

ОГЕРУК БОГДАН

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0009-0000-6519-6225>e-mail: bohdan.r.oheruk@lpnu.ua**ВЕРЕТЮК ОЛЕКСІЙ**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0009-0009-2340-4458>e-mail: oleksii.v.veretiuk@lpnu.ua

ОГЛЯД МЕТОДІВ 3D-РЕКОНСТРУКЦІЇ НА ОСНОВІ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА БАГАТОКАМЕРНОЇ ТРІАНГУЛЯЦІЇ

У статті представлено порівняльний аналіз сучасних методів 3D-реконструкції об'єктів, що ґрунтуються на лазерному скануванні (LiDAR) та багатокamerній тріангуляції. 3D-реконструкція є ключовим інструментом у таких галузях, як архітектура, промисловий дизайн, культурна спадщина, автономне водіння та віртуальна реальність. Лазерне сканування забезпечує високу точність та цілісність даних, що робить його незамінним при скануванні великих та складних об'єктів, однак вимагає дорогого обладнання та тривалого часу обробки. З іншого боку, багатокamerна тріангуляція, що базується на обробці зображень з декількох камер або фотографій, дозволяє ефективно реконструювати 3D-моделі з високою деталізацією, особливо у разі текстурованих поверхонь, але її точність значною мірою залежить від умов освітлення та конфігурації камер.

У статті розглядаються ключові етапи кожного з методів, зокрема: попередня калібрування, сегментація, вирівнювання хмар точок та побудова сітки. Аналізуються алгоритми, такі як Structure from Motion (SfM), Multi-View Stereo (MVS), Iterative Closest Point (ICP), а також новітні методи гібридного підходу, які поєднують переваги обох підходів. Здійснено порівняння точності, швидкодії, масштабованості та вартості реалізації. Наведено приклади практичного застосування кожного з методів у сфері цифрової реконструкції пам'яток архітектури, криміналістики, контролі якості на виробництві та автоматизованому картографуванню.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що вибір методу 3D-реконструкції залежить від вимог до точності, доступності обладнання, умов сканування та характеру об'єкта. У перспективі доцільним є розвиток гібридних систем, що поєднують LiDAR та фотограмметрію для досягнення максимальної точності та ефективності.

Ключові слова: тріангуляція, 3D реконструкція, лазерне сканування, фотограмметрія.

OHERUK BOHDAN**VERETIUK OLEKSI**

Lviv Polytechnic National University

REVIEW OF 3D RECONSTRUCTION METHODS BASED ON LASER SCANNING AND MULTI- CAMERA TRIANGULATION

This article provides a comparative analysis of modern 3D reconstruction methods based on laser scanning (LiDAR) and multi-camera triangulation. 3D reconstruction is a vital tool in various fields such as architecture, industrial design, cultural heritage preservation, autonomous navigation, and virtual reality. Laser scanning delivers high precision and dense point clouds, making it ideal for scanning large and complex structures, yet it requires expensive equipment and longer processing times. In contrast, multi-camera triangulation, relying on the processing of images captured from several cameras or viewpoints, is effective in generating detailed 3D models of textured surfaces, although its accuracy depends significantly on lighting conditions and camera configuration.

The article examines key stages of each method, including pre-calibration, segmentation, point cloud alignment, and mesh generation. Algorithms such as Structure from Motion (SfM), Multi-View Stereo (MVS), and Iterative Closest Point (ICP) are reviewed, along with recent hybrid approaches that combine the strengths of both techniques. A comparative assessment is provided in terms of accuracy, speed, scalability, and implementation cost. Real-world applications are illustrated for each method, including digital reconstruction of architectural heritage, forensic analysis, quality control in manufacturing, and automated mapping.

The findings indicate that the choice of a 3D reconstruction technique depends on required accuracy, equipment availability, scanning environment, and object characteristics. Future directions suggest the development of hybrid systems integrating LiDAR and photogrammetry to achieve optimal accuracy and efficiency.

