

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

Добош Владислав Ярославович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Оцінка точності та використання портативного LiDAR при виконанні
кадастрових робіт у міському середовищі.

(назва роботи)

Землеустрій та кадастр

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

д. т. н. проф. Приходько Микола Миколайович

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

м. Івано – Франківськ

2025р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітній рівень магістр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

« ____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Добош Владислав Ярославович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оцінка точності та використання портативного LiDAR при виконанні кадастрових робіт у міському середовищі

Керівник роботи д. т. н. проф. Приходько Микола Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від " __ " _____ 2025 року № __

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики, матеріали польових досліджень

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Методологія спостережень
Результати та аналіз калібрування
Детальне кадастрове дослідження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3	д. г. н. проф. Приходько М.М.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Методологія спостережень		
2	Результати та аналіз калібрування		
3	Детальне кадастрове дослідження		

Студент _____
(підпис)
М.М.
Керівник роботи _____
(підпис)

Добош В.Я.
(прізвище та ініціали)
Приходько
(прізвище та ініціали)

Анотація

У магістерській роботі розглянуто актуальні підходи до використання портативних лазерних сканерів (LiDAR) з метою проведення кадастрових вимірювань в умовах міського середовища.

Проаналізовано технічні характеристики та функціональні можливості портативних LiDAR-систем, зокрема, ручних і мобільних пристроїв з інтегрованими лазерними сенсорами.

Мета дослідження: Встановити точність та ефективність портативного LiDAR у проведенні кадастрових робіт в умовах міста, а також окреслити можливості його впровадження в українську кадастрову систему.

Об'єкт дослідження: Техніко-технологічні та метрологічні аспекти використання мобільного LiDAR для збору геопросторової інформації з кадастровою точністю.

Наукова новизна: Створено алгоритм застосування портативного LiDAR у кадастрових цілях, що враховує специфічні труднощі забудованих територій.

Обґрунтовано доцільність використання мобільного лазерного сканування в поєднанні з геодезичними методами для покращення кадастрових процесів.

Особливу вагу має точність вимірювань, розглядаючи вплив зовнішніх чинників, як-от щільна забудова, зелені насадження, обмеженість простору, що безпосередньо впливають на якість отриманих просторових даних.

Здійснено експериментальне лазерне сканування об'єктів міської інфраструктури з подальшим опрацюванням даних та проведенням порівняльного аналізу результатів у зіставленні з традиційними методами кадастрової зйомки.

У процесі роботи встановлено сильні та слабкі сторони використання портативного LiDAR, а також надано рекомендації щодо його інтеграції у практичну діяльність з кадастру в Україні.

Ключові слова: портативний LiDAR, кадастрові роботи, точність, міське середовище, мобільне картографування, лазерне сканування.

Abstract

The master's thesis considers current approaches to the use of portable laser scanners (LiDAR) for the purpose of conducting cadastral measurements in urban environments.

The technical characteristics and functional capabilities of portable LiDAR systems, in particular, handheld and mobile devices with integrated laser sensors, are analyzed.

Research objective: To establish the accuracy and efficiency of portable LiDAR in conducting cadastral work in urban conditions, as well as to outline the possibilities of its implementation in the Ukrainian cadastral system.

Research object: Technical, technological and metrological aspects of using mobile LiDAR for collecting geospatial information with cadastral accuracy.

Scientific novelty: An algorithm for using portable LiDAR for cadastral purposes has been created, which takes into account the specific difficulties of built-up areas.

The feasibility of using mobile laser scanning in combination with geodetic methods to improve cadastral processes has been substantiated.

Of particular importance is the accuracy of measurements, considering the influence of external factors, such as dense construction, green spaces, limited space, which directly affect the quality of the obtained spatial data.

Experimental laser scanning of urban infrastructure objects was carried out with further data processing and comparative analysis of the results in comparison with traditional methods of cadastral surveying.

In the process of work, the strengths and weaknesses of the use of portable LiDAR were identified, and recommendations were provided for its integration into practical cadastral activities in Ukraine.

Keywords: portable LiDAR, cadastral work, accuracy, urban environment, mobile mapping, laser scanning.

ЗМІСТ

Вступ

1. Методологія спостережень

1.1. Калібрування портативного сканера

1.1.1. Вибір поля калібрування

1.1.2. Отримання та вилучення опорних даних для калібрування

1.1.3. Отримання даних хмари точок портативним сканером для калібрувальних даних

1.2. Детальне міське кадастрове дослідження

1.2.1. Наземне контрольне дослідження

1.2.2. Планування шляху для збору даних

1.2.3. Обробка хмари точок

1.2.4. Створення даних детальної лінії міського кадастру

2. Результати та аналіз калібрування

2.1. Калібрування портативного сканера

2.1.1. Вибір поля калібрування

2.1.2. Отримання та вилучення довідкових даних калібрування

2.2. Отримання хмари точок портативного сканера для калібрувальних даних

2.2.1. Фільтрація та підвибірка хмар точок

2.2.2. Аналіз результатів

3. Детальне кадастрове дослідження

3.1. Наземне контрольне дослідження

3.1.1. Планування шляху для збору даних

3.2. Фільтрація хмар точок, виправлення системних помилок та перетворення координат

3.3. Отримання детальних даних міського кадастру

3.4. Аналіз результатів

3.4.1 Аналіз даних ліній деталей

Висновки

Список використаних джерел

Вступ

Сучасний етап розвитку геодезії визначається шаленою трансформацією методів збирання просторової інформації, що породжує перспективні горизонти для кадастрової діяльності, зокрема в контексті щільної міської забудови.

Підвищення складності будівель, густота комунікацій, проблематичний доступ до земельних наділів і посилені запити до точності та оперативності обробки даних зумовлюють необхідність інтеграції інноваційних інструментів для кадастрових процедур.

Серед технологій, що стрімко прогресують в останні роки та знаходять широке застосування в геодезичній практиці, виділяється портативний лазерний сканер (LiDAR).

Такі пристрої мають гнучкість у застосуванні: їх можна інтегрувати у смартфони, планшети, або ж користуватися ними як окремими портативними сканерами.

Їхня перевага полягає у можливості створення надзвичайно деталізованих хмар точок, без потреби в складних конфігураціях та габаритному устаткуванні.

Це робить їх ідеальним рішенням для швидкого сканування у міському середовищі.

Оперативне збирання великих обсягів просторових даних в реальному часі перетворює портативні LiDAR-системи на незамінний інструмент для кадастрових інженерів, особливо в умовах щільної забудови.

Ці системи є ефективним рішенням для визначення меж земельних ділянок, об'єктів нерухомості, фасадів будівель та інших елементів міської інфраструктури, що в свою чергу позитивно впливає на точність та достовірність кадастрової інформації.

Водночас, виникає важливе питання щодо точності одержаних даних, їхньої відповідності державним стандартам та технічним вимогам кадастрової зйомки.

Не менш критичним є аналіз ефективності застосування портативного LiDAR, враховуючи витрати часу, людських ресурсів та фінансових затрат порівняно зі звичними геодезичними способами (такими як тахеометрія, GNSS вимірювання та інше).

Слід звернути увагу на вплив зовнішніх умов, як-от: віддзеркалення лазерного променя від скляних поверхонь, присутність об'єктів, що переміщуються, зміни у освітленні.

Всі ці фактори здатні впливати на якісні властивості хмари точок.

У зв'язку з цим виникає необхідність ретельного дослідження метрологічних параметрів портативних LiDAR-приладів, перевірки їх відповідності вимогам кадастру, а також встановлення найкращих умов експлуатації цих сканерів у реальних польових умовах.

Дослідження результативності портативного лазерного сканування вимагає оцінювання не лише щодо точності, але й легкості застосування, оперативності обробки інформації, сумісності з програмами для ГІС та автоматизованого кадастрового картографування.

Представлене дослідження зосереджене на детальному вивченні можливостей портативного LiDAR для вирішення кадастрових питань в умовах міста, а також на формулюванні рекомендацій щодо його застосування в Україні.

Зіставний аналіз з традиційними способами геодезичної зйомки дозволить зробити висновки стосовно перспектив впровадження цієї технології у сферу державного земельного кадастру, зокрема для підтримки актуальності, точності та надійності кадастрової інформації.

1. Методологія спостережень

Методика спостережень у цій праці ґрунтується на зіставленні інформації, зібраної мобільним LiDAR-сканером, з даними, отриманими традиційними геодезичними методами – зокрема, виконанням тахеометричних вимірювань та використанням GNSS-технологій.

Основна задача полягає у з'ясуванні рівня точності, надійності та доцільності застосування портативного лазерного сканування в середовищі з щільною міською забудовою.

Для проведення практичної частини дослідження було обрано типову територію в центральній частині міста.

Територія охоплює щільну забудову, де також є зелені зони, тротуари, міська інфраструктура, а також місця з обмеженим доступом.

Умови такого середовища дають змогу змоделювати ситуацію, в якій портативний LiDAR може бути ефективною альтернативою традиційним підходам до збору кадастрових даних.

Дослідження було умовно поділене на два основні компоненти:

1. Калібрування мобільного лідарного обладнання (ліворуч, див. рисунок 1);
2. Повноцінне кадастрове обстеження міської території (праворуч, див. рисунок 1).

Окремі частини було присвячено детальному опису процесу калібрування, а також методології збору просторових даних з наступним виправленням систематичних похибок.

Це сприяло підвищенню точності під час створення детальної кадастрової моделі міського середовища.

Обидва етапи пройшли верифікацію за допомогою контрольних вимірювань.

