки репозиторію цифрових моделей архітектурних пам'яток в умовах сучасних безпекових ризиків.

Цифрові ініціативи, пов'язані зі створення та збереженням максимально деталізованих 3D моделей архітектурних пам'яток, згідно з Конвенцією ЮНЕСКО про охорону всесвітньої культурної і природної спадщини (2003 р.) [1] мають суттєві практичні обмеження у реалізації в умовах воєнного стану. Проте потреба в таких моделях є нагальною. При цьому на сайті міжнародної організації ICOMOS, яка займається збереженням пам'яток та визначних місць світу, серед представлених 113 країн комітет від України відсутній [2].

Метою дослідження є практична оцінка методики кількісно-якісного аналізу трудомісткості та ресурсних потреб створення цифрових моделей архітектурних пам'яток двох рівнів:

1. Високоякісних цифрових моделей, які відповідають вимогам стандартів ISO 19157:2013 "Географічна інформація — Якість даних" [4], що визначає принципи та керівництва для оцінки якості даних у географічних інформаційних системах, включаючи просторові дані, що використовуються для 3D-моделювання архітектурних об'єктів, та ISO 16739-1:2018 (IFC) [5] обміну інформацією про будівельні конструкції та архітектурні об'єкти в цифрових моделях.

2. Актуальних цифрових моделей, що відповідають мінімальним критичним практичним вимогам.

Об'єктом дослідження є цифрова 3D-модель дзвіниці Софійського собору в Києві, Національний заповідник Софія Київська вул. Володимирська 24 (рис. 1 та 2). Координати по центру вхідних воріт: Широта N50°27'10.4444", Довгота E30°30'55.2858". Розміри: ширина 21м, глибина 16м, висота 76м.

Предметом дослідження визначені наступні вимоги до параметрів цифрової моделі.

1. **Точність геометрії:** оцінка відповідності цифрової моделі реальній архітектурній пам'ятці; порівняння відстаней, пропорцій, кутів та загальних форм з оригіналом; використання стандартів точності для 3D-моделювання (відхилення не більше ніж на кілька міліметрів).



Рис. 1. Територія заповідника і розташування дзвіниці на ній (місце №2).



Рис. 2. Загальне вигляд дзвіниці.

2. Деталізація: рівень деталізації моделі: відображення дрібних елементів, текстур, орнаментів та інших архітектурних деталей; пошкоджень, та розміру дефектів, необхідність моделювання певних компонентів пам'ятки (фасад, декоративні елементи).

3. Метод збору даних: джерела даних: аерофотознімки, лазерне сканування, фотограмметрія, колориметрія; якість та роздільна здатність зібраних даних, що використовуються для моделювання.

4. Сумісність форматів: вимоги до форматів 3D-моделей (наприклад, .obj, .fbx, .stl) для подальшої обробки, зберігання та використання; сумісність із програмним забезпеченням для моделювання, візуалізації та аналізу.

5. Збереження текстур і матеріалів: оцінка якості фіксації візуалізації матеріалів (каменю, металу, фасадних фарб) та їх відповідності оригіналу, стандартизація та маркування колористики; використання високоякісних текстур та їх правильне накладання на 3D-модель.

6. Масштабованість і адаптивність: можливість використання моделі в різних масштабах (від локальних до глобальних реконструкцій); гнучкість моделі для адаптації до різних рівнів деталізації та технічних вимог (наприклад, для VR/AR або наукових реконструкцій).

7. Метадані: наявність і якість метаданих про пам'ятку; документування джерел даних, використаних технологій та методик для створення моделі.

8. Аналіз трудомісткості: оцінка витрат часу та людських ресурсів на кожен етап створення моделі (збір даних, обробка, моделювання, рендеринг); визначення необхідних кваліфікацій та навичок для фахівців, які працюють з моделями.

9. Оцінка обчислювальних ресурсів: вимоги до обчислювальних потужностей для побудови та обробки моделі; використання хмарних сервісів для зберігання та обробки даних.

10. Безпека і доступність: захист даних моделі (авторські права, конфіденційність); оцінка доступності моделі для науковців, дослідників або громадськості через репозиторій чи інші платформи.

11. Оцінка можливостей для збереження і реставрації: визначення потенціалу використання цифрових моделей для реставраційних проєктів або моніторингу стану архітектурних пам'яток; інтеграція з інструментами аналізу зносу, деформації або пошкодження.

12. Відповідність міжнародним стандартам: дотримання міжнародних стандартів збереження культурної спадщини (наприклад, вимоги ЮНЕСКО); використання відкритих стандартів для зберігання та доступу до моделей.

