



МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПОВІТРЯНИХ СИЛ ІМЕНІ ІВАНА КОЖЕДУБА

ISSN 1681-7710



СИСТЕМИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Щоквартальний
збірник наукових праць

Заснований
у березні 1996 року

Збірник публікує результати наукових досліджень у галузі інформаційних технологій та електроніки, зокрема з питань розробки методів і засобів збору, обробки та відображення інформації, проектування комп'ютерних систем і мереж, створення та вдосконалення інформаційних систем і технологій різного призначення, кібербезпеки та захисту інформації, комп'ютерної інженерії, електроніки та радіотехніки. Збірник призначений для наукових працівників, викладачів, докторантів, ад'юнктів, аспірантів, курсантів та студентів відповідних спеціальностей.

Засновник і видавець:

Харківський національний університет
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
61023, м. Харків-23, а/с 11800

Телефон:

+38 (057) 704-91-97
+38 (098) 332-62-27

E-mail редколегії: journal-hnups@ukr.net

Інформаційний сайт:

journal-hnups.com.ua

№2(1 85)/2026

Харків • 2026

© Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2026

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор:

Залевський Геннадій Станіславович , доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

Заступник головного редактора:

Хижняк Ірина Анатоліївна , доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

Члени редакційної колегії:

- **Духопельников Сергій** , кандидат фізико-математичних наук, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна;
- **Журавська Ірина Миколаївна** , доктор технічних наук, професор, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна;
- **Ісламов Іслам Джамал огли** , доктор технічних наук, професор, Бакінський інженерний університет, Баку, Азербайджан;
- **Коломійцев Олексій Володимирович** , доктор технічних наук, професор, Заслужений винахідник України, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
- **Лемешко Олександр Віталійович** , доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
- **Лук'янчук Вадим Володимирович** , доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
- **Осієвський Сергій Валерійович** , кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
- **Радівілова Тамара Анатоліївна** , доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
- **Сабзієв Елхан** , доктор фізико-математичних наук, професор, Інститут систем управління МОН Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан;
- **Ясечко Максим Миколайович** , доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Відповідальний секретар:

Слободянюк Валерій Валерійович , доктор технічних наук, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

Включений до категорії "Б" Переліку наукових фахових видань України, у межах кластеру "Інформаційні технології та електроніка" за спеціальностями F3, F4, F5, F6, F7, G5, G6, G7 (наказ Міністерства освіти і науки України від 11.06.2026 р. № 928).

Ідентифікатор медіа – R30-03672 (рішення від 21.03.2024 р. № 938).

Усі статті, що публікуються в журналі, проходять обов'язкове рецензування, яке здійснюється за анонімною формою як для авторів, так і для рецензентів (подвійне сліпе рецензування). Унікальність текстів публікацій перевіряється за допомогою системи пошуку ознак плагіату StrikePlagiarism. За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.



Публічність та доступ: Журнал зберігається в реферативній базі даних "Україніка наукова" Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського та включено в довідник періодичних видань Ulrich's Periodicals Directory (USA), міжнародний каталог журналів відкритого доступу DOAJ.

Авторські права: За авторами зберігаються всі авторські права та права на видання без обмежень. Журнал дозволяє користувачам: читати, завантажувати, копіювати, поширювати, друкувати та посилатися на повні тексти статей за умови зазначення авторства. Дозволяється повторне використання змісту журналу у відповідності з ліцензією Creative Commons CC-BY.



MINISTRY OF DEFENCE OF UKRAINE
IVAN KOZHEDUB KHARKIV NATIONAL
AIR FORCE UNIVERSITY

ISSN 1681-7710



INFORMATION PROCESSING S SYSTEMS

Quarterly
scientific publication

Founded in March, 1996

The scientific works "Information Processing Systems" objective is to publish the results of scientific research in the field of information technologies and electronics, in particular on the development of methods and means of collecting, processing and displaying information, designing computer systems and networks, creation and improvement of information systems and technologies for various purposes, cybersecurity and information protection, computer engineering, electronics and radio engineering. The Digest is intended for researchers, lecturers, doctoral students, adjuncts, postgraduate students, cadets and students of relevant specialties.

Founder and publisher:

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force
University
post office box 11800, Kharkiv, 61023,
Ukraine

Phone:

+38 (057) 704-91-97
+38 (098) 332-62-27

E-mail: journal-hnups@ukr.net

Website: journal-hnups.com.ua

№2(1 85)/2026

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

<i>Пастушенко М.С., Файзулаєв Т.А.</i> Аналіз впливу відношення сигнал/шум на якість виділення формантних частот по амплітудним та фазовим даним в системах автентифікації	91
<i>Pastushenko M., Faizulaiev T.</i> Analysis of signal-to-noise ratio impact on quality of formant frequency detection based on amplitude and phase data in authentication systems	91
<i>Рудаков І.С.</i> Експериментальне дослідження та порівняльний аналіз ефективності розроблених методів уникнення конфліктів групи безпілотних літальних апаратів в урбанізованому середовищі	97
<i>Rudakov I.</i> Experimental study and comparative analysis of the effectiveness of developed methods for avoiding conflicts among groups of unmanned aerial vehicles in an urban environment	97
<i>Самсонов В.С.</i> Метод визначення раціонального рівня агрегування даних багатовимірного куба для забезпечення обробки аналітичних запитів в аналітичній системі з використанням сховища даних	103
<i>Samsonov V.</i> A method for determining the rational level of data aggregation of a multidimensional cube to ensure the processing of analytical queries in an analytical system using a data warehouse	103
<i>Сичов О.С., Захарченко І.В., Дзюба І.В.</i> Підхід до застосування засобів штучного інтелекту для аналізу динаміки формування фахових компетентностей здобувачів вищої освіти	118
<i>Sychov O., Zakharchenko I., Dziuba I.</i> An approach to using artificial intelligence tools for analyzing the dynamics of professional competence development in higher education students	118
<i>Слободяник О.Ю.</i> Метод глибинного навчання для автоматизованого виявлення типових шаблонів у PQ-даних показників якості електроенергії	127
<i>Slobodianyuk O.</i> A deep learning method for the automated detection of typical patterns in PQ data on electric power quality indicators	127
<i>Тоотс Р.В., Шаповалова О.О., Наливайко Т.Т.</i> Огляд сучасних методів обробки хмар точок для документування зруйнованих та історичних будівель	133
<i>Toots R., Shapovalova O., Nalivayko T.</i> Review of modern point-cloud processing methods for documenting damaged and heritage buildings	133
<i>Чередниченко І.С., Можасєв М.О., Філімончук Т.В.</i> Модель системи бронювання на основі генетичного алгоритму	143
<i>Cherednychenko I., Mozhaiev M., Filimonchuk T.</i> A booking system model based on a genetic algorithm	143
<i>Чернявський Б.В.</i> Формалізація моделі загроз для гібридних архітектур безпеки пристроїв Інтернету речей з подвійним транспортним каналом	155
<i>Cherniavskyi B.</i> Formalization of a threat model for hybrid security architectures of Internet of Things devices with dual transport channels	155
<i>Шапошник М.С., Кобилін А.М.</i> Оцінка ефективності впровадження інтелектуальних помічників у системи електронної комерції: методологія та практичні результати	160
<i>Shaposhnyk M., Kobylin A.</i> Evaluation of the efficiency of implementing intelligent assistants in e-commerce systems: methodology and practical results	160