Загальну схему виконання дослідження зображено на рисунку 1.

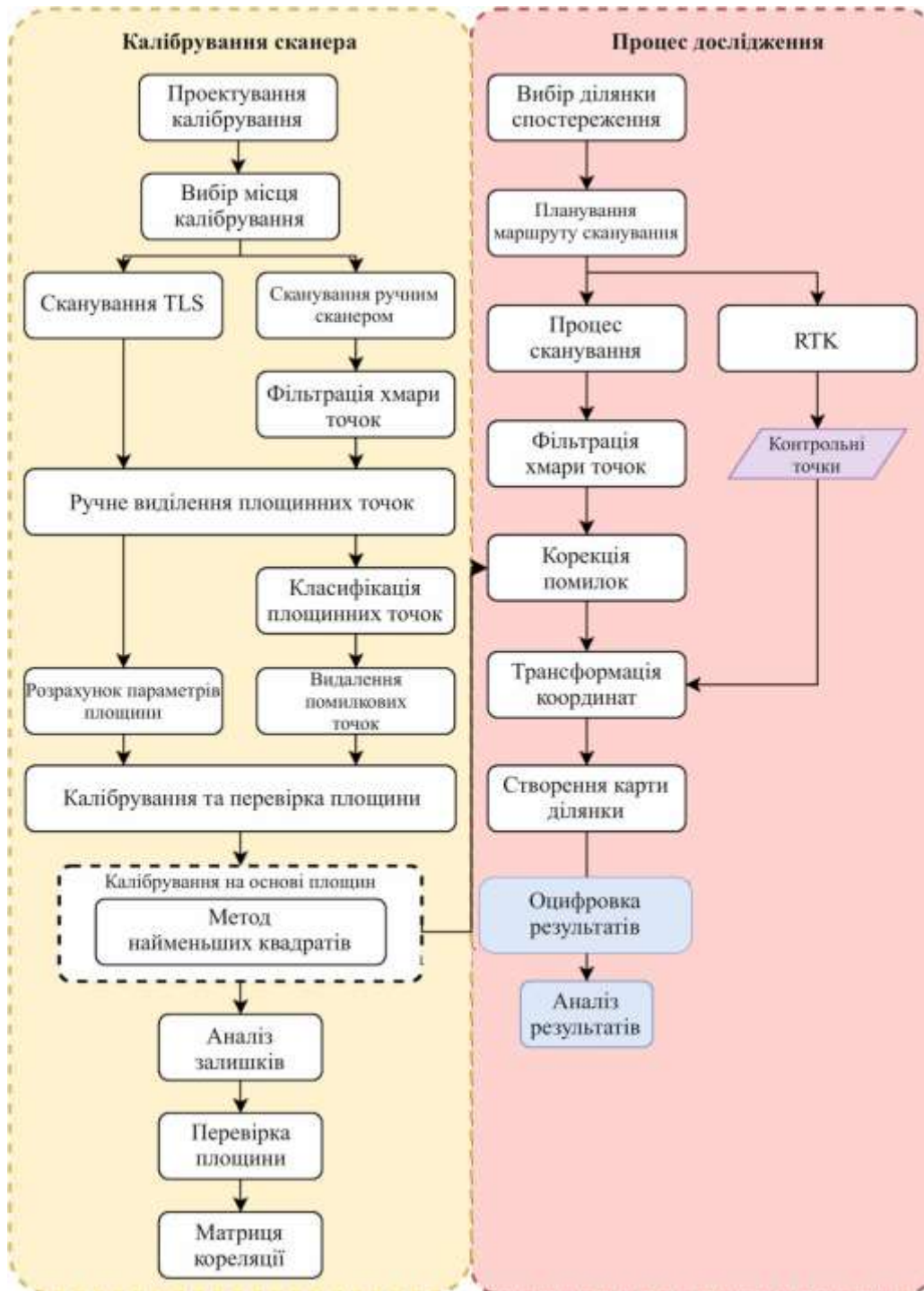


Рисунок 1 Блок-схема дослідження.

1.1. Калібрування портативного сканера

Процедура калібрування ручного лазерного сканера розпочалася з визначення спеціального калібрувального середовища у центрі кімнати.

Першочергово, було зібрано дані з цієї ділянки, використовуючи стаціонарний наземний LiDAR-сканер.

У межах цієї зони було позначено площини, умовно розділені на контрольні та калібрувальні.

Після цього, точки, що відносяться до вибраних калібрувальних площин, були отримані за допомогою мобільного сканера AlphaGEO SLAM R100 в активному режимі.

Всі ключові вузли, важливі для калібрування та верифікації, було обрано вручну, а значення з вираженими неточностями відсіювалися за допомогою алгоритму RANSAC (Випадкова Вибірка Згоди).

Цей алгоритм працює ітеративно, визначаючи параметри моделі, навіть якщо вихідні дані можуть містити викиди.

Для сканера AlphaGEO SLAM R100 було використано площинно-орієнтований підхід динамічного калібрування, який дозволив виправити систематичні помилки, що виникали при вимірюванні відстані.

Зокрема, було здійснено уточнення масштабного коефіцієнта дальності S та зсуву далекоміра C , використовуючи метод найменших квадратів.

1.1.1. Вибір поля калібрування

Для калібрувального оточення необхідно було згенерувати достатньо плоских елементів, що відповідали чітко визначеним розмірам.

Цей крок був критичним для отримання точкових хмар з варіативними відстанями до об'єктів. Таким чином, досягалося виділення

площин, які виступали основними реперами під час калібрувального процесу.

1.1.2. Отримання та вилучення опорних даних для калібрування

Збирання ключових даних, потрібних для калібрування, було виконано стаціонарним лазерним сканером.

Для створення хмари точок у межах простору калібрування використовувався наземний LiDAR-сканер Faro, що розміщувався на одній точці вимірювання.

Це унеможливило необхідність багатоточкової реєстрації, яка потенційно могла б спричинити похибки під час об'єднання хмар точок та, як наслідок, вплинути на точність формування еталонних даних.

Технічні характеристики приладу FARO Focus S350 представлені на рисунку 2.

Цей пристрій є фазовим тривимірним лазерним сканером, який забезпечує вищу точність порівняно з 3D-сканерами, що базуються на вимірюванні часу прольоту (Time-of-Flight, TOF), зокрема під час сканування у внутрішніх приміщеннях на коротких відстанях за відсутності перешкод.



Технічні характеристики лазерного сканера Faro Focus S350	
Швидкість сканування	976 000 точок/сек
Дальність вимірювання	350 м
Відносна точність	2 мм на 10 м
Довжина хвилі лазера	1550 нм

Рисунк 2 Специфікація наземного лідарного сканера FARO Focus S350

Для виявлення калібрувальних та контрольних поверхонь було використано площинні поверхні, які найчастіше є в середині будівель.

Цей метод допоміг уникнути потреби в організації важких будівельних робіт з метою створення спеціального калібрувального простору.

Аналітичний опис площини у випадку позначки k подано у виразі (1):

$$a_k x + b_k y + c_k z + d_k = 0 \quad (1)$$

де a_k, b_k, c_k – одиничний вектор нормалі площинної ознаки k .

Параметри площини a_k, b_k, c_k, d_k під час калібрування розглядалися як початкові (апріорні) відомості й застосовувалися як еталонні.

Як згадувалося раніше, для побудови хмари точок у калібрувальному середовищі було використано наземний лазерний сканер FARO Focus S350.

Точки, які відповідали площинним компонентам у цьому просторі, були виділені вручну з отриманих даних.

Ці відмічені точки стали основою для розрахунку характеристик площин, застосовуючи метод найменших квадратів.

Всі визначені площинні елементи розділили на два типи: калібрувальні площини, що були потрібні для регулювання параметрів сканера, та контрольні площини, які застосували для перевірки точності й результативності виконаного калібрування.

1.1.3. Отримання даних хмари точок портативним сканером для калібрувальних даних

Для збору хмар точок на мобільних пристроях в межах калібрувального простору використовували ручний лазерний сканер AlphaGEO SLAM R100. Технічні особливості приладу можна побачити на рисунку 3.

Застосування даного сканера дозволило зібрати найбільшу кількість площинних елементів.

Це забезпечило великий діапазон просторових даних.

Такі дані критично важливі для створення повноцінного набору калібрувальних точок.



