

Андрій МАЛІЦЬКИЙ

Національний університет “Львівська політехніка”, Інститут геодезії, вул. Карпінського, 6, Львів, 79013, Україна, тел. +38(063)3258578, ел. пошта: andrii.y.malitskyi@lpnu.ua

## МОДЕЛЮВАННЯ КВАЗИСИМЕТРИЧНИХ КІЛЬЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЦЕРКВИ ЗА ДАНИМИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

*Мета цієї роботи* – розробити алгоритм математичного тривимірного моделювання типового даху української церкви за даними наземного лазерного сканування та знайти способи оптимізації моделі залежно від набору вхідних даних. *Методика.* Точність моделювання залежить від даних лазерного сканування. Кількість отриманих точок та їх точність впливатимуть на кінцевий результат – 3D модель даху. Враховуючи типову конструкцію даху церкви у формі конуса, можна застосувати стандартний математичний алгоритм моделювання частини споруд типової церкви. *Результати.* Запропонований алгоритм розроблено у програмному середовищі MathCad. Для розроблення математичного алгоритму використано матеріали 3D сканування української типової церкви. Алгоритм аналізує розташування точок сканування даху церкви та виконує його усереднення. У результаті роботи алгоритму відбраковано помилкові виміри та отримано модель частини даху, яка утворює оптимальну геометрію споруди. *Наукова новизна та практична значущість.* Запропонований математичний алгоритм дає змогу автоматизувати деякі процеси моделювання типової української церкви для проєктних рішень. Такий спосіб моделювання можна застосовувати для подібних конструкцій інших будівель.

*Ключові слова:* 3D сканування; 3D моделювання; алгоритм автоматичного моделювання; хмара точок; побудова поверхні.

### Вступ

Результатом 3D сканування є хмара точок, яку можна використовувати різноманітними способами для різних цілей. Зазвичай хмара точок є джерелом вихідної інформації для 3D моделювання. Побудована модель використовується для аналізу, проєктування тощо.

У практичній роботі зі сканування старих дерев'яних церков ми зіткнулися із проблемою аналізу покрівлі церкви на великій висоті.

Для виконання проєктних робіт із визначення площі та форми даху можуть використовуватися дані наземного лазерного сканування. Але, враховуючи висоту будівлі та матеріал, з якого виготовляють дахи церков, дані сканування недостатньо якісні. Великі помилки вимірів спричиняють великі спотворення, а тому моделювання може бути утрудненим. Також дах української церкви не можна описати простою геометричною фігурою. Для пошуку оптимальних рішень проаналізовано доступну літературу із цієї тематики.

У роботах [Pang G., et al., 2015, Patil A. K., et al., 2017] описано ефективні методи автоматичного

моделювання типових промислових конструкцій – труби та крани. Маючи стандартизовані розміри та типи елементів трубопроводу, можна швидко отримати просторову модель об'єкта. Але такий спосіб моделювання є вузькоспрямованим і не може використовуватися для моделювання інших об'єктів.

Метод автоматичного моделювання будівель низької деталізації запропоновано у [Budroni, & Boehm, 2010]. Автор пропонує виконати сегментацію хмари точок для визначення параметрів побудови моделі. Такий спосіб моделювання не можна використовувати для точного відтворення окремих елементів будівель, його застосування доцільне для швидкого відтворення інфраструктури населених пунктів. Подібне дослідження здійснено у [Ochmann, et al., 2019], основою опрацювання якого є моделювання плоских об'єктів (стін, підлоги). Дослідження із моделювання за даними лазерного сканування у сфері промисловості виконано також у [Крисько, 2014]. У цій праці доволі детально викладено роботу запропонованого алгоритму, але не наведено практичного результату моделювання. М. Пере зі співавторами [Пере, et al., 2020] здійснили

практичні роботи зі збирання просторових даних фотограмметричним методом. Використовуючи хмару точок, автори виконують 3D моделювання споруд стандартними засобами програмного забезпечення у ручному режимі. В автоматичному режимі побудову поверхні виконують за наявними вимірами. Наземне лазерне сканування у архітектурі досліджували у багатьох роботах протягом тривалого часу. Р. В. Шульц, М. В. Білоус та О. М. Гончерюк [Шульц та ін. 2016] описують загальні принципи сканування пам'яток архітектури та опрацювання отриманих даних. У праці [Scorigno, et al., 2011] описано практичні результати моделювання різноманітних об'єктів культурної спадщини та деякі особливості сканування конкретних об'єктів. Технологію інформаційного моделювання та її особливості висвітлено в [Талапов, 2015] та [Rocha, et al., 2020]. Але в жодній роботі з-поміж тих, які ми розглянули, не виявлено методів автоматизації процесів моделювання специфічних елементів споруд.

