

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

Методика синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд

Кузнєцова Анна Михайлівна

Київ – 2021 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

проф., д.т.н. Карпінський Ю.О.

“ _____ ” _____ 2021 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Методика синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд

Виконала студент групи ГСТ-61м
193 «Геодезія та землеустрій»
Геоінформаційні системи і технології
Кузнєцова А.М.

Керівник: Горковчук Ю.В.,
доцент, к.т.н.
Ідентичність підтверджую

Київ 2021 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

_____ доцент., к.т.н. Нестерненко О. В.

“ _____ ” _____ 2021 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Кузнецова Анна Михайлівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Методика синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд

затверджена наказом ректора КНУБА № 1653/2 від « 16 » вересня 2021 року

2. Керівник роботи _____ доцент, к.т.н. Горковчук Юлія Вікторівна

(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту: 13 грудня 2021 р.

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р. 1. Характеристика предметної сфери високоточного моделювання будівель і споруд.

Р. 2. Методичні засади синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд.

Р. 3. Дослідна реалізація методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд.

Р. 4. Оцінка точності високоточного моделювання будівель і споруд.

5. Графічний матеріал за розділами

Р. 1. Схема класифікації 3D-моделей. Схема нормативно-методичного забезпечення сфери моделювання будівель і споруд. Технологічна система інтеграції 2D та 3D даних. Таблиця класифікації первинних даних для високоточного 3D-моделювання

Р. 2. 4 рисунка рівнів інтегрування фотограмметрії та лазерного сканування. Функціональна модель синтезу даних для моделювання будівель і споруд Рівень А0 та Рівень А1. Блок схема синтезу даних для отримання високоточної хмари точок. Концептуальна модель бази даних моделювання будівель і споруд.

Технологічна схема завантаження даних лазерного сканування в середовище PostgreSQL.

Р. 3. Фото об'єкта моделювання. Рисунки прикладів вхідних даних. Рисунки обробки даних фотограмметричного знімання у програмі Agisoft PhotoScan. Рисунки обробки даних лазерного сканування та синтезу цих даних з даними фотограмметричного знімання у програмі CloudCompare. Приклад результуючої 3D-моделі з накладеними текстурами.

Р. 4. Результати оцінки точності синтезу даних у вигляді таблиці та рисунку з програми CloudCompare.

7. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)
Розділ 1. Характеристика предметної сфери високоточного моделювання будівель і споруд 1.1. Класифікація 3D-моделей. Інформаційне моделювання. Принципи інтеграції 2D та 3D даних 1.2. Аналіз нормативно-методичного забезпечення моделювання будівель і споруд 1.3. Аналіз вихідних даних для високоточного моделювання 1.4. Висновок до першого розділу	08.10.2021
Розділ 2. Методичні засади синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд 2.1. Методика інтегрування даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання 2.2. Функціональна модель синтезу даних для моделювання будівель і споруд 2.3. Концептуальна модель бази даних для моделювання будівель і споруд 2.4. Висновок до другого розділу	05.11.2021
Розділ 3. Дослідна реалізація методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд 3.1. Опис об'єкта дослідження та аналіз вихідних даних 3.2. Практична реалізація синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд 3.3. Висновок до третього розділу	02.11.2021
Розділ 4. Оцінка точності високоточного моделювання будівель і споруд	24.11.2021
Остаточне оформлення роботи	02.12.2021
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	07.12.2021
Попередній захист роботи на кафедрі	13.12.2021

8. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.	Лященко А.А.		
Розділ 3.	Горковчук Д.В.		
Розділ 4.			

9. Дата видачі завдання 17 вересня 2021 р.

Зав. кафедри	_____	Карпінський Ю.О.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник	_____	Горковчук Ю.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Студент	_____	Кузнєцова А.М.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

РЕЗЮМЕ (summary) <i>до атестаційної випускної роботи студента:</i>		Кузнєцова Анна Михайлівна	
<i>Тема</i>	Методика синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд		
<i>Назва ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Освітній тупінь</i>	Магістр за освітньо-професійною програмою навчання		
<i>Факультет</i>	Геоінформаційних систем та управління територіями		
<i>Кафедри</i>	Геоінформатики та фотограмметрії		
<i>Спеціальність</i>	193 Геодезія та землеустрій		
<i>Спеціалізація</i>	Геоінформаційні системи і технології		
<i>Керівник</i>	Горковчук Юлія Вікторівна, к.т.н, доцент		
<i>Обсяг роботи</i>	<i>пояснювальна записка, стор.</i>	<i>розділів</i>	<i>рисунків</i>
	77	4	26
<i>Розділ 1</i>	Виконано огляд нормативно-методичного забезпечення предметної сфери моделювання будівель і споруд. Створено класифікацію 3D-моделей та розглянуто методи інтеграції 2D та 3D даних. Здійснено огляд інформаційного моделювання будівель і споруд (BIM). Виконано аналіз первинних даних для високоточного 3D-моделювання. Обґрунтовано актуальність теми.		
<i>Розділ 2</i>	Розроблено методику синтезу даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання на основі схеми інтеграції об'єктного рівня інтегрування з основною ідеєю окремої обробки та інтерпретування даних. Запропоновано концептуальну модель бази даних моделювання архітектурних будівель і споруд та розглянуто схему завантаження даних лазерного сканування в середовище PostgreSQL/PostGIS.		
<i>Розділ 3</i>	Здійснено опис об'єкта дослідження та проведено аналіз вихідних даних. Апробовано методику синтезу даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання для тривимірного моделювання та виконано практичну реалізацію схеми синтезу даних для отримання покращеної високоточної хмари точок на прикладі історичної споруди Fort Asterstein у німецькому місті Кобленц. Містить результати аналізу перекриття щодо відсотку зони перекриття між досліджуваними хмарами.		
<i>Розділ 4</i>	Проведено оцінку точності запропонованої методики синтезу даних на основі порівняльного аналізу даних.		
<i>Висновки по роботі:</i>	У роботі розроблено методику синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд та запропоновано функціональну модель синтезу даних результатів наземного лазерного сканування та фотограмметричного знімання, що включає такі загальні етапи як первинна обробка вхідних даних, синтез даних та моделювання. Точність створеної високоточної 3D-моделі складає 2 мм.		
Ключові слова: синтез даних, 3D моделювання, наземне лазерне сканування, фотограмметричне знімання, база даних.			
Keywords: data fusion, 3D modeling, point cloud fusion, terrestrial laser scanning (TLS), digital photogrammetry, high accuracy modeling, database.			

Укладач: _____ /Кузнєцова А.М./

Керівник: _____ /Горковчук Ю.В./

« ____ » _____ 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ ВИСОКОТОЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	11
1.1 Класифікація 3D-моделей. Інформаційне моделювання. Принцип інтеграції 2D та 3D даних	12
1.2 Аналіз нормативно-методичного забезпечення моделювання будівель і споруд	19
1.3 Аналіз вихідних даних для високоточного моделювання.....	24
1.4 Висновок до першого розділу.....	29
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ СИНТЕЗУ ДАНИХ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	31
2.1 Методика інтегрування даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання	32
2.2 Функціональна модель синтезу даних для моделювання будівель і споруд	37
2.3 Концептуальна модель бази даних моделювання будівель і споруд...	47
2.4 Висновок до другого розділу	52
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ СИНТЕЗУ ДАНИХ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД	54
3.1 Опис об'єкта дослідження та аналіз вихідних даних	55
3.2 Практична реалізація методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд.....	58
3.3 Висновок до третього розділу	66
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИСОКОТОЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	70

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72
ДОДАТКИ	77

ВСТУП

В останнє десятиліття різко зріс попит на створення 3D-моделей для документування та візуалізації об'єктів. 3D-моделювання може використовуватися в різноманітних сферах: міське планування, промисловість, архітектура та дизайн інтер'єру, реклама й маркетинг, комп'ютерні ігри, кінематограф, анімація, медицина тощо. Фотограмметрія вже багато років використовується для тривимірної реконструкції об'єктів з аналогових або цифрових зображень. Тимчасом технологія лазерного сканування стає дуже перспективною альтернативою для багатьох видів геодезичних зйомок. Лазерні сканери дають змогу дуже швидко отримувати велику кількість тривимірних даних, які часто можна поєднувати з кольоровими цифровими зображеннями високої роздільної здатності.

Поняття синтезу даних за змістом є інтегруванням даних різного походження для подальшого спільного аналізу і оброблення, що дозволяє компенсувати недоліки кожного методу збору геопросторових даних, забезпечуючи більш точне моделювання, інтерпретацію та подання об'єктів навколишнього середовища.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю визначення шляхів синтезу даних фотограмметричного знімання та лазерного сканування як одного з найефективніших методів отримання якісних великих даних про просторові об'єкти у вигляді хмар точок, які є основою для високоточного моделювання будівель і споруд.

Об'єктом дослідження є високоточне моделювання будівель і споруд, а **предметом** дослідження – синтез даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання.

Метою магістерської роботи є розроблення методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд та її практична апробація.

Для досягнення мети в роботі поставлено та виконано такі **завдання**:

1. Аналіз нормативно-методичного забезпечення предметної сфери моделювання будівель і споруд

2. Класифікація 3D-моделей та дослідження методів інтеграції 2D та 3D даних

3. Розроблення функціональної моделі синтезу даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання

4. Розроблення концептуальної моделі бази даних моделювання будівель і споруд

5. Дослідна реалізація методики синтезу даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання для тривимірного моделювання історичної споруди Fort Asterstein у німецькому місті Кобленц

6. Оцінка точності запропонованої методики синтезу даних на основі порівняльного аналізу даних.

Методологічною основою дослідження є положення і методи теорії синтезу даних, об'єктно-орієнтованого моделювання, методи порівнянь, аналізу і узагальнення теорії системного аналізу.

Методологія синтезу даних наземного лазерного сканування та фотограмметричного знімання була розглянута в таких роботах:

- Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia (Thomas Luhmann, Maria Chizhova, Denys Gorkovchuk);
- Increase of readability and accuracy of 3D models using fusion of close range photogrammetry and laser scanning (Mateo Gasparovic, Iva Gasparovic);
- An automatic procedure for combining digital images and laser scanner data (Wassim Moussa, Mohammed Abdel-Wahab, Dieter Fritsch);
- 3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy (HossamEl-Din Fawzy);

- Combination of laser scanner data and simple photogrammetric procedures for surface reconstruction of monuments (Ch. Ioannidis, N. Demir, S. Soile, M. Tsakiri);
- Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to cultural heritage 3D modeling (Alberto Guarnieri, Fabio Remondino);
- Integration of Laser Scanning and Photogrammetry (Petri Rönholm, Eija Honkavaara, Paula Litkey, Hannu Huuypä);
- Integration of digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for cultural heritage data recording (Wassim Moussa).

Наукова новизна полягає в вирішенні прикладної наукової задачі розроблення методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд, а саме – розроблено функціональну модель процесу синтезу даних лазерного сканування і фотограмметричного знімання та концептуальну модель бази даних моделювання будівель і споруд.

Практична цінність результатів дослідження полягає у підвищенні точності та надійності вихідних даних для тривимірного моделювання у вигляді формування високоточної щільної хмари точок, що є результатом синтезу даних з різних джерел. Запропонована методика інтегрування даних може бути впроваджена в процесах первинної обробки даних та оцінці точності робіт з наземного сканування, фотограмметричного знімання, в тому числі засобами БПЛА, та подальшого моделювання інженерних об'єктів і споруд.

Вихідні дані було надано приватним товариством з обмеженою відповідальністю SPM3D у форматах .PTS та .ARW в локальній системі координат.

Дипломна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загального висновку, списку використаних джерел та додатків. Має 26 рисунків, 2 таблиці, 1 формулу та 52 джерел літератури. Обсяг роботи – 77 сторінок.

РОЗДІЛ 1
ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ ВИСОКОТОЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Кузнцова А.М.			Розробка методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд	Літ.	Арк.	Аркушів
							11	77
Керівник		Горковчук Ю.В.				11		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О.				ІІ ІПО КНУБА, група ГІСТ-61м		

1.1 Класифікація 3D-моделей. Інформаційне моделювання. Принцип інтеграції 2D та 3D даних

3D-моделювання – це процес розробки математичного представлення будь-якої тривимірної поверхні об’єкта за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Продуктом моделювання є 3D-модель.

3D-модель – це об’ємна фігура в просторі, створена в спеціальній програмі. За основу, як правило, приймаються креслення, фотографії, малюнки та детальні описи, спираючись на які, фахівці і створюють віртуальну модель [1]. Класифікація 3D-моделей подана на рис. 1.1.

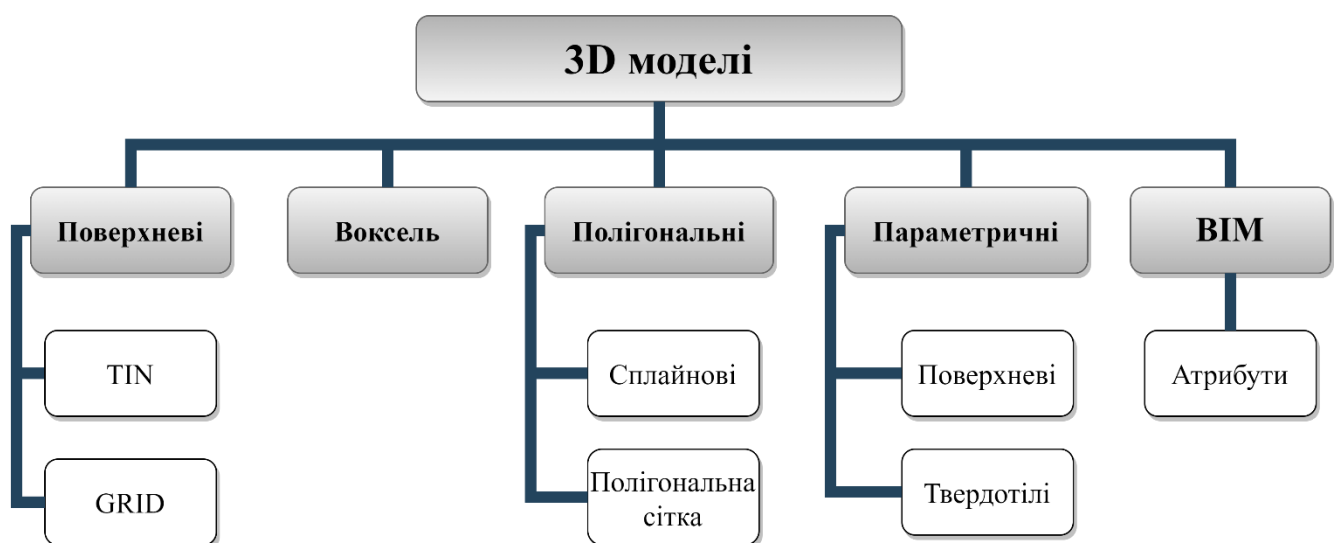


Рис. 1.1 Класифікація 3D-моделей

Поле (**поверхня**) є безперервною функцією відображення кожної точки місцевості в значеннях деякої предметної сфери.

Трикутні нерегулярні мережі (TIN) – це структура організації просторових даних, яка подає земну поверхню у вигляді пов'язаних між собою спільними вершинами і сторонами трикутників неправильної форми, що не перетинаються. Кожен трикутник мережі визначається трьома координатами (X, Y, Z) його вершин.

GRID – цифрове подання рельєфу, яке відповідає растровій моделі поверхні як множині значень висоти у вузлах регулярної сітки (GRID-модель вузлова) або в регулярно розташованих чарунках (комірках) однакового розміру та форми (GRID-модель чарункова).

Воксель (від англ. volumetric + pixel) – одиниця графічної інформації, що подає точку в тривимірному просторі у вигляді її положення (X , Y), кольору та щільності (Z). Шар вокселів подає багатовимірну просторову/часову інформацію в тривимірній об'ємній візуалізації [2].

Полігональні моделі є результатом апроксимації поверхні об'єкта ділянками площин, обмеженими прямими лініями – полігонами. Кожен полігон може мати власну текстуру й колір, а сполучені між собою полігони утворюють полігональну сітку або полігональний об'єкт. Для моделювання поверхні лише необхідно задати в просторі набір полігонів, що стикаються один з одним по гранях та вершинах.

Сплайнове моделювання – метод, що ґрунтується на використанні криволінійних поверхонь (сплайнів). Лінії сплайнів задаються тривимірним набором контрольних точок у просторі, які і визначають гладкість. Всі сплайни зводяться до каркасу сплайна, на основі якого вже буде створюватися огинаюча тривимірна геометрична поверхня [3].

При способі полігонального моделювання модель визначається набором вершин та типом зв'язку між ними (лініями, полігонами, трикутниками тощо). Точність моделювання об'єкта залежить від рівня деталізації, що визначається кількістю полігонів; розрізняють високополігональне моделювання – з великою кількістю та низькополігональне – з низькою кількістю полігонів відповідно.

Параметричне моделювання базується на створенні математичної моделі із параметрами, зміна яких тягне за собою зміну всієї конфігурації об'єкту, наприклад, переміщення деталей у збірці та інші схожі трансформації. На відміну від інших технологій, таке моделювання виконується не вручну, а на основі визначених користувачем параметрів або правил. Іншими словами створюється математична модель із потрібними параметрами, у якій за короткий час можна випробувати різні комбінації геометричного співвідношення і зміни параметрів моделі, внести необхідні корективи й уникнути подальших помилок.

Під час моделювання поверхонь (поверхневе моделювання) створюються і видозмінюються поверхні всіх елементів і деталей об'єкта, що моделюється.

При **твердотілому моделюванні** поверхня модельованого об'єкта повністю описується оболонками, які відокремлюють внутрішній обсяг об'єкта від усього іншого простору. Моделі створюються з використанням найпростіших форм, таких як прямокутна призма, сфера, циліндр, конус тощо. Потім при використанні операцій об'єднання, віднімання та накладання двох фігур разом, створюються більш складні структури. При побудові моделі працюють відразу з усією оболонкою, а не з окремими поверхнями.

Таким чином, поверхнєве параметричне моделювання має низку переваг, зокрема висока точність подання будь-якого за складністю об'єкта, контроль взаємно розташованих деталей, автоматизація процесу моделювання.

3D-моделювання може використовуватися в різноманітних сферах: міське планування, промисловість, архітектура та дизайн інтер'єру, реклама й маркетинг, комп'ютерні ігри, кінематограф, анімація тощо [4].

Інструментами 3D-моделювання є професійні програми, такі як SketchUp, SolidWorks, Revit, AutoCAD, ArchiCAD, Rhino 3D, MicroStation, Agisoft PhotoScan тощо.

Зважаючи на завдання дослідження, у роботі було використано метод моделювання полігональною сіткою в програмі Agisoft PhotoScan.