УДК 004.94 + 528.02:72

DOI: 10.30748/soi.2026.185.16

Р.В. Тоотс, О.О. Шаповалова, Т.Т. Наливайко

Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Харків

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ХМАР ТОЧОК ДЛЯ ДОКУМЕНТУВАННЯ ЗРУЙНОВАНИХ ТА ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ

У статті узагальнено сучасні підходи до швидкого документування та оцінювання стану зруйнованих і історичних будівель на основі 3D-хмар точок. Розглянуто комбінований збір даних (наземне лазерне сканування, фотограмметрія, аерознімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), Global Navigation Satellite System (GNSS)-прив'язка) та типові етапи Scan-to-BIM/Scan-to-CAD конвеєрів: попередню обробку, виділення геометричних примітивів (Random Sample Consensus, RANSAC), оцінювання орієнтацій і нормалей (Principal Component Analysis, PCA), кластеризацію/сегментацію, а також семантичну сегментацію на основі глибокого навчання. Особливу увагу приділено моделям і алгоритмам, що зберігають фактичні деформації (неортогональні кути, нахили, прогини) як важливі ознаки технічного стану та культурної автентичності. Проаналізовано можливості наявних інструментів і обмеження автоматизації, а також окреслено ключові прогалини: нестача еталонних наборів даних і метрик, масштабованість, стійкість до шуму/перекриттів і семантична насиченість моделей. Наведено перспективні напрями розвитку деформаційно-усвідомлених робочих процесів для планування відновлення та реставрації.

Ключові слова: архітектурне документування; конвеєр; лазерне сканування; фотограмметрія; хмари точок; GNSS; Scan-to-BIM; Scan-to-CAD.

Вступ

Постановка проблеми. Оперативне оцінювання стану зруйнованих будівель в Україні є критичним для планування пріоритетів у відновлювальних роботах. Традиційні підходи є трудомісткими та не завжди забезпечують достатню точність. Використання лазерного сканування, цифрової фотограмметрії та аерознімання з БПЛА дозволяє швидко фіксувати пошкодження та формувати детальні 3D-моделі об'єктів, що є необхідним для відновлення відсутньої або застарілої проектною документації [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З 2010-х років активно розвиваються підходи Scan-to-BIM/Scan-to-CAD, які перетворюють густі 3D-хмари точок LiDAR/фотограмметрії у креслення та параметричні моделі [1–3]. Окремий клас робіт присвячено надійним геометричним алгоритмам (RANSAC, PCA-оцінювання орієнтацій/нормалей), а також семантичній сегментації на основі глибокого навчання для виділення компонентів будівлі [5; 9; 11–14]. У сучасних дослідженнях підкреслюється важливість збереження фактичних деформацій (нахили, прогини, неортогональні кути) як значущих ознак стану конструкцій та автентичності пам'яток [2–4].

Мета статті: – аналіз сучасних досягнень у підготовці вихідних даних (хмар точок) для планування відновлення зруйнованих будівель із застосуванням комплексу комбінованих методів тривимірного моделювання. Виявлення недоліків та обме-

жень, що стримують подальший розвиток зазначених методів;

– обґрунтування вибору методів якісного відтворення геометрії історичних об'єктів із застосуванням технології Scan-to-BIM в українських реаліях;

– визначення ролі високоточного набору даних, алгоритмів реєстрації станцій та вибору параметрів сканування для реалізації можливостей цифрової консервації об'єктів культурної спадщини.

Виклад основного матеріалу

1. Методи обробки хмар точок для реконструкції будівель

Одним із завдань дослідження є аналіз сучасних досягнень в сфері підготовки вихідних даних (хмар точок) для планування відновлення зруйнованих будівель із застосуванням комплексу сучасних комбінованих методів тривимірного моделювання.

Запропонована методика передбачає комплексне поєднання різних методів збору інформації та алгоритм її обробки. Збір даних здійснюється за допомогою наземного лазерного сканування, цифрової фотограмметрії, аерофотознімання та GNSS. Дані з кожного методу проходять обробку для створення тривимірних моделей. Лазерне сканування дає чорно-білу хмару точок, а цифрова фотограмметрія та аерофотознімання – кольорову хмару точок. Отримані дані поєднуються в єдину комбіновану тривимірну модель. Координати GNSS допомагають прив'язати модель та створити кінцеву тривимірну модель з координатами. Додатково, знімки використовуються для побудови ортофотоплану, що дозво-

ляє отримати точне геопросторове відображення об'єкта. Такий підхід забезпечує високу точність і наочність моделювання, що є важливим для оцінки пошкоджень та розробки заходів з відновлення будівлі.

Для збору метричної інформації авторами пропонується наземний лазерний сканер Trimble TX6, що забезпечить сканування фасаду та інтер'єру. Реєстрація та експорт хмари точок пропонується здійснювати у Trimble RealWorks, фільтрація шумів – у Autodesk ReCap Pro та об'єднання точок з різних методів – у Reality Capture.

Виділення геометричних примітивів. Першим ключовим кроком при перетворенні сирих сканів у придатні до подальшої роботи моделі є ідентифікація базових геометричних елементів (площин, ліній, циліндрів тощо) в хмарі неорганізованих 3D-точок. Класичні алгоритми обробки даних досі широко використовуються для цього завдання. Наприклад, стандартом для виявлення площин у будівельних сканах є алгоритм Random Sample Consensus (RANSAC). При цьому попередньо передбачається використання оптичних датчиків, які формують тривимірну карту навколо об'єкта керування. Робота таких алгоритмів зазвичай призначена як для детектування ключових об'єктів навколишнього середовища, так і для пошуку попередньо визначених об'єктів для релокації власного положення робота. Результати аналізу даних демонструють найбільш енергоефективний метод виявлення площин, який обробляє 60 кадрів RGB-D камери за секунду. RANSAC повторно підбирає кандидатну площину до випадкових підмножин точок і використовує голосування для пошуку найкращих площин, відкидаючи аутлайєри. Цей метод широко застосовується у Scan-to-BIM дослідженнях завдяки здатності точно визначати площини та лінії навіть у зашумлених даних [1; 5].