Дослідження алгоритму моделювання плоских кільцевих об'єктів виконано у роботі [Вус, Маєвський, 2015]. Запропонований метод дає змогу точно описувати форму дерев'яних колод у місцях поперечних перетинів. Але запропонований метод описує форму об'єкта лише на площині. Повний цикл опрацювання даних сканування для моделювання елементів інтер'єру описано у роботі [Роух, et al., 2018]. Крім запропонованого алгоритму, подано результати моделювання. Втім, головною умовою забезпечення реалізації цього методу є високоякісні дані лазерного сканування. Цього легко досягти у разі сканування інтер'єру будівель, але складно під час вимірювання далеких об'єктів.

Під час моделювання поверхні також можуть використовуватися геометричні фігури, які вписуються у хмару точок. Наприклад, для аналізу відхилення труби зручно побудувати циліндр певного розміру [Маліцький, 2017] (рис. 1).

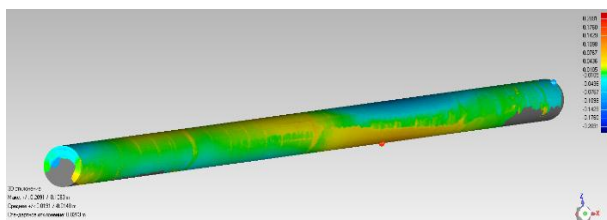


Рис. 1. Відображення відхилень Cad-моделі циліндра від положення наявної труби [Маліцький, 2017]

Цей спосіб вартий уваги у випадку, якщо відсканований об'єкт можна описати набором простих тривимірних фігур. Але використання такого способу в разі неправильної форми конструкції дасть поганий результат.

### Методика

Наземне лазерне сканування використовується для збирання даних для моделювання. Церкву сканують із різних станцій сканування, що забезпечує відтворення споруди у вигляді хмари точок. Велике значення під час сканування має матеріал покрівлі споруди. Залежно від нього, дані сканування можуть містити істотні помилки у вимірах або взагалі можуть бути відсутні. Кількість отриманих точок лазерного сканування та їх точність впливатимуть на кінцевий результат – 3D модель даху. Враховуючи типову конструкцію даху церкви у формі конуса, можна застосувати стандартний математичний алгоритм моделювання частини споруд типової церкви.

Першочерговим завданням під час опрацювання точок сканування є фільтрація вхідних даних, які використовуватимуться для моделювання. Представлення положення точки сканування можна описати двома змінними – зміна висоти перерізу об'єкта та радіус-вектор до поверхні від осі симетрії об'єкта.

Радіус-вектор є функцією, яка залежить від значення азимута  $A$  та висоти перерізу  $f$  (рис. 2)

$$r = f(A; f) \quad (1)$$

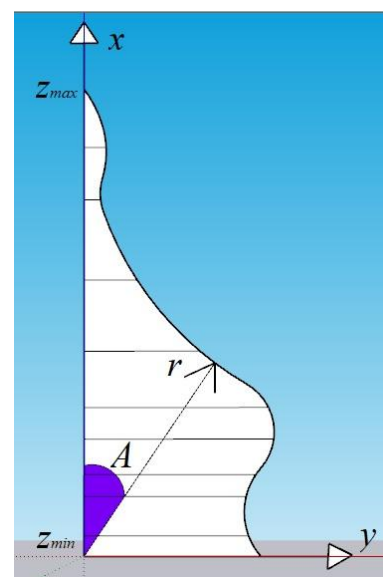


Рис. 2. Схема побудови перерізів для створення усередненої моделі

У картезіанській системі координат вісь  $z$  – це змінна  $h$ ; вісь  $x$  – проекція на вісь  $x$  вектора  $r$ , який визначається за таким виразом:

$$x = ax_0 \cos A + \sum_{i=1}^n (ax_{ci} \cos f_i \cos A + ax_{si} \sin f_i \cos A)$$

$$y = ay_0 \sin A + \sum_{i=1}^n (ay_{ci} \cos f_i \sin A + ay_{si} \sin f_i \sin A) \quad (2)$$