ВІМ-технологія (Building Information Modeling – інформаційне моделювання будівель і споруд) – це цифрове представлення фізичних і функціональних характеристик об'єкта, що створює спільно використовуваний інформаційний ресурс заданого об'єкта та формує надійну основу для прийняття рішень упродовж його життєвого циклу: від ранніх концепцій до утилізації [5]. Особливістю цієї технології є комплексна обробка архітектурно-конструкторської та техніко-економічної інформації.

На відміну від звичайних програм 2D, програма 3D-проектування моделей на основі ВІМ-технології в будівництві зберігає не просто графічні об'єкти, а інформацію, що дозволяє автоматично створювати креслення і звіти, виконувати аналіз проєкту, моделювати графік виконання робіт, експлуатацію об'єктів і т. д [6].

Інформаційні моделі будівель – це цифрові відображення будівель на різних фазах життєвого циклу. Окрім того, BIM – це не тільки модель чи інструмент, а і процес та технологія створення, обміну, використання та підтримання будівельної інформації. Основним використанням інформаційних моделей будівель є підтримання розробки дизайнерської моделі будівлі, тобто визначення цілей виробництва на основі вимог різних зацікавлених сторін, якими є замовники, клієнти, власники, а також держава із її будівельними нормами та кодексами [7].

У галузі архітектури, інженерії та будівництва BIM містить багато геометричних і семантичних властивостей будівлі, таких як структури, елементи, графіки та інші аспекти будівельного проєкту [8].

У 1986 р. англієць Роберт Ейш уперше використав термін «Building Modeling» як інформаційне моделювання будівель. Він сформулював основні принципи інформаційного підходу до проєктування:

- тривимірне представлення об'єкта;
- автоматичне отримання креслень на основі сукупності параметрів об'єкта та його елементів;
- інтелектуальна параметризація об'єктів;
- створення баз даних, що відповідають об'єктам будівництва;
- розподіл процесу будівництва по часових етапах.

Переваги застосування BIM:

- скорочення термінів проєктування;
- зменшення витрат на реалізацію проєкту;
- підвищення продуктивності праці завдяки простоті отримання інформації;
- покращення процесів погодження будівельної документації;
- доступність конкретної інформації про виробників матеріалів;
- кількісні характеристики для оцінювання та проведення тендерів [9].

BIM – це числове представлення та належним чином організована інформація про об'єкт, яка використовується на всіх етапах його життєвого циклу. Важливою

складовою цієї технології є єдиний інформаційний простір, база даних, що містить усю інформацію про технічні, правові, майнові, експлуатаційні, енергетичні, екологічні, комерційні та інші характеристики об'єкта будівництва. Завдяки високій точності та детальному опису моделі, ця технологія дає можливість проводити різні розрахунки (наприклад, енергоефективність та енергоспоживання будівлі, комплексні розрахунки на довготривалість, вогнестійкість та міцність як усєї будівлі, так і її окремих елементів) та аналіз отриманих результатів [10].

На сьогодні не існує загальноприйнятого визначення і єдиних стандартів до побудови інформаційної моделі об'єкта, але були сформовані основні принципи, яким вона мусить відповідати:

1. Єдина інформаційна модель є узгодженим банком даних графічної й описової інформації, базою даних проєкту, загальною для всіх частин і етапів проєкту. Інформація може бути отримана з моделі за потребою.

2. Ґрунтуючись на єдиній інформаційній моделі об'єкта, формується єдина стратегія управління проєктуванням, виробництвом і процесом реалізації будівельного об'єкта.

3. Забезпечується підтримування розподілених груп: люди, інструменти й завдання можуть ефективно і спільно використовувати цю інформацію, що виключає надмірність, повторне введення і втрату даних, помилки під час їхньої передачі та перетворення.

4. Універсалізація форматів обміну даними між програмними комплексами різного призначення [9].

Технологічна система інтеграції 2D та 3D-даних у ГІС представлена на рис. 1.2. Вона в основному розкривається в інтеграції управління даними, інтеграції додатків, інтеграції функціональних модулів, інтеграції систем виразів символів та інтеграції функцій аналізу, що не тільки допомагають при красивій візуалізації для 3D ГІС, а й супроводжуються потужним функціям ГІС із 2D, такими як зберігання й управління даними, запити, просторовий аналіз тощо. Така технологічна система може бути застосована і для архітектурного 3D-моделювання.

Важливим моментом є те, що модель та структура просторових даних 2D та 3D-об'єктів даних зберігаються в одному середовищі. Усі двовимірні дані можна безпосередньо використовувати з високопродуктивним моделюванням у 3D-сцені без будь-якого перетворення просторових даних. 2D та 3D-інтеграція управління даними (методом зберігання 2D та 3D-даних в уніфікованій базі даних) розв'язує проблему сумісності даних різного розміру та зменшує вартість та складність побудови системи для задоволення потреб різних типів діяльності.

Висока вартість тривимірного моделювання є основною проблемою, з якою стикається більшість користувачів, на відміну від векторних даних, якими володіють більшість фахівців сьогодні. Тому важливо мати інструменти тривимірної геовізуалізації двовимірних даних, структура та зміст яких можуть задовільнити всі просторові запити та інструменти аналізу в 3D-сценах – віртуальному просторі моделювання. [11].

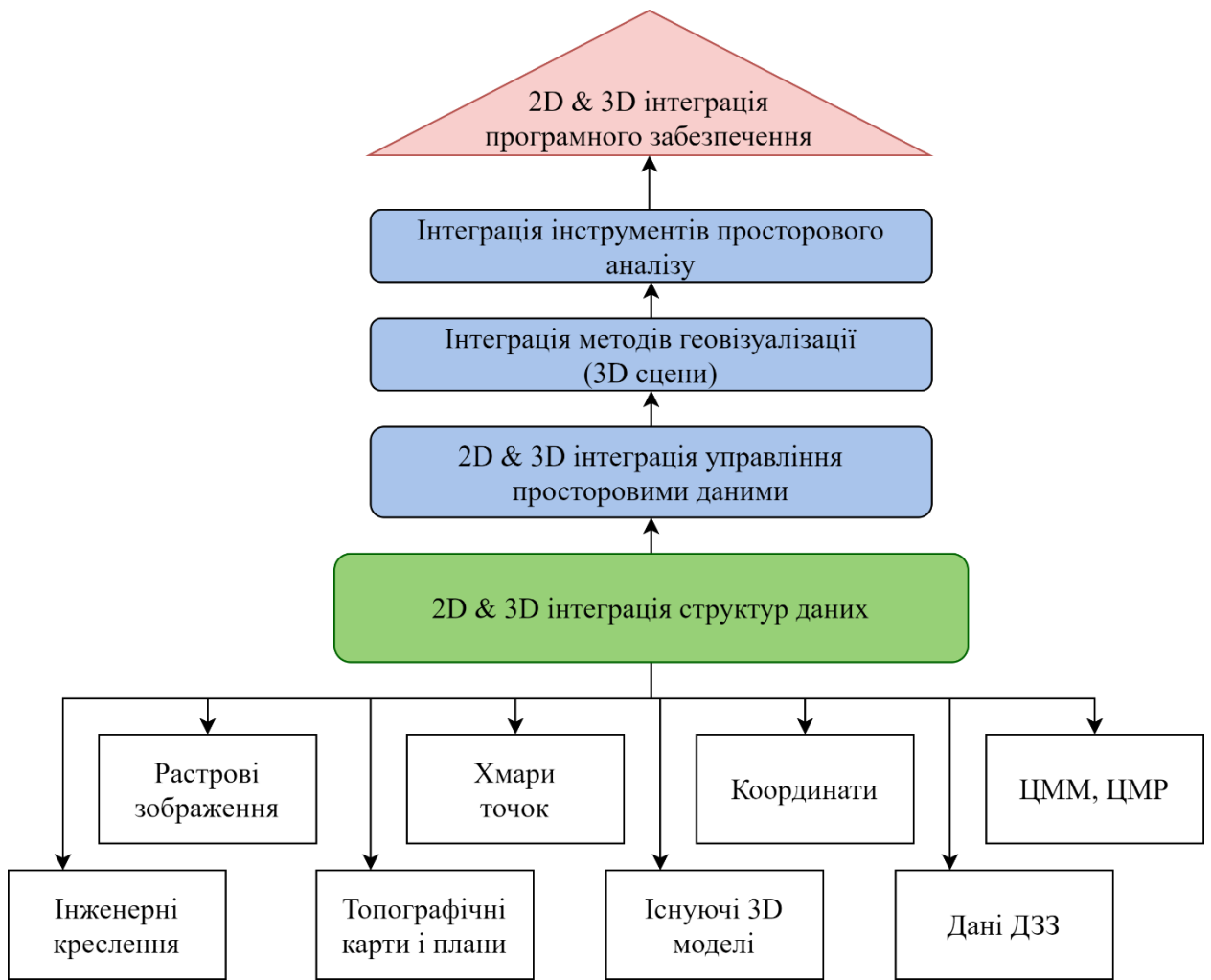


Рис. 1.2 Технологічна система інтеграції 2D та 3D даних

1.2 Аналіз нормативно-методичного забезпечення моделювання будівель і споруд

Сфера моделювання будівель і споруд регулюється такими Законами України:

- Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності»;
- Закон України «Про охорону культурної спадщини»;
- Закон України «Про архітектурну діяльність»;
- Закон України «Про Державний земельний кадастр»;
- Проект Закону України «Про запровадження будівельного інформаційного моделювання (BIM-технології) на всіх етапах життєвого циклу об'єктів та науково-технічного супроводу об'єктів, удосконалення процедури обстеження об'єктів, прийнятих в експлуатацію в установленому законодавством порядку».

З 1 липня 2020 року набрав чинності Національний стандарт ДСТУ 19650-1:2020 «Організація та оцифрування інформації щодо будівель та споруд включно з будівельним інформаційним моделюванням. Управління інформацією з використанням будівельного інформаційного моделювання. Частина 1. Концепції та принципи». Цей документ ідентичний міжнародному стандарту ISO 19650-2:2018. У цьому стандарті викладено концепції та принципи, рекомендовані для організації бізнес-процесів у сфері будівництва, призначені для управління інформацією та створення інформації упродовж життєвого циклу об'єктів будівництва з використанням технології будівельного інформаційного моделювання [12].

Також Кабінет Міністрів України затвердив розроблену Мінрегіоном Концепцію впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання в Україні, у тому числі і план заходів із її реалізації. Відповідне розпорядження було прийнято 17 лютого. Концепція визначає механізми впровадження BIM-технології в будівництві як інструменту для подальшої цифрової трансформації будівельної галузі України [13].

1 квітня 2020 року набули чинності декілька Національних стандартів, гармонізованих із європейськими та міжнародними стандартами:

- ДСТУ EN ISO 12006-2:2020 (EN ISO 12006-2:2020, IDT; ISO 12006-2:2015, IDT) Зведення будівель. Структура інформації про об'єкти будівництва. Частина 2. Основні принципи класифікації;
- ДСТУ EN ISO 12006-3:2020 (EN ISO 12006-3:2016, IDT; ISO 12006-3:2007, IDT) Зведення будівель. Структура інформації про об'єкти будівництва. Частина 3. Структура об'єктно-орієнтованої інформації;
- ДСТУ EN ISO 16757-1:2020 (EN ISO 16757-1:2019, IDT; ISO 16757-1:2015, IDT) Структури даних електронних каталогів товарів для будівельних послуг. Частина 1. Поняття, архітектура та модель;
- ДСТУ EN ISO 16757-2:2020 (EN ISO 16757-2:2019, IDT; ISO 16757-2:2016, IDT) Структури даних електронних каталогів товарів для будівельних послуг. Частина 2. Геометричні параметри;
- ДСТУ ISO/TS 12911:2020 (ISO/TS 12911:2012, IDT) Загальні принципи розроблення стандартів будівельного інформаційного моделювання;
- ДСТУ ISO 16354:2020 (ISO 16354:2013, IDT) Рекомендації щодо створення бібліотек даних та об'єктних модулів;
- ДСТУ ISO 22263:2020 (ISO 22263:2008, IDT) Структура інформації про будівельні споруди. Основи управління інформацією про будівельний об'єкт.

Існує декілька міжнародних стандартів ISO (International Organization for Standardization – міжнародна організація зі стандартизації), які широко використовуються під час проєктування та моделювання даних BIM для задоволення різних будівельних послуг та вимог:

1. *ISO/TS 12911:2012, Framework for building information modelling (BIM) guidance* – загальні принципи розробки стандартів інформаційного моделювання будівель і споруд.

Цей стандарт служить для використання у сфері моделювання будь-яких видів будівель і споруд, у тому числі груп об'єктів на одному або декількох будівельних майданчиках і невеликих окремих об'єктів, а також елементів і конструкцій, що входять до складу об'єкта. Цей стандарт поширюється на всі типи об'єктів, включно з об'єктами інфраструктури, що фінансуються з державних коштів, а також на супутні ресурси, включно з обладнанням та матеріалами. Він встановлює загальні принципи надання технічних характеристик для введення в експлуатацію BIM та покликаний допомогти в роботі інформаційним менеджерам, які на його основі зможуть створювати стандарти інформаційного моделювання на міжнародному та національному рівні, а також для окремих проєктів. Ці загальні принципи також підходять для використання в роботі розробникам програмного забезпечення.

2. *ISO 16757-1:2015, Data structures for electronic product catalogues for building services – Part 1: Concepts, architecture and model* – Структури даних електронних каталогів товарів для будівельних послуг. Частина 1. Поняття, архітектура та модель.

3. *ISO 16757-2:2016, Data structures for electronic product catalogues for building services – Part 2: Geometry* – структури даних електронних каталогів товарів для будівельних послуг. Частина 2. Геометричні параметри.

Серія ISO 16757 є багатокomпонентним стандартом, що поширюється на структури даних для електронних каталогів товарів і встановлює вимоги до автоматичної передачі даних про продукти інженерно-технічного забезпечення в інформаційні моделі об'єкта й моделі прикладного програмного забезпечення інженерно-технічних систем. Частина 1 включає в себе метамодель для опису класів продуктів і їхніх властивостей, а також метамодель даних про продукти, якими обмінюються каталоги продуктів. Частина 2 описує оптимальне моделювання геометрії продуктів будівельних послуг.

4. *ISO 29481-1:2016 (first edition ISO 29481-1:2010), Building information models – Information delivery manual – Part 1: Methodology and format* –

Інформаційне моделювання в будівництві. Довідник з обміну інформацією. Частина 1. Методологія і формат.

У цьому стандарті описуються методологія, що зв'язує бізнес-процеси, які виконуються в процесі будівництва, зі специфікацією інформації, яку ці процеси потребують, та спосіб зіставлення й опису інформаційних процесів упродовж усього життєвого циклу об'єктів будівництва. Цей стандарт призначений полегшити інтероперабельність програмних засобів, які використовуються на всіх етапах життєвого циклу будівельних об'єктів, включно з постановкою завдань, проектуванням, розробкою документації, будівництвом, експлуатацією, технічним обслуговуванням та знесенням.

5. *ISO 29481-2:2012, Building information models – Information delivery manual – Part 2: Interaction framework* – Інформаційне моделювання в будівництві. Довідник з обміну інформацією. Частина 1. Структура взаємодії.

Цей стандарт призначений для полегшення взаємодії між програмними додатками, використовуваними в процесі будівництва, для сприяння цифровій співпраці між учасниками процесу будівництва будівель, а також забезпечення основи для точного, надійного, повторюваного і високоякісного обміну інформацією.

У Сполучених Штатах Америки також є свій діючий національний стандарт – NBIMS-USV3 (The National BIM Standard-United States). Цей стандарт включає в себе три основних розділи: огляд використовуваних інших стандартів, стандарти з обміну даними і практичні керівництва.

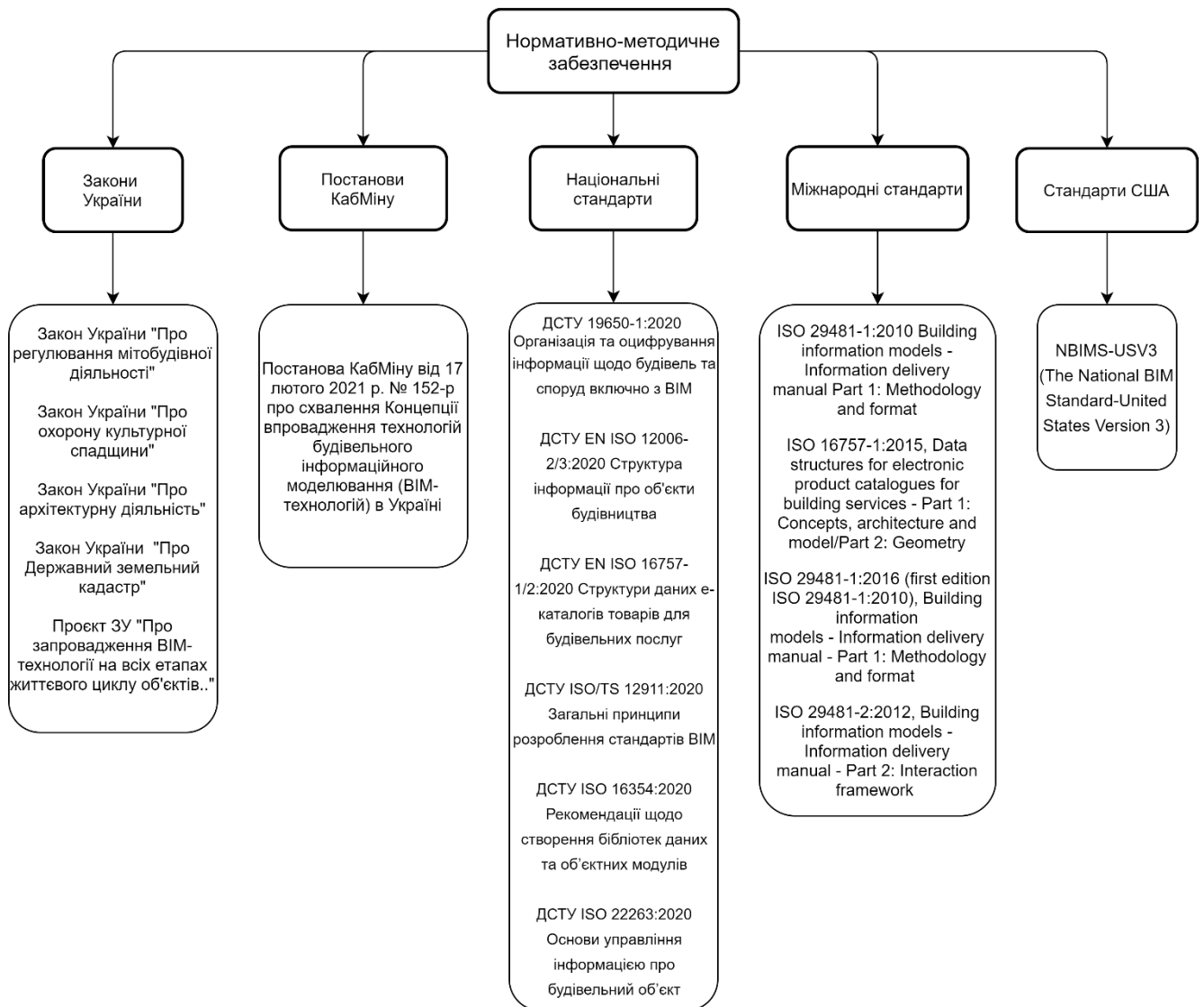


Рис. 1.3 Схема нормативно-методичного забезпечення сфери моделювання будівель і споруд

1.3 Аналіз вихідних даних для високоточного моделювання

На камеральному етапі відбувається обробка даних польових вимірювань, усі отримані результати оцінюються на предмет їхньої точності, а вже далі проводиться створення обмірних креслень, побудова 3D-моделей, створення баз даних та інші дії, необхідні для виконання поставленої в технічному завданні задачі.