Технічні	
Висота сканера	42 см
Дальність та діапазон	
Дальність сканування	7 000 м (20')
Діапазон сканування	0,05 м (2")
Характеристика швидкості	
Швидкість сканування	20 000 / 60 000 / 100 000 / 150 000 / 200 000 / 300 000 / 400 000 / 500 000 / 600 000 / 700 000 / 800 000 / 900 000 / 1 000 000 / 1 100 000 / 1 200 000 / 1 300 000 / 1 400 000 / 1 500 000 / 1 600 000 / 1 700 000 / 1 800 000 / 1 900 000 / 2 000 000 / 2 100 000 / 2 200 000 / 2 300 000 / 2 400 000 / 2 500 000 / 2 600 000 / 2 700 000 / 2 800 000 / 2 900 000 / 3 000 000 / 3 100 000 / 3 200 000 / 3 300 000 / 3 400 000 / 3 500 000 / 3 600 000 / 3 700 000 / 3 800 000 / 3 900 000 / 4 000 000 / 4 100 000 / 4 200 000 / 4 300 000 / 4 400 000 / 4 500 000 / 4 600 000 / 4 700 000 / 4 800 000 / 4 900 000 / 5 000 000 / 5 100 000 / 5 200 000 / 5 300 000 / 5 400 000 / 5 500 000 / 5 600 000 / 5 700 000 / 5 800 000 / 5 900 000 / 6 000 000 / 6 100 000 / 6 200 000 / 6 300 000 / 6 400 000 / 6 500 000 / 6 600 000 / 6 700 000 / 6 800 000 / 6 900 000 / 7 000 000 / 7 100 000 / 7 200 000 / 7 300 000 / 7 400 000 / 7 500 000 / 7 600 000 / 7 700 000 / 7 800 000 / 7 900 000 / 8 000 000 / 8 100 000 / 8 200 000 / 8 300 000 / 8 400 000 / 8 500 000 / 8 600 000 / 8 700 000 / 8 800 000 / 8 900 000 / 9 000 000 / 9 100 000 / 9 200 000 / 9 300 000 / 9 400 000 / 9 500 000 / 9 600 000 / 9 700 000 / 9 800 000 / 9 900 000 / 10 000 000
Дисплей та керування	
Дисплей	5,5"
Характеристика живлення	
Батарея	Li-Ion 3,7V 10 000 mAh
Особливі характеристики	
Температура роботи	від -20° до +50°С

Рисунок 3 Ручний сканер AlphaGEO SLAM R100

У зіставленні зі стандартним (статичним) підходом, динамічне калібрування дозволяє отримати більшу кількість просторових координат з різноманітними вимірами глибини, що значно покращує повноту отриманої інформації.

Крім того, цей метод не потребує багаторазової фіксації ручного сканера у різних позиціях, як це реалізується при статичних

вимірюваннях, що дає змогу суттєво зменшити загальну тривалість вимірювань.

Згідно з керівництвом користувача для приладу AlphaGEO SLAM R100, під час процесу сканування, маршрут повинен починатися та закінчуватися в безпосередній близькості від початкової точки.

Це необхідно для належного функціонування SLAM-алгоритму, який обробляє дані, отримані від інерційного вимірювального блоку.

Такий метод дозволяє досягти більшої точності під час відтворення шляху, яким рухався прилад, та гарантує коректне формування траєкторії.

У AlphaGEO SLAM R100 інтегровано лідар Velodyne VLP-16, що працює за принципом багатопроменевого сканування для отримання просторових даних шляхом обертання.

Проте, в окремих випадках, наприклад, за великих кутів падіння променя, можливе зменшення точності хмари точок.

Для зменшення помилок, які виникають через неідеальні вимірювання чи вплив зовнішніх факторів, було використано програмне забезпечення AlphaGEO SurPro 6.

Цей функціонал дозволяє:

- Розраховувати нормалі для кожної точки;
- Проводити оцінку якості SLAM-реконструкції;
- Визначати кут інцидентності променя для кожної точки;
- Обчислювати показник точності траєкторії.

Використовуючи ці дані, було здійснено попередню фільтрацію хмари точок: всі значення з надмірними кутами падіння або низькою якістю SLAM було відсіяно.

Після очищення даних, з хмари точок вручну було виділено фрагменти, які відповідають калібрувальним та контрольним поверхням.

З метою уникнення надмірного накопичення даних в окремих діапазонах дистанцій, або нерівномірного розподілу між площинами, було

застосовано випадкову вибірку однакової кількості точок для кожного площинного елемента.

Це дозволило забезпечити однорідний розподіл калібрувальних даних по всіх дистанціях, що позитивно позначилося на точності визначення систематичних похибок — зокрема, коефіцієнта масштабу дальності S і зміщення далекоміра C .

Видалення хибних точок виконувалось з використанням алгоритму RANSAC (Random Sample Consensus).

Такий метод показав свою результативність у побудові математичної моделі на основі вибірки, здатній містити велику кількість аномальних даних або грубих помилок.

Основні етапи функціонування алгоритму RANSAC

1. Зі всього наявного масиву даних випадковим чином вибирається фіксована кількість точок, необхідних для створення первинної математичної моделі.

2. Всі інші точки піддаються перевірці на сумісність зі створеною моделлю, що здійснюється через обчислення залишків (тобто, різниці між фактичними показниками та тими, які передбачені моделлю).

3. Якщо залишкова похибка для конкретної точки знаходиться в межах визначеного порогу — вона зараховується до таких, що узгоджуються з моделлю (внутрішні точки); у випадку, якщо похибка більша — точка класифікується як викид.

4. Вищенаведений процес повторюється неодноразово з різними підмножинами даних.

Після завершення повторень, модель, яка містить найбільшу кількість внутрішніх точок, вважається оптимальною.

В результаті застосування цього методу було досягнуто успішної ізоляції помилкових вимірювань та формування стабільного набору даних для подальшої калібровки лідарного устаткування.

1.2. Детальне міське кадастрове дослідження

1.2.1. Наземне контрольне дослідження

Під час проведення польових випробувань було отримано тривимірні просторові координати, що необхідні для трансформації точок, знятих портативним лідаром, у чинну кадастрову систему координат.

Оскільки для точного тривимірного перетворення критично важливо враховувати не лише планові координати, а й висоту, було додатково виміряно висоту кожної контрольної точки.

В Україні для визначення висоти традиційно використовується Балтійська система висот.

Зважаючи на точність, вартість та практичність, було вирішено використовувати технологію RTK (кінематику реального часу).

Вона санкціонувала визначення координат контрольних пунктів у світовій системі навігації GNSS з максимальною точністю.

З метою підвищення надійності результатів, кожну контрольну точку вимірювали двічі, а остаточне значення координат визначали шляхом обчислення середнього арифметичного з двох вимірювань.

Згідно з технічним завданням, стандартне відхилення для кожного окремого виміру не мало перевищувати 2 см по горизонталі та 5 см по вертикалі.

До того ж, розбіжність між показниками двох незалежних вимірювань не повинна була перевищувати 3 см у плані та 5 см по вертикалі.

Стосовно планових координат, застосовано державну систему координат УСК2000, після чого отримані дані про висоту перетворено на ортометричні, використовуючи відповідну геоїдну модель.

На фінальному етапі проводилося перетворення координат для виявлення та усунення систематичних невідповідностей між системами УСК2000 та GNSS, а також для оцінювання правильності трансформації.

Замість традиційного підходу до корекції, що акцентує увагу на виправленні поодиноких помилок, у цій роботі використано метод колокації найменших квадратів.

Цей метод поєднує в собі оцінювання, фільтрування та регуляризацію даних, спираючись на метод найменших квадратів, що дозволяє враховувати як випадкові, так і систематичні розбіжності між різними системами координат.

1.2.2. Планування шляху для збору даних

Відповідно до керівництва користувача до програмного забезпечення AlphaGEO SurPro6, траєкторія сканування повинна бути у вигляді замкнутої фігури – стартова та фінішна позиції мають збігатися або знаходитися в безпосередній близькості.

Це є обов'язковою умовою для правильного функціонування SLAM-алгоритму, який, використовуючи дані інерційного вимірювального блоку, дає змогу точніше відтворити пройдений сканером шлях.

Дотримання умови замкнутого контуру траєкторії дозволяє звести до мінімуму накопичення помилок, що виникають внаслідок розповсюдження систематичних та випадкових відхилень під час переміщення приладу.

Якщо у межах сканування є контрольні точки, їх фіксація може бути здійснена за допомогою спеціального вирівнюючого пристрою (демонстрація на малюнку 4).

Пристрій має отвір спереду, крізь який потрібно спрямувати сканер, фіксуючи його у нерухомому положенні на десять секунд, щоб забезпечити стабільне захоплення координат.

Програмне забезпечення AlphaGEO SurProb фіксує положення даної контрольної точки у внутрішній системі координат портативного LiDAR, що у майбутньому дозволить правильно виконати перетворення координат у конкретну глобальну систему.



Рисунок 4. Пристрій вирівнювання контрольних точок.

Оскільки сканер AlphaGEO SurProb базується на алгоритмі SLAM, що використовує дані з інерціального вимірювального блоку для найточнішого відображення шляху, надзвичайно важливо, які умови оточують сканування, адже від цього залежить якість процесу.

Перед початком роботи вкрай важливо провести ретельний аналіз умов, де працюватиме сканер, а також спланувати оптимальний маршрут для сканування. Це необхідно для поглибленого розуміння характеристик об'єкта сканування та виявлення потенційних факторів, здатних вплинути на точність алгоритму SLAM, зокрема, відсутність чітких орієнтирів.

Для тестових випробувань у цій роботі було обрано міську забудову.

Відповідно до порад користувача та сучасних наукових досліджень, визначено наступні ключові аспекти:

- Застерігатися від сканування рухомих об'єктів, оскільки SLAM може їх неправильно розпізнати, трактуючи як нерухомі елементи середовища, що вплине на точність визначення шляху.
- Слідкувати за тим, щоб початкова та кінцева точки сканування були суміщені або максимально наближені, утворюючи замкнутий контур, для зменшення нагромадження похибок.
- Витримувати помірну швидкість пересування, не перевищуючи середню швидкість пішохода (приблизно 1,1–1,5 м/с), для забезпечення потрібної щільності хмари точок.
- Зменшуйте швидкість, коли наближаєтеся до кутів споруд. Зміна кута огляду може погіршити збір необхідної інформації, що потрібна для точного визначення траєкторії.
- Виконуйте сканування в межах 50 метрів, щоб забезпечити високу точність та щільність отриманих даних.
- Один цикл сканування не повинен тривати довше 30 хвилин.
- У разі великої площі, розділіть завдання на частини з подальшою реєстрацією хмар точок.
Це допоможе зменшити ризик відхилень у траєкторії.
- Уникайте просторів, де багато скляних фасадів та вікон, адже вони можуть провокувати заломлення лазерних променів, через що зображення хмари точок викривлюється.
- При оцифруванні вузьких коридорів слід рухатися центром проходу, для коректного сканування поверхонь стін з обох боків.