$ax_0, ax_{ci}, ax_{si}, ay_0, ay_{ci}, ay_{si}$  – коефіцієнти ряду Фур'є;  $n$  – кількість гармонік ряду Фур'є;  $i$  – чергова гармоніка,  $1 \leq i \leq n$ ;  $f_i$  – зміна висоти перерізу в кутовій мірі.

Зміну висоти перерізу трансформовано у кутову розмірність за таким виразом:

$$f_i = h_i \frac{2p}{(h_{max} - h_{min})}, \quad (3)$$

де  $h_{max}, h_{min}$  – максимальна та мінімальна висоти точок об'єкта;  $h_i$  – висота  $i$ -ї точки.

Коефіцієнти ряду Фур'є  $ax_0, ax_{ci}, ax_{si}, ay_0, ay_{ci}, ay_{si}$  визначають за способом найменших квадратів, розв'язавши  $2 \times i$  рівнянь. Тобто кожна точка, визначена у результаті сканування, утворює два рівняння (2).

Для забезпечення оптимального результату моделювання у запропонованому алгоритмі застосовано різні рівні складності поверхні. Для цього використано різну кількість коефіцієнтів  $i$ . Зі збільшенням кількості цих гармонік модель стає детальнішою та враховує більшу кількість вимірів на поверхні.

Тому наступним кроком є побудова усередненого профілю з використанням функції згладження за Гауссом.

Для побудови профілю задають кількість перерізів по вертикалі та горизонталі. Від їх кількості залежить детальність побудови усередненого профілю.

Завершальним етапом побудови моделі є використання згладженого профілю для розв'язання ряду Фур'є.

### Результати

Для розроблення алгоритму моделювання використано матеріали лазерного сканування дерев'яної церкви в с. Сушно Радеківського

району Львівської області (рис. 3). Сканування виконано сканером Faro Focus 3D 120. Згідно із технічними характеристиками 3D сканера, точність знімання становить  $\pm 2$  мм на відстані 25 м за коефіцієнта відбиття лазерного променя від поверхні 90 %. Вимірювання даху виконано із шести станцій сканування із різними налаштуваннями швидкості вимірювання та роздільної здатності. Вимірювання з усіх станцій сканування орієнтовані у ПЗ Faro Scene 6.2 за допомогою сфер. Точність орієнтування сканів – 0,7 см. Середня відстань від місця розташування сканера до найвіддаленішого елемента церкви 24 м.



Рис. 3. Хмара точок відсканованої церкви с. Сушно Львівської області

Для опрацювання даних сканування використано не усі точки лазерного сканування, а лише їх частину, що відтворює дах церкви. Під час дослідження автоматичного методу моделювання використано близько 13000 точок сканування, за якими побудовано модель

Для відтворення покрівлі церкви хмари точок розділено на дві частини. Нижня частина хмари точок даху містить недостатню кількість вимірів через обмеження видимості об'єкта. Цю частину хмари точок опрацьовували вручну, вписуючи полігони (рис. 4) і враховуючи, що дах за будовою складається із восьми граней.

Верхня частина даху церкви круглої форми, без граней. Результати сканування цієї частини споруди містять великі помилки у вимірах. Для подальшого опрацювання цих даних застосовано фільтрацію точок. У нашому випадку встановлено максимальне значення відхилення положення точки 10 см, тому близько 1 % точок із загального переліку усіх вимірів відкинуто.