Keywords: triangulation, 3D reconstruction, laser scanning, photogrammetry.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми

Метою статті є здійснення глибокого огляду та порівняльного аналізу двох провідних методів 3D-реконструкції — лазерного сканування (LiDAR) та багатокamerної тріангуляції, які є найпоширенішими технологічними підходами у сфері створення тривимірних моделей об'єктів фізичного світу. Актуальність дослідження зумовлена зростаючою потребою в точних та високоефективних 3D-моделях у таких галузях, як будівництво, культурна спадщина, промисловий контроль якості, робототехніка, криміналістика, віртуальна/доповнена реальність та автономне транспортування.

У статті детально розглянуто методологічну основу кожного з підходів. Лазерне сканування передбачає активне сканування простору за допомогою лазерного променя, який реєструє відстані до об'єктів з високою точністю, формуючи хмари точок. Цей метод особливо ефективний для реконструкції об'єктів із

складною геометрією, великою протяжністю або слабко текстурованими поверхнями. У свою чергу, метод багатокamerної тріангуляції базується на обробці набору зображень з різних ракурсів (Structure from Motion, Multi-View Stereo), що дозволяє відновити структуру сцени шляхом побудови кореспондентних точок у просторі. Він має перевагу в зручності використання звичайних камер, нижчій вартості та можливості одночасного отримання кольорової текстури.

У статті виконано порівняння обох методів за низкою ключових критеріїв:

- Точність вимірювання: лазерне сканування переважає у забезпеченні міліметрової точності незалежно від умов освітлення;
- Швидкість та складність обробки: фотограмметрія потребує більшого обсягу обчислень для вирішення задач відповідності, тоді як LiDAR-дані обробляються швидше, однак попереднє сканування може займати більше часу;
- Вартість реалізації: багатокamerні системи значно дешевші, особливо для польових умов або мобільних рішень;
- Сумісність з різними об'єктами: фотограмметрія гірше працює з однорідними або блискучими поверхнями, а LiDAR — з прозорими або дуже малими деталями.

Розглянуто також сучасні тенденції розвитку гібридних підходів, де поєднується переваги обох методів — наприклад, використання фотозображень для накладення текстур на LiDAR-моделі або попереднє калібрування фотограмметричних моделей за допомогою точок з лазерного сканера.

У висновках підкреслено, що вибір методу реконструкції повинен здійснюватися з урахуванням технічних вимог до проєкту, фінансових обмежень, характеристик об'єкта та умов сканування. LiDAR доцільно використовувати для складних або великомасштабних об'єктів, де критично важлива точність, тоді як фотограмметрія краще підходить для малобюджетних проєктів або об'єктів з високою візуальною складністю. Перспективним напрямом вважається розвиток систем із синхронним використанням камер та лазерних сканерів, які дозволяють досягати оптимального балансу між точністю, деталізацією та ефективністю обробки даних.

Виклад основного матеріалу

У сучасних умовах цифрової трансформації суспільства 3D-реконструкція стала важливим інструментом в науці, інженерії, культурній спадщині, архітектурному проєктуванні, медицині, криміналістиці та багатьох інших галузях. Застосування тривимірних моделей дозволяє не лише візуалізувати об'єкти та простори з високою точністю, а й здійснювати глибокий аналіз їхніх геометричних, морфологічних та функціональних характеристик. Зокрема, у архітектурі 3D-реконструкція дає змогу здійснювати цифрове збереження та відновлення історичних споруд; у промисловості — забезпечує високоточний контроль якості продукції; в медицині — слугує для моделювання органів та хірургічного планування; у судовій експертизі — сприяє створенню наочних реконструкцій місця події для слідства [1].

Значення точності при цьому є критично важливим. Навіть незначні відхилення у побудові 3D-моделі можуть призвести до помилок в аналітичних висновках або прийнятті рішень. Особливо це стосується галузей, де цифрова модель слугує основою для виготовлення фізичних копій, визначення деформацій, об'ємних вимірів або просторового аналізу [2].