- Якщо сканер надто близько до стін, звужується кут огляду, а кількість розпізнаних деталей стає меншою, що негативно позначається на стійкості траєкторії.

1.2.3. Обробка хмари точок

Після отримання даних, хмари точок, оброблені в AlphaGEO SurProb, було вивантажено разом з векторами нормалей для кожної точки та показниками якості, отриманими в результаті розрахунків алгоритму SLAM.

Виходячи з цих показників, проведено фільтрацію, метою якої було видалення ділянок хмар з недостатньою якістю або за несприятливих умов сканування.

Окрім критеріїв фільтрації, що базуються на куті падіння лазерного променя та якості SLAM, також потрібно враховувати характеристики лазерного далекоміра, які впливають на точність вимірювань на значних відстанях.

Хмари точок з аномальними значеннями відстані часто характеризуються збільшеною похибкою та можуть містити спотворені або помилкові дані, особливо на відкритих просторах.

Для мобільних геодезичних робіт та картографування радять зберігати дані, отримані з невеликої віддалі, враховуючи їхню високу точність.

Інструкція передбачає, що найкращий радіус сканування – близько 50 метрів.

Відповідно, до параметрів фільтрації включено порогове значення дальності, що дозволяє видалити з обробки малоякісні точки.

Для кожної точки хмари було розраховано координати лазерного центру з використанням лінійної інтерполяції, а також просторові вектори напрямку D_x , D_y , D_z .

На основі цих відомостей було розраховано псевдо-радіальні виміри r , а також кути огляду, горизонтальний і вертикальний.

Параметри системи визначення дальності, що стали результатом калібрування – коефіцієнт масштабування S та зсув далекоміра C – були застосовані для виправлення похибок у вимірюванні довжин.

За допомогою зазначених параметрів було виконано корекцію псевдо-радіальних вимірів для кожної точки, що сприяло збільшенню точності визначення положення.

Після обробки хмари точок, включно з вилученням системних похибок, координати контрольних пунктів, отримані в системі портативного LiDAR, разом з відповідними горизонтальними координатами в системі UСК2000 та висотами в Балтійській системі висот, були використані для розрахунку параметрів перетворення.

Завершальна трансформація скоригованої хмари точок з системи координат портативного LiDAR у систему UСК2000 здійснювалася з застосуванням шести параметрів жорсткого тіла, забезпечуючи відповідність просторових даних загальноприйнятим геодезичним системам.

1.2.4. Створення даних детальної лінії міського кадастру

Деталізовані контури міського кадастру показують можливі точки розділу земельних ділянок вздовж їхніх країв.

Автоматичне отримання таких даних є непростим процесом, оскільки потрібно враховувати особистісні нюанси при розпізнаванні та оцифровці.

Ці аспекти залежать від реалій забудови, даних кадастрових вимірювань, наявних кадастрових мап та карт земельного зонування.

З огляду на це, у цьому дослідженні було використано програмний продукт PointCab для ручної оцифровки ліній детального міського кадастру.

Під час процесу оцифрування було взято до уваги наступні основні положення:

1. Стосовно будівель, що стоять вздовж вулиць, контури споруд здебільшого узгоджуються з лінією забудови.
Остання, у свою чергу, визначається осьюовою лінією міської вулиці або наявною межею дорожнього полотна.
Відповідно, межі доріг використовуються як основні орієнтири для деталізованого відображення при оцифруванні.
2. Детальні межі будівель передаються здебільшого по осьовій лінії стіни, з врахуванням можливих відмінностей в архітектурних або декоративних елементах фасаду.
Для будівель, споруджених в єдиному стилі, використовується центральна лінія стіни фасаду, за винятком випадків, коли визначається зовнішня межа будівлі.
3. У ситуаціях, коли з боків конструкцій чи на окремих будівлях видно сталеві арматурні стрижні без захисту, кордоном слугує уявна середина стіни, в іншому разі – зовнішній її край.
4. Зовнішня межа будівлі визначається по контуру зовнішньої стіни, що типово для споруд одного архітектурного стилю, а також для ізольовано розміщених будівель, якщо не йдеться про наявність відкритої арматури зі сталі.

Карниз будівлі вважається складовою частиною цієї ж споруди, а тому включається до контуру.

Щоб оцінити точність отриманих результатів, було виконано аналіз похибок детального кадастрового знімання.

Його було розділено на два блоки:

- похибки у плановому положенні (зображено на рисунку 5а);
- похибки по висотній складовій (показано на рисунку 5б).

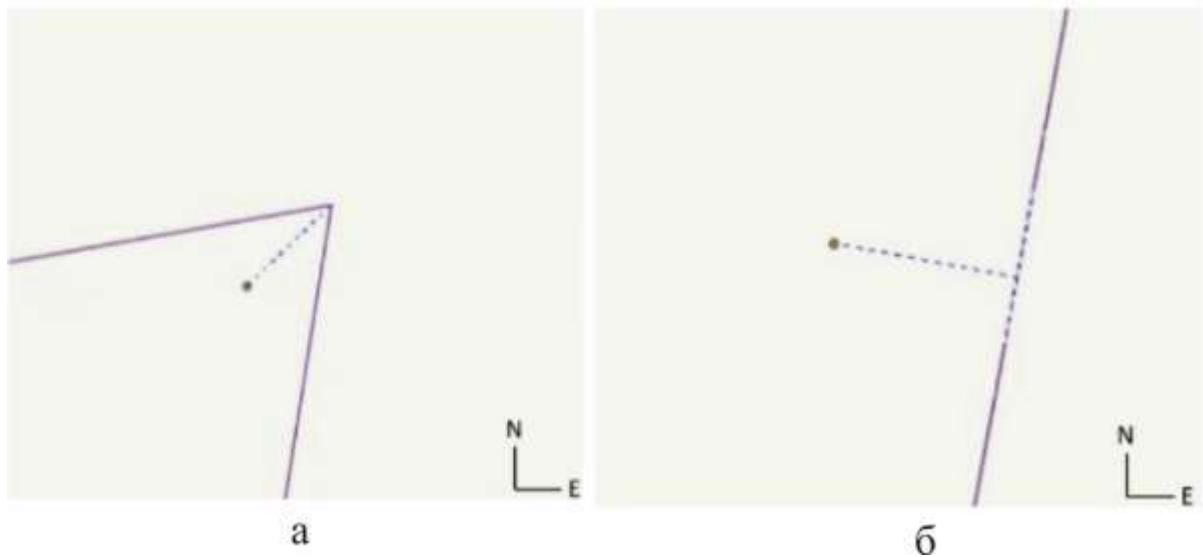


Рисунок 5 Обчислення похибок при детальному міському кадастровому зніманні включало два основні етапи:

- аналіз похибки в площинних координатах;
- аналіз похибки за вертикальною складовою відстані.

Якщо точки, які отримано з тахеометра, вдається правильно поєднати з вузловими точками оцифрованих ліній, тоді можна розрахувати похибки планового положення цих точок, що ілюструє малюнок 5а.

Коли точне поєднання нереальне, для аналізу використовували вертикальні відстані між точками, знятими тахеометром, та найближчими відрізками оцифрованих ліній, як демонструє рисунок 5б.

Вплив виправлення похибок системи позиціонування визначали через обчислення різниці, що наведена в рівнянні (2), між детальними

лініями, знятими портативним лідарним сканером до та після корекції системних похибок, порівнюючи їх з опорними точками, що були виміряні тахеометром.

$$D_{i-1} = D_{\text{до корекції}} - D_{\text{після корекції}} \quad (2)$$

де,

$D_{\text{до корекції}}$ — це оцифрована похибка, розрахована за даними нескоригованої хмари точок у порівнянні з деталізованими точками, отриманими тахеометром;

$D_{\text{після корекції}}$ — це оцифрована похибка, визначена на основі скоригованої хмари точок при зіставленні з деталізованими точками, отриманими тахеометром.

2. Результати та аналіз калібрування

2.1. Калібрування портативного сканера

2.1.1. Вибір поля калібрування

Розміри ділянки для калібрування були приблизно $35 \times 27 \times 3$ метри.

Він знаходився у підземному паркінгу нового торговельного центру, що у місті Київ.

Цей майданчик надавав доступ до великого набору площинних об'єктів з широким діапазоном відстаней, що сприяло створенню найкращих умов для калібрування, як продемонстровано на малюнку 6.