13. Інтерактивність і візуалізація: можливість інтерактивного перегляду моделі для користувачів (наприклад, через веб-додатки або VR/AR-платформи); оцінка якості візуалізації в реальному часі, швидкість завантаження моделі в інтерактивних середовищах.

14. Модульність і оновлюваність: можливість модифікації або оновлення моделі в майбутньому (наприклад, додавання нових елементів або виправлення помилок); модульність цифрових моделей, що дозволяє окремі частини моделі редагувати або використовувати незалежно.

15. Автоматизація процесів: можливість автоматизації певних процесів при створенні моделі, таких як обробка аерофотознімків, генерація текстур або порівняння з архівними матеріалами; використання алгоритмів машинного навчання або штучного інтелекту для автоматичного виявлення та відтворення складних архітектурних елементів.

16. Оцінка придатності для реставрації: можливість використання моделі для планування реставраційних робіт: аналіз стану конструкції, пошкоджень, що можуть не бути очевидними при звичайному огляді; точність 3D-моделі щодо історичних креслень і збережених елементів для точного відновлення.

17. Використання в навчальних цілях: оцінка можливостей використання моделі як навчального інструменту в освітніх закладах, музеях або для дослідницьких цілей; можливість створення інтерфейсів з анотаціями, поясненнями та інтерактивними довідковими матеріалами.

18. Соціальна і культурна цінність: оцінка впливу цифрової моделі на суспільство та культуру, її значущість для збереження історичної пам'яті; аналіз можливостей популяризації культурної спадщини через цифрові моделі, виставки, інтерактивні тури тощо.

19. Використання у віртуальних реконструкціях: оцінка можливостей моделі для віртуальної реконструкції втрачених частин архітектурної пам'ятки або створення віртуальних турів; визначення, чи може модель служити базою для реконструкції історичного контексту навколо пам'ятки (наприклад, відтворення міського середовища певного періоду).

20. Аналіз використання 3D моделей для моніторингу стану пам'ятки: визначення можливостей регулярного сканування та оновлення цифрової моделі для моніторингу стану пам'ятки (виявлення зносу, тріщин, інших змін); створення інтерактивних звітів про стан пам'ятки на основі цифрової моделі.

21. Екологічні аспекти: оцінка впливу цифрових моделей на збереження навколишнього середовища, наприклад, зниження потреби в фізичному дослідженні важкодоступних ділянок; використання екологічно чистих методів збору даних, таких як дрони з мінімальними викидами або спеціалізовані мультиспектральні сенсори для збереження пам'яток без пошкоджень.

22. Економічна ефективність: аналіз економічної доцільності створення 3D-моделей архітектурних пам'яток: оцінка співвідношення витрат і користі від використання цифрових моделей; отримання базової інформації для створення абсолютно актуальних проектів реставрації будівлі; визначення можливих джерел фінансування або комерційного використання моделі (наприклад, у туристичному секторі чи для архітектурних бюро).

23. Стійкість до зовнішніх факторів: оцінка стійкості цифрових моделей до впливу часу, зміни стандартів або нових технологій зберігання; визначення механізмів довгострокового збереження цифрових моделей із врахуванням розвитку інформаційних технологій.

24. Глобальна інтеграція та співпраця: оцінка можливостей інтеграції цифрових моделей у глобальні платформи збереження культурної спадщини (наприклад, міжнародні ініціативи ЮНЕСКО або інші репозиторії); забезпечення можливості міжнародної співпраці для вдосконалення моделей, доступу до даних і обміну знаннями.

Ці вимоги забезпечують всебічний і якісний аналіз цифрових моделей архітектурних пам'яток з урахуванням технічних, наукових та культурних аспектів.

Проведена оцінка можливості автоматизації об'єднання цифрових даних, отриманих паралельно технологіями лазерного сканування, фотограмметрії та маркування колористики, для створення єдиної комплексної цифрової моделі архітектурної пам'ятки заданої якості.

Проведено кваліметричне обґрунтування вимог до параметрів компонентів контенту та принципів взаємодії між ними.

Досягнута якість створеної моделі може прийматися за кваліметричний еталон для нормування та масштабування виконання подібних робіт (рис.3, 4).

З використанням наземного лазерного сканера Faro Focus 3D, виконані сканування, зареєстровані за допомогою геодезичної мережі. Кінцева хмара точок охоплює внутрішній та зовнішній об'єм дзвіниці і складається з кількох мільярдів точок. Точність сканування +/- 2мм.