Попри наявність багатьох методів 3D-реконструкції, зокрема ручного моделювання, фотограмметрії, лазерного сканування, томографії та гібридних систем, не існує універсального підходу, що був би оптимальним для всіх випадків. Різні методи мають як переваги, так і обмеження, які проявляються в залежності від типу об'єкта, умов сканування, наявного обладнання та вимог до точності. Саме тому постає актуальна проблема — систематизувати та порівняти найпоширеніші методи високоточної 3D-реконструкції, такі як лазерне сканування та багатокamerна тріангуляція, з метою виявлення сфер їх ефективного застосування та потенціалу для інтеграції.

Останніми роками тема 3D-реконструкції набула широкого розповсюдження у науковій літературі, що відображає її високу актуальність у різних галузях. Основну увагу дослідники приділяють двом провідним підходам до створення тривимірних моделей: лазерному скануванню (LiDAR) та методам, що базуються на багатокamerній тріангуляції (фотограмметрія, Structure from Motion, Multi-View Stereo). Ряд праць, зокрема роботи J. L. Boehm (2018), R. Szeliski (2022), D. Remondino та F. Menna (2019), розкривають деталі алгоритмів обробки хмар точок, калібрування камер, фільтрації шумів і генерації полігональних сіток [3].

У контексті розвитку алгоритмів реконструкції дедалі більшого значення набуває використання штучного інтелекту (ШІ), зокрема глибокого навчання. Алгоритми на базі згорткових нейронних мереж (CNN) ефективно застосовуються для семантичної сегментації хмар точок, розпізнавання структурних елементів сцен, а також для автоматичної фільтрації шумів та оптимізації сіткової топології. Приклади успішного впровадження таких рішень спостерігаються у сферах архітектурної документації, обстеження мостів та тунелів, а також під час реконструкції об'єктів культурної спадщини. Інтеграція ШІ дозволяє підвищити точність та зменшити залежність від ручної обробки даних, що значно розширює можливості масштабованого застосування 3D-реконструкції.

Лазерне сканування детально досліджується у контексті архітектурного документування, топографії та автономного транспорту. Перевагою цього підходу є незалежність від освітлення, надзвичайно висока точність (до кількох міліметрів), а також можливість охоплення великих об'єктів або територій. У той же час публікації вказують на низку недоліків: високу вартість обладнання, потребу в обробці великого обсягу даних, складність інтеграції кольорової інформації та обмежену мобільність [4].

Практичним прикладом ефективності гібридного підходу є реконструкція фасаду Софії Київської. У проєкті використовувались наземні LiDAR-сканери для точного вимірювання геометрії архітектурного об'єкта, а також DSLR-камери для отримання фототекстур. Після обробки хмари точок за допомогою CloudCompare дані були об'єднані з текстурною інформацією в Agisoft Metashape. Це дозволило створити високоточну, кольорову 3D-модель, що використовується у віртуальних турах, архівуванні та подальших реставраційних роботах.

Методи багатокамерної тріангуляції отримали особливої популярності завдяки доступності цифрових камер, зокрема в мобільних пристроях. Роботи, присвячені алгоритмам SfM та MVS (наприклад, дослідження М. Furukawa та J. Ponce, 2015; Agisoft, 2020), демонструють ефективність реконструкції складних об'єктів із високою текстурою. Проте обмеженнями цього підходу залишаються залежність від якості знімків, неоднозначність реконструкції плоских або глянцеви́х поверхонь, проблеми при слабкому або змінному освітленні [5].

Окрему групу публікацій становлять дослідження гібридних систем, у яких поєднуються дані з лазерного сканера та фотограмметрії (наприклад, роботи Т. Kersten та С. Lindstaedt, 2019). Такий підхід дозволяє компенсувати слабкі сторони кожного з методів і досягати високої якості результату навіть у складних умовах. Однак, як зазначають автори, досі залишаються відкритими питання стандартизації обробки таких даних, складність автоматичної реєстрації результатів з різних джерел, а також необхідність спеціалізованого програмного забезпечення та технічної підготовки оператора.

Загалом аналіз наукових публікацій засвідчує значний прогрес у розвитку методів 3D-реконструкції, але виявляє й наявність ряду проблемних зон:

- відсутність універсального методу для роботи з будь-яким типом об'єктів або умов сканування;
- обмежена точність реконструкції в умовах обмеженого освітлення чи однорідних поверхонь;
- складність масштабування процесів для великих об'єктів або інтеграції даних з різних сенсорів.