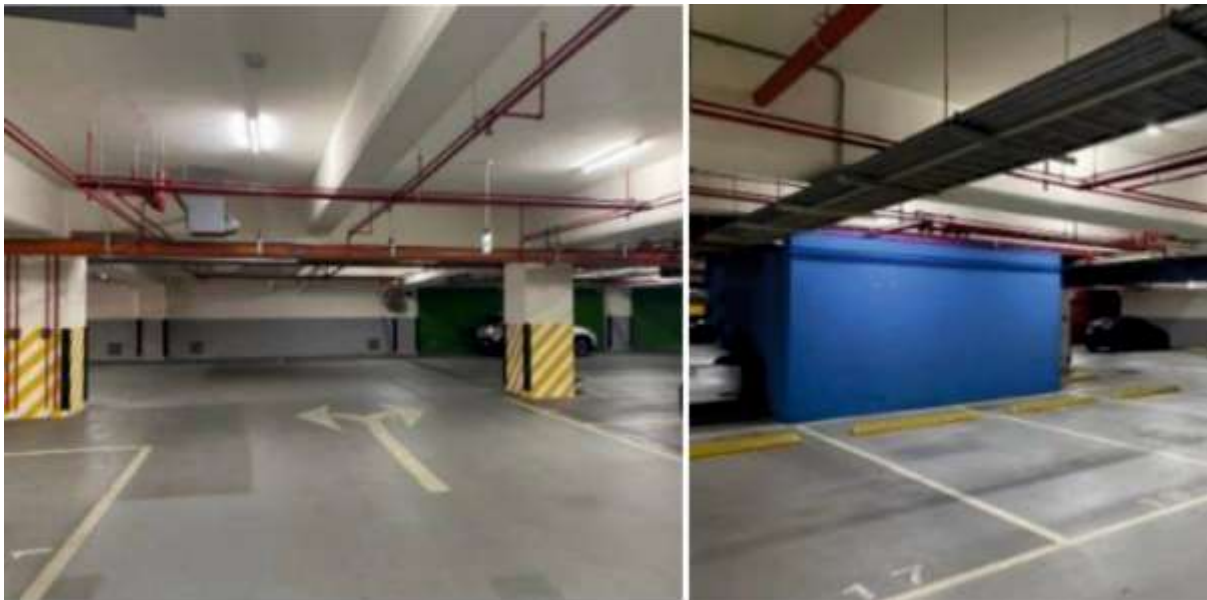


Рисунок 6. Місце калібрування.

2.1.2. Отримання та вилучення довідкових даних калібрування

Як зазначалося раніше, для побудови хмари точок з калібрувальної площини з єдиного місця, а не з багатьох, було застосовано наземний сканер Faro.

Завдяки цьому способу вдалося мінімізувати похибки, що з'являються під час реєстрації кількох хмар точок.

Візуальне представлення зібраних даних у вигляді хмари точок демонструє рисунок 7.

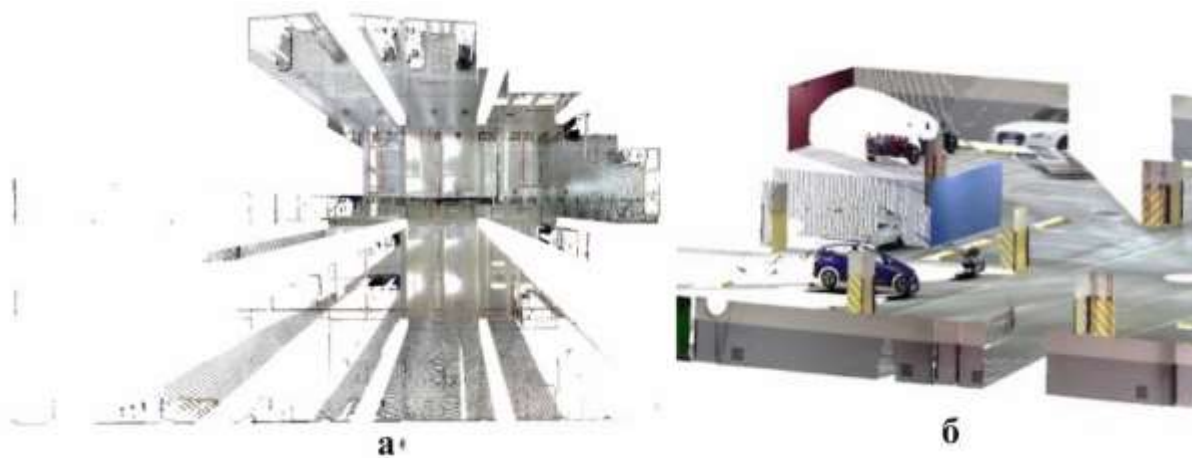


Рисунок 7. Вид зверху та збоку точок, зібраних даних за допомогою FARO Focus S350 на одній станції. (а) Вид зверху. (б) Вид збоку.

Відповідно до проведеного дослідження, вручну було виокремлено сімнадцять площин, позначених літерами від А до Q, для формування вихідних даних з метою калібрування.

Розташування цих площин представлено на рисунку 8.

Кожна площина мала приблизні габарити $0,7 \times 1,2$ метра, а її параметри було обчислено методом найменших квадратів.

Параметри разом із середньоквадратичними відхиленнями (СКО) апроксимації вміщено в таблиці 1.

Варто наголосити, що усі СКО не перевищували 0,001 метра, що свідчить про високу точність та надійність хмар точок, отриманих за

допомогою сканера FARO Focus S350, як для калібрувальних, так і для контрольних площин.

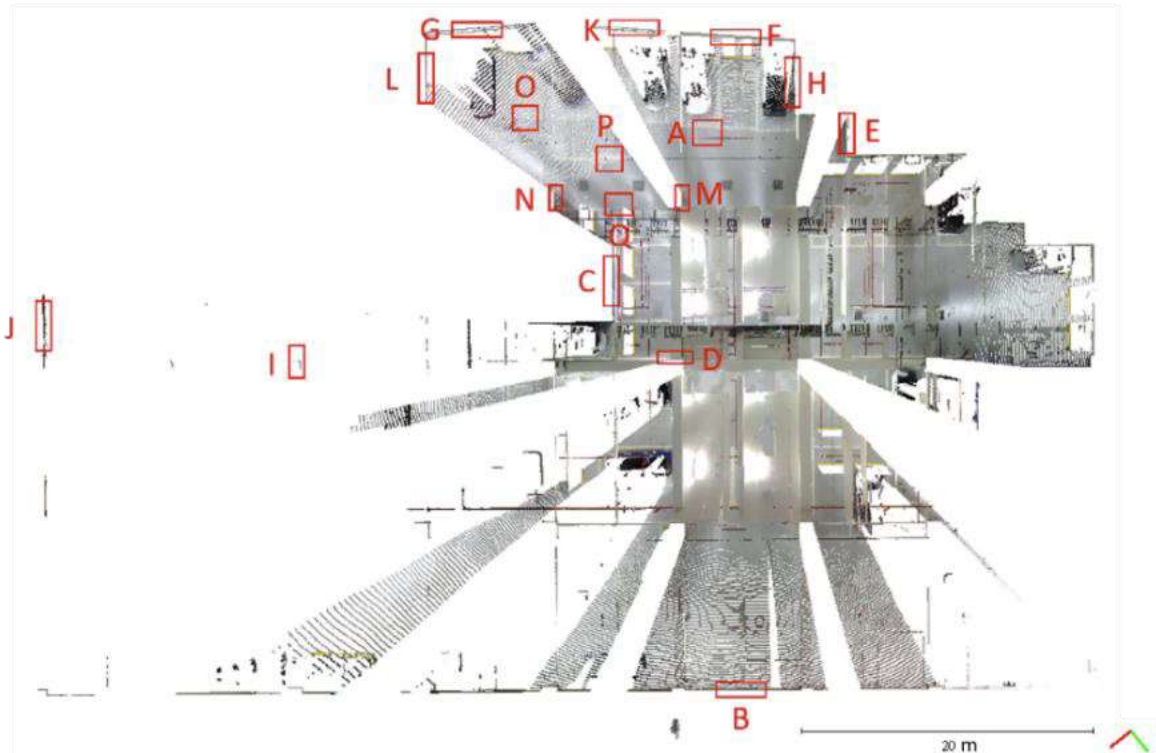


Рисунок 8. Розташування вибраних 17 площин (позначених від А до Q) для калібрувальних опорних даних.

Таблиця 1. Інформація про площину підбору.

Площини сканування	a	b	c	d	СКП	Кут сканування
A	0.012	0.007	0.999	-44.416	0.0009	0
B	0.982	0.190	0.002	-23.319	0.0009	89
C	-0.196	0.981	-0.001	9.670	0.0008	89
D	0.982	0.190	0.001	-1.516	0.0006	89
E	-0.183	0.983	-0.003	-5.552	0.0008	89
F	0.993	0.121	0.002	19.513	0.0008	89
G	0.964	0.265	0.002	21.626	0.0006	89
H	-0.193	0.981	-0.002	-2.357	0.0007	89
I	-0.194	0.981	0.001	30.209	0.0006	89
J	-0.191	0.982	0.001	46.958	0.0010	89
K	0.994	0.112	0.003	19.384	0.0009	89
L	-0.189	0.982	-0.005	22.097	0.0006	89
M	-0.191	0.982	-0.001	5.064	0.0008	89
N	-0.187	0.982	-0.004	13.458	0.0005	89
O	-0.004	0.005	0.999	-44.549	0.0009	0
P	-0.003	-0.002	0.999	-44.667	0.0006	0
Q	0.002	0.003	0.999	-44.545	0.0010	0

Для одночасного розв'язання задачі обчислення відстані та шести параметрів перетворення жорсткого тіла було використано три площини з взаємно перпендикулярними нормаллями до сукупності визначених площин.

У таблиці 1 наведено характеристики площин, що містять 4 горизонтальні кути падіння та 13 вертикальних кутів нахилу.

Трійка чисел (a, b, c) у таблиці визначає одиничний вектор нормаллі до відповідної площини.

2.2. Отримання хмари точок портативного сканера для калібрувальних даних

Для визначення точності калібрування використано динамічний метод на площинах, що передбачає збирання даних з мобільних пристроїв у вигляді хмар точок для калібрування.

Збір даних відбувся 26 січня 2024 року о 9:30 ранку.

Загальний час сканування становив близько 87 секунд, що дозволило зібрати приблизно 160 мільйонів точок.