Кожен різновид інженерних вишукувань передбачає камеральну стадію робіт, на якій формуються звітні матеріали. Під час виконання топографо-геодезичних та інженерно-геодезичних вишукувань у якості звітних матеріалів у складі технічного звіту здаються топографічні плани й карти, топографічна основа для виконання інших видів інженерних вишукувань, зведені плани інженерних комунікацій і споруд, тематичні плани, карти й атласи, цифрові моделі місцевості (ЦММ) і цифрові моделі рельєфу (ЦМР), геоінформаційні системи та інші матеріали. Результатами інженерно-геологічних, інженерно-екологічних та інженерно-гідрометеорологічних вишукувань є технічні звіти, що відповідають вимогам нормативних документів, в зміст яких включаються отримані в результаті проведених досліджень відомості. Під час виконання обмірних робіт у сферах архітектури, будівництва, культурної спадщини або дизайну інтер'єрів як звітних матеріалів здаються обмірні креслення, плани, розрізи й перетини, тривимірні моделі [14].

Як уже було зазначено, первинними даними для високоточного моделювання у 3D можуть бути: растрові зображення, хмари точок, координати, дані дистанційного зондування Землі, цифрова модель рельєфу (ЦМР) та цифрова модель місцевості (ЦММ), топографічні плани й карти, різноманітні інженерні креслення (плани, фасади, розрізи тощо) та вже існуючі 3D-моделі (рис. 1.2). Класифікація первинних даних для високоточного 3D-моделювання наведена в таблиці 1.

Таблиця 1.1 Класифікація первинних даних для високоточного 3D-моделювання

Первинні дані	Джерело	Формат подання	Точність	Файловий формат	Використання у 3D
Растрові зображення	Фотограмметрія близьких відстаней	Растрові зображення	Обмежується розміром чарунки	.BMP, .TIFF, .JPG, .GIF, .PNG, .ARW	Геометрія, карти глибини, текстуризація
Хмари точок	LiDAR, наземне лазерне сканування	X, Y, Z, RGB, інтенсивність	Залежить від сканера ~5мм	.LAS, .OBJ, .E57, .PLY, .PTS, .RCS	Геометрія, деформації, конструктивні особливості
Координати	ГНСС, наземне топографічне знімання	X, Y, Z	Залежить від пристрою 1-3см (DGPS)	.TXT, .CSV, .GPX	Геометрія
Дані ДЗЗ	Дистанційне зондування, аерофотозйомка, дані БПЛА	Растрові зображення	Залежить від типу сенсора\камери ~5-10м	.TIFF, .GeoTIFF, .DNG	Геометрія, карти глибини, текстуризація
ЦМР, ЦММ	LiDAR, аерофотозйомка, наземне знімання	TIN, GRID	Вхідні дані ~20-30см	.CSV, .TIF, .FLT, .DEM, ESRI_grid	Геометрія
Топографічні плани й карти	Аерофотозйомка топографічне знімання	Цифровий топоплан/карта	Залежить від масштабу 0,1 мм у масштабі плану 1м для 1:10 000	.TIFF, .GeoTIFF, .PDF, .SHP	Геометрія
Інженерні креслення	Паперові архівні дані, дані галузевих кадастрів	Графічний конструкторський документ	Залежить від масштабу ~2-3см	.DWG, .DXF, .DTS, .RVT, .PLN, .PDF	Геометрія

Існуючі 3D-моделі	Проектні дані, дані локальних інформаційних систем та галузевих кадастрів	Полігональна/твердотільна модель	Залежить від рівня деталізації ~2-3см	.3DS, .DXF, .DWG, .OBJ, .FBX, .u3d	Геометрія
-------------------	---	----------------------------------	---------------------------------------	--	-----------

Точність первинних даних була розглянута у роботах [15], [16], [17] та зазначена у [18], [19].

Растровий спосіб формалізації просторових даних, чи растрова модель просторових даних, у найпростішому випадку полягає в зображенні просторових об'єктів у вигляді мозаїки, що суцільно покриває територію. Ця мозаїка й називається растром. Кожен елемент растра називається чарункою (коміркою) растра або пікселем (від англ. pixel, що є скороченням від picture element — елемент зображення) [20].

Лазерне сканування – це сучасний високотехнологічний метод збирання геопросторових даних шляхом вимірювання відстаней від сканера до точок об'єкта з досить високою швидкістю та реєстрацією відповідних напрямків у просторі. Одержані дані про точки об'єкта містять не лише координати X, Y, Z, а й параметри відображення кольору RGB, інтенсивність відбиття лазерного променя тощо. Результатом лазерного сканування є високоточна хмара точок великої щільності, за результатами обробки якої можна розрахувати напрямки нормалі до поверхні споруди, дешифрувати контури об'єктів у плані та в просторі. Ці дані в подальшому можна використовувати в будь-якій графічній програмі [21].

Карти глибини – це зображення або канал зображення, який містить інформацію, що стосується відстані поверхонь предметів сцени від точки зору.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – зондування поверхні Землі з космосу з використанням властивостей електромагнітних хвиль, які випромінюються,

відбиваються або розсіюються зондованими об'єктами, з метою кращого розпорядження природними ресурсами, вдосконалення землекористування та охорони довкілля. Дані ДЗЗ – дані про поверхню Землі, об'єкти, розташовані на ній або в її надрах, отримані в процесі зйомок будь-якими неконтактними, тобто дистанційними методами [22]

Цифрова модель рельєфу (digital terrain model, DTM; digital elevation model, DEM) – цифрове й математичне подання рельєфу місцевості на основі дискретної сукупності вихідних точок, які дають змогу із заданою точністю відтворити реальну поверхню і її структуру, тобто подання у вигляді сукупності моделей висотних відміток або відміток глибин та інших значень аплікат у вузлах нерегулярної мережі трикутників або у вузлах регулярної сітки з утворенням матриці висот або як сукупність записів даних про горизонталі (ізогипси, ізобати) або інші ізолінії. Цифрова модель місцевості – впорядкована множина точок з інформацією про місцевість у цифровій формі, що визначена математичними залежностями, за якими однозначно з потрібною точністю можна отримати необхідні характеристики місцевості [23].

Топографічна карта – побудоване в картографічній проєкції, спотворене, зменшене, узагальнене зображення значної ділянки земної поверхні, що дає змогу визначити як планове, так і висотне положення її точок. Топографічний план – подібне зображення на площині в ортогональній проєкції у великому масштабі ситуації та рельєфу обмеженої ділянки місцевості, у межах якої кривина рівнинної поверхні Землі не враховується [24].

Фотограмметрія – це галузь технічних наук, яка займається отриманням достовірної інформації про фізичні об'єкти та їхнє оточення за допомогою реєстрації, вимірювання та інтерпретації образів або цифрових образів, одержаних за допомогою сенсорів, які не контактують безпосередньо з цими об'єктами [25]. У 3D-моделюванні використовується для створення полігональних 3D-моделей, які складаються з геометричної форми та накладених поверх текстур. Текстура – це растрове зображення, що накладається на поверхню моделі для додання їй кольору,

параметрів забарвлення або ілюзії рельєфу. Типи текстур: колір, блиск, шорсткість, рельєф та прозорість [4].

Усі вищезгадані дані є різноманітними за типами даних, природою, структурою, форматами, ступенем достовірності та точністю. Для формування високоточних тривимірних моделей будівель і споруд постає завдання їхнього злиття та поєднання для використання на різних етапах моделювання.

Наразі опубліковано велику кількість статей щодо порівняння та інтеграції між даними наземного лазерного сканування та фотограмметричного знімання, а також методів наземної топографічної зйомки для тривимірного моделювання [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]. Найрізноманітніші об'єкти, такі як малі та великі пам'ятки, історичні будівлі чи цілі археологічні комплекси, були оцифровані та змодельовані для різних цілей: збереження, створення документації, реконструкції та для використання в музейних експозиціях. Досягнуті результати показали, що ці дві технології можуть доповнювати одна одну в створенні високоточних 3D-моделей [33]. Комбінування цих методів має низку переваг, оскільки лазерне сканування в архітектурі дає можливість дуже швидко провести знімання фасаду й одержати модель об'єкта з деталями розміром у декілька міліметрів, а цифрові зображення дають змогу покращити текстуру об'єкта [34].

1.4 Висновок до першого розділу

Актуальність теми тривимірного моделювання зумовлена широким спектром застосуванням методу для високоточного моделювання об'єктів у різноманітних сферах: міське планування, промисловість, архітектура та дизайн інтер'єру, реклама й маркетинг, комп'ютерні ігри, кінематограф, анімація тощо.

Аналіз дефініцій предметної сфери показав, що поверхневе параметричне моделювання має низку переваг, зокрема високу точність подання будь-якого за складністю об'єкта, контроль взаємно розташованих деталей, автоматизація процесу моделювання. Зважаючи на задачі дослідження, у роботі використаний метод моделювання полігональною сіткою в програмі Agisoft PhotoScan.

Сфера моделювання будівель і споруд регулюється Законами України «Про регулювання містобудівної діяльності», «Про охорону культурної спадщини», «Про архітектурну діяльність», «Про Державний земельний кадастр». Також Кабінет Міністрів України затвердив Концепцію впровадження BIM-технологій в Україні, у тому числі і план заходів із її реалізації. Крім того, існує національний стандарт США та низка основних стандартів ISO, на які опираються чільні українські національні стандарти в сфері моделювання будівель і споруд.

Технологічно процес інтеграції 2D та 3D даних ґрунтується на використанні єдиного середовища уніфікованої бази даних, що забезпечує використання двомірних даних у 3D-сценах – віртуальному просторі моделювання без будь-якого перетворення на основі інструментів тривимірної геовізуалізації, просторових запитів та аналізу.

Первинними даними для високоточного моделювання можуть бути растрові зображення, хмари точок, координати, дані дистанційного зондування Землі, цифрова модель рельєфу (ЦМР) та цифрова модель місцевості (ЦММ), топографічні плани й карти, різноманітні інженерні креслення (плани, фасади, розрізи тощо) та вже існуючі 3D-моделі. Усі вихідні дані для 3D-моделювання є різноманітними за типами, природою, структурою, форматами, ступенем достовірності та точністю. Для формування високоточних тривимірних моделей

будівель і споруд постає завдання їх злиття та поєднання для використання на різних етапах моделювання.

Комбінування даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання має низку переваг, оскільки лазерне сканування дає можливість визначити геометрію, а також змоделювати окремі архітектурні елементи з точністю в декілька міліметрів, а цифрові зображення забезпечують текстуризацію об'єкта.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ СИНТЕЗУ ДАНИХ ДЛЯ

ВИСОКОТОЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Кузнцова А.М.			Розробка методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд	Літ.	Арк.	Аркушів
Консульт.		Лященко А.А.					31	77
Керівник		Горковчук Ю.В.				31		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О.				ІПО КНУБА, група ГІСТ-61м		

2.1 Методика інтегрування даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання

У даний час усе ще ведуться великі дискусії про те, який підхід чи метод 3D-реєстрації та вимірювань кращий у тій чи іншій ситуації. У багатьох дослідницьких проєктах ідеальним рішенням є поєднання та інтеграція різних методів, зокрема, для зйомки великих та складних об'єктів.

Для створення цифрових 3D-моделей масивних об'єктів із ціл्लю документації та збереження потрібен метод, який має такі властивості:

1. Точність. Точність і достовірність – два важливих фактори геодезичних робіт, якщо тільки проєкт не виконується для простої та швидкої візуалізації;

2. Мобільність. Техніка, зокрема для наземних зйомок, має бути портативною через проблеми доступності до об'єктів, за браком електрики, обмежень за місцем розташування тощо;

3. Низька вартість. Археологічні та документаційні дослідження здебільшого мають обмежений бюджет і не можуть забезпечити використання дорогих геодезичних приладів;

4. Швидке виконання робіт. Для багатьох об'єктів час для проведення робіт з їхнього документування є обмеженим, так як цей процес може заважати відвідувачам чи власникам;

5. Гнучкість. У зв'язку з великою різноманітністю та розмірами об'єктів, метод зйомки має передбачати різні масштаби та бути застосованим у будь-яких можливих умовах.

Оскільки всі ці властивості не часто поєднуються в одному методі, при виконанні більшості геодезичних проєктів, пов'язаних із великими та складними об'єктами, об'єднуються та комбінуються декілька методів для отримання більш точних та повних результатів 3D-зйомки та моделювання. Інтеграція зазвичай здійснюється на рівні даних. Злиття даних — це стандартна структура для об'єднання даних, що надходять із різних джерел [35].

Фотограмметричне знімання та лазерне сканування є двома типовими методами реконструкції 3D-об'єктів. Обидва методи надають змогу збирати точні й щільні тривимірні хмари точок та підходять для знімання складних або різномасштабних об'єктів. Перевагою цих методів є те, що при їхньому використанні можна скоротити кількість повторюваних етапів традиційних процесів зйомки, отримуючи більше часу для інших важливих процесів як моделювання та аналіз будівлі або споруди. Досі ще не розроблено оптимальну функціональну модель синтезу вищезазначених даних, яка б підходила для кожного випадку й задовольняла всі вимоги одночасно. Ці вимоги в основному стосуються геометричної точності, фотореалізму, повноти, автоматизації, часу та вартості.

Лазерне сканування безпосередньо відображає точки тривимірного об'єкта через масив координат. Такі хмари точок не мають інформації про текстуру об'єкта, що призводить до необхідності використання фотограмметрії. Фотографії містять потрібну текстуру, але не містять жодної явної метричної інформації, якщо не використовувати подальші кроки обробки, такі як створення шкали чи додавання наземних контрольних точок.

Фотограмметричний метод корисний для ситуацій, коли виконання архітектурних зйомок за допомогою традиційного обладнання займає багато часу або є неможливим, а також у випадках, коли лазерне сканування обтяжується розмірами ділянки або важкодоступними місцями як, наприклад, високі дахи. Щоби фотограмметрична зйомка була виконана правильно, необхідно забезпечити такі умови, щоб уся геометрія була захоплена зображеннями з достатнім перекриттям та уникати великих «стрибків» між фотографіями. Також важливо мати належні погодні умови та однорідне освітлення.

Лазерні сканери фіксують та записують геометричну, а в деяких випадках і текстурну, інформацію на поверхнях досліджуваних об'єктів та ділянок. Термінологія лазерних сканерів охоплює безліч інструментів із різними принципами та функціями, призначених для різних типів середовищ, цілей та рівнів точності. При виконанні сканування необхідно переконатися, що все

навколишнє середовище досить видиме, встановити достатню кількість станцій сканування для забезпечення належного зв'язку між усіма приміщеннями будівлі, поверхами, зовнішнім та внутрішнім середовищем. Усі ці запобіжні заходи необхідні для того, щоби при обробці вхідних даних програмне забезпечення змогло розпізнати відповідні особливості та правильно вирівняти кожен зі сканів [36].

Інтегрування даних наземної фотограмметрії на лазерного сканування може мати різні рівні залежно від бажаного кінцевого продукту, характеру вихідних даних або відмінностей у пріоритеті. Тож основними чотирма рівнями інтеграції є:

1. Об'єктний рівень інтегрування;
2. Фотограмметрія + лазерне сканування;
3. Лазерне сканування + фотограмметрія;
4. Глибоко інтегрована схема лазерного сканування і фотограмметрії [37].

1. Об'єктний рівень інтегрування. Головний зміст цього рівня інтегрування полягає в тому, що лазерне сканування та фотограмметричні дані обробляються та інтерпретуються окремо. Типовим прикладом такої інтеграції є створення гібридних 3D-віртуальних моделей, у яких цифрова модель об'єкту створюється за результатами лазерного сканування, а структурні лінії – за допомогою фотознімків. Орієнтування в загальну систему найчастіше виконують окремо для сканів та фотознімків.

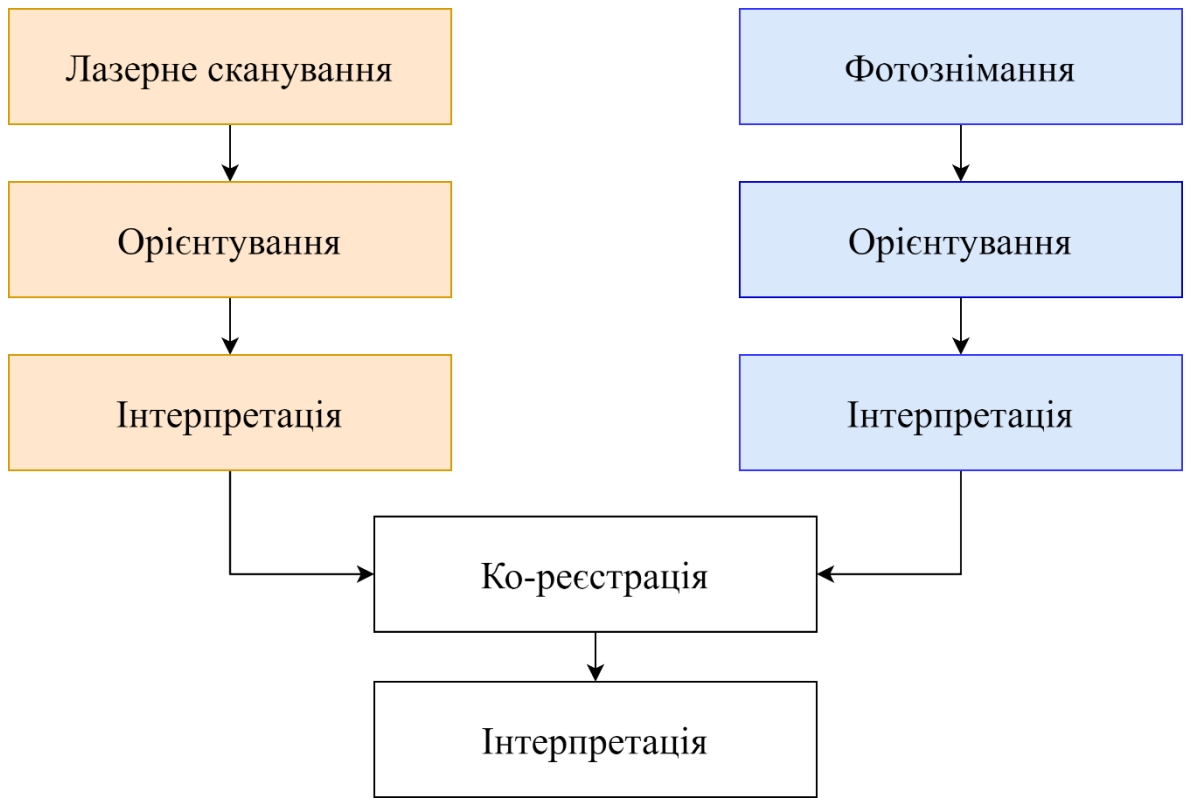


Рис. 2.1 Об'єктний рівень інтегрування

2. Фотограмметрія + лазерне сканування. На цьому рівні фотограмметричні дані та дані лазерного сканування орієнтуються окремо або в загальній системі координат. Основним завданням цього способу є покращення фотографічних даних, які є первинними, за допомогою даних лазерного сканування. Результатом використання такої схеми інтегрування є високоякісні ортофотозображення.