Інші поширені методи включають перетворення Хафа (Hough Transform) та “region growing” (розростання регіонів) [6; 7]. Вони дозволяють виявляти великі плоскі поверхні (стіни, підлоги, стелі), що формують основу моделей будівель. Наприклад, автори [8] спершу сегментували точки стін із внутрішнього скану, проєктували їх у 2D-модель та застосували ітеративний кластеризаційний RANSAC для виявлення сегментів ліній стін, що дозволило автоматично генерувати плани поверхів навіть у неортогональних будівлях. Метод показав понад 90 % точності реконструкції ліній і 97 % IoU відносно еталонного плану, демонструючи ефективність RANSAC поза межами класичних “Мангеттенських” сцен [8].

Метод головних компонент (PCA). PCA використовується для оцінки локальної геометрії хмар точок. При цьому головні осі визначають за допомо-

гою аналізу коваріації точок у локальному оточенні. PCA застосовують для обчислення нормалей поверхонь; визначений за матрицею коваріації власний вектор з найменшим власним значенням обирають за вектор нормалі. Нормалі важливі для алгоритмів сегментації, RANSAC-підгонки та виявлення різких кутів. Також PCA всієї хмари може виявити домінуючі напрямки стін для вирівнювання координатної системи моделі [9].

Кластеризація та сегментація. Щоб відтворити будівлю повністю, хмари точок сегментують на значущі підмножини – стіни, вікна, колони тощо. Традиційні методи базуються на геометричній однорідності: “region-growing” додає сусідні точки із схожими нормаллями, кривиною або відстанню. Інший підхід – сегментація шляхом підгонки моделей (plane, cylinder, sphere) за допомогою RANSAC або Hough. Однак у великих складних будівлях прості геометричні методи часто є неефективними і погано справляються з дрібними або криволінійними елементами [5; 6].

Семантична сегментація за допомогою штучного інтелекту. Останні дослідження все частіше застосовують глибинне навчання для класифікації точок за семантичним класом (стіна, двері, балка тощо). Архітектури на зразок PointNet/PointNet++ дозволяють безпосередньо обробляти хмари точок і призначати мітки для кожної точки [10–12]. Мережі (DGCNN, sparse conv, Transformers) використовуються для сегментації складних будівель, зокрема історичними пам'ятками [13; 14]. Однак моделі часто залишаються “архітектурно наївними” – вони правильно маркують точки, але не гарантують топологічну цілісність стін чи колон. Брак навчальних даних особливо відчутний для історичних будівель. Гібридні підходи поєднують машинне навчання та правила архітектури, наприклад, дерева рішень в комбінації з просторовим аналізом для формування послідовної параметричної моделі [16].

Виділення контурів і ліній. Для чистих 2D-креслень важливо виділяти гострі кути та контурні криві. Традиційно це роблять через зміни нормалей або дискретність глибин [9]. Новітні підходи включають векторизацію хмар точок у лінійні креслення через оптимізацію підгонки сегментів [2; 3]. Навчання з урахуванням невизначеності дозволяє мережам виділяти лінії з оцінкою точності. Прикладом такого підходу є запропонований авторами [2] конвеєр від лазерного скану до CAD-креслень із шарами, символами дверей/вікон та анотаціями розмірів. Автори [3] демонструють автоматизацію генерації трьох видів креслень, зокрема з криволінійними стінами, та з виходом у редагованому CAD.

2. Інтерпретація та збереження геометричних деформацій

Одним із аспектів застосування LiDAR є обробка неортогональних та криволінійних конструкцій. Традиційні алгоритми, що прив'язують стіни до ортогональних сіток або підганяють їх під регулярні геометричні форми, можуть давати збої у випадку будівель з вигнутими кутами або вільною архітектурною формою.

Для вирішення цієї проблеми автори [3] спеціально розробили конвеєр генерації креслень так, щоб він був придатний для “складних конструкцій з неортогональними або криволінійними стінами”. Проведені ними тести показали, що за таких умов система здатна створювати плани будівель навіть у разі, коли стіни сходяться під незвичними кутами та містять криволінійні елементи, отже алгоритм дозволяє адаптуватися до довільних орієнтацій.

Аналогічно запропоноване авторами [8] рішення продемонструвало надійну роботу в умовах виділення планів поверхів у внутрішніх просторах, які не відповідають мангеттенській моделі. Їхній підхід пошуку ліній на основі RANSAC не вимагав прямокутного вирівнювання і забезпечив понад 90 % точності навіть тоді, коли кімнати мали гострі або тупі кути. Ці досягнення показують, що вміле поєднання сучасних методів дозволяє відтворювати похилі стіни та складні планувальні структури, з якими старіші алгоритми, орієнтовані на мангеттенську модель, наприклад, з прив'язкою до сітки або осьового вирівнювання рамки, не справлялися.

У випадку історичної архітектури геометричні деформації елементів є не випадковістю, а цінною частиною історії споруди (наприклад, незначні нахили через осідання або нерегулярні елементи ручної роботи). Тому в процесі збереження та реставрації пам'яток прагнуть зафіксувати та зберегти ці відхилення. Так, автори [2] цілеспрямовано оцінювали, наскільки добре їхні автоматизовані лінійні креслення відображають нерегулярності у старовинних дерев'яних будівлях. Порівняно з ручним кресленням, де креслярі іноді “ідеалізують” геометрію, автоматизований метод зафіксував 100 % неортогональних кутів балок та інших особливостей, тоді як ручні креслення пропустили приблизно 28 % таких нерегулярних елементів. Отже, до переваг неупередженого алгоритму можна віднести його здатність задокументувати кожну вимірювану деформацію.

В роботі [4] також запропоновано підхід “моделювання зі збереженням форми” для об'єктів культурної спадщини, який дозволяє зберігати незначні зміщення та непланарність у фінальній моделі в межах допустимих похибок (замість примусового вирівнювання до ідеально плоских поверхонь). Після сегментації кожного елементу спадщини автори [4] виконали апроксимацію геометрії за точками

із середньою похибкою менш ніж 10 %, забезпечивши відображення тонких деформацій кожної колони чи балки в моделі. Результатом стала більш достовірна цифрова копія історичної будівлі, що є критично важливим для структурного аналізу та консервації.

Фіксація деформацій також пов'язана з моніторингом технічного стану споруд. Інженери, які працюють з пам'ятками архітектури, часто використовують моделі фактичного стану для оцінювання того, наскільки конструкція відхилилася від початкової форми (наприклад, вимірювання нахилу стіни або прогину балки). Безконтактне зондування за допомогою лазерного сканування є ідеальним для цієї мети, а автоматизоване моделювання забезпечує необхідні кількісні дані. Як зазначають автори [4], “безконтактні вимірювання та моніторинг деформацій часто необхідні, щоб уникнути подальших пошкоджень” під час збереження пам'яток, що підкреслює важливість точної 3D-реконструкції для виявлення та відстеження структурних деформацій. Порівнюючи повторні сканування з часом, можна відслідковувати зміни деформацій, однак для цього початкова модель повинна зберігати всі геометричні деталі.