На рисунку 9 показано зібрані дані, використані для калібрування, разом із траєкторією руху скануючого пристрою.

Колір позначок на зображенні 9a показував, наскільки добре спрацював алгоритм SLAM: відмінна якість мала синій колір (R=0; G=0; B=255), а чим ближче колір до червоного, тим гірше була якість.

В області, де було багато унікальних деталей, якість SLAM майже не змінювалась, більшість точок були насичено синіми, що показувало відсутність серйозних помилок чи збоїв в алгоритмі.

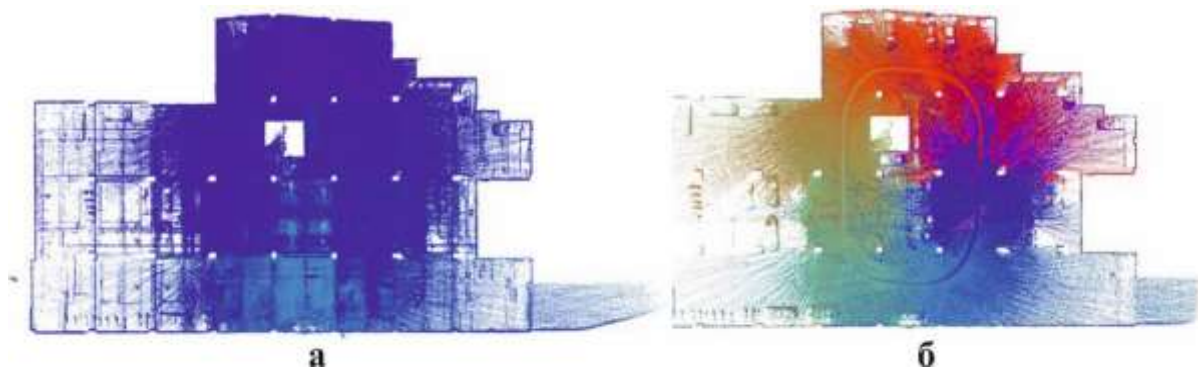


Рисунок 9. Хмара точок і траєкторія руху під час сканування калібрувальних даних:

(a) кольори відображають якість розрахунку SLAM;

(b) кольори відповідають часовим позначкам сканування.

Кольори плям на хмарі з малюнку 7b інформують про тривалість проходження шляху сканування, змінюючись поступово: від червоного – на початку, до синього – в кінці.

Траєкторію сканування сплановано так, щоб вона оминала центральну частину паркінгу та верталась поблизу стартової позиції, зберігаючи типову швидкість руху.

Це забезпечило повне покриття території, що підлягала калібруванню.

Відзначимо близьке розташування початкової (червоної) та кінцевої (синьої) точок, що відповідає коректному виконанню сканування.

2.2.1. Фільтрація та підвибірка хмар точок

У цьому дослідженні фільтрацію хмар точок, отриманих з портативного сканера, було здійснено з урахуванням показників SLAM та кута падіння для кожної точки.

Щоб уникнути негативного впливу даних з низькою якістю SLAM, було встановлено поріг.

Використано лише точки, які мали колір $R=0$, $G=0$, $B=255$, тобто сині точки, котрі відповідали найкращій якості SLAM.

Ці крапки було використано для формування калібрувальних даних.

З метою визначення ефективності фільтрації, було взято хмару точок, розташованих в одній площині, і проаналізовано, чи відбулося зниження середньоквадратичної похибки при апроксимації площини після того, як фільтр було застосовано.

Результати цього аналізу подано в таблиці 2.

Таблиця 2. Результати оцінки впливу фільтрації на точність апроксимації плоскої хмари точок.

Умови фільтрації	СКП відхилення площини	Кількість точок	Точки фільтрації
Немає	0.0110	20.554	-----
Якість SLAM	0.0108	12.764	8345
Кут падіння	0.0108	18.562	2346

Якість SLAM та кут падіння	0.0106	11.986	8567
----------------------------	--------	--------	------

Після роздільного фільтрування за показниками SLAM чи кутом падіння середньоквадратична похибка апроксимації площини (СКПА) впала з 0,0110 м до 0,0108 м.

У разі застосування обох критеріїв одночасно — і якості SLAM, і кута інцидентності — СКПА продовжила падати, зафіксувавшись на рівні 0,0106 м.

Отримані дані свідчать про те, що апроксимація площини за точковою хмарою, відфільтрованою відповідно до трьох умов, забезпечує вищу точність, ніж апроксимація, виконана на початкових даних без фільтрації.

Відповідно, використані критерії та задані граничні значення дозволили відібрати масив точок з оптимальними характеристиками.

У цьому контексті, в даному дослідженні було застосовано комбіновану методику фільтрування.

На графічному зображенні 10 продемонстровано вигляд точкового хмари після фільтрації.

В результаті фільтрування загальна кількість точок досягла 1 401 803, що відповідає приблизно 91% ефективності відсіювання.

Відібрані високоякісні дані було використано як калібрувальні для адаптації системи.

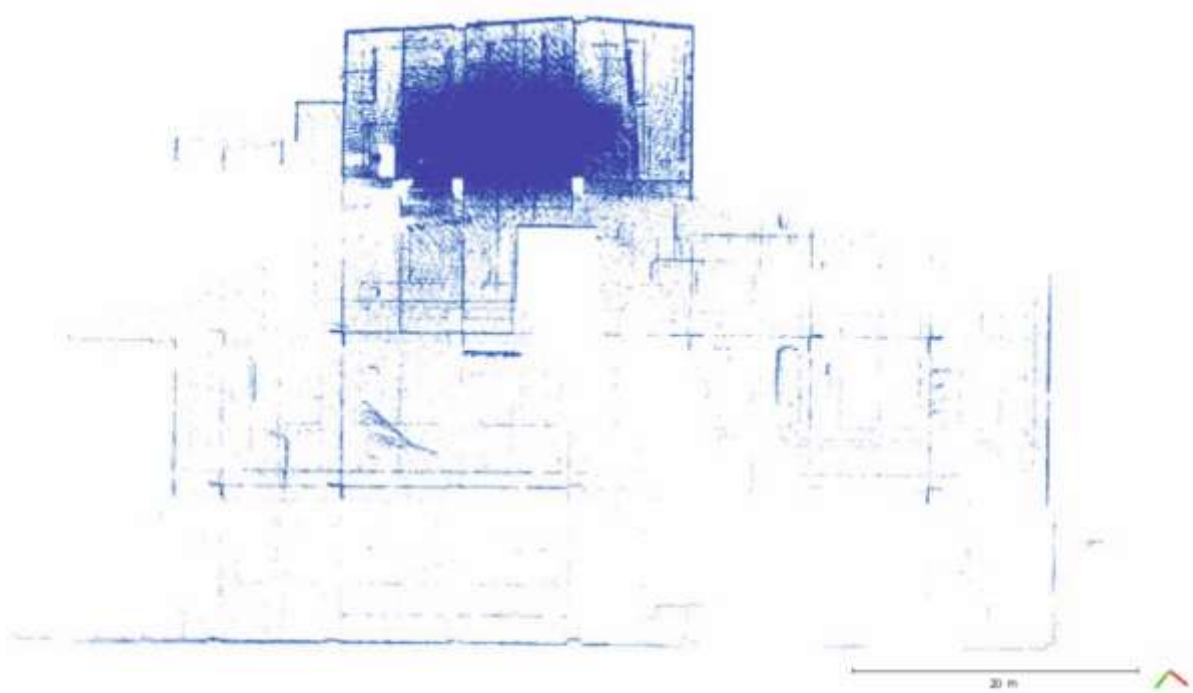


Рисунок 10. Хмара точок портативного сканера після застосування фільтрації даних..

Хмара точок, отримана з ручного сканера для кожної площини, була відібрана.

Далі визначено кількість точок на кожній площині та обчислено відстань кожної точки від центру лазерного сканування.

Для підвищення ефективності обробки та забезпечення збалансованого розподілу вимірювань відстаней, як однорідних, так і різноманітних, на кожній площині було випадково вибрано однакову кількість точок, що відповідає кількості даних калібрування.

Виключення становили площини В, Е, І та J, де точок було менше.

Найменше позначок серед усіх площин нарахували на площині D – 613.

Враховуючи цю особливість, для аналізу решти площин взяли по 600 довільно розміщених точок.

Було проведено дослідження з метою виявлення істотних відмінностей у обчислених псевдовідстанях до та після корегування і усунення похибок, здійснених методом RANSAC.

Статистичні показники аналізу псевдовідстаней для кожної площини до та після процедури підвибірki та фільтрації помилок за алгоритмом RANSAC представлено в таблиці 3.

Статистичні дані щодо псевдовідстаней розподілено на мінімальні, максимальні, медіанні та середні значення, щоб оцінити характеристики вимірювань дистанції, наданих точками на кожній площині.

Це потрібно для подальшого розрахунку калібрувальної корекції.

Таблиця 3. Статистичні показники псевдовідстаней вимірювань у кожній площині для калібрувальних даних до та після підвибірki і фільтрації помилок за допомогою алгоритму RANSAC.