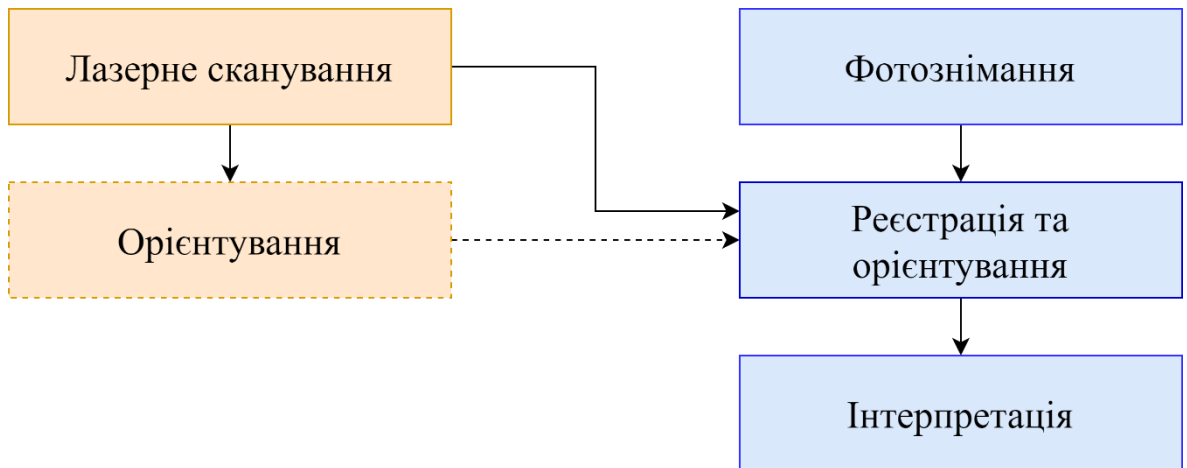


Рис. 2.2 Фотограмметрія + лазерне сканування

3. Лазерне сканування + фотограмметрія. У схемі третього рівня основний акцент робиться на отриманні з фотознімків додаткової інформації для хмари

точок. Найчастіше цей спосіб використовують при кольоровому кодуванні хмари точок. Такий підхід вигідно використовувати при створенні детальних фотореалістичних зображень навіть при не щільному скануванні.

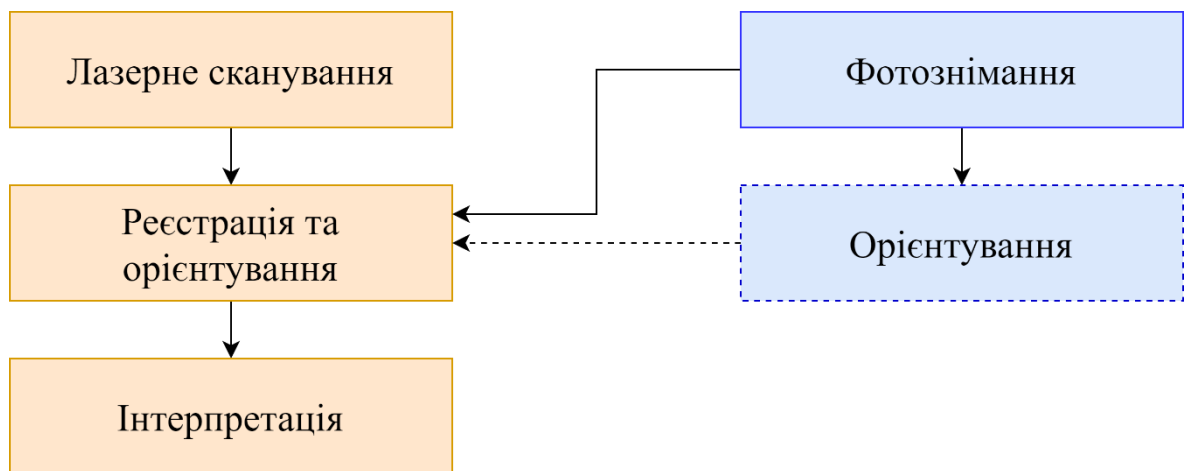


Рис. 2.3 Лазерне сканування + фотограмметрія

4. Глибоко інтегрована схема лазерного сканування і фотограмметрії.

Основна відмінність цієї схеми від попередніх полягає в тому, що реєстрація після збору даних не потрібна. Як правило, лазерний сканер й камера інтегруються на рівні пристрою шляхом жорсткого кріплення обох датчиків на одній платформі. Після калібрування такого комплексу зв'язок між системами координат лазерного сканера й цифрової камери є відомим. Схема дозволяє отримати одночасно хмару точок і фотозображення в єдиній системі координат [38].

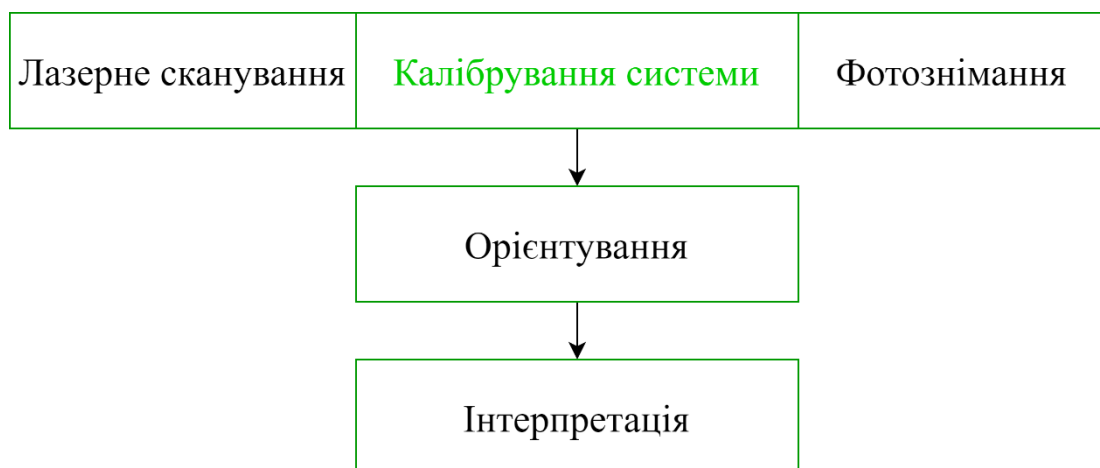


Рис. 2.4 Глибоко інтегрована схема лазерного сканування і фотограмметрії

2.2 Функціональна модель синтезу даних для моделювання будівель і споруд

Методологія SADT (Structured Analysis and Design Technique) – це сукупність методів, правил і процедур, призначених для побудови моделей об'єкта предметної сфери. Функціональна модель SADT відображає функціональну структуру об'єкта, тобто вироблені ним дії і зв'язки між ними. Ця методологія є основою сімейства методологій моделювання IDEF (Integration Definition).

Стандарт IDEF0 представляє собою методологію функціонального моделювання та відображає функціональну структуру об'єкта, тобто здійснювані ним дії і зв'язки між цими діями. IDEF0 може застосовуватися для моделювання широкого кола систем і визначення вимог і функцій, а потім – для розроблення системи, яка задовольняє ці вимоги й реалізує зазначені функції. Як правило, моделювання засобами IDEF0 є першим етапом вивчення будь-якої системи. Діаграма A0 встановлює область моделювання і її межу [39]. Функціональна модель синтезу даних для моделювання будівель і споруд рівня A0 подана на рис. 2.5.

Блок A-0 – описує функції, сформульовані як діяльність, процес, операція, дія або перетворення. За поставленим завданням до даної роботи, досліджуваною функцією є синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд.

Стрілка входу (зліва) – це матеріал або дані, які перетворюються функцією, щоби створити вихідний результат. Для даного дослідження матеріалами є результати лазерного (хмара точок) та фотограмметричного знімання (цифрові знімки).

Стрілка управління (згори) – це правила, стратегії, процедури, стандарти, які визначають умови, необхідні функції, щоб зробити правильне перетворення. За проведеним аналізом нормативно-методичного забезпечення сфери моделювання будівель і споруд, управлінням для досліджуваного синтезу є Закони України, національні та міжнародні стандарти, а також технічні завдання.

Стрілка механізму (знизу) – це ресурси (персонал, техніка, обладнання), які підтримують виконання функції. Синтез даних для моделювання будівель і споруд

може бути виконаний за допомогою програмного забезпечення для обробки та порівняння хмар точок, для обробки цифрових знімків та для самого 3D-моделювання. Програмним забезпеченням для обробки та порівняння хмар точок можуть виступати такі програми як Cyclone та CloudWorx від Leica Geosystems, FARO Scene та PointSense, Autodesk ReCap, CloudCompare, RiscanPro, Bentley Pointools, Trimble Realworks та інші. Програмним забезпеченням для обробки цифрових знімків є Agisoft PhotoScan (Metashape), Bentley ContextCapture, RealityCapture, ReCap Photo, Pix4Dmapper, Trimble Inpho, 3DF Zephyr, Meshroom та інші [40].

Стрілка виходу (справа) – це дані чи матеріальні об'єкти, перетворені функцією. У нашому випадку результатом синтезу даних є щільна хмара точок та побудована на її підставі високоточна 3D-модель.



Рис. 2.5 Функціональна модель синтезу даних для моделювання будівель і споруд. Рівень А0

Для більш детального опису функції синтезу даних для моделювання будівель і споруд, блок А-0 був розбитий (декомпозований) на складові частини і представлений у вигляді докладнішої (дочірньої) діаграми рівня А1 (рис. 2.6).

Синтез даних передбачає реалізацію таких функцій: первинна обробка вхідних даних (хмара точок та цифрові знімки) за допомогою відповідного програмного забезпечення результатом якої виступають урівняні координати контрольних точок та уніфіковані хмари точок (блок А-1); синтез даних для одержання єдиної покращеної щільної хмари з використання відповідного програмного забезпечення та керуючись технічним завданням (блок А-2); моделювання, після якого на виході створюється покращена щільна хмара точок та високоточна 3D-модель (блок А-3). Для виконання останньої функції застосовується програмне забезпечення для 3D-моделювання: SketchUp, SolidWorks, Revit, AutoCAD, ArchiCAD, Rhino 3D, MicroStation, Agisoft PhotoScan тощо. Управлінням для даної функції є Закони України, національні та міжнародні стандарти та технічні завдання.

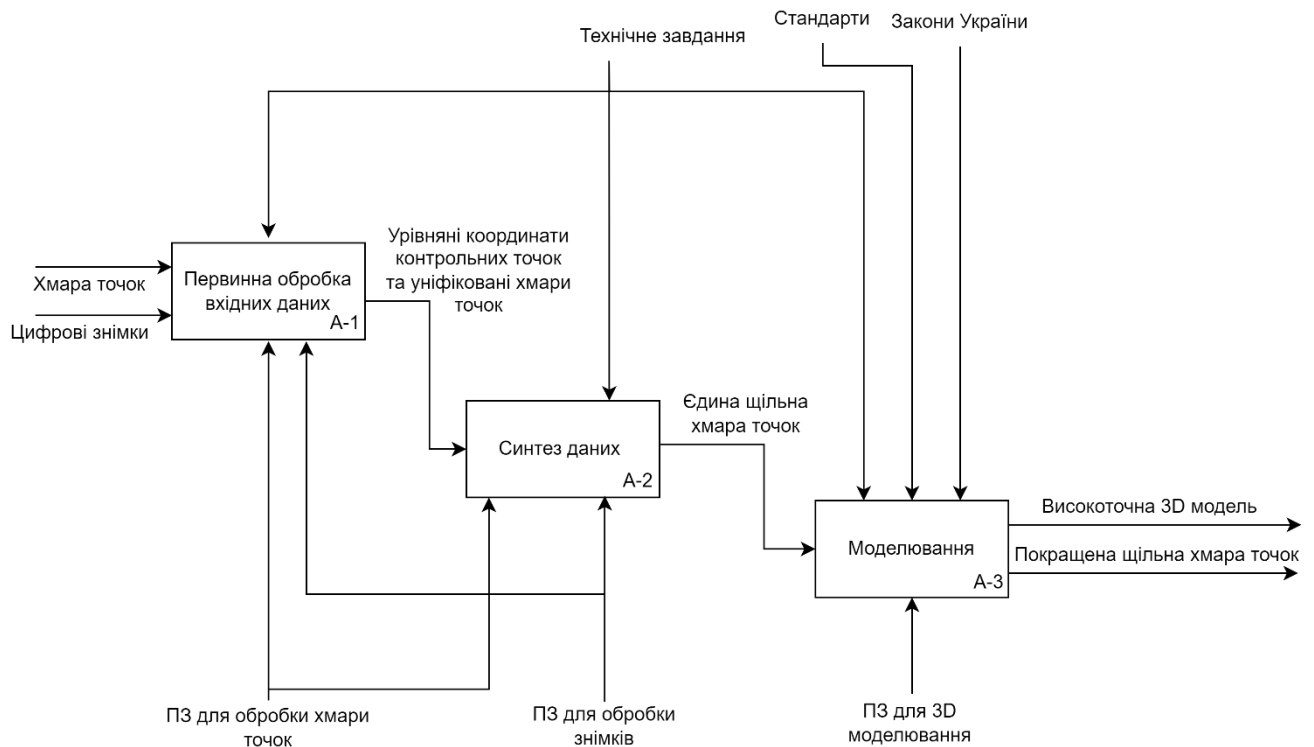


Рис. 2.6 Функціональна модель синтезу даних для моделювання будівель і споруд. Рівень А1

Блок-схема процесу синтезу даних для отримання високоточної хмари точок за даними лазерного сканування та фотограмметричного знімання (рис. 2.7) була розроблена, базуючись на схемі інтеграції об'єктного рівня інтегрування з основною ідеєю окремої обробки та інтерпретування даних (Рис. 2.1).

Хмара точок є повноцінною цифровою копією об'єкта і відображає всі його видимі елементи. Важливо одержати якісну високоточну хмару точок – щільну, прив'язану, без зайвих шумів і без прогалів, оскільки існує декілька програмних забезпечень, що надають можливість автоматичної побудови тривимірної полігональної моделі на підставі щільної хмари точок, а саме CloudCompare, PhotoMesh, Edgewise, PointFuse, ENVI LiDAR, INPHO Building Generator. Іншими словами, чим точнішою буде хмара точок, тим точнішим буде результат 3D-моделювання.

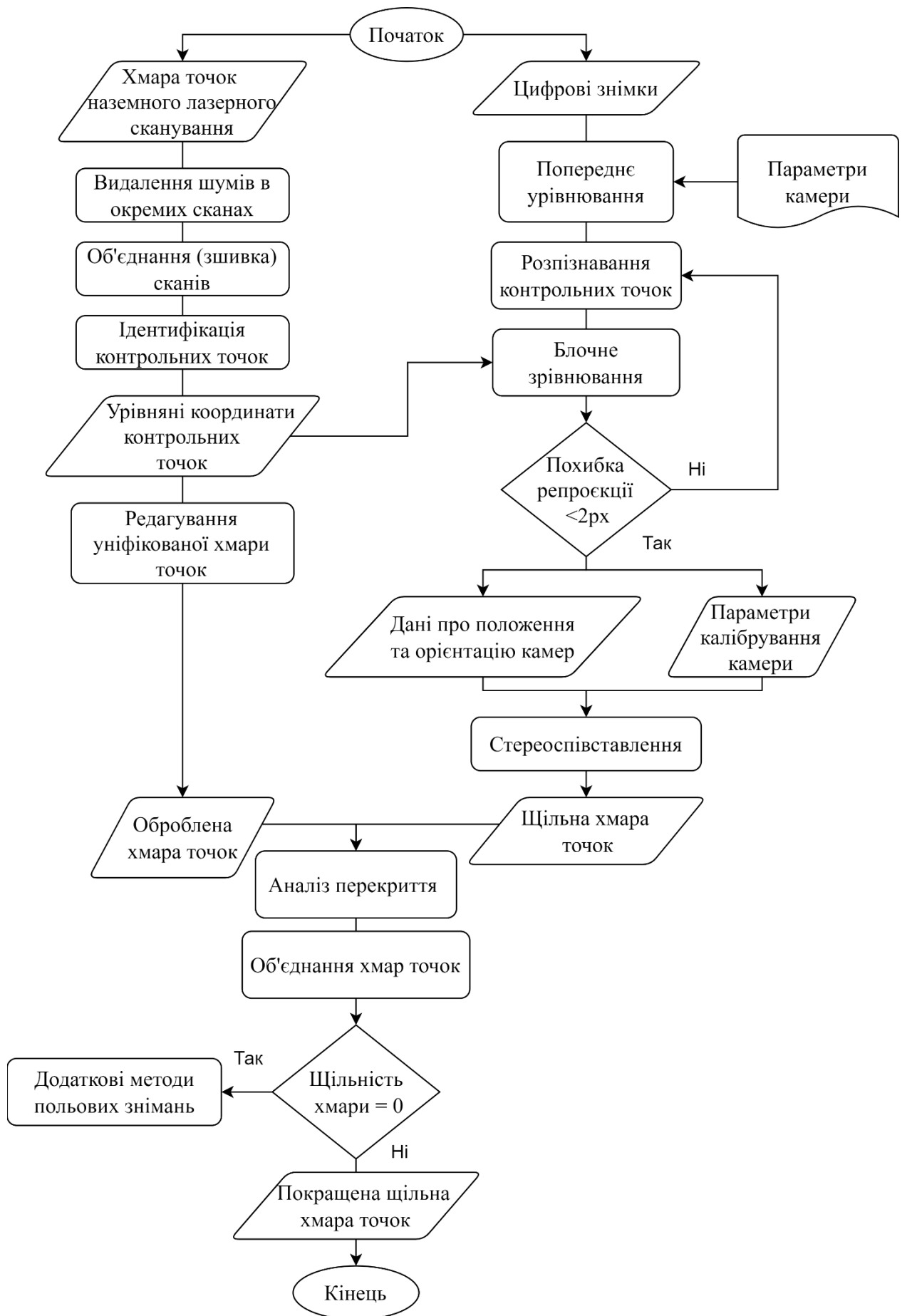


Рис. 2.7 Блок схема синтезу даних для отримання високоточної хмари точок

Камеральні роботи лазерного сканування складаються з первинного та вторинного опрацювання. Первинне опрацювання вміщує в собі всі процеси по створенню уніфікованої хмари точок об'єкту. Такими процесами є видалення шумів в окремих сканах, об'єднання (зшивка) сканів у єдину точкову модель, ідентифікація контрольних точок у наслідок якої одержуються урівняні координати цих точок, редагування уніфікованої хмари точок. Вторинним етапом роботи є створення інженерних креслень чи 3D-моделей.