Ще одним аспектом роботи з хмарами точок є точність самого процесу сканування та її вплив на геометрію. Різні платформи сканування, як то наземні лазерні сканери та мобільні/ручні сканери, можуть створювати систематичні похибки (зміщення, дрейф), які фактично деформують хмару точок. Останні дослідження спрямовані на врахування цих похибок для забезпечення відповідності розмірів фінальної моделі реальним значенням. Автори [17] проаналізували закономірності розподілу похибок у хмарах точок мобільного лазерного сканування (MLS) і встановили, що просте апроксимування площини може неправильно оцінювати розміри, якщо не скориговано зміщення сканера. Вони показали, що стійкі методи апроксимації, такі як RANSAC, хоча й ефективні для відкидання викидів, можуть все ж давати дещо викривлену геометрію, якщо весь набір даних містить послідовну похибку (наприклад, усі стіни виглядають вигнутими на 1 % через дрейф сканера). Калібрування та корекція таких закономірностей дозволяє підвищити точність відтвореної моделі. Це є ще одним аспектом моделювання з урахуванням деформацій – забезпечення того, щоб зафіксовані деформації були реальними, тобто зумовленими станом будівлі, а не артефактами вимірювального обладнання. У майбутньому робочі процеси можуть інтегрувати моделі похибок, щоб фінальні креслення та моделі автоматично коригували систематичні зміщення та забезпечували реалістичну геометрію [5; 17].

Підсумовуючи, сучасний рівень розвитку тех-

нологій дедалі краще відображає фактичний стан будівель, зокрема всі їхні недосконалості. Відхід від ідеалізованих моделей є очевидним: нові алгоритми враховують криволінійні, похилі та нерегулярні форми, що зумовлено потребами документування архітектурної спадщини та створення точних BIM-моделей фактичного стану об'єктів. Розглянемо детальніше застосування цих методів у сфері збереження культурної спадщини, де збереження автентичності має першочергове значення.

3. Застосування в архітектурній спадщині та реконструкції

Цифрове документування історичної архітектури стало одним із ключових напрямів застосування технологій обробки хмар точок. Об'єкти архітектурної спадщини – такі як будівлі столітньої давності, пам'ятники, храми – значно вииграють від створення точних 3D-записів, які можуть використовуватися для збереження, реставрації та наукового дослідження. Концепція HBIM (Heritage Building Information Modeling – інформаційне моделювання будівель культурної спадщини) набула широкого поширення як засіб інтеграції різнорідних даних (лазерне сканування, фотограмметрія, архівні матеріали) у семантичну 3D-модель історичної споруди [4; 15]. Наукові публікації останніх років демонструють широкий спектр методів, адаптованих до потреб спадщини, з акцентом на високій деталізації, нерегулярній геометрії та мінімальній інвазивності досліджень.

Однією з ключових тенденцій є розроблення автоматизованих робочих процесів для створення HBIM-моделей. В роботі [15] запропоновано процес Scan-to-HBIM, спеціально орієнтований на історичні будівлі. Запропонований підхід автоматично перетворює лазерні скани на 3D BIM-моделі з підвищеним рівнем деталізації (LoD), необхідним для об'єктів спадщини, фіксуючи дрібні архітектурні елементи, які стандартні методи сканування будівель можуть ігнорувати. Робота в середовищі BIM забезпечує створення не лише геометричної сітки, а і структурованої моделі, що включає метадані та взаємозв'язки між елементами, що є критично важливим для управління об'єктами спадщини. Переваги такого підходу є суттєвими: підвищення точності відображення нерегулярних історичних конструкцій та можливість централізованого зберігання різнорідної інформації (3D-геометрії, характеристик матеріалів, карт пошкоджень тощо) в єдиній узгодженій моделі. Це відповідає загальній меті збереження культурної спадщини – створенню повноцінних цифрових двійників пам'яток для аналізу та планування консерваційних робіт [15].

Іншим важливим напрямом є розпізнавання та моделювання специфічних елементів історичної

архітектури. Багато історичних споруд містять архітектурні деталі (наприклад, декоративні капітелі, дерев'яні з'єднання, склепіння), які відсутні в сучасному будівництві та можуть ускладнювати роботу універсальних алгоритмів. Для розв'язання цієї проблеми дослідники інтегрують попередні семантичні знання про архітектуру в алгоритмічні процеси. Автори роботи [2] подають показовий приклад: їхня система генерації лінійних креслень для давньокитайської архітектури використовує стратегію “багаторівневого вилучення ознак”, яка поєднує локальні геометричні характеристики (нормалі, кривину тощо) з високорівневими семантичними ознаками будівельних компонентів. Автори [2] застосували вдосконалену модель PointNet++ для семантичної сегментації таких елементів, як колони, балки та складні кронштейнні конструкції Dougong, характерні для східноазійської дерев'яної архітектури. Розпізнавання цих компонентів дозволило системі призначати відповідні типи та шари ліній у вихідних кресленнях (наприклад, розмежовувати конструктивні контури та декоративні деталі). Крім того, система враховувала структурні взаємозв'язки – зокрема, яка балка спирається на яку колону, – використовуючи методи графового зіставлення та ієрархічні правила. Вбудовування архітектурних знань (наприклад, правил суміжності та опорних взаємозв'язків) дозволило досягти вищого рівня семантичної точності порівняно із суто геометричними методами. Ефективність підходу підтверджується результатами: система коректно ідентифікувала ключові елементи спадщини (колони, балки, кронштейни Dougong) та автоматично створила інженерні креслення для двох історичних будівель, значно скоротивши час роботи порівняно з ручним кресленням. У тестах автоматизований конвеєр створював повні креслення з анотаціями приблизно за 2,5 години, тоді як традиційне ручне документування тих самих об'єктів займало близько 36 годин. Отримані цифрові матеріали були не лише швидше створені, але й більш узгоджені та детальні [2; 12].

Ще однією проблемою у сфері спадщини є обмеженість і варіативність даних. На відміну від сучасних будівель, де часто використовуються повторювані конструктивні рішення, кожен об'єкт спадщини є унікальним, а навчальні вибірки для машинного навчання можуть бути недостатніми. Цікавий підхід запропонували автори роботи [4], які розробили метод автоматичного розпізнавання компонентів без потреби у великих навчальних наборах даних. Автори роботи [4] створили вдосконалений локальний дескриптор ознак (варіацію дескриптора SHOT), який кодує геометричні характеристики точок, включаючи власну локальну систему координат і багатомасштабне поєднання ознак. Отримані дескриптори, що описують форму архітектурних

елементів (наприклад, карнизів або арок), класифікувалися за допомогою полегшеного алгоритму машинного навчання замість глибоких нейронних мереж. Така двохетапна стратегія – ручне вилучення ознак та неглибоке навчання – показала високу ефективність у ситуаціях з невеликими обсягами даних, характерних для досліджень спадщини. У тестах на реальних хмарах точок метод досяг точності класифікації 93,7 % і значення mIoU 80 % для сегментації компонентів, перевершивши деякі глибокі нейронні мережі, які демонстрували нижчу ефективність через нестачу навчальних даних. Крім того, метод показав стійкість до втрати частини даних: навіть при випадковому видаленні фрагментів хмари точок для імітації перекриттів ефективність зменшувалася незначно. Це є критично важливим для об'єктів спадщини, де часто виникають проблеми перекриття та нерівномірної щільності точок. Після сегментації компонентів автори виконували апроксимацію геометричних моделей, досягаючи перетворення хмари точок у модель з максимальною похибкою менше 10 %. Така наскрізна автоматизація – від сегментації до побудови фінальної моделі – безпосередньо сприяє створенню цифрових двійників історичних споруд із мінімальним ручним втручанням [4].