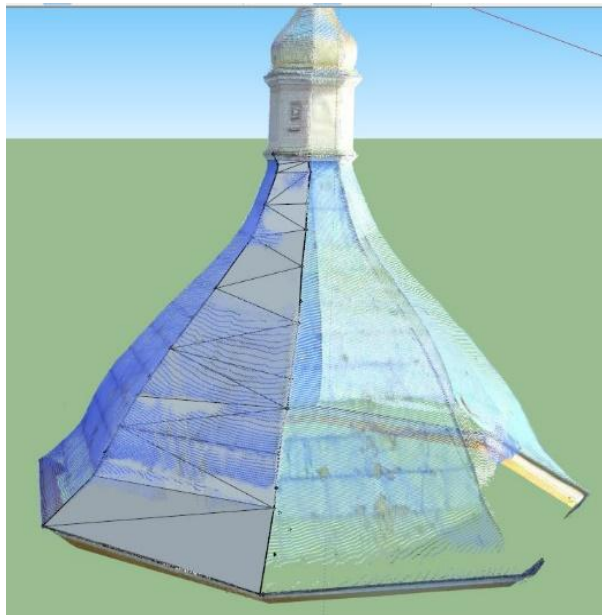


Рис. 4. Результати ручного моделювання нижньої частини даху церкви

Опрацювання хмари точок виконано автоматичним методом із використанням запропонованого алгоритму.

Аналізуючи верхню круглу частину даху, спостерігаємо певні зміщення в симетрії. Тому різні перетини даху відрізнятимуться. Для моделювання даху необхідно виконати аналіз усіх точок сканування, їх фільтрацію, згладжування та оцінювання точності.

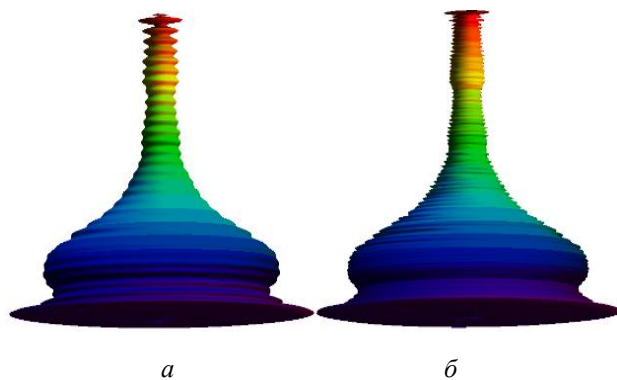


Рис. 5. Модель частини даху церкви:  
а –  $i = 30$ ; б –  $i = 80$

Для визначення оптимальної кількості точок потрібно обчислити середню квадратичну помилку побудови моделі. Використавши значення  $i = 40$ , отримаємо точність побудови моделі 3,2 см. Зі збільшенням значення цього

коефіцієнта точність моделі майже не змінюється. Ми також спробували змінити поріг фільтрації точок сканування. Але зміна фільтрації точок не дала відчутних результатів.

У нашому випадку використано коефіцієнт згладження  $n = 100$ .

На рис. 6 відображено частину моделі з найбільшою кількістю хибних вимірів:

- верхня частина профілю вимірів лазерного сканування (сині крапки);
- верхня частина профілю побудованої моделі (зелена потовщена лінія), якщо  $i = 30$  та  $i = 80$ ;
- верхня частина профілю згладженої моделі за фільтром Гаусса (червона тонка лінія).

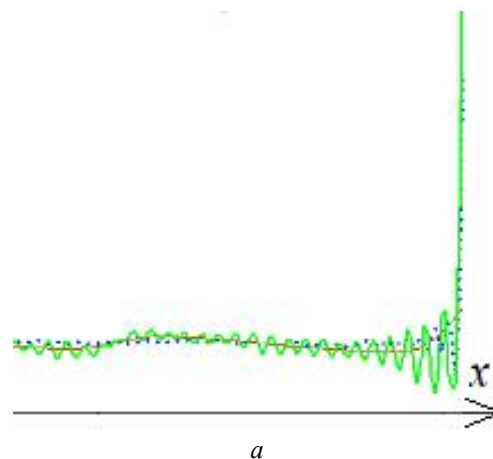
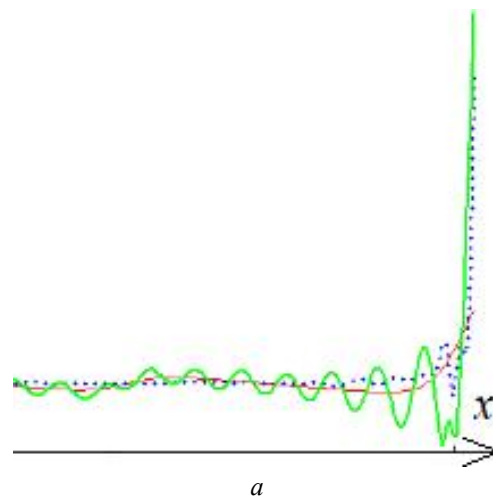