Першим кроком обробки даних є видалення шуму, тому що під час роботи сканер фіксує все у вибраному полі зору, у тому числі й небажані об'єкти (люди, рослинність, обладнання тощо). Також шум може виникати через погані погодні умови, невідповідну поверхню відбиття та відстань сканера від об'єкта. Цей шум потрібно видалити перед наступним етапом, оскільки це може вплинути на точність реєстрації.

Другим кроком процесу сканування є реєстрація сканів. Як правило, під час знімання сканування виконується послідовно з декількох точок для повного покриття всієї поверхні об'єкту. При опрацюванні отриманих даних для створення єдиної точкової моделі необхідно виконати об'єднання (зшивку) окремих сканів у єдину точкову модель. Існує багато методів зшивки сканів із різним рівнем автоматизованості: знімання по методу «відомої станції», метод оберненої засічки, метод суміщення спільних точок, метод суміщення хмар точок [41]. Найчастіше використовується метод суміщення сканів за опорними точками, що відображаються на суміжних сканах, бо він не потребує використання інших геодезичних приладів. У якості таких точок можуть бути використані спеціальні призми, марки або світловідбиваючі пластини. Для кожного окремого сканування потрібно мінімум 3 опорних точки (марки). Під час процесу реєстрації сканів спільні точки та моделі різних хмар точок накладаються одна на одну у такий спосіб, щоби розходження між точками та моделями суміжних сканів були мінімальні. Результатом другого кроку є урівняні координати контрольних точок, що надалі будуть використанні при обробці цифрових знімків для приведення даних у єдину систему координат.

Однією з важливих процедур обробки хмар точок є її редагування, а саме проріджування даних, яке полягає в зменшенні кількості наявних точок зі збереженням важливої інформації (тобто без втрати суттєвих даних про об'єкт). Метою цієї процедури є зменшення надто великих вхідних обсягів даних для спрощення їхньої подальшої обробки або візуалізації [42].

Обробка цифрових знімків починається з попереднього вирівнювання знімків (фототриангуляція). Для цього потрібно мати інформацію щодо параметрів камери, таку як тип камери, розмір знімка (в пікселях), фокусну відстань та ін. В процесі виконання цієї операції програмне забезпечення виконує пошук характерних точок на фотографіях та відповідності між цими точками; визначає взаємне розташування площин знімків і спільних точок, й одночасно з цим - визначає параметри оптичної системи, найбільш відповідних знайденим параметрам; формує розріджену хмару точок об'єкта.

Синтез даних відбувається на етапі ідентифікації контрольних точок для узгодження систем координат. Тобто урівняні координати контрольних точок, що були отримані за результатами реєстрації сканів лазерного сканування, додаються до процесу обробки знімків як опорні точки, що використовуються для прив'язки знімків у геодезичній системі координат, тобто узгодження систем координат даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання.

Для пошуку спільних точок зазвичай використовується алгоритм блочного зрівнювання (Bundle Block Adjustment), в основі якого лежить метод найменших квадратів. Bundle Block Adjustment – це інтерпретація способу зв'язок, найсуворішого методу вирішення фототриангуляції. У розрахунок можуть бути включені координати точок прив'язки та проєкції маркерів на кадрі. Усім параметрам можна задати ваги – масштаб їхньої участі в розрахунку. Тобто такий алгоритм спочатку знаходить характерні точки на окремих фотографіях, а потім з урахуванням унікальних ідентифікаторів – дескрипторів – точки ототожнюються. Якщо точку розпізнано на двох і більше знімках, вона стає відповідністю. Результат автоматичного калібрування можна оцінити за похибкою положення на знімку – похибкою репроєкції, вона має становити менше, ніж 2 px (пікселя). Якщо похибка

є більшою, а координати контрольних точок правильними, це значить що розпізнавання марок було виконано неналежним чином і треба повторити цей процес.

Після закінчення операції вирівнювання знімків формуються дані про положення та орієнтацію камер, параметри калібрування камери та розріджена хмара точок.

Далі будується щільна хмара на основі стереоспівставлення. На даному етапі проводиться повторний пошук спільних точок і визначення їхніх координат. Завдяки тому, що параметри взаємного орієнтування знімків уже відомі, для кожної точки на одному знімку область, в якій може перебувати відповідна їй точка на іншому знімку, відома і порівняно невелика. Це надає змогу визначати загальні точки вірогідніше й суттєво підвищити їхню кількість і щільність. Причому положення цих точок уже буде уточнене за результатами оптимізації на основі координат опорних точок. На цьому етапі використовується алгоритм Semi-Global Matching – попиксельне порівняння пар зображень, що мають спільне перекриття. Суть алгоритму полягає в тому, що кожному пікселю лівого знімка стереопар знаходиться відповідний піксель на правому знімку. Кожен піксель лівого знімка порівнюється з набором пікселів правого знімка з відповідною ординатою. Далі для всього знімка формується паралелепіпед, де кожному пікселю відповідає одна «лінія» чарунок, а рядку пікселів на знімку відповідає один поздовжній переріз куба. Елементами куба є значення критерію відповідності, аналізуючи які знаходять мінімальні значення кожного пікселя. Крім того, аналізуються зв'язки між сусідніми пікселями у восьми напрямках навколо цього пікселя. У результаті для кожного пікселя лівого знімка знаходиться відповідне значення поздовжнього паралаксу i , як наслідок, просторові координати точок щільної моделі.

Часто після побудови щільної хмари точок виникає необхідність відфільтрувати зайві точки – небажані об'єкти або просто недостовірні точки, що з'явилися через шуми. Для цього є 3 способи: ручна фільтрація, фільтрація за кольором та за достовірністю [43].

Далі виконується остаточний синтез даних, тобто об'єднання щільних хмар точок лазерного сканування та фотограмметричного знімання за допомогою програмного забезпечення для порівняння хмар точок. Для того, щоби виконати такий синтез потрібно провести аналіз перекриття, що включає в себе аналіз видимості, аналіз щільності та аналіз шумів.

Навіть якщо об'єкт знімання сканувати декілька разів, враховуючи різні кути сканування, оклюзії – ситуації, у яких два об'єкта розташовані приблизно на одній лінії й один об'єкт, розташований ближче до сканера частково або повністю перекриває видимість іншого об'єкта – можуть перешкодити лазерному променю досягти найглибших закутків. Прогалини в хмарі точок також можуть бути спричинені низьким рівнем відбивної здатності об'єктів або просто неможливістю відсканувати деякі частини об'єктів. У таких прогалинах щільність хмари дорівнює нулю. Аналіз зон перекриття виконується для знаходження цих прогалин в одній з отриманих щільних хмар точок для заповнення інформацією з іншої хмари. Якщо ж і в іншій хмарі на місці цієї діри немає точок, то потрібно виконати додаткові методи польових знімачів.

Також при накладанні щільних хмар точок можна помітити шуми, що не були знайдені при попередній обробці вхідних даних.

Після об'єднання двох щільних хмар точок та проведеному аналізу перекриття можна одержати високоточну хмару точок – щільну, прив'язану, без зайвих шумів і без прогалин, що буде сприяти збільшенню точності результуючої 3D-моделі.

Тривимірна полігональна модель, що описує форму об'єкта, будується на підставі щільної хмари точок. Деталізація отриманої моделі, як правило, надмірна. Тому після тріангуляції проводиться фільтрація надлишкових полігонів – децимація. Модель будується тріангуляцією за точками щільної хмари і спрощенням отриманої поверхні у таких спосіб, щоби зберігалася максимальна деталізація при мінімально необхідній кількості граней (полігонів) моделі. Текстуризація виконується шляхом розфарбовування вершин полігональної моделі в реальні кольори [44].

Отже, при процесі синтезу взаємодія вхідних даних виконується на 2 етапах: на етапі ідентифікації контрольних точок для узгодження систем координат та на етапі об'єднання щільних хмар точок, коли хмари вже фактично зливаються в єдиний результат – покращену щільну хмару точок.

Модель діаграми потоків даних DFD (Data flow diagramming) – одна з найвідоміших систем класифікації злиття даних (рис. 2.8), що була запропонована В. Десаратою [45]. Ця класифікація визначає елементи процесу злиття даних, що задаються на основі вхідних (необроблених) даних та вихідних даних (деякого рішення) та сприяє встановленню зв'язків між даними та задачами. Проаналізований синтез даних для отримання високоточної хмари точок належить до рівня функції-функції (feature in-feature out). На цьому рівні як на вході, так і на виході процесу злиття даних розглядаються функції. Інакше кажучи, у процесі інтеграції даних обробляється набір функцій із метою покращення, уточнення або отримання нових функцій.

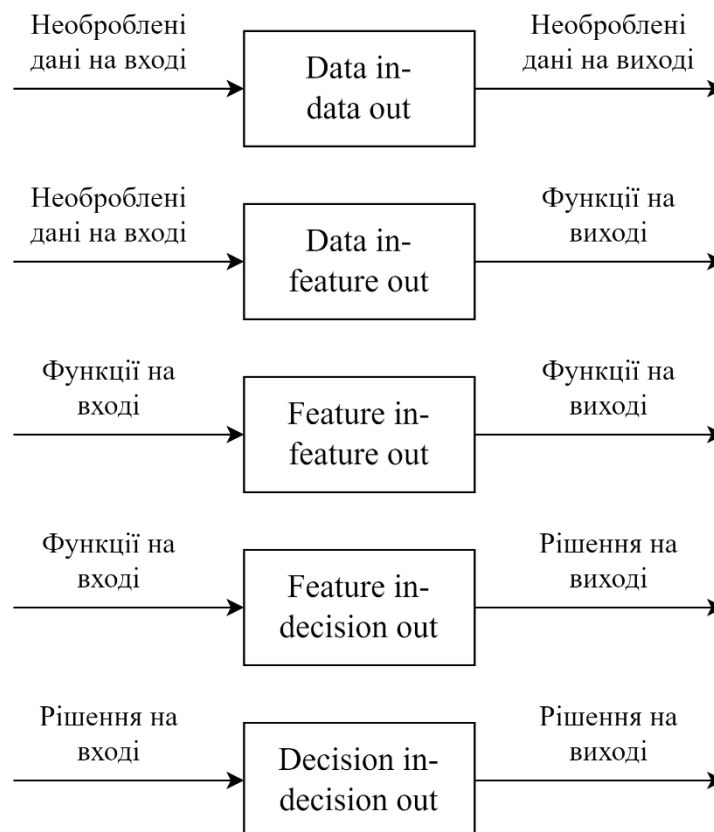


Рис. 2.8 Структура моделі DFD

2.3 Концептуальна модель бази даних моделювання будівель і споруд

База даних (БД) – сукупність даних, організованих згідно з концептуальним описом характеристик цих даних та зв'язків між відповідними об'єктами даних для підтримки однієї або декількох предметних областей (сфер).

Концептуальна модель – це високорівневий абстрактний опис концептів предметної сфери (понять, складу, структури та зв'язків) з використанням базових формалізмів обраного загального підходу до моделювання даних (зазвичай реляційного або об'єктно-реляційного) незалежно від фізичного середовища реалізації бази даних. У рамках бази даних це означає узагальнене зображення того, що буде зберігатися в БД і як сутності, що зберігаються, відносяться до інших сутностей і як поведуть себе в завершеній системі або БД.

Відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 19101 «Географічна інформація. Еталонна модель» для концептуального моделювання використовується уніфікована мова моделювання UML (Unified Modeling Language). На UML-діаграмах із використанням уніфікованих нотацій визначаються типи об'єктів, їхні атрибути та асоціації між об'єктами. Їх використовують, щоби скласти уявлення про об'єкти моделей та відношення (зв'язки) між ними [46].

Концептуальна модель бази даних моделювання будівель і споруд (Рис. 2.9) складається з таких основних класів об'єктів: реєстр вхідних даних, реєстр просторових моделей та реєстр результуючих моделей.

Запропонована концептуальна модель забезпечує структуроване збереження значних масивів геопросторових даних з різних джерел про об'єкт моделювання, що досліджується.

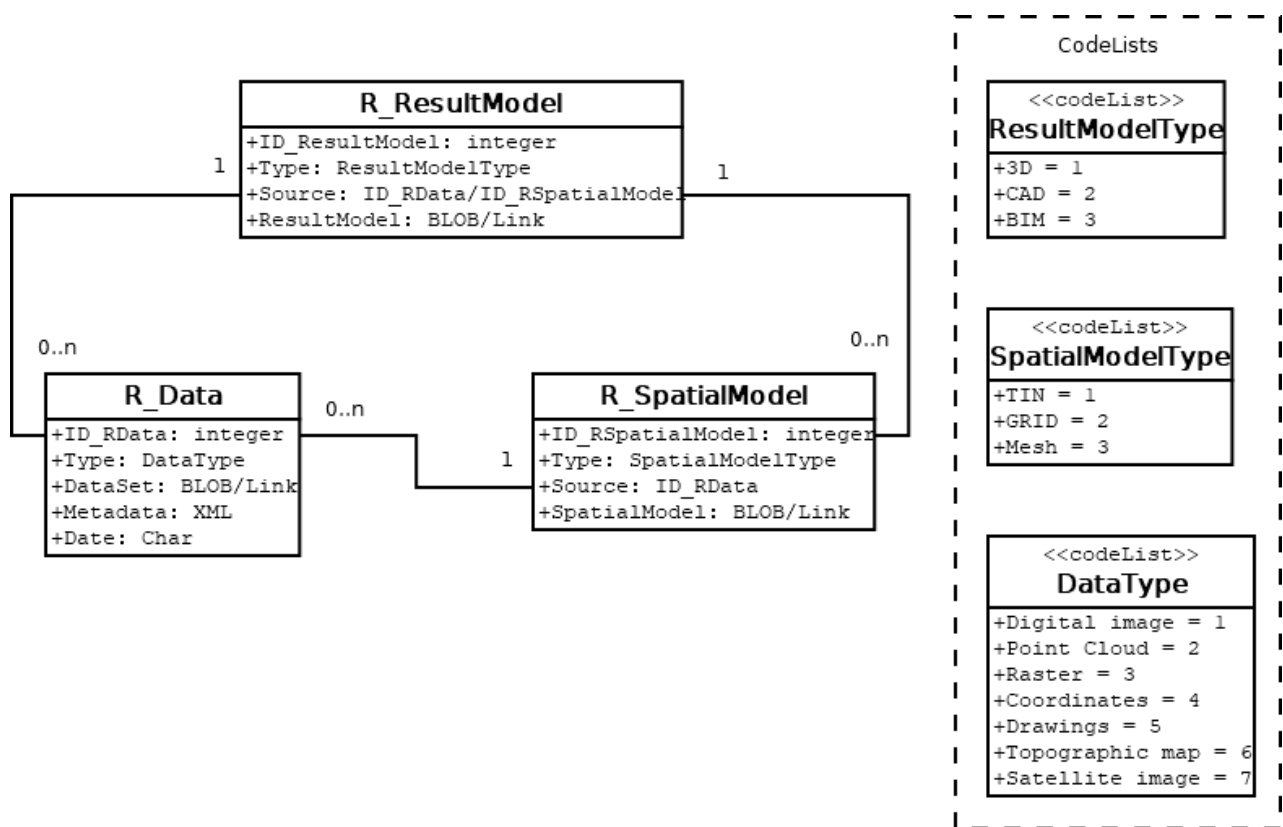


Рис. 2.9 Концептуальна модель бази даних моделювання будівель і споруд

1. **Реєстр вхідних даних (R_Data)** – первинним ключем є *ID_RData*. Цей клас має тип зв'язку асоціація із сутностями просторових та результуючих моделей. Має кратність зв'язку багато до одного – тобто одне або декілька джерел вхідних даних можуть використовуватися для створення просторових або/та результуючих моделей. Має такі атрибути:

ID_RData – ідентифікатор вхідних даних, тип даних: Integer (Ціле число);

Type – відомості про тип, зовнішнім ключем зв'язаний із класифікатором типів вхідних даних;

DataSet – масив даних, тип даних: BLOB або Link;

Metadata – метадані вхідних даних, тип даних: XML;

Date – дата отримання даних, тип: Char.

2. **Просторові моделі (SpatialModel)** – первинним ключем є *ID_SpatialModel*. Цей клас має тип зв'язку асоціація із реєстром результуючих моделей та кратністю зв'язку багато до одного – тобто одна або декілька просторових моделей можуть використовуватися для створення 3D/CAD/BIM-моделей. Має такі атрибути:

ID_RSpatialModel – ідентифікатор просторових моделей, тип даних: Integer;

Type – відомості про тип, зовнішнім ключем зв'язаний із класифікатором типів просторових моделей;

Source – відомості про вхідні дані, з якими зв'язаний зовнішнім ключем *ID_Data* з реєстром вхідних даних;

SpatialModel – масив даних, тип даних: BLOB або Link.

3. Результуючі моделі (ResultModel) – первинним ключем є *ID_ResultModel*.

Має такі атрибути:

ID_ResultModel – ідентифікатор результуючих моделей, тип даних: Integer;

Type – відомості про тип, зовнішнім ключем зв'язаний із класифікатором типів результуючих моделей;

Source – відомості про вхідні дані з якими зв'язаний зовнішнім ключем *ID_Data* з реєстром вхідних даних або *ID_RSpatialModel* з реєстром просторових моделей;

ResultModel – масив даних, тип даних: BLOB або Link.

Також були визначені і відповідні класифікатори (CodeLists):

1) Типи вхідних даних (DataType), а саме:

- Цифрові знімки;
- Хмари точок;
- Растрові зображення;
- Координати;
- Інженерні креслення;
- Топографічні плани й карти;
- Дані ДЗЗ.

2) Типи просторових моделей (SpatialModelType) у складі TIN, GRID та Mesh моделей.

3) Типи результуючих моделей (ResultModelType), такі як 3D/CAD/BIM-моделі.

Дані лазерного сканування на території міст або регіонів можуть містити в собі мільярди точок. Зберігання їх у базі даних в класичному вигляді як тип

геометрії «точка» представляється можливим, але дуже ресурсовитратним завданням. По-перше, величезна кількість записів в таблиці, що збільшує час обробки даних. По-друге, великий обсяг пам'яті, зайнятий сховищем.