Площина спостереження	Кількість точок до і після	Розраховане псевдодалекомірне вимірювання (м)			
		Мінімум до і після	Максимум до і після	Медіана до і після	Середнє до і після
A	3024/586	2.012/2.043	4.166/4.043	2.714/2.715	2.745/2.738
B	233/211	34.100/34.100	37.353/37.230	35.474/34.982	35.444/35.313
C	660/595	6.953/6.953	9.137/9.137	8.137/8.146	8.138/8.138
D	613/567	12.471/12.471	15.977/15.919	13.775/13.768	13.962/13.923
E	322/297	9.226/9.226	10.454/10.328	9.495/9.474	9.737/9.691
F	862/593	8.713/8.735	13.018/12.964	9.125/9.125	9.347/9.337
G	847/579	8.846/8.846	18.200/18.200	10.954/10.696	11.536/11.449
H	1420/581	7.832/7.860	11.380/11.380	9.227/9.161	9.354/9.317
I	80/58	22.515/22.515	28.518/28.518	24.317/24.350	24.985/25.192
J	91/62	39.675/39.757	45.099/45.099	41.515/41.605	41.833/41.836
K	1595/592	7.916/7.919	12.618/12.618	8.396/8.357	9.029/8.949
L	864/569	9.722/9.722	20.655/20.655	15.538/14.993	15.484/15.391
M	1110/599	2.310/2.310	2.909/2.906	2.542/2.536	2.546/2.542
N	1417/562	3.333/3.555	10.170/10.170	5.961/5.987	6.335/6.391
O	818/600	2.695/2.695	12.473/12.473	3.485/3.493	3.722/3.706
P	2119/599	1.456/1.466	7.881/7.295	2.082/2.088	2.342/2.348
Q	736/593	3.186/3.199	7.054/7.054	3.698/3.694	3.873/3.866

Відповідно до даних з таблиці 3, площини B, I та J показали відносно меншу кількість точок через збільшені інтервали сканування.

Площина E частково перекривалася стіною, що стало причиною обмеженої кількості зареєстрованих точок.

Діаграма, що ілюструє розподіл псевдо-відстаней до та після проведення процедур вибірки та ліквідації похибок за допомогою алгоритму RANSAC, зображена на малюнку 11.

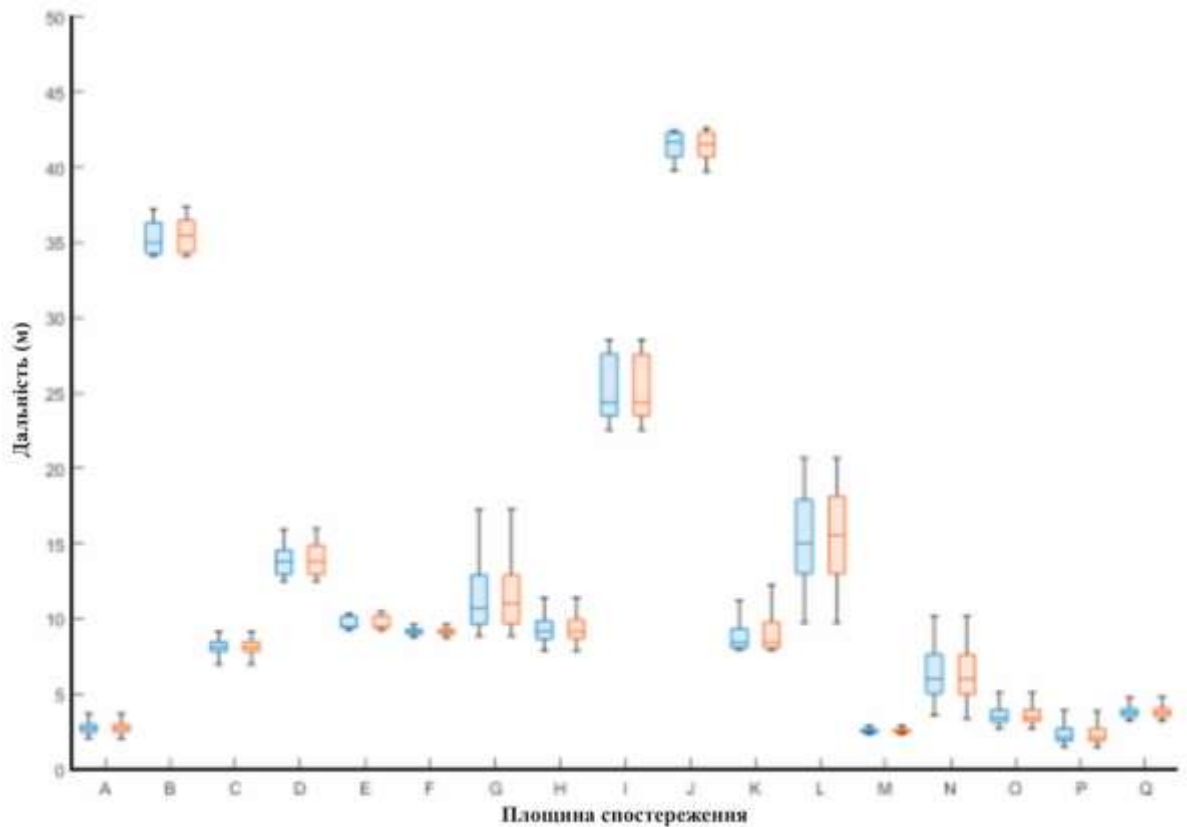


Рисунок 11. Діаграма розрахованих псевдовідстаней вимірювань кожної площини

Згідно з даними, що містяться у Таблиці 3 та на рисунку 11, значних відмінностей між мінімальними, максимальними, медіанними та середніми значеннями розрахованих псевдовідстаней не спостерігається для жодної з площин, як до, так і після виконання субдискретизації та видалення помилкових даних за допомогою алгоритму RANSAC.

Розкид у статистичних характеристиках псевдовідстаней до та після фільтрації не перевищував 1 метр, що свідчить про стабільність точності вимірювань навіть після процедури відбору та очищення інформації.

Отже, вибір 600 точок для субдискретизації виглядає виправданим, враховуючи доступні калібрувальні дані, та сприяє покращенню швидкодії обчислень.

2.2.2. Аналіз результатів

Розташування калібрувальних площин у цьому дослідженні представлено на малюнку 12.

Вибір площин для калібрування має гарантувати максимальне покриття калібрувального майданчика з їхнім рівномірним розподілом.

Для одночасного розв'язання параметрів перетворення твердого тіла під час обчислення калібрувального коригування, крім вертикальних площин, потрібно обирати і горизонтальні, зокрема, площини А, О та Q.

Зокрема, хоча площина Е розташована ближче до краю калібрувального поля, ніж площина Н, остання демонструвала вищі максимальні та мінімальні показники дистанції сканування (див. таблицю 3), тому для калібрування було обрано площину Н замість площини Е.

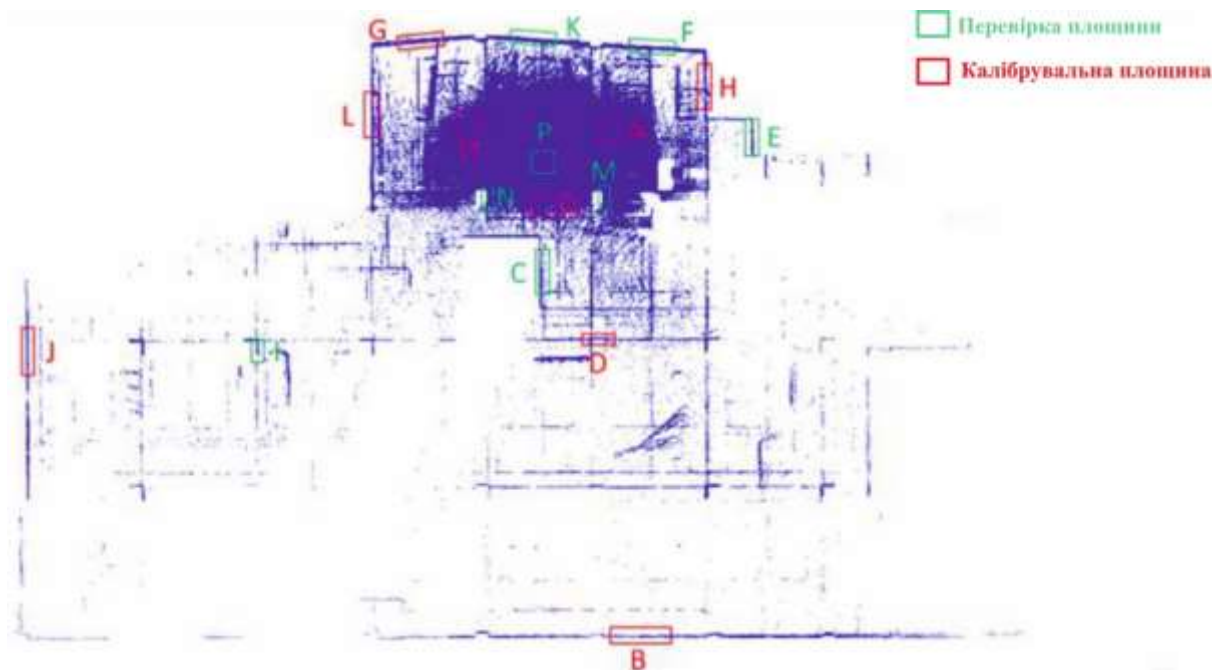


Рисунок 11. Розташування калібрувальних площин (позначених А, В, D, G, Н, J, L, О, Q) та контрольних площин (позначених С, Е, F, I, К, М, N, P).

На малюнку 12 представлено графіки розподілу залишків.

Графіки розсіювання залишків після коригування з урахуванням чи без урахування систематичної похибки у системі вимірювання дистанції показано на малюнку 13.

А саме, на рисунках 12а та 13а зображено розподіл залишків та їх розкид для результатів калібрування.

При цьому систематична похибка у системі вимірювання відстані була інтегрована в модель налаштування як додаткова змінна.