Застосування у сфері спадщини також стимулює розвиток інтеграції даних із різних джерел. Для повного документування історичної будівлі часто використовуються різні методи сканування: наземний LiDAR для інтер'єрів, фотограмметрія з БПЛА для дахів, структуроване світло для дрібних артефактів тощо. Автоматизовані робочі процеси поступово інтегрують таке поєднання даних. Наприклад, система, представлена в роботі [2], використовувала наземне лазерне сканування разом з високоточними аерофотограмметричними даними даху для забезпечення повноти хмари точок. Дані з різних джерел реєструвалися та об'єднувалися в єдиний набір, після чого використовувалися для генерації креслень. Завдяки поєднанню наземних та аероданих було досягнуто повного покриття складних конструкцій даху (наприклад, карнизів у стилі пагоди, які важко зафіксувати з поверхні землі) [2]. Це демонструє практичну специфіку роботи з об'єктами спадщини: жоден окремий сенсор не забезпечує повного охоплення, тому алгоритми повинні обробляти гетерогенні дані з різною точністю. Дослідження, представлені в роботі [15], також наголошували на важливості інтеграції метаданих і матеріалознавчої інформації у моделі – наприклад, прив'язки сегментів хмари точок до даних про тип матеріалу або ступінь руйнування, що є цінним для реставраційних робіт. Хоча вилучення геометрії залишається основним завданням, кінцевою метою у сфері спадщини є створення інформаційно насиченої моделі.

Отже, галузь охорони культурної спадщини стимулює розвиток автоматизованої обробки хмар точок, висуваючи вимоги до підвищеної деталізації, семантичної інтерпретації та збереження нерегулярних форм. Сучасні технології дозволяють автоматично створювати деталізовані NBIM-моделі та креслення, що відповідають вимогам експертів з реставрації. Такі моделі відображають як великомасштабні конструктивні елементи, так і дрібні декоративні деталі, забезпечуючи повне цифрове документування. Підвищення ефективності є суттєвим – роботи, які раніше тривали кілька днів, тепер виконуються за кілька годин, що дозволяє документувати великі комплекси пам'яток у стислі терміни. Важливо, що отримана документація є об'єктивною та відтворюваною, що сприяє порівняльним дослідженням і довгостроковому моніторингу стану об'єктів. Успіхи в цій сфері створюють передумови для ширшого впровадження технологій scan-to-BIM у модернізації будівель та управлінні інфраструктурою, де точність і деталізація також мають вирішальне значення. Розглянемо технічну складову цього процесу, а саме сучасні інструменти та робочі процеси, що забезпечують реалізацію цих можливостей, а також їхні практичні обмеження.

4. Інструменти та робочі процеси: сучасні можливості та обмеження

Інтеграція описаних вище методів у наскрізні робочі процеси стала одним із головних напрямів сучасних досліджень. Нині вже існує низка прототипних інструментів і програмних конвеєрів, здатних перетворювати сирі хмари точок будівель у повноцінну архітектурну документацію.

Щодо сучасного стану в цій галузі за останні 3 роки, то повністю або значною мірою автоматизовані конвеєри scan-to-drawing були продемонстровані на реальних будівлях. Наприклад, система, представлена в роботі [3], може генерувати повний комплект двовимірних креслень (плани поверхів та фасади) на основі 3D-сканування з мінімальним втручанням людини, автоматичне розміщення умовних позначень дверей і нанесення розмірів зокрема. Це суттєвий крок уперед порівняно з ранніми напівавтоматичними підходами, що потребували ручного редагування CAD-ліній. Інший програмний конвеєр, запропонований в роботі [16], створює параметричні BIM-моделі рівня деталізації LOD-200 на основі щільних внутрішніх сканувань шляхом поєднання розпізнавання на основі штучного інтелекту з правилами побудови моделей. Результатом є структурована 3D-модель (включаючи приміщення та будівельні елементи), придатна для задач управління об'єктами нерухомості [16]. Для збереження спадщини автори роботи [2] розробили інструмент, що автоматично генерує CAD-файли промислових

стандартів (DXF/SVG/DWG) з шарами та анотаціями. Це свідчить про орієнтацію дослідницьких прототипів на інтеграцію у професійні робочі процеси – створення результатів у форматах, сумісних з AutoCAD, Revit та іншими системами.

Важливою перевагою організації сучасних робочих процесів є їхня швидкість та ефективність. Автоматизація значно скорочує час обробки порівняно з ручною роботою. Наприклад, автори роботи [2] повідомляють, що їхній метод дозволив отримати повний комплект креслень складної історичної будівлі приблизно за 2,5 години, тоді як ручне креслення вимагало близько 36 годин. Це відповідає скороченню часу приблизно на 93 %. Інші дослідження також підтверджують, що процеси, які раніше займали кілька днів, тепер можуть виконуватися протягом кількох годин завдяки автоматизованій сегментації та моделюванню. Навіть з урахуванням подальшої перевірки та редагування такі інструменти значно прискорюють створення виконавчої документації. Вони також забезпечують більш узгоджений результат: шари, типи ліній і позначення застосовуються відповідно до заздалегідь визначених правил, що усуває суб'єктивність різних виконавців. Деякі програмні конвеєри включають механізми контролю якості, наприклад, перевірку наявності всіх необхідних розмірів на кресленнях. У одному з досліджень автоматизований метод забезпечив нанесення 100 % критично важливих розмірів, тоді як традиційні методи досягали лише приблизно 85 % повноти [2]. Це демонструє, що сучасні інструменти можуть не лише відповідати рівню ручної роботи, а й перевищувати його.

Попри значні досягнення, існує низка обмежень, які необхідно враховувати.