Для вирішення цих проблем існує технологія зберігання даних лідарної зйомки в PostgreSQL /PostGIS з використанням вбудованого розширення pointcloud і імпорту таких даних в базу за допомогою бібліотеки PDAL (Point Data Abstract Library).

Об'єктами в pointcloud для PostGIS є точки (PcPoint) – базовий об'єкт, і блоки (PcPatch) – об'єднані в групи PcPoint. Структура PcPoint описується в XML схемі формату, що зберігається в таблиці pointcloud_formats та виді (View) pointcloud_columns.

Бібліотеки розширення PostgreSQL для лідарних даних:

- CREATE EXTENSION postgis;
- CREATE EXTENSION pointcloud;
- CREATE EXTENSION pointcloud_postgis.

Розширення pointcloud_postgis додає функції, які дозволяють виконувати обробку хмари точок, перетворювати PcPoint і PcPatch на геометрію та здійснювати просторову фільтрацію даних.

Імпорт даних відбувається за допомогою бібліотеки PDAL. PDAL це бібліотека для маніпулювання даними хмари точок. Вона дуже схожа на бібліотеку GDAL, яка обробляє растрові і векторні дані. На додаток до коду бібліотеки, PDAL надає набір додатків командного рядка, які користувачі можуть зручно використовувати для обробки хмари точок [47].

Хоча після створення таблиця і складається з двох полів ID і PA, але в полі PA закодована інформація про точки: X, Y, Z, інтенсивність та значення червоного, зеленого і синього кольорів.

Технологічна схема завантаження даних лазерного сканування в середовище PostgreSQL/PostGIS подана на рисунку 2.10 [48].

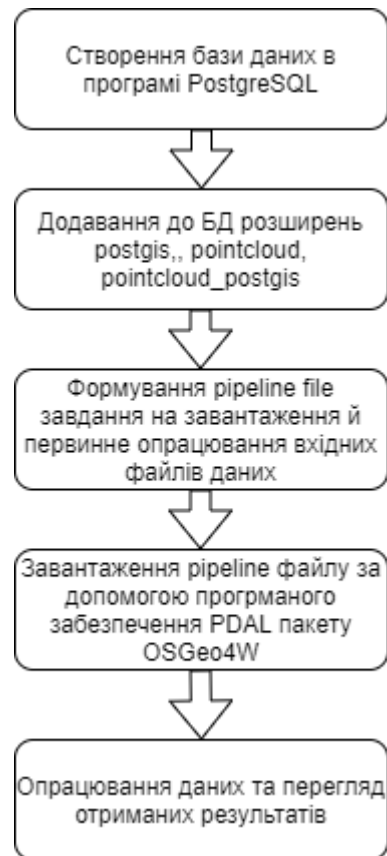


Рис. 2.10 Технологічна схема завантаження даних лазерного сканування в середовище PostgreSQL

2.4 Висновок до другого розділу

Високоточне тривимірне моделювання архітектурних будівель і споруд вимагає поєднання різнорідних за структурою, типами, джерелами даних. Теорія синтезу або злиття даних є основою для вирішення прикладного завдання інтегрування результатів виконавчих знімків при моделюванні інженерних об'єктів. Фотограмметричне знімання та лазерне сканування є двома типовими методами збору даних, що дозволяють отримати високоточні вхідні данні геометрії об'єктів, а також деяку атрибутивну інформацію, як наприклад, тип покриття. Інтегрування даних наземної фотограмметрії та лазерного сканування може мати різні рівні залежно від бажаного кінцевого результату: об'єктний рівень інтегрування; фотограмметрія + лазерне сканування; лазерне сканування + фотограмметрія; глибоко інтегрована схема лазерного сканування і фотограмметрії. В роботі для отримання високоточної хмари точок за даними лазерного сканування та фотограмметричного знімання розроблено методику синтезу на основі схеми інтеграції об'єктного рівня інтегрування з основною ідеєю окремої обробки та інтерпретування даних.

Функціональна модель синтезу даних для моделювання будівель і споруд включає такі загальні етапи: первинна обробка вхідних даних, синтез даних та моделювання. Процес синтезу даних для отримання високоточної хмари точок передбачає реалізацію наступних функцій: отримання вхідних даних; їх окрема обробка за допомогою відповідного програмного забезпечення, результатом якої є урівняні координати контрольних точок та уніфіковані хмари точок; синтез даних для приведення даних у єдину систему координат; подальша окрема обробка даних для отримання щільних хмар точок за вхідними даними; аналіз перекриття щільних хмар точок; об'єднання хмар для одержання покращеної щільної хмари для подальшого моделювання.

Запропонована концептуальна модель бази даних моделювання архітектурних будівель і споруд з використанням уніфікованої мови моделювання UML забезпечує структуроване збереження значних масивів геопросторових даних

про об'єкт моделювання. БД складається з таких основних класів об'єктів: реєстр вхідних даних, реєстр просторових моделей та реєстр результуючих моделей, а також відповідні їм класифікатори.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ СИНТЕЗУ ДАНИХ ДЛЯ

ВИСОКОТОЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Кузнцова А.М.			Розробка методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд	Літ.	Арк.	Аркушів
Консульт.		Горковчук Д.В.					54	77
Керівник		Горковчук Ю.В.				54		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О.				ІПО КНУБА, група ГІСТ-61м		

3.1 Опис об'єкта дослідження та аналіз вихідних даних

Об'єктом моделювання виступає форт Астерштейн, що входив до пруської фортеці Кобленц. Він був побудований у 1820-х роках, але частково зрівняний із землею в 1920-х роках. Редуїт залишився збереженим до цього часу (Рис. 3.1).

Двоповерховий зміцнений казематами редуїт розташований в задній частині форту. Він складається з круглої будівлі – три чверті кола (290°) – і двох укріплень. Круговий план поверху редуїту пояснюється необхідністю мати можливість боронити будівлю, яка призначена як відступ за стіною форту, у всіх напрямках. На фасадах містяться багато гладко оштукатурених арочних ніш, пілястрів та архітрів. На передній частині редуїту видно артилерійські та гвинтівкові отвори.

Форт Астерштейн є охоронюваною пам'яткою культури згідно із Законом про охорону пам'яток (Denkmalschutzgesetz) та внесений до списку пам'яток землі Рейнланд-Пфальц [49].



Рис. 3.1 Редуїт форту Астерштейн

Для виконання магістерської роботи було отримано уніфіковану хмару точок (рис. 3.2) з файловим розширенням .pts – простий текстовий файл, який використовується для зберігання даних точок зі сканерів LIDAR. У першому рядку вказано нумерацію точок. Кожен наступний рядок має 7 значень: перші три – координати (X, Y, Z) точки, четвертий – значення інтенсивності, а останні три – параметри кольору (Red, Green, Blue). Значення (R, G, B) коливаються від 0 до 255. Значення інтенсивності – це потужність відбитого поверхнею лазерного імпульсу в даній точці, де 255 – дуже сильне відбиття.

Кількість точок в отриманому файлі – 824 мільйона (824 578 585), розмір файлу – 24.7 ГБ. Щільність хмари точок – 5 мм.

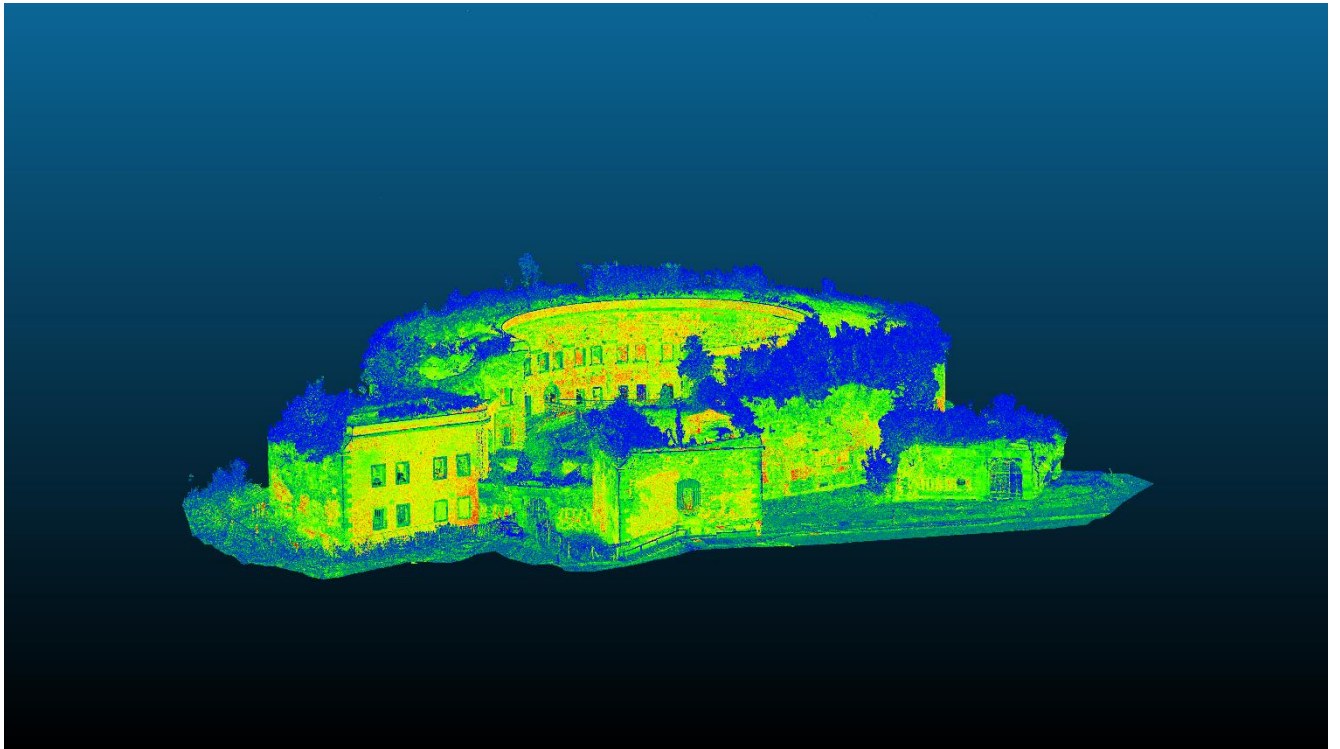


Рис. 3.2 Хмара точок об'єкту моделювання в програмі CloudCompare

Лазерне сканування було виконано високоточним лазерним сканером «ScanStation P40» швейцарської фірми Leica. Його основні технічні параметри наведені нижче:

- діапазон вимірювання відстаней – 0,4-270 м;
- точність вимірювання відстані – 1.2 мм + 10 ppm;
- кутова точність – 8";

- точність виміру марки – 2 мм на 50 м;
- 3D-положення – 3 мм на 50 м;
- кут сканування (гориз./верт.) – 360°/270°;
- частота сканування – до 1 000 000 точок за секунду [50].

Фотограмметричне знімання було виконано цифровою камерою Sony Alpha SLT-A77V з об'єктивом із фокусною віддаллю 16 мм. Основні технічні параметри дзеркальної камери:

- Максимальний розмір кадру; кадрів/сек. (fps) – 1920x1080 (60fps);
- Кількість мегапікселів – 24,3;
- Максимальний розмір кадру – 6000x4000 [51];

Як вихідні дані було отримано 469 цифрових знімків (183 внутрішньої та 286 фасадної частини) у форматі ARW із розмірами зображення 6000x4000 пікселів (Рис. 3.3). Формат ARW (Sony Alpha Raw) – ґрунтується на популярному форматі TIFF його специфікації, містить необроблені стиснені дані зображення, відправлені безпосередньо з матриці камери після зйомки. У таких файлах міститься повна інформація про збережений сигнал.



Рис. 3.3 Приклад вхідних даних фотограмметричного знімання

3.2 Практична реалізація методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд

Вихідними даними є уніфікована хмара точок - результат первинного етапу об'єднання окремих сканів. Контрольні точки, що використовуються для приведення вхідних даних у єдину систему координат, були обрані як характерні точки місцевості – 12 точок у внутрішній частині об'єкту моделювання та 8 точок із зовнішньої сторони споруди. Координати характерних точок – X, Y, Z – збережено у файлі формату .csv. Приклад двох обраних точок (перша та друга) внутрішньої сторони форту наведений на рис. 3.4.



Рис. 3.4 Обрані характерні точки на внутрішній частині фасаду форту

Для оптимізації використання хмари точок та досягнення однакової щільності точок виконано декілька етапів її редагування, а саме прорідження та видалення шумів і нерелевантних даних в вільному програмному забезпеченні CloudCompare. У результаті виконання цих процесів отримана редагована хмара з кількістю точок, що зменшилася з 824 до 572 мільйонів (572 193 155) точок (рис. 3.5).

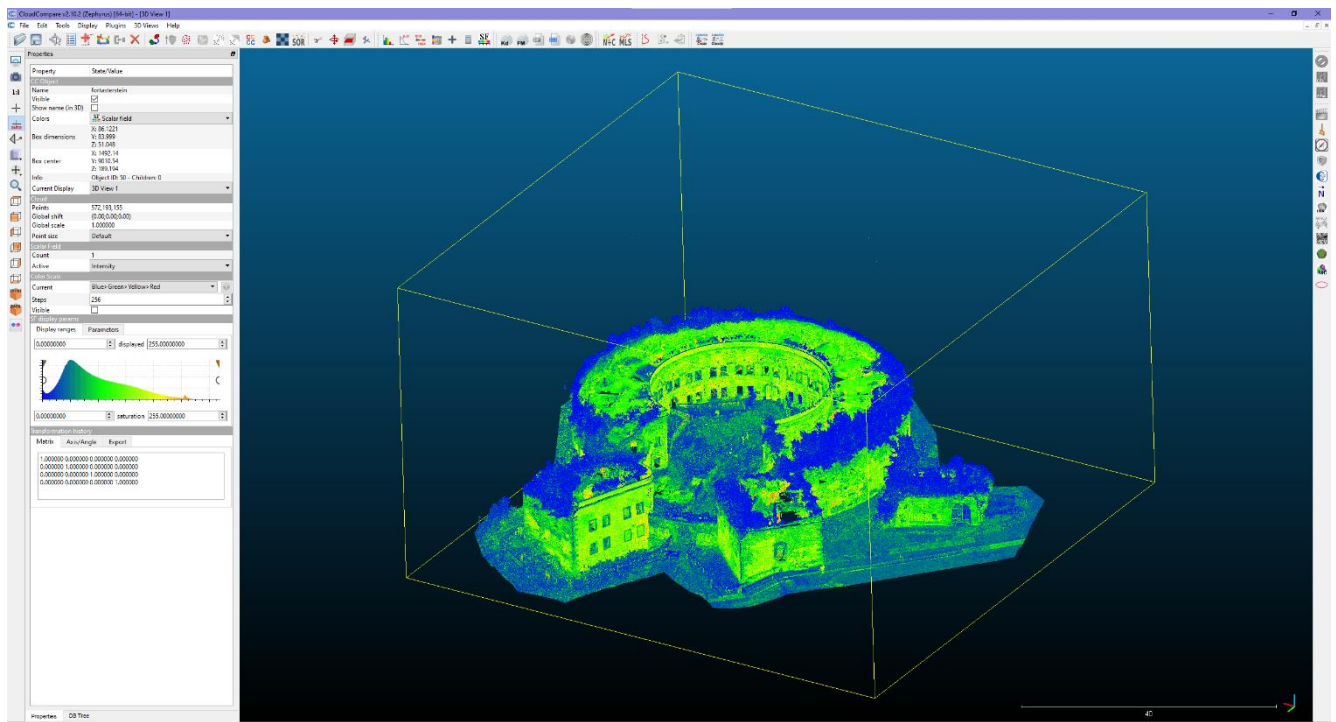


Рис. 3.5 Розріджена хмара точок лазерного сканування

Вхідні дані фотограмметричного знімання потребували попередньої обробки, а саме балансування кольорів, що виконано у програмі Adobe Photoshop Lightroom, через різний час виконання знімачь (одна частина знімків зроблена зранку, інша частина – декількома годинами пізніше). Окрім того, потребувалася конвертація знімків з формату .ARW до .JPEG для їхньої подальшої обробки у спеціальній програмі для роботи з даними фотокамер Sony – Sony Imaging Edge [52].

Обробка цифрових знімків проведена у програмному забезпеченні Agisoft PhotoScan (Metashape). Після завантаження у ПЗ PhotoScan цифрові знімки є «NA» (Not Aligned), тобто не вирівняні. Це означає, що параметри зовнішнього орієнтування знімків ще є невідомими. Далі проведена автоматична оцінка знімків, що відображається як числове значення від 0 до 1 та характеризує відносну якість знімків, де 0 – знімки незадовільної якості, а 1 – гарної якості. Цей етап виконаний з огляду на те, що використання в проєкті знімків поганої якості (змазаних, розфокусованих) збільшує час обробки та зменшує надійність результатів. Зазвичай не використовуються знімки з показником якості менше 0,5. Як результат, оцінка точності показала, що більшість знімків знаходиться в задовільній якості:

- 0,57-0,7 – 23 знімка; 0,7-0,8 – 77 знімка; 0,8-0,91 – 186 знімка зовнішньої фасадної частини;
- 0,49 – 3; 0,52-0,6 – 23 знімка; 0,6-0,7 – 112 знімка; 0,7-0,77 – 45 знімка внутрішньої фасадної частини.

Операція вирівнювання цифрових знімків була виконана з використанням таких параметрів:

1. Точність – дуже висока. При встановленні такого параметра застосовуються знімки оригінального розміру, збільшені в 4 рази.
2. Максимальна кількість точок – 40000, максимальна кількість відповідностей – 4000. Максимальна межа кількості характерних точок та відповідностей на кожній фотографії, що приймаються до уваги на поточній стадії обробки.

Як результат блочного зрівнювання відображено дані про положення та орієнтацію камери, параметри її калібрування та розріджена хмара точок (рис. 3.6).