Базове фотограмметричне сканування [6-8] зовнішньої поверхні дзвіниці виконано з використанням дрона DJI Phantom 3 Pro зі стандартним режимом GPS прив'язки. Фотографічна зйомка виконана в форматі RAW з наступною конвертацією кольоровідтворення на базі стандартних мішеней компанії X-Rite. Використано 1202 каліброваних фотознімків, 1 015 669 сполучних точок. Точність вершин моделі +/- 3см. Точність деталізації текстур до 50 texels/cm².

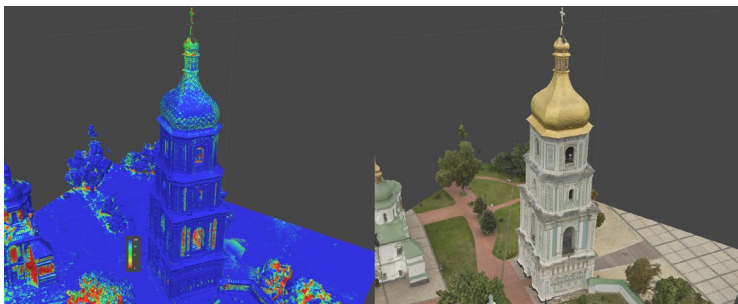


Рис. 3. Загальне зображення достовірності вершин та текстурованої 3D моделі

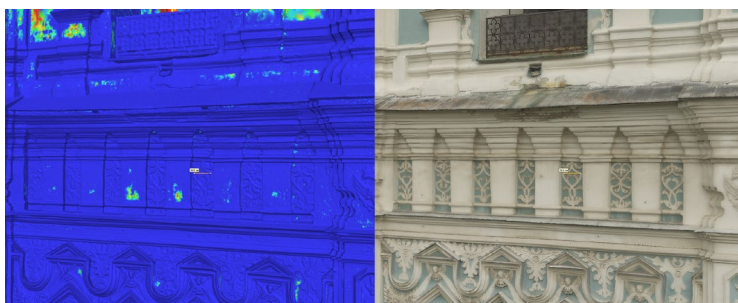


Рис. 4. Зображення достовірності вершин та деталізації 3D моделі

Висновки

Існуючі на сьогодні методології створення цифрових моделей архітектурних пам'яток не відповідають їх актуальним потребам.

Великий обсяг даних цифрових моделей вимагає покращення інтерфейсів для їх створення та доступу, а також автоматизації процесів.

Найбільш перспективним напрямком розвитку є використання сучасних дронів з фотограмметричним обладнанням високої роздільної здатності та системою 3D лазерного сканування та позиціонування.

Створення репозиторію цифрових моделей архітектурних пам'яток України потребує узгодження нормативної бази з сучасними світовими стандартами зберігання, доступу та обміну даними, а також забезпечення їхньої безпеки та довгострокового збереження.

Уніфікація кваліметрії дасть змогу масштабування технології та нормування ресурсів створення цифрових моделей різного рівня, в тому рахунку і віртуальних інтерактивних турів для освітніх програм, туризму та популяризації культурної спадщини України.

Список літератури

1. UNESCO. Charter on the Preservation of Digital Heritage. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000179529>.
2. Principles for the Recording of Monuments, Groups of Building and Sites as Adopted by ICOMOS General Assembly, Sofia, Bulgaria, October 1996. URL: https://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_en0057762001587380182.pdf.
3. ISO/TC 211. URL: <https://www.iso.org/committee/54904.html>
4. ISO 19157:2013. URL: <https://standards.iso.org/iso/19157/>
5. ISO 16739-1:2018 (IFC), URL: <https://standards.iso.org/iso/16739/>
6. Bill Triggs, Philip McLauchlan, Richard Hartley, Andrew Fitzgibbon Peter Axelsson. Dem generation from laser scanner data using adaptive tin models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B4. Amsterdam 2000. URL: <http://surl.li/ywjfm>.
7. C. Becker, N. Hani, E. Rosinskaya, E. d'Angelo, C. Strecha. Classification of Aerial Photogrammetric 3D Point Clouds. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Volume 84, Number 5, May 2018, pp. 287-295(9). DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.84.5.287>. URL: <https://arxiv.org/pdf/1705.08374.pdf>.
8. Silvano Galliani, Katrin Lasinger, Konrad Schindler. Massively Parallel Multiview Stereopsis by Surface Normal Diffusion. Photogrammetry and Remote Sensing, ETH Zurich. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.106>. <https://prs.igp.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igp/photogrammetry-remote-sensing-dam/documents/pdf/galliani-lasinger-iccv15.pdf>.