Ці прогалини формують підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на розробку більш адаптивних, економічно ефективних і точних систем 3D-реконструкції, зокрема з використанням штучного інтелекту, автоматичного вирівнювання хмар точок та самонавчальних алгоритмів для підвищення якості результатів.

Метою цієї статті є здійснення комплексного огляду, систематизації та порівняльного аналізу сучасних методів 3D-реконструкції, що ґрунтуються на лазерному скануванні (LiDAR) та багатокамерній тріангуляції (методах фотограмметрії), з акцентом на їхню технічну реалізацію, переваги, обмеження та сфери ефективного застосування. У центрі уваги — визначення, наскільки ці підходи відповідають сучасним вимогам точності, масштабованості, мобільності та вартості, що ставляться до технологій тривимірної реконструкції в науково-практичних завданнях [6].

Завданням статті є: здійснити огляд ключових алгоритмічних принципів методів лазерного сканування та багатокамерної тріангуляції, включаючи такі технології, як Structure from Motion (SfM), Multi-View Stereo (MVS), Iterative Closest Point (ICP) тощо;

- класифікувати методи за критеріями точності, обчислювальної складності, вартості реалізації, чутливості до умов сканування та типу об'єкта;
- проаналізувати основні переваги та недоліки кожного методу в реальних умовах застосування;
- виявити недоліки в існуючих технологічних рішеннях та запропонувати напрями для оптимізації або комбінування методів;
- сформулювати узагальнену таблицю порівняльних характеристик для практичного використання дослідниками та фахівцями.

Лазерне сканування (LiDAR – Light Detection and Ranging) є одним із найточніших і найнадійніших методів 3D-реконструкції, який ґрунтується на вимірюванні часу повернення лазерного імпульсу після відбиття від поверхні об'єкта. Цей метод дозволяє отримати щільну хмару точок, що відображає геометрію досліджуваного простору з високою точністю. LiDAR-системи поділяють на три основні типи: наземні (TLS – Terrestrial Laser Scanning), мобільні (MLS – Mobile Laser Scanning) та авіаційні (ALS – Airborne Laser Scanning). TLS застосовують для реконструкції будівель, промислових об'єктів та архітектурних пам'яток; MLS — для створення 3D-карт в умовах міського середовища; ALS — у топографії, лісовому господарстві та геодезії. Серед основних переваг лазерного сканування — висока точність (до 1–5 мм), незалежність від освітлення, ефективність при реконструкції об'єктів зі складною геометрією. Недоліки включають високу вартість обладнання, складність в обробці великих масивів даних і потребу в інтеграції з фотоінформацією для текстуровання моделей.

Багатокамерна тріангуляція є другим ключовим методом 3D-реконструкції, який базується на обробці зображень, отриманих з кількох камер або ракурсів. Суть методу полягає в застосуванні геометричної тріангуляції для обчислення просторового положення точок сцени на основі відповідностей між зображеннями. Існують пасивні та активні системи багатокамерної реконструкції. Пасивні системи (на основі Structure from Motion і Multi-View Stereo) не потребують джерел світла і використовують лише візуальну інформацію. Вони є найбільш доступними завдяки можливості використання звичайних камер або знімків з дронів. Активні системи використовують додаткове освітлення або структуроване світло (наприклад, технології Structured Light або ToF) для підвищення точності в умовах слабкої текстури або неоднорідного освітлення. Перевагами багатокамерної тріангуляції є дешевизна, гнучкість, мобільність та можливість отримання кольорової текстури. Водночас основними недоліками є чутливість до умов освітлення, труднощі при роботі з глянцеви́ми чи прозорими поверхнями, а також порівняно нижча точність (до 1–10 см), особливо при великих масштабах. [7]