На рисунках 12б та 13б, відповідно, продемонстровано розподіл та розкид залишків для конфігурації, де погрішність системи вимірювання відстані ігнорувалася, а невизначеність стосувалася лише шести параметрів перетворення твердого тіла, які підлягали оцінюванню.

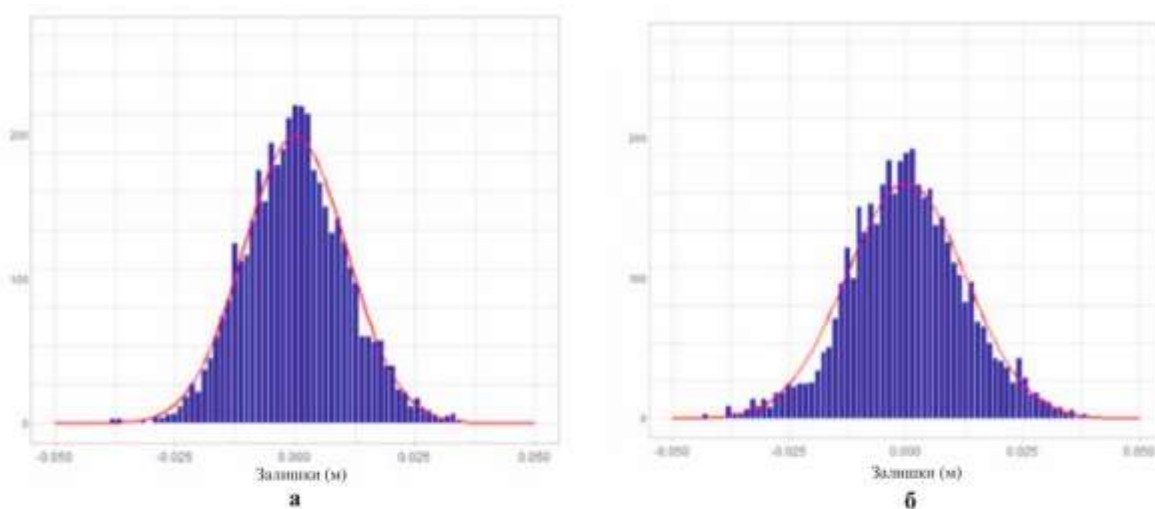


Рисунок 12. Графіки розподілу залишків калібрувальних даних:

(а) із врахуванням точок доступу;

(б) без врахування точок доступу.

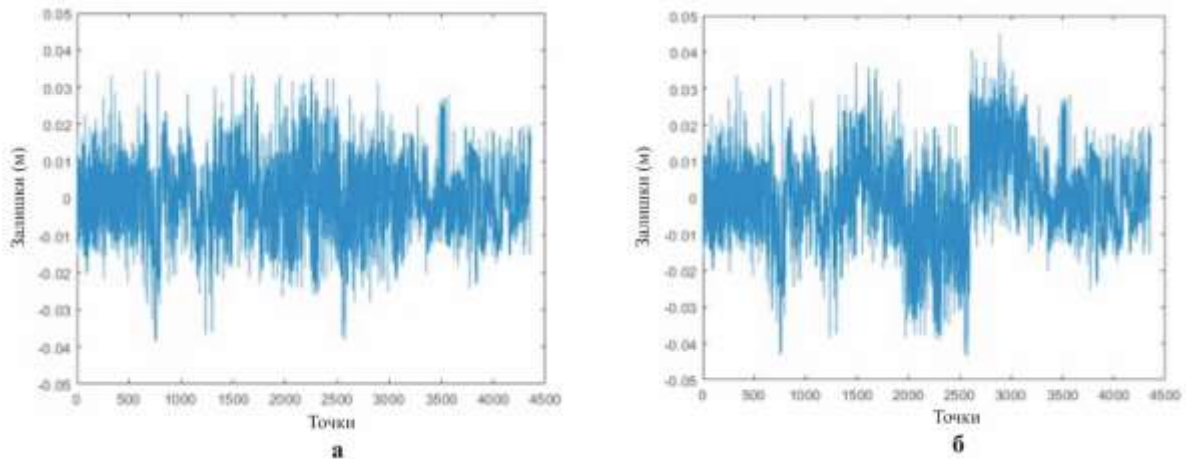


Рисунок 13. Діаграми розсіювання залишків калібрувальних даних:
 (а) із врахуванням точок розсіювання;
 (б) без врахування точок розсіювання.

Порівнявши розподіли залишків на рисунках 12а та 12б, стало помітно, що, враховуючи локації вимірювань відстаней, розподіл залишків виявився щільніше згрупованим біля нульової позначки та демонстрував кращу відповідність нормальному розподілу.

Аналіз графіків розсіювання залишків, представлених на рисунку 13, виявив, що залишки на 13а мали стабільний та рівномірний розподіл в межах $\pm 0,03$ м, що корелювало з оголошеною точністю хмари точок (3 см).

Водночас, у випадку рисунку 13б, залишки демонстрували нестабільний, хвилеподібний характер, викликаний впливом більш помітних систематичних похибок.

Після активації налаштувань вимірювання відстані, середній залишок почав коливатися біля нульової позначки (від $-0,000045195$ м до $-0,000014845$ м), а стандартне відхилення апостеріорної одиничної ваги зменшилося (з $0,01278$ м до $0,01077$ м), що свідчить про поліпшення результатів калібрування.

Не зважаючи на ймовірну відсутність статистично значущих відмінностей, ці зміни ілюструють ефективність врахування похибок системи вимірювання відстані.

Для оцінювання якості калібрування було розраховано середньоквадратичне відхилення (СКВ) для кожної контрольної площини, використовуючи три набори даних: з параметрами помилок дистанції та без них.

Результати подано в таблиці 4.

Таблиця 4. Значення середньоквадратичного відхилення для кожної контрольної площини

Площина	СКВ з коригуванням	СКВ без коригуванням	Різниця (м)	Покращення %
С	0.0121	0.0125	0.0004	2.98%
Е	0.0129	0.0290	0.0161	55.35%
Ф	0.0092	0.0329	0.0237	72.12%
І	0.0236	0.0287	0.0051	17.75%
К	0.0083	0.0164	0.0081	49.25%
М	0.0057	0.0105	0.0048	45.27%
Н	0.0102	0.0118	0.0016	13.82%
Р	0.0066	0.0069	0.0003	4.32%
Середнє значення	0.0111	0.0186	0.0075	32.61%

Суттєве покращення зафіксовано на поверхнях Е, Ф, К, М та Н, зокрема, на площині Ф приріст становив 72,12% (майже 2,4 см), а на Е – близько 1,6 см.

В середньому, загальне поліпшення досягло 32,61%, що свідчить про ефективність запропонованого методу калібрування для підвищення точності хмар точок.

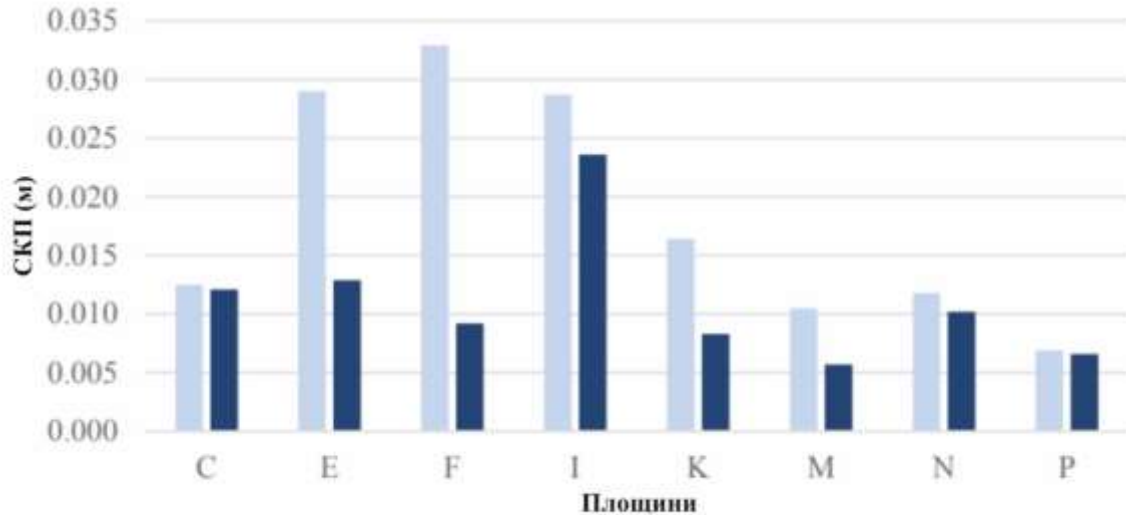


Рисунок 14. Діаграма у вигляді стовпчиків середньоквадратичної помилки (RMSE) для контрольних площин

Таблиця 5 демонструє фрагмент кореляційної матриці, що візуалізує взаємозв'язки між невідомими параметрами, визначеними в процесі калібрування методом найменших квадратів.

Таблиця 5. Матриця коефіцієнтів кореляції між невідомими параметрами для калібрувальних даних.

	S	C	X_t	Y_t	Z_t	φ	ω	k
S	1	-0.82	-0.61	0.63	-0.03	-0.05	0.11	-0.59
C	-0.82	1	0.29	-0.25	0.07	0.05	-0.13	0.22

Кореляційні взаємозв'язки між точками, задіяними у розрахунках відстаней, і параметрами координатного перетворення виявилися несуттєвими.

У більшості випадків абсолютні значення коефіцієнтів кореляції не перевищували значення 