Щодо універсальності та адаптивності, то багато автоматизованих робочих процесів орієнтовані лише на певні типи будівель або припускають наявність специфічних умов. Наприклад, деякі методи добре працюють для будівель, що відповідають “мангеттенській моделі”, але можуть бути неефективними для криволінійної або сильно нерегулярної архітектури. Конвеєр, представлений в роботі [16], свідомо орієнтований саме на ортогональні структури, тому його застосування до готичних соборів або будівель органічної форми потребує значної модифікації. Водночас методи, розроблені для складних об'єктів спадщини, часто мають вузьку спеціалізацію і не можуть безпосередньо застосовуватися до типових сучасних будівель. На сьогодні універсального рішення не існує; натомість доступний набір спеціалізованих інструментів, адаптованих до різних сценаріїв.

Щодо повноти автоматизації, то повністю автоматизовані процеси (від хмари точок до BIM або креслень без ручного редагування) поки що майже

не зустрічаються. У більшості випадків автоматизовані системи створюють початкову модель, яка потребує доопрацювання експертом. Типовою є ситуація, коли основні конструктивні елементи (стіни, перекриття, підлоги) визначаються точно, але дрібні елементи (інженерні мережі, декоративні деталі, електрообладнання) можуть бути пропущені або класифіковані неправильно. Наприклад, метод авторів роботи [3] забезпечує автоматичну сегментацію компонентів, але результатом є лише маркована хмара точок без векторних креслень. У таких випадках потрібні додаткові етапи перетворення даних.

Щодо якості і масштабованості даних, то реальні хмари точок можуть містити мільярди елементів і включати шуми, перекриття та сторонні об'єкти. Багато алгоритмів не масштабуються ефективно для таких обсягів даних. Тому часто застосовуються процедури попередньої обробки, такі як проріджування або поділ простору на сегменти [1]. Однак надмірне проріджування може призвести до втрати дрібних деталей. Існують методи адаптивної вибірки, що зберігають високу щільність точок у складних геометричних областях [2], але вони потребують більш складних обчислень. Додатковою проблемою є сторонні об'єкти (меблі, рослинність, люди), які можуть помилково інтерпретуватися алгоритмами як частини будівлі. Для їх усунення використовуються методи сегментації та розпізнавання об'єктів [8], але вони не завжди працюють з прийнятним рівнем точності. Повні перекриття призводять до втрати даних, що може вимагати повторного сканування або ручного редагування моделей.

Попри автоматизацію, більшість інструментів містять значну кількість параметрів (наприклад, допуски RANSAC або порогові значення кутів нормалей), які потрібно налаштовувати для кожного проекту. Тому для ефективного використання технологій необхідні спеціалізовані знання у сфері обробки хмар точок, інколи із залученням експертів. Дослідницькі прототипи часто використовують складні програмні середовища, що обмежує їх широке впровадження. Ведуться роботи зі спрощення інтерфейсів і підвищення стійкості алгоритмів.

Щодо семантичної насиченості і інтеграції BIM, то автоматичне створення повноцінної BIM-моделі є складнішим завданням, ніж побудова геометрії. Більшість сучасних систем надійно відтворюють основні конструктивні елементи, але другорядні компоненти (двері, вікна, інженерні мережі) моделюються менш стабільно. Наприклад, визначення стін виконується досить точно, але автоматичне створення об'єкта дверей потребує використання бібліотек шаблонів, що реалізовано не в усіх інструментах. Сучасні дослідження лише починають інтегрувати глибші семантичні властивості.

Важливою проблемою є відсутність загальноприйнятих еталонних наборів даних і метрик оцінювання. Різні дослідники використовують різні об'єкти дослідження, що ускладнює порівняння результатів [1]. Наразі не існує універсального тестового набору scan-to-BIM, аналогічного стандартним наборам у комп'ютерному баченні. Тому результати часто оцінюються індивідуально для кожного проекту, що підкреслює необхідність подальшої стандартизації.

Отже, на практиці сучасні автоматизовані робочі процеси слід розглядати як інструменти підтримки фахівців, які виконують основну частину роботи з вилучення геометрії та створення первинної документації, залишаючи експертам контроль і доопрацювання результатів. У такому форматі вони значно підвищують продуктивність. Наприклад, автоматизоване моделювання може забезпечити відтворення (80–90) % елементів будівлі, після чого спеціаліст доповнює відсутні компоненти або виправляє помилки. Загальні витрати часу при цьому суттєво зменшуються. Крім того, кожне нове покоління досліджень поступово усуває наявні обмеження. Проблеми, пов'язані зі сторонніми об'єктами, дрібними деталями та семантичною інтерпретацією, залишаються активними напрямками досліджень, і можна очікувати їх швидкого розвитку в найближчі роки.

5. Прогалини в дослідженнях та перспективи розвитку

Попри значний прогрес у автоматизованому створенні архітектурних креслень із хмар точок, залишаються відкриті дослідницькі прогалини. Їх усунення є ключовим для того, щоб технологія scan-to-BIM стала надійною та поширеною як у промисловості, так і в збереженні спадщини.

Якщо говорити про універсальність і здатність до узагальнення, то майбутні дослідження мають бути спрямовані на розширення сфери застосування розглянутих методів. Більшість сучасних алгоритмів адаптовані до конкретних типів будівель (наприклад, прості ортогональні офіси або специфічні історичні форми). Задачею на перспективу є створення більш загальних фреймворків, здатних працювати з різноманітними структурами – від сучасних будівель вільної форми до давньої народної архітектури – без значних переналаштувань. В цьому контексті доцільно залучати гібридні підходи, що поєднують примітивні форми та вільні поверхні, дозволяючи відтворювати як регулярну, так і нерегулярну геометрію. Моделі машинного навчання поки ще не завжди добре справляються з різноплановими об'єктами в цій галузі, отже актуальним напрямком є вдосконалення як самих моделей, так і нарощування баз даних для їх навчання. Один із

шляхів – створення великих попередньо навчених моделей для 3D-даних будівель, аналогічних до моделей обробки зображень. Однак, як уже зазначалося, відсутність великих анотованих наборів даних є обмежувачим фактором. Перспективним напрямом є створення спільних баз даних хмар точок з контрольними моделями/кресленнями для навчання та оцінки. Спільні ініціативи зі збору даних (наприклад, сканування багатьох будинків або публічних будівель з верифікованими результатами) можуть стимулювати підходи, орієнтовані на дані. Більші обсяги даних дозволять глибокому навчання вивчати ширший спектр архітектурних стилів. Інший перспективний напрям – few-shot або zero-shot навчання у 3D-доміні, що дозволяє адаптувати модель до нових класів об'єктів або стилів з мінімальним додатковим навчанням. Ранні спроби, такі як MetaGCN, спрямовані на сегментацію рідкісних елементів спадщини [2]. Подальші дослідження можуть дозволити штучному інтелекту розпізнавати нові архітектурні елементи, спираючись на попередні знання (наприклад, розуміти, що “літаючі контрфорси” схожі на відомі опорні колони, навіть якщо вони не були прямо включені в навчання) [1].