Таблиця 1

Порівняння методів		
Критерій	Лазерне сканування (LiDAR)	Багатокамерна тріангуляція
Точність	Висока (до 1–5 мм)	Середня (до 1–10 см)
Вартість обладнання	Висока (від \$10,000 і більше)	Низька (звичайні або DSLR-камери)
Умови роботи	Незалежне від освітлення	Чутливе до освітлення
Швидкість сканування	Висока (у LiDAR-дронах – до 1 млн т/с)	Середня (залежить від обсягу фото)
Обсяг даних	Дуже великий (RAW point cloud)	Помірний (фото та 3D-модель)
Отримання текстури	Потребує додаткового RGB-каналу	Пряме накладення текстури з фото
Сфера застосування	Картографія, архітектура, промисловість	Культурна спадщина, візуалізація, VR/AR
Робота зі складною геометрією	Висока ефективність	Обмежена для однорідних або складних форм

Порівняння двох підходів за основними критеріями дозволяє сформувати узагальнену картину їх застосування. За точністю LiDAR переважає фотограмметрію (1–5 мм проти 1–10 см). Вартість обладнання значно нижча у багатокамерних систем, що робить їх доступними для широкого кола користувачів. Щодо умов роботи — LiDAR не залежить від зовнішнього освітлення, тоді як фотограмметрія потребує стабільного світла і виразної текстури. Обсяг даних, що генерується LiDAR-системами, зазвичай більший, проте фотограмметричні дані потребують значної обчислювальної потужності для побудови моделей. Також LiDAR краще справляється зі складними формами та великими об'єктами, у той час як фотограмметрія більш ефективна при візуалізації об'єктів з багатою текстурою [8].

У відповідь на обмеження кожного з методів останнім часом набувають популярності гібридні підходи, які поєднують лазерне сканування та фотограмметрію. Типовий сценарій передбачає використання LiDAR для отримання геометрично точної хмари точок, а фотознімків — для побудови текстурованої поверхні або деталізації дрібних елементів. Прикладами таких систем є поєднання Faro або Leica сканерів з DSLR-камерами, або інтегровані платформи для дронів з одночасною зйомкою лазером і камерами. Обробка даних відбувається за допомогою алгоритмів злиття — Iterative Closest Point для вирівнювання хмар точок, Bundle Adjustment для калібрування камер, а також методів сенсорної інтеграції, що дозволяють синхронізувати LiDAR, GPS, IMU та RGB-дані в єдиній системі координат. Такі підходи демонструють найвищу ефективність у сферах, де важлива точність і повнота — наприклад, при цифровій реконструкції пам'яток архітектури, у криміналістиці або в геоінформаційних системах [9].

Висновки

Здійснений аналіз показав, що методи 3D-реконструкції, засновані на лазерному скануванні та багатокамерній тріангуляції, є взаємодоповнюючими інструментами, кожен з яких має власні переваги та обмеження. LiDAR забезпечує найвищу точність та геометричну достовірність, що робить його незамінним у технічно критичних сферах. Фотограмметрія, своєю чергою, приваблює простотою реалізації, доступністю та можливістю текстуровання моделей. Жоден із методів не є універсальним, тому вибір технології має ґрунтуватися на аналізі вимог конкретного завдання, умов сканування, типу об'єкта та бюджету проекту. Найбільш перспективним напрямом розвитку є створення гібридних систем, які поєднують сильні сторони обох підходів. Подальші дослідження мають зосереджуватися на автоматизації процесів злиття даних, використанні штучного інтелекту для покращення якості реконструкції в умовах низької якості вхідних даних, а також на розробці адаптивних алгоритмів, що дозволяють використовувати 3D-реконструкцію в режимі реального часу для мобільних платформ, автономних транспортних засобів та смарт-міст [10].