Рис. 6. Вертикальні перерізи моделей із застосуванням фільтра згладження:  
а –  $i = 30$ ; б –  $i = 80$

На рис. 7 відображено одержану модель частини даху церкви за початкових коефіцієнтів  $i = 30$  та  $i = 80$  та коефіцієнта згладження  $n = 100$ .



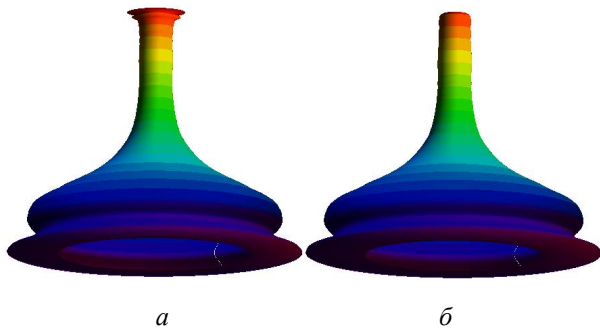


Рис. 7. Згладжена модель для  $n = 100$  моделей із кількістю гармонік: а –  $i = 30$ ; б –  $i = 80$

Використання простого математичного виразу дало змогу перетворити дані лазерного сканування на точну квазісиметричну модель із урахуванням наявних локальних деформацій та фільтрацією грубих помилок під час вимірювань.

### Висновки

Запропоновано та реалізовано у програмному забезпеченні MathCad алгоритм моделювання квазісиметричної кільцевої фігури, який описує просторову поверхню двома змінними – азимутом точки відносно осі симетрії об'єкта та висоти перерізу. Опрацювавши точки сканування лазерного сканування та не зважаючи на грубі помилки у вимірах, ми створили усереднену квазісиметричну модель частини даху церкви автоматизованим методом. Середня квадратична похибка моделі становить 3,2 см. Цей результат зумовлений точністю сканування поверхні та її формою. Можна стверджувати, що заявленої точності наземного лазерного сканування 2 мм/25 м за коефіцієнта відбиття поверхні не досягнуто. Застосовано фільтрацію даних сканування, що покращило точність моделі на 7 мм. Визначено оптимальну кількість гармонік для створення точної моделі та оптимальний показник згладження для спрощення моделі.