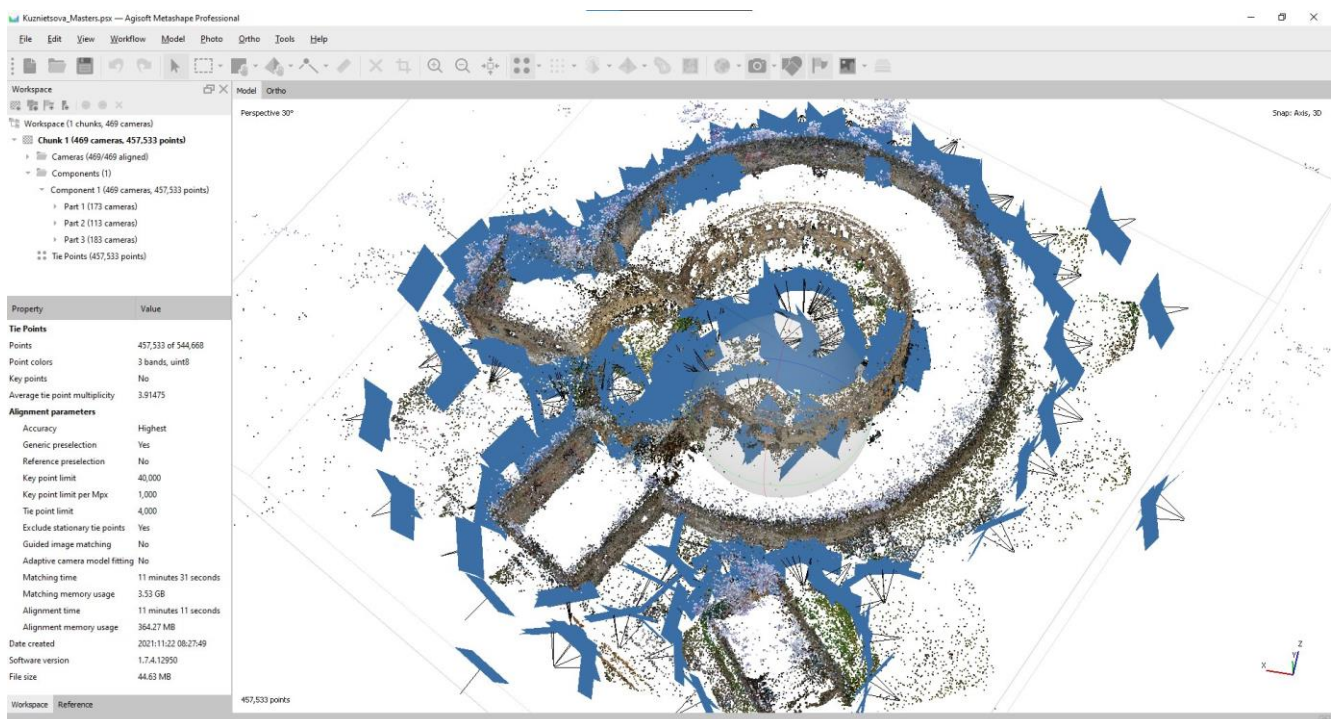


Рис. 3.6 Результат виконання етапу блочного зрівнювання

Наступним етапом є прив'язка поточних результатів фотограмметрії до координатної системи лазерного сканера на основі координат опорних точок, виміряних із хмари точок лазерного сканування, та їхнього подальшого

розпізнавання на знімках. Після оновлення інформації про прив'язку, програмне забезпечення Metashape в автоматичному режимі перераховує положення камер з урахуванням координат опорних точок та подає значення похибок положення на знімках Error (pix) та на місцевості Error (m) у таблиці прив'язки (рис. 3.7). Можна зробити висновок, що прив'язка виконано задовільно, оскільки значення середньоквадратичної похибки репроекції Error (pix) не перевищує 2 pix, а похибка положення на місцевості Error (m) не перевищує точності методу їхнього визначення, а саме 1-2 см.

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
✓ 1	1493.229300	9008.097300	174.338500	0.005000	0.004402	16	0.824
✓ 2	1495.493100	9010.362500	180.644400	0.005000	0.020456	11	1.971
✓ 3	1492.140300	8994.667900	173.749000	0.005000	0.006644	16	0.985
✓ 4	1492.118900	8994.614000	177.527500	0.005000	0.019958	25	1.822
✓ 5	1502.810000	8986.257700	173.808000	0.005000	0.004563	27	1.030
✓ 6	1502.777600	8986.240800	177.550900	0.005000	0.004483	25	0.832
✓ 7	1518.599200	8994.955200	173.762000	0.005000	0.003775	16	0.974
✓ 8	1518.609900	8994.973200	177.506600	0.005000	0.014597	15	1.832
✓ 9	1519.408800	9003.160500	173.783900	0.005000	0.006962	15	1.622
✓ 10	1519.409300	9003.179600	177.516400	0.005000	0.004438	15	1.168
✓ 11	1512.106400	9012.995700	173.294800	0.005000	0.009630	14	1.460
✓ 12	1510.358600	9013.458200	180.599100	0.005000	0.008565	9	1.883
✓ 21	1519.312000	9022.816000	172.763000	0.005000	0.031805	8	1.065
✓ 22	1531.597000	9003.222000	176.212000	0.005000	0.021844	20	1.450
✓ 23	1516.856000	8976.629000	175.327000	0.005000	0.013502	14	1.894
✓ 24	1510.029000	8974.381000	175.919000	0.005000	0.008084	13	0.965
✓ 25	1488.284000	8980.136000	175.761000	0.005000	0.010868	7	0.932
✓ 26	1480.636000	8990.855000	175.185000	0.005000	0.017022	11	1.017
✓ 27	1478.986000	8998.275000	171.273000	0.005000	0.004585	10	1.620
✓ 28	1483.019000	9014.445000	175.029000	0.005000	0.032127	17	1.223
✓ point ...	0.000000	0.000000	0.000000	0.005000		0	0.000
Total Error							
Control points					0.015133		1.367
Check points							

Рис. 3.7 Значення похибок Error положення на знімках (pix) та на місцевості (m)

Після завершення попередніх етапів побудована щільна хмара точок (рис. 3.8) на основі алгоритму стереоспівставлення з вибраними параметрами:

1. Якість – висока, тобто використання знімків оригінального розміру.

2. Фільтрація карт глибин – м'яка. Рекомендовано для складних, з численними дрібними деталями, об'єктів.

3. Розрахування кольорів точок, тобто розфарбування хмари точок у реальні кольори з фотографій.

4. Розрахування достовірності точок, тобто підрахування кількості карт глибин, що були використані для обчислення координат кожної точки.

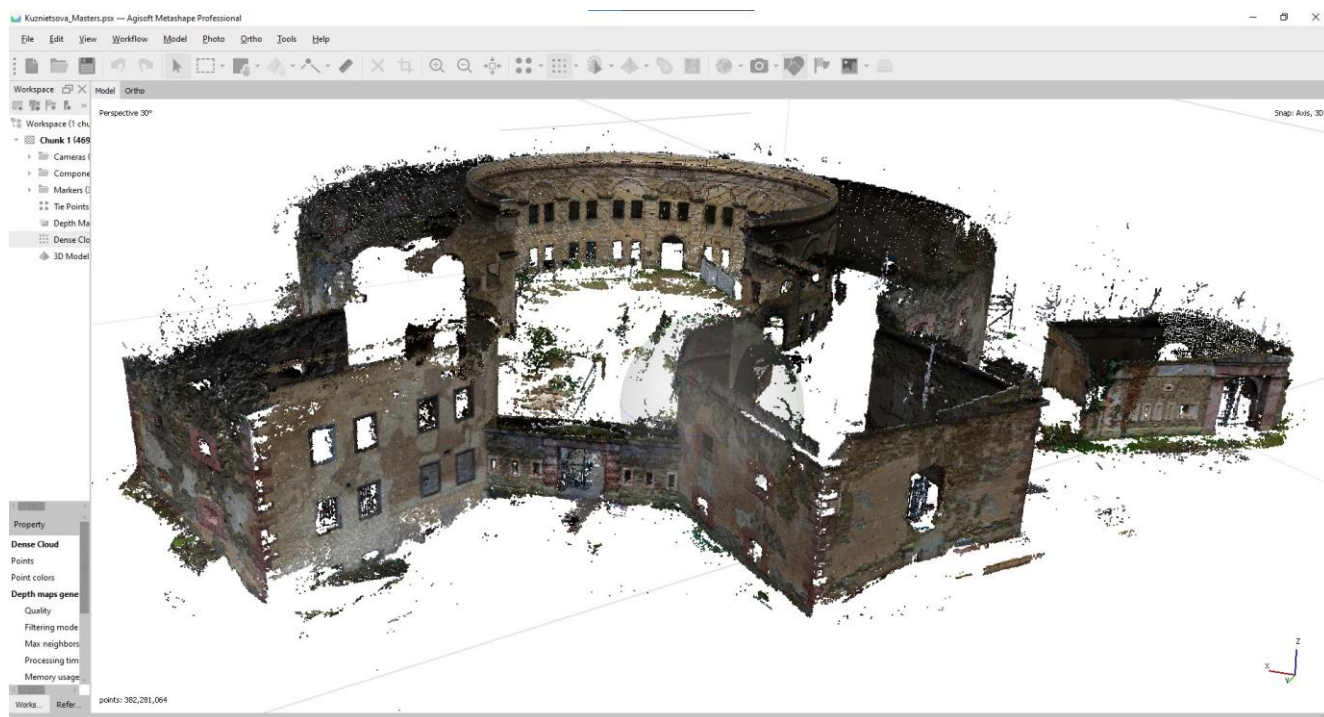


Рис. 3.8 Результат побудови щільної хмари точок

Далі щільні хмари точок фотограмметричного знімання та лазерного сканування експортовано до CloudCompare для подальшого аналізу перекриття. Аналіз щільності хмар точок відображається як шкала кольорів від зеленого до синього (рис. 3.9), де зелений – це область з високою щільністю точок, а синій – з низькою.

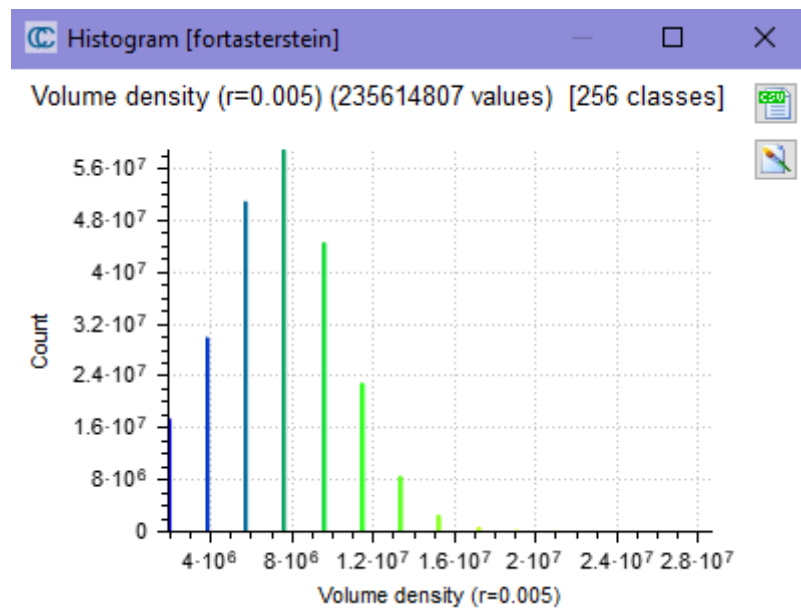
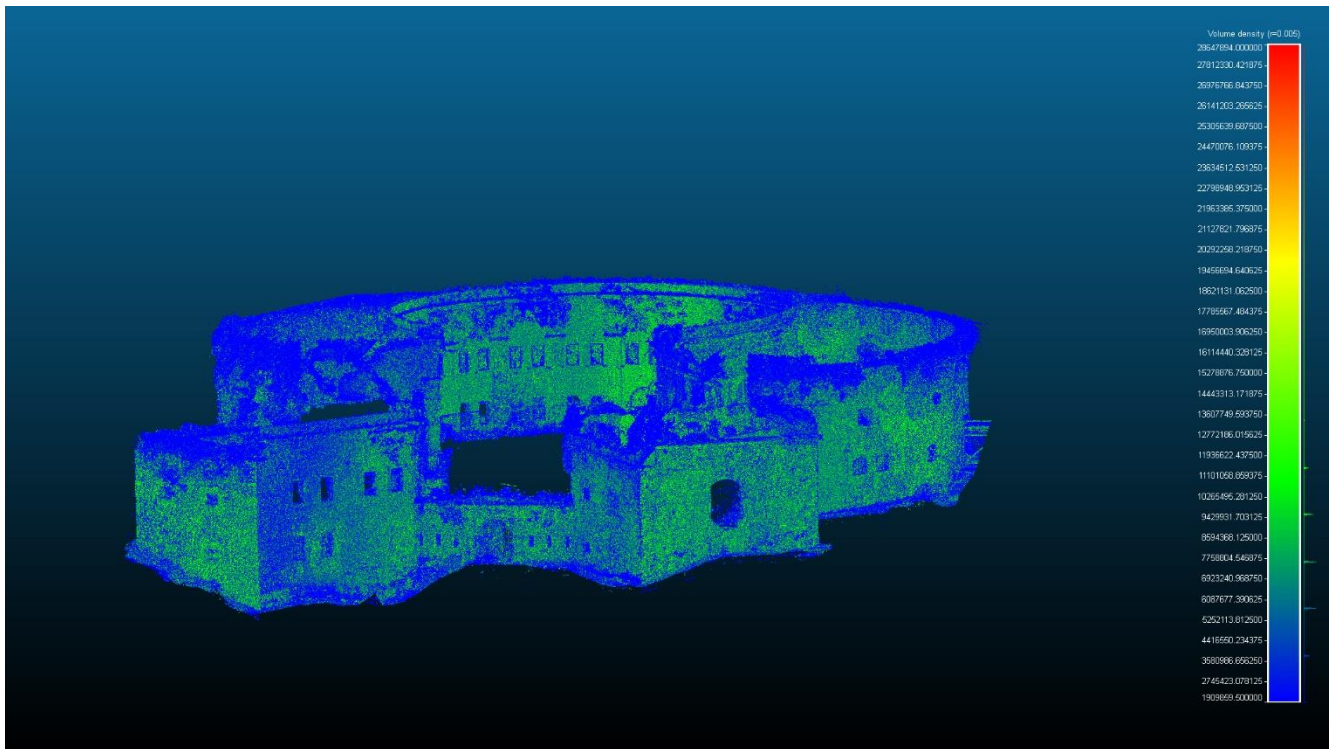


Рис. 3.9 Аналіз щільності хмар точок; де r - радіус сфери обчислення

У CloudCompare щільність точок оцінюється шляхом підрахунку для кожної точки кількості сусідів всередині сфери радіуса r . Її можна виразити як об'ємну щільність, а саме кількість сусідів, поділену на об'єм сфери (формула 3.1).

$$D = \frac{N}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad (3.1)$$

де D – щільність точок;

N – кількість сусідів;

r – радіус сфери.

Гістограма є поданням кількості точок, які мають однакову щільність. Враховуючи сферу радіусом 5 мм, об'ємна щільність між двома хмарами точок варіюється від 0 до $1,7 \cdot 10^7$ точок/м³ і можна сказати, що більше 230 млн точок мають об'ємну щільність 115 млн точок/м³.

Відкидаючи перші 2 стовбці гістограми, де щільність є низькою, можна зробити висновок, що зона перекриття між двома хмарами складає 80%, що свідчить про те, що інші 20% поверхні об'єкта не мали покриття на одному з джерел вихідних даних.

Хмара точок лазерного сканування перефарбована у реальні кольори за допомогою інтерполяції кольору з хмари точок фотограмметрії – для кожної точки вибраної хмари була знайдена найближча точка в іншій хмарі та був взятий її колір.

Наступним етапом є об'єднання двох хмар точок у єдину покращену хмару (рис. 3.10). Кількість точок у створеній об'єднаній хмарі – 230 млн точок (234 118 204).

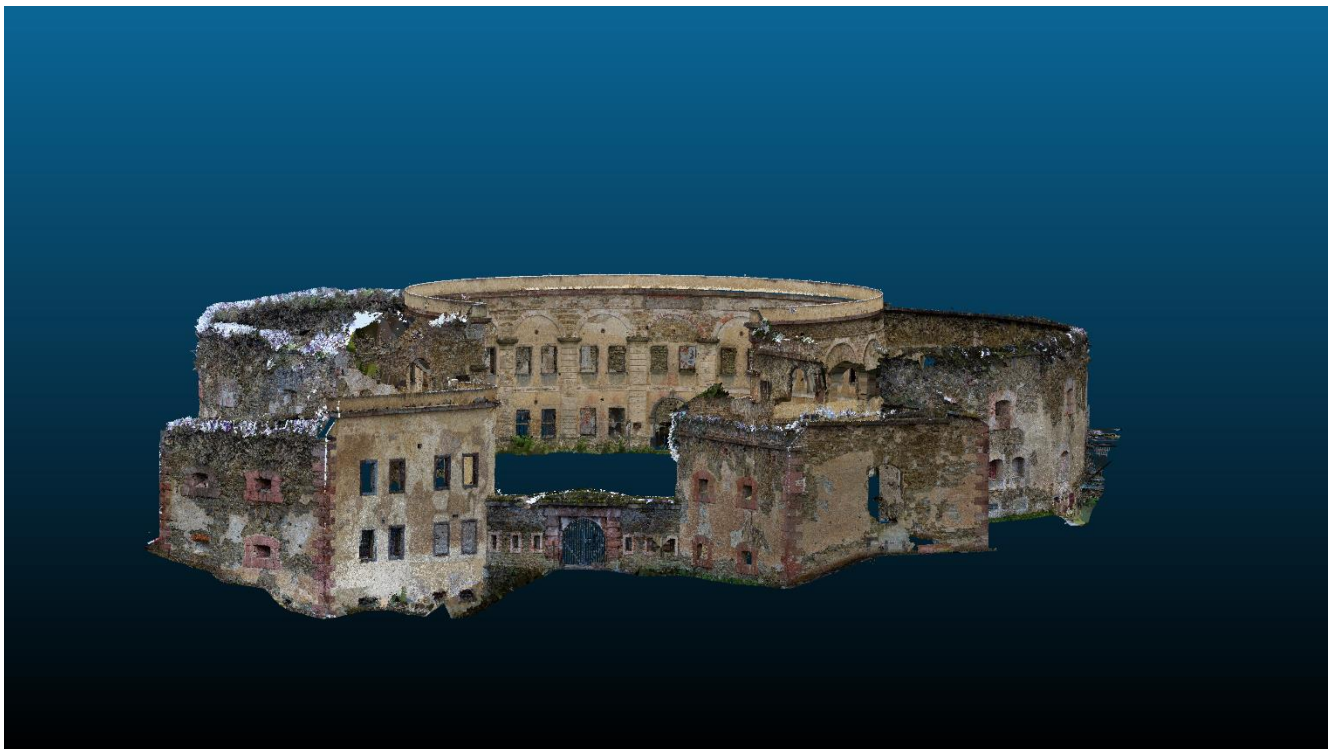


Рис. 3.10 Об'єднана щільна хмара точок представлена у реальних кольорах

Покращена щільна хмара точок є основою для побудови високоточної полігональної 3D-моделі у PhotoScan з високою максимальною кількістю полігонів

та довільним типом поверхні (рис. 3.11). Текстуризація моделі була виконана в загальному режимі параметризації з поетапним режимом змішування «мозаїка» (рис. 3.12). Розмір та кількість текстур – 4096x3.