Література

1. Сойфер В. А. Методи комп'ютерної обробки зображень. – К. : ФІЗМАТЛІТ, 2003. – 784 с.
2. Roncat A., Dublyansky Y., Spötl C., Dorninger P. 3D-зйомка печери: приклад з Märchenhöhle (Австрія) // У: Marschallinger R., Zobl F. (ред.). Математичні науки про Землю на перетині теорії та практики: матеріали конф. IAMG 2011, 5–9 вересня, Зальцбург, Австрія. – С. 1393–1403.
3. Tobler R., Mayerhofer S. Мережеві структури даних для візуалізації та поділу сітки // У: Jorge J., Skala V. (ред.). Матеріали 14-ї міжнародної конференції WSCG'2006. – 2011. – С. 157–162.
4. Pucci B., Marambio A. Віртуальна реконструкція печери Олердоли (Каталонія) на основі лазерного сканування та ГІС-даних // ISPRS Workshop 3D-ARCH. – 2009.
5. Cignoni P., Callieri M., Corsini M., Dellepiane M., Ganovelli F., Ranzuglia G. Meshlab – інструмент відкритого коду для обробки полігональних сіток // У: Scarano V., De Chiara R., Erra U. (ред.). Матеріали Італійської секційної конференції Eurographics. – 2008. – С. 129–136.
6. Radu B., Kazins S. Бібліотека хмар точок (PCL): 3D-технології сьогодення // Матеріали IEEE ICRA. – Шанхай, Китай, 2011.
7. Alvarez R., Noguera J.-V., Tortosa L., Zamora A. Оптимізація сітки за допомогою нейромережевого алгоритму // Information Sciences. – 2007. – Vol. 177, No. 23.

8. Zhang R. Алгоритм стиснення 3D-моделі з покращеним згортанням граней // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. – 2014. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.jocpr.com.
9. Ma T., Gong G., Yang J. Спрощення 3D-моделі на основі методу "edge-collapse" // IEEE INDIN. – 2012.
10. Attali D., Lieutier A., Salinas D. Скорочення ріпсових комплексів // Матеріали 29-го Європейського семінару з обчислювальної геометрії (EuroCG). – 2013.

References

1. Soifer V. A. Metody komp'yuternoi obrobky zobrazen / V. A. Soifer. – K.: FIZMATLIT, 2003. – 784 s.
2. Roncat A. 3D Surveying of a Cave: Case Study of Märchenhöhle (Austria) / A. Roncat, Y. Dublyansky, C. Spötl, P. Dorninger // In: Marschallinger R., Zobl F. (eds.). Mathematical Geosciences at the Crossroads of Theory and Practice: Proc. of the IAMG 2011 Conference, September 5–9, Salzburg, Austria. – P. 1393–1403.
3. Tobler R. Network Data Structures for Visualization and Mesh Partitioning / R. Tobler, S. Mayerhofer // In: Jorge J., Skala V. (eds.). Proc. of the 14th International Conference WSCG'2006. – 2011. – P. 157–162.
4. Pucci B. Virtual Reconstruction of the Olèrdola Cave (Catalonia) Based on Laser Scanning and GIS Data / B. Pucci, A. Marambio // ISPRS Workshop 3D-ARCH. – 2009.
5. Cignoni P. Meshlab – An Open-Source Tool for Processing Polygonal Meshes / P. Cignoni, M. Callieri, M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ganovelli, G. Ranzuglia // In: Scarano V., De Chiara R., Erra U. (eds.). Proc. of the Italian Chapter Conference of Eurographics. – 2008. – P. 129–136.
6. Radu B. Point Cloud Library (PCL): Modern 3D Technologies / B. Radu, R. Kazins, S. Kazins // Proc. of IEEE ICRA. – Shanghai, China, 2011.
7. Alvarez R. Mesh Optimization Using a Neural Network Algorithm / R. Alvarez, J.-V. Noguera, L. Tortosa, A. Zamora // Information Sciences. – 2007. – Vol. 177, No. 23.
8. Zhang R. 3D Model Compression Algorithm with Improved Face Folding / R. Zhang // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. – 2014. [Electronic resource]. Access mode: www.jocpr.com.
9. Ma T. 3D Model Simplification Based on the Edge-Collapse Method / T. Ma, G. Gong, J. Yang // IEEE INDIN. – 2012.
10. Attali D. Reduction of Rips Complexes / D. Attali, A. Lieutier, D. Salinas // Proc. of the 29th European Workshop on Computational Geometry (EuroCG). – 2013.