Щодо обліку неповноти та невизначеності, то оскільки автоматизовані методи беруть на себе більше етапів процесу, критично важливим стає опрацювання відсутніх даних і невизначеностей. Реальні хмари точок завжди містять перекриття та шум; майбутні алгоритми повинні бути стійкими до цього. Один із напрямів – інтеграція сенсорного злиття та стратегій активного сканування. Наприклад, використання зображень камер разом із хмарию точок допомагає заповнити семантичні прогалини (ідентифікація об'єкта за текстурою або кольором, коли геометрія недостатня). Також можливе застосування адаптивного планування наступного найкращого огляду, коли система не лише обробляє дані, а й спрямовує додаткове сканування для покриття пропусків [1]. У моделюванні слід явно враховувати невизначеність у результаті. Наприклад, можливо створювати ймовірнісні моделі або інтервали довіри для геометрії – повідомляючи, що певна лінія стіни є виведеною незважаючи на прогалину в даних. Це попереджає користувача про необхідність перевірки. Деякі роботи в комп'ютерному зорі вже розглядають це, наприклад, “uncertainty-aware” виділення ліній [2]. Подібні підходи для повних моделей будівель підвищать довіру до автоматизованих результатів. Автоматичне виявлення та виправлення помилок – ще один перспективний напрям: система може самостійно діагностувати проблеми, наприклад, незамкнуті приміщення чи фізично неможливу геометрію, і намагатися виправити їх, посиляючись на архітектурні правила або додаткові дані.

Щодо поглиблення семантичного моделювання, то більшість сучасних конвеєрів обмежується геометрією з базовими позначеннями. Майбутнє полягає у збагаченні семантичної інформації автоматично створених моделей. Це означає не лише “стіна”, а й властивості типу матеріалу, стану, зв’язок із зовнішніми базами даних. Досягнення цього ймовірно потребує поєднання моделей “vision-language” або графів знань із геометричною обробкою. Можна уявити систему, яка після виділення геометрії елемента запитує базу знань або використовує класифікатор для визначення підтипу або стилю. У спадщині це може автоматизувати типологічні дослідження. Для сучасних будівель перспективним є підключення до BIM-бібліотек (наприклад, пошук найближчого об’єкта в IFC-продуктовій бібліотеці). Початкові кроки вже робляться, зокрема перетворення семантичних хмар точок у семантичний BIM з використанням онтологій. Майбутні дослідження також повинні стандартизувати формати семантики, наприклад, через відкриті стандарти IFC або CityGML, щоб автоматизовані моделі були готові до використання у FM-системах, структурному аналізі тощо [18; 19].

Якщо говорити про обчислювальну ефективність та масштабованість, то для обробки великих хмар точок (наприклад, міських сканів) важлива підвищена ефективність алгоритмів. Глибинне навчання з хмарами точок потребує багато ресурсів; застосовуються розріджені згорткові мережі та підвибірки, але потрібен подальший прогрес, щоб забезпечити прийнятний час для обробки реальних об’єктів або інтерактивність для роботи з великими проектами. Можливі шляхи: хмарні обчислення та паралельна обробка сегментів із подальшим об’єднанням результатів, або використання ефективних структур даних (вокселі, октодерев), що прискорюють пошук сусідів та підгонку. Генеративні моделі та “diffusion models” для хмар точок [20; 21] можуть допомагати синтезувати відсутні частини або згладжувати шум, але потрібно забезпечити їхню ефективність і точність.

У найближчому майбутньому практичним напрямом є інтеграція автоматизації з інтуїтивними інтерфейсами, де користувач керує процесом у ключових точках, системи “human-in-the-loop”. Наприклад, оператор може позначити кілька точок як “колона”, а система доопрацює решту (аналог сучасних інструментів сегментації з мінімальним втручанням користувача). Це забезпечує одночасно контроль та економію часу.

Щодо бенчмарків та протоколів оцінювання, то спільнота повинна узгодити стандарти оцінки. Перспективним є проведення змагань зі scan-to-BIM, визначення загальних наборів даних і метрик (повнота і точність креслень, precision/recall для стін

тощо). Стандартизовані бенчмарки дозволять вимірювати прогрес і визначати слабкі місця методів. Відсутність таких ресурсів уповільнює розвиток.

Висновки

Огляд сучасних підходів показує, що найпрактичніші рішення для реконструкції будівель із хмар точок ґрунтуються на поєднанні робастних геометричних методів (для опорної геометрії) та алгоритмів машинного навчання (для семантики й складних елементів), однак рівень автоматизації на реальних об’єктах обмежується шумом, оклюзіями, неоднорідною щільністю даних і браком еталонних датасетів та узгоджених метрик.

У результаті огляду сформульовано такі висновки й рекомендації:

1. Інтеграція хмар точок, отриманих різними методами дистанційного зондування та наземного сканування, забезпечує підвищення повноти та достовірності геопросторової інформації.

2. Наземне лазерне сканування підтверджено як пріоритетний метод отримання високоточної метричної інформації щодо геометрії пошкоджених конструкцій.

3. Поєднання монохромної хмари точок TLS із кольоровими даними фотограмметрії та БПЛА дозволяє сформувати семантично збагачену тривимірну модель об’єкта.

4. Для виділення домінантних площин і ліній доцільно використовувати робастні класичні алгоритми (наприклад, RANSAC; перетворення Гафа) як інтерпретовану основу контролю якості.

5. Для семантичної сегментації варто розглядати point-based моделі глибинного навчання (PointNet/PointNet++ та графові/локально-орієнтовані архітектури), але окремо підкреслювати залежність якості від наявності доменно-релевантних навчальних даних і процедур адаптації.

6. Для історичних та деформованих конструкцій важливо мінімізувати “ідеалізацію” геометрії та фіксувати відхилення/деформації як частину фактичного стану об’єкта.

7. Для підвищення придатності результатів у BIM/GIS-екосистемах рекомендовано узгоджувати семантику моделі з відкритими стандартами обміну (IFC для BIM; CityGML для міських 3D-моделей).

Подальший розвиток автоматизованого створення архітектурних креслень із хмар точок пов’язаний із розширенням універсальності, інтеграцією геометричного та семантичного інтелекту, підвищенням надійності через взаємодію з користувачем та стандартизовану оцінку. Брак спеціалізованих досліджень у цьому напрямі обмежує можливість ефективного використання технологій для

швидкого відновлення та забезпечення безпеки населення в постконфліктний період. Конвергенція геодезичного моніторингу, комп'ютерної обробки та

архітектурних знань обіцяє рішення, що будуть технічно досконалішими та практично корисними для архітекторів та інженерів.

Список літератури

1. Abreu N., Pinto A., Matos A., Pires M. Procedural point cloud modelling in Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM applications: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2023. Vol. 12. No. 7. Art. 260. <https://doi.org/10.3390/ijgi12070260>.
2. Dong S., Wu D., Kong W., Liu W., Xia N. Research on intelligent generation of line drawings from point clouds for ancient architectural heritage. *Buildings*. 2025. Vol. 15. No. 18. Art. 3341. <https://doi.org/10.3390/buildings15183341>.
3. Zhang F., Kong Q., Yuan C., Li P. Automatic generation of architecture drawings from point clouds. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2024. Vol. 39. No. 22. P. 3477–3488. <https://doi.org/10.1111/mice.13302>.
4. Pang B., Yang J., Xia T., Zhang A., Zhang K., Xu Q., Wang F. Automated heritage building component recognition and modelling based on local features. *Journal of Cultural Heritage*. 2025. Vol. 71. P. 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.12.006>.
5. Fischler M. A., Bolles R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*. 1981. Vol. 24. No. 6. P. 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>.
6. Duda R. O., Hart P. E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*. 1972. Vol. 15. No. 1. P. 11–15. <https://doi.org/10.1145/361237.361242>.
7. Rabbani T., van den Heuvel F. A., Vosselmann G. Segmentation of point clouds using smoothness constraints. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium "Image engineering and vision metrology" (ISPRS 2006)*. Dresden, Germany, 25–27 September, 2006. P. 248–253.
8. Gao X., Ronghao, Y., Tan J., Liu Y. Floor plan reconstruction from indoor 3D point clouds using iterative RANSAC line segmentation. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 89. Art. 109238. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109238>.
9. Hoppe H., DeRose T., Duchamp T., McDonald J., Stuetzle W. Surface reconstruction from unorganized points. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1992. Vol. 26. No. 2. P. 71–78. <https://doi.org/10.1145/142920.134011>.
10. Rusu R. B., Cousins S. 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Shanghai, China, 09–13 May, 2011. 4 p. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980567>.
11. Qi C. R., Su H., Mo K., Guibas L. J. PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation. *arXiv : web site*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.00593>.
12. Qi C. R., Yi L., Su H., Guibas L. J. PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. *Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*, Long Beach, CA, USA. 04–09 December, 2017. P. 5105–5114.
13. Wang Y., Sun Y., Liu Z., Sarma S. E., Bronstein M. M., Solomon J. M. Dynamic graph CNN for learning on point clouds. *ACM Transactions on Graphics*. 2019. Vol. 38. No. 5. Art. 146. <https://doi.org/10.1145/3326362>.
14. Zhao H., Jiang L., Jia J., Torr P. H., Koltun V. Point Transformer. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Montreal, QC, Canada, 10–17 October, 2021. P. 16239–16248. <https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.01595>.
15. Escudero P. A. Scan-to-HBIM: automated transformation of point clouds into 3D BIM models for the digitization and preservation of historic buildings. *VITRUVIO – International Journal of Architectural Technology and Sustainability*. 2023. Vol. 8. No. 2. P. 52–63. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20413>.
16. Mehranfar M., Braun A., Borrmann A. From dense point clouds to semantic digital models: End-to-end AI-based automation procedure for Manhattan-world structures. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 162. Art. 105392. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105392>.
17. Bae S.-J., Park J., Ham J., Song M., Kim J.-Y. Error Distribution Pattern Analysis of Mobile Laser Scanners for Precise As-Built BIM Generation. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 14. Art. 8076. <https://doi.org/10.3390/app15148076>.
18. Industry Foundation Classes (IFC) – technical standards documentation. *buildingSMART International* : web site. URL : <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/> (accessed 15.03.2026).
19. Pauwels P., Terkaj W. EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 63. P. 100–133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.003>.
20. Luo S., Hu W. Diffusion probabilistic models for 3D point cloud generation. *Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Nashville, TN, USA, 20–25 June, 2021. P. 2836–2844. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00286>.
21. Li Y., Peng F., Dou F., Xiao Y., Li Y. PCCDiff: Point Cloud Completion with Conditional Denoising Diffusion Probabilistic Models. *Symmetry*. 2024. Vol. 16. No. 12. Art. 1680. <https://doi.org/10.3390/sym16121680>.

Надійшла до редколегії 02.03.2026

Схвалена до друку 20.04.2026

Дата публікації 30.06.2026

Відомості про авторів:

Тоотс Роберт Володимирович
аспірант
Харківського національного економічного
університету ім. С. Кузнеця,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-2775-1911>

Information about the authors:

Robert Toots
Post-Graduate
of Simon Kuznets Kharkiv
National University of Economics,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-2775-1911>

Шапівалова Олена Олександрівна

кандидат технічних наук доцент
доцент
Харківського національного економічного
університету ім. С. Кузнеця,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4566-6634>

Наливайко Тетяна Тарасівна

кандидат технічних наук
доцент
Харківського національного економічного
університету ім. С. Кузнеця,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5069-486X>

Olena Shapovalova

PhD in Engineering Associate Professor
Associate Professor
of Simon Kuznets Kharkiv
National University of Economics,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4566-6634>

Tetyana Nalivayko

PhD in Engineering
Associate Professor
of Simon Kuznets Kharkiv
National University of Economics,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5069-486X>

REVIEW OF MODERN POINT-CLOUD PROCESSING METHODS FOR DOCUMENTING DAMAGED AND HERITAGE BUILDINGS

R. Toots, O. Shapovalova, T. Nalivayko

Rapid post-damage assessment and reliable as-built documentation are critical for prioritizing reconstruction works and for preserving evidence of structural condition. This paper reviews recent (2023-present) Scan-to-BIM/Scan-to-CAD research and practice relevant to documenting damaged and heritage buildings from dense 3D point clouds. We summarize a combined data acquisition strategy that fuses terrestrial laser scanning, close-range and UAV photogrammetry, and GNSS control to produce a georeferenced 3D model suitable for further engineering analysis. The reviewed pipelines are decomposed into key processing stages: denoising and registration; extraction of geometric primitives (planes and lines) with robust estimators such as RANSAC; orientation and normal estimation via PCA; clustering and region growing for geometric segmentation; and se-mantic segmentation using point-based deep networks (e.g., PointNet-family, graph and transformer models) to label building components. A dedicated part of the review focuses on deformation-aware modelling: avoiding Manhattan-world snapping, preserving non-orthogonal corners, wall lean and bowing, and separating true deformations from sensor-induced bias. We compare the current capabilities of end-to-end toolchains that output editable CAD drawings and/or parametric BIM models, and discuss their limitations in real scenes with clutter, occlusions and massive point counts. Finally, we identify research gaps that hinder wide deployment: lack of standardized benchmarks and validation protocols, limited training data for uncommon architectural styles, insufficient uncertainty reporting, and incomplete semantic enrichment for secondary elements. The synthesis outlines practical directions for robust, verifiable and deformation-preserving documentation workflows that can accelerate post-conflict reconstruction and heritage conservation. The proposed structure also supports repeat surveys and change monitoring over time.

Keywords: architectural documentation; conveyor; deep learning; GNSS, laser scanning; photogrammetry; point clouds; Scan-to-BIM; Scan-to-CAD; segmentation.