Побудовану модель можна розглядати як один із етапів оцифрування хмари точок. Запропонований метод оптимізовано для створення моделей із метою моніторингу та пошуку відхилень від базової моделі. Подальші дослідження стосуватимуться порівняння моделей, утворених за іншими відомими способами, з використанням наявних програмних засобів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Вус А. Я., Маєвський В. О. Математичне моделювання поперечних перетинів колоди за результатами її сканування. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015, Вип. 25(4). <https://cyberleninka.ru/article/n/matematichne-modelyuvannya-poperechnih-peretiviv-kolodi-za-rezultatami-yiyi-skanuvannya>
- Катушков В. О., Шульц Р. В., Сосса, Б. Р. Співвідношення між очікуваною точністю наземного лазерного сканування та вимогами до точності виконання інженерно-геодезичних робіт. *Містобудування та територіальне планування*. 2012. Вип. 44, С. 238–248.
- Крисько О. А. Обробка даних, отриманих НЛС, для створення геометричної моделі дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм. *Сучасні проблеми моделювання*. 2014, Вип. 2, С. 51–56.
- Маліцький А. Ю. Контроль відхилень фізичної поверхні від базової за даними наземного лазерного сканування. *Geoterrace-2017: Міжнар. Наук.-техн. конференція молодих вчених*, 14–16 грудня 2017, Львів
- Талапов В. В. О некоторых закономерностях и особенностях информационного моделирования памятников архитектуры. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2015, is. 2 (31). <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekotoryh-zakonomernostyah-i-osobennostyah-informatsionnogo-modelirovaniya-pamyatnikov-arhitektury>
- Шульц Р. В., Білоус М. В., Гончарюк О. М. Моніторинг пам'яток архітектури за допомогою даних наземного лазерного сканування. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2016, Вип. 46, С. 202–207.
- Budroni, A., & Boehm, J. (2010). Automated 3D reconstruction of interiors from point clouds. *International Journal of Architectural Computing*, 8(1), 55–73. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1260/1478-0771.8.1.55>
- Ochmann, S., Vock, R., & Klein, R. (2019). Automatic reconstruction of fully volumetric 3D building models from oriented point clouds. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 151, 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.017>
- Pang, G., Qiu, R., Huang, J., You, S., & Neumann, U. (2015, May). Automatic 3d industrial point cloud modeling and recognition. In *2015 14th IAPR international conference on machine vision applications (MVA)*, 22–25. IEEE. <https://doi.org/10.1109/MVA.2015.7153124>
- Patil, A. K., Holi, P., Lee, S. K., & Chai, Y. H. (2017). An adaptive approach for the reconstruction and modeling of as-built 3D pipelines from point clouds.

- Automation in construction*, 75, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.12.002>
- Pepe, M., Costantino, D., & Restuccia Garofalo, A. (2020). An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds. *Applied Sciences*, 10(4), 1235. <https://doi.org/10.3390/app10041235>
- Poux, F., Neuville, R., Nys, G. A., & Billen, R. (2018). 3D point cloud semantic modelling: Integrated framework for indoor spaces and furniture. *Remote Sensing*, 10(9), 1412. <https://doi.org/10.3390/rs10091412>
- Rocha, G., Mateus, L., Fernández, J., & Ferreira, V. (2020). A scan-to-BIM methodology applied to heritage buildings. *Heritage*, 3(1), 47–67. <https://doi.org/10.3390/heritage3010004>
- Scopigno, R., Callieri, M., Cignoni, P., Corsini, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Ranzuglia, G. (2011). 3D models for cultural heritage: Beyond plain visualization. *Computer*, 44(7), 48–55. [https://www.academia.edu/3064863/3D\\_Models\\_for\\_Cultural\\_Heritage\\_Beyond\\_Plain\\_Visualization?from=cover\\_page](https://www.academia.edu/3064863/3D_Models_for_Cultural_Heritage_Beyond_Plain_Visualization?from=cover_page)

Andrii MALITSKYI

Lviv Polytechnic National University, Institute of geodesy, 6, Karpinsky Str., Lviv, 79013, Ukraine, тел. +38(063)3258578, e-mail: andrii.y.malitskyi@lpnu.ua

#### MODELING OF QUASISYMMETRIC RING ELEMENTS OF THE CHURCH USING DATA OF GROUND LASER SCANNING

*The aim of this work* is to develop an algorithm for mathematical three-dimensional modeling of a typical roof of a Ukrainian church based on ground-based laser scanning and to find ways to optimize the model depending on the input data set. *Method.* The accuracy of the simulation depends on the laser scan data. The number of points obtained and their accuracy will affect the final result – 3D model of the roof. Given the typical design of the church roof in the shape of a cone, you can apply the standard mathematical algorithm for modeling part of the buildings of a typical church. *Result.* The proposed algorithm was developed in the MathCad software environment. 3D scanning materials of the Ukrainian typical church were used to develop the mathematical algorithm. The algorithm analyzes the location of the scanning points of the church roof and performs its averaging. As a result of the algorithm, erroneous measurements were rejected and a model of the part of the roof was obtained, which forms the optimal geometry of the structure. *Scientific novelty and practical significance.* The proposed mathematical algorithm allows to automate some modeling processes of a typical Ukrainian church for design decisions. This method of modeling can be used for similar structures of other buildings.

*Key words:* 3D scanning; 3D modeling; automatic modeling algorithm; point cloud; surface construction.

Надійшла 22.04.2022 р.