Рис. 3.11 Високоточна полігональна 3D-модель внутрішнього та зовнішнього фасадів форту Астерштейн



Рис. 3.12 Внутрішній фасад форту з накладеними текстурами

3.3 Висновок до третього розділу

У третьому розділі проведено апробацію запропонованої функціональної моделі синтезу даних для моделювання будівель і споруд та виконано практичну реалізацію схеми синтезу даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання для отримання покращеної високоточної хмари точок, а саме виконано:

- опис об'єкта дослідження та аналіз вхідних даних;
- редагування хмари точок лазерного сканування (прорідження та видалення шумів) та визначення координат контрольних точок;
- попередня обробка даних наземного знімання та вирівнювання цифрових знімків;
- прив'язка даних фотограмметрії до координатної системи лазерного сканера на основі координат опорних точок;
- побудова щільної хмари точок за результатами фотограмметричного знімання;
- аналіз перекриття хмар точок за результатами лазерного сканування та фотограмметричного знімання;
- об'єднання двох хмар точок у єдину покращену хмару та побудова високоточної полігональної 3D-моделі на її основі.

Проведений аналіз результатів виявив, що зона перекриття між двома хмарами склала 80%, що свідчить про те, що інші 20% поверхні об'єкта не мали покриття на одному з джерел вихідних даних. У результаті інтеграції даних була створена покращена щільна хмара точок у реальних кольорах з кількістю точок 230 млн точок, що забезпечило подальше моделювання об'єкта з точністю до 1 мм.

РОЗДІЛ 4
ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИСОКОТОЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Кузнцова А.М.			Розробка методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд	Літ.	Арк.	Аркушів
							67	77
Керівник		Горковчук Ю.В				67		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О				ІПО КНУБА, група ГІСТ-61м		

Для оцінки точності виконано порівняння між покращеною хмарою точок та первинними хмарами точок лазерного сканування та фотограмметрії. Обчислено стандартне відхилення та середнє значення відхилення між хмарами точок інструментом обчислення відстані «хмара-хмара», що використовує алгоритм методу найближчого сусіда (для кожної точки хмари, що порівнюється, ПЗ CloudCompare в автоматичному режимі шукає найближчу точку в еталонній хмарі та обчислює евклідову відстань між ними). CloudCompare може розділити обчислені відстані за 3 основними вимірами (X, Y і Z), тобто створює ще 3 скалярні поля для кожної осі (Рис. 4.1). Також можна відобразити стандартне відхилення та середнє значення, обчисливши статистичні параметри з використанням нормального розподілу. За результатами обчислення відстані між хмарами точок було створено таблицю відхилення між хмарами точок (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 Відхилення між хмарами точок

Хмари точок	Вісь X, м	Вісь Y, м	Вісь Z, м	По всій хмарі, м
Покращена хмара точок vs хмара точок лазерного сканування	Стандартне відхилення			
	0,001251	0,000721	0,001340	0,001968
	Середнє значення			
	-0,000004	-0,000004	0,000002	0,000078
Покращена хмара точок vs хмара точок фотограмметрії	Стандартне відхилення			
	0,031003	0,028219	0,019804	0,042555
	Середнє значення			
	0,002662	-0,000753	-0,00124	0,018611

Проаналізувавши наведену вище таблицю, можна зробити висновок, що максимальне зміщення між покращеною хмарою точок та хмарою точок лазерного сканування складає 2 мм. А отже, точність 3D-моделі, створеної на основі

первинної хмари точок за результатами лазерного сканування не може бути більшою ніж 2 мм. А точність 3D-моделі, створеної на основі первинної хмари точок за результатами фотограмметричного знімання не може бути більшою ніж 4 см.

Завдяки поєднанню первинних хмар точок лазерного сканування та фотограмметричного знімання, отримана покращена хмара точок має реальні кольори та не має тих прогалів, що були у первинних хмарах. І саме тому можна припустити, що покращена щільна хмара точок матиме більшу точність, достовірність та якість і з її використанням можна побудувати високоточну 3D-модель.

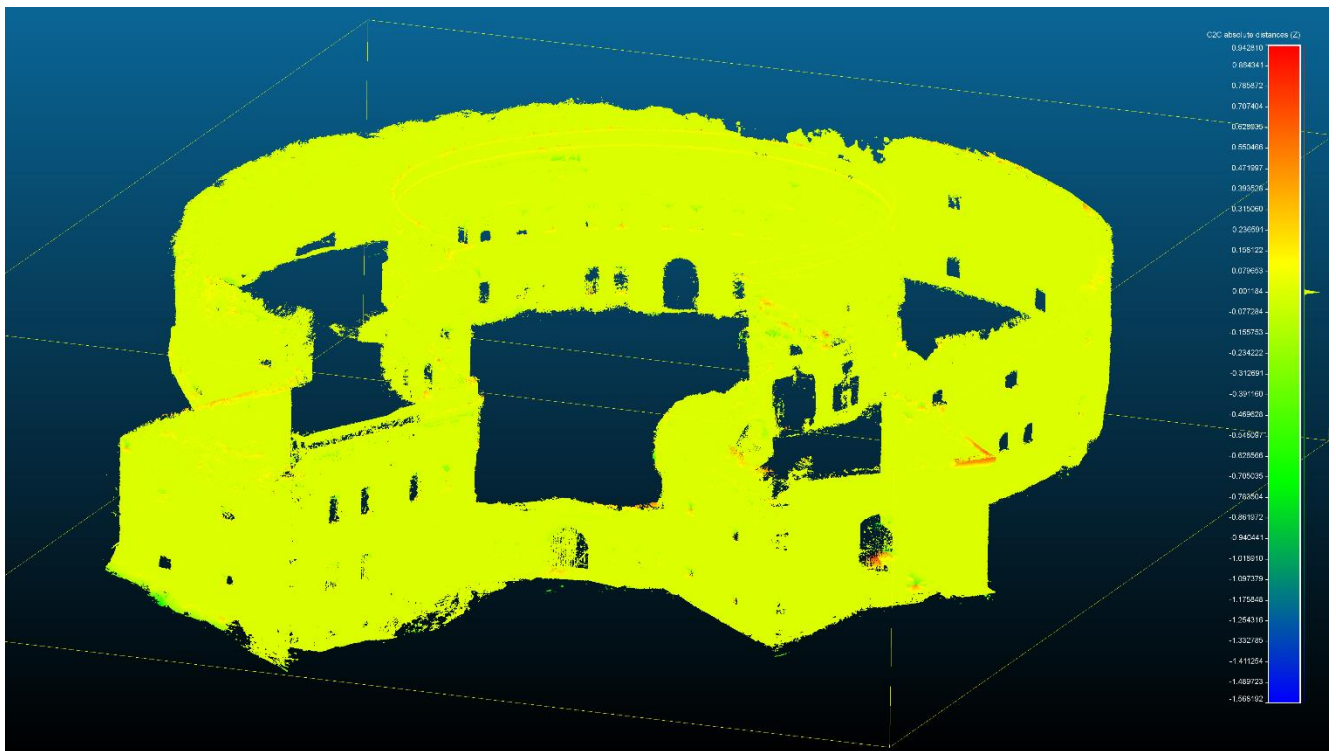


Рис. 4.1 Розходження у відстанях по осі Z між покращеною щільною хмарию точок та хмарию точок за результатами фотограмметричного знімання

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Високоточне тривимірне моделювання архітектурних будівель і споруд вимагає поєднання різнорідних за структурою, типами, джерелами даних. Теорія синтезу або злиття даних є основою для вирішення прикладного завдання інтегрування результатів виконавчих знімів при моделюванні інженерних об'єктів. Комбінування даних лазерного сканування та фотограмметричного знімання має низку переваг, оскільки лазерне сканування дає можливість визначити геометрію, а також змодельовати окремі архітектурні елементи з точністю в декілька міліметрів, а цифрові зображення забезпечують текстуризацію об'єкта.

У магістерській роботі досліджено методику синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд та запропоновано функціональну модель синтезу даних результатів наземного лазерного сканування та фотограмметричного знімання, що включає такі загальні етапи як первинна обробка вхідних даних, синтез даних та моделювання. Функціональна модель створена на основі схеми інтеграції об'єктного рівня інтегрування з основною ідеєю окремої обробки та інтерпретування даних.

Запропонована концептуальна модель бази даних моделювання архітектурних будівель і споруд забезпечує структуроване збереження значних масивів геопросторових даних про об'єкт моделювання. БД складається з таких основних класів об'єктів: реєстр вхідних даних, реєстр просторових моделей та реєстр результуючих моделей, а також відповідні їм класифікатори.

Проведений аналіз результатів виявив, що зона перекриття між двома хмарами склала 80%, що свідчить про те, що інші 20% поверхні об'єкта не мали покриття на одному з джерел вихідних даних. У результаті інтеграції даних була створена покращена щільна хмара точок у реальних кольорах з кількістю точок 230 млн точок, що забезпечило моделювання об'єкта з точністю до 1 мм.

Подальші дослідження щодо синтезу даних мають бути направлені на вдосконалення етапів оброблення значних масивів даних з врахуванням широкого

кола первинних даних та можливих ризиків інтегрування даних, що є актуальним для високоточного моделювання будівель і споруд.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Види 3D-моделювання / І. Ю. Кривошей, Е. О. Чернишов // Вісник студентського наукового товариства: збірник наукових праць студентів. – Ніжин: НДУ, 2018. – № 18. – С. 10 – 11.
2. 3D GIS: введення та основні поняття [Електронний ресурс] : [презентація PowerPoint] / Ю. В. Горковчук // Електрон. дані (25 слайдів). – Київ: КНУБА, 2021.
3. Види 3D-моделювання: полігональне, сплайнове, і nurbs моделювання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://koloro.ua/ua/blog/3d-tehnologii/vidy-3d-modelirovaniya-poligonalnoe-splajnovoe-i-nurbs-modelirovanie.html>
4. 3D GIS: створення та візуалізація 3D даних [Електронний ресурс] : [презентація PowerPoint] / Ю. В. Горковчук // Електрон. дані (23 слайда). – Київ: КНУБА, 2021.
5. National BIM standard: version 2 / US National BIM Standards Committee (NBIMS). – 2014.
6. Шибко О. Інформаційне моделювання будівель та споруд / О. Шибко // Збірник наукових праць ЛОГОС. – 2020. – С. 104 – 105. – doi:10.36074/30.10.2020.v1.31.
7. Description of geodata quality with focus on integration of BIM-data and geodata / J. Sun, L. Harrie, A. Jensen et al // Smart Built Environment project «Data Quality and Data Responsibility within the Built Environment». – 2018. – 75 p.
8. The Integration of 3D Geodata and BIM Data in 3D City Models and 3D Cadastre / Jing Sun // Licentiate Thesis. – 2019. – 37 p.
9. Трач Р.В. Інформаційне моделювання в будівництві (BIM): сутність, етапи становлення та перспективи розвитку (КНУБА) / Р. В. Трач // Науковий збірник «Економіката управління підприємством». – Миколаїв: МНУ ім. В.О. Сухомлинського. – 2017. – № 16 – С. 490 – 496.
10. Використання методів інтеграції для створення узагальненої інформаційної моделі будівельного об'єкта / М. С. Барабаш, К. І. Київська // Управління розвитком складних систем. – 2016. – № 25. – С. 114 – 120. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2016_25_20
11. 3D GIS Overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.supermap.com/en/html/3D_GIS_Overview.html
12. Технологія BIM: для чого вона потрібна та як вплине на будівництво [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gmk.center/ua/opinion/tehnologiya-bim-dlya-chogo-vona-potribna-ta-yak-vpline-na-budivnictvo/>

13. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (ВІМ-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації» № 152-р від 17 лютого 2021 р.
14. 3D моделирование и обработка данных [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.souzgiprozem.ru/izyskaniya-3d-modelirovanie-obrabotka-dannyh.html>
15. Geometric Accuracy Validation for ZY-3 Satellite Imagery / T. Wang, G. Zhang, D. Li et al // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2014. – vol. 11. – № 6. – pp. 1168 –1171. – doi: 10.1109/LGRS.2013.2288918.
16. Accuracy assessment of point clouds from LiDAR and dense image matching acquired using the UAV platform for DTM creation / A. Salach, K. Bakuła, M. Ostrowski et al // ISPRS Int. J. Geo-Inf. – 2018. – № 7. – 342 p.
17. Глотов В. М. Априорна точність складання фронтальних планів методом сумісного використання лазерного сканування та наземного цифрового знімання / В. М. Глотов, К. Б. Смолій // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 72. – С. 65 – 68. – Бібліографія: 14 назв.
18. Differential GPS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_GPS
19. Наказ Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України «Про затвердження Інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98)» № 56 від 9 квітня 1998р.
20. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. – 492 с.
21. Розробка концептуальної моделі збору геопросторових даних регіональних аеропортів методами лазерного сканування для створення ГІС / О. Л. Бойко, Д. О. Ляшенко, О. І. Горб // Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник. – Київ: КНУБА. – 2019. – № 71. – С. 60 – 71.
22. Резолюція 41/65 Генеральної Асамблеї ООН «Принципи, що стосуються дистанційного зондування Землі з космічного простору» від 3 грудня 1986 року.

23. Фотограмметрія: Підручник / О. Л. Дорожинський, Р. Тукай – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». – 2018. – 332 с.
24. Геодезія: Підручник. Частина друга / А. Л. Островський, О. І. Мороз, В. Л. Тарнавський; За заг. Ркд. А. Л. Островського. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». – 2008. – 564 с.
25. XVI Конгрес Міжнародного товариства з фотограмметрії та дистанційного зондування (ISPRS). – 1988 р.
26. The statue of Ramsete II – Integration of digital photogrammetry and laser scanning technique for 3D modeling / A. Lingua, F. Rinaudo // CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage. – 2001. – Vol. XVIII. – pp. 206-211.
27. Laser scanning and photogrammetry for the documentation of a large statue. Experiences in the combined use / C. Ioannidis, M. Tsakiri // Proc. CIPA XIXth Int. Symposium. – 2003. – pp. 517 – 523.
28. Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry - The last decade and beyond / J.-A. Beraldin // IAPRS, 35(5), XXth ISPRS Congress. – 2004.
29. 3D scanning and photogrammetry for Heritage recording: a comparison / W. Boehler, A. Marbs // Proc. of 12th Int. Conf. on Geoinformatics. – 2004.
30. Photogrammetry and ground-based laser scanning: assessment of metric accuracy of the 3D model of Pozzoveggiani church / A. Guarnieri, F. Remondino, A. Vettore // Proc. of FIG Working week, «The Olympic Spirit in Surveying». – 2004.
31. Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of Cultural Heritage / R. Kadobayashi, N. Kochi, H. Otani et al. // IAPRS, 35(5), XXth ISPRS Congress. – 2004.
32. 3D modeling of close-range objects: Photogrammetry or Laser Scanning? / A. Guarnieri, F. Remondino, A. Vettore // SPIE Proc., Electronic Imaging 2005, Videometrics VIII. – 2005.
33. Digital photogrammetry and tils data fusion applied to cultural heritage 3D modeling / A. Guarnieri, F. Remondino, A. Vettore // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. – 2006. – № 36. – pp. 1 – 6.
34. Аналіз технології створення фронтальних та інтер'єрних планів при проектуванні реставраційних робіт архітектурних пам'яток / В. Глотов, Ю. Дубик, В. Чижевський // Укр. міжвід. наук.-техн. збірн. «Геодезія, картографія і аерофотознімання». – №68. – 2007. – С. 177– 183.

35. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning / F. Remondino // Remote Sensing. – № 3. – 2011. – pp. 1104-1138.
<https://doi.org/10.3390/rs3061104>
36. A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings / G. Rocha, L. Fernández, V. Ferreira // Heritage. – 2020. – № 3(1). – pp. 47 – 67.
<https://doi.org/10.3390/heritage3010004>
37. Integration of Laser Scanning and Photogrammetry / P. Rönholm, E. Honkavaara, P. Litkey, et al. // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. – 2006. – Sci. 36.
38. Шульц Р. В. Аналіз можливостей наземного лазерного сканування та сучасної наземної фотограмметрії / Р. В. Шульц // Містобудування та територіальне планування. – 2010. – № 37. – С. 607 – 612. - Режим доступу:
http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2010_37_90
39. Методи і моделі проектування на основі сучасних CASE-засобів. Навчальний посібник / С. В. Мінухін, О. М. Беседовський, С. В. Знахур // Харків: Вид. ХНЕУ, – 2008. – 272 с.
40. Physics: List of programs for point cloud processing [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://handwiki.org/wiki/Physics:List_of_programs_for_point_cloud_processing
41. Шульц Р. В. Преимущества и недостатки различных методов сшивки лазерных сканов / Р.В. Шульц // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. – № 9(143). – 2009. – 211 с.
42. Workflow Data Collection of Existing Buildings by 3D Scanning Process : (in Modelling BIM) / F. Cruzado // Universitat Politècnica de València – 2016. – 48 p.
43. Геодезичні дослідження та моделювання об'єктів єврейської спадщини. Посібник ESJF / Д. В. Горковчук, Т. Кондратенко // Європейська ініціатива зі збереження єврейських кладовищ. – 2020. – 112 с.
44. Реконструкція тривимірної моделі об'єкта в програмному забезпеченні Agisoft Photoscan: методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Фотограмметрія близьких відстаней» для студентів спеціальності «Геодезія та землеустрій» – Київ : КНУБА, 2018. – 20 с.
45. V. V. Dasarathy. Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications / V. V. Dasarathy // Proceedings of the IEEE. – № 85 (1). – 1997. – pp. 24 – 38.
46. Системи керування базами геоданих для інфраструктури просторових даних. Навчальний посібник. / Д. Кейк, А.А. Лященко, В.В. Путренко, Ю. Хмелевський, К.С. Дорошенко, М. Говоров // Планета-прінт. – 2017. – 456с.

47. Импорт и анализ данных лидарной съемки в PostgreSQL/PostGIS с помощью PDAL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bit.ly/3jKZJ3C>
48. Засоби зберігання та опрацювання результатів лідарних знімків в середовищі об'єктно-реляційних СКБД [Електронний ресурс] : [презентація PowerPoint] / А. А. Лященко // Електрон. дані (29 слайдів). – Київ: КНУБА, 2018.
49. Fort Asterstein [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://de.wikipedia.org/wiki/Fort_Asterstein
50. Високоточний наземний лазерний 3D сканер Leica ScanStation P40 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ngc.com.ua/p/717-leica-scanstation_p40.html
51. Характеристики Sony Alpha SLT-A77V [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.sony.ru/electronics/support/a-mount-body-slt-a70-series/slt-a77/specifications>
52. Exporting images into the JPEG or TIFF format (developing images) [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://support.d-imaging.sony.co.jp/app/imagingedge/en/instruction/5_2_development.php

ДОДАТКИ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Виконав		Кузнцова А.М.			Літ.	Арк.	Аркушів
						77	77
Керівник		Горковчук Ю.В.			ІПО КНУБА, група ГІСТ-61м		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О.					
					Розробка методики синтезу даних для високоточного моделювання будівель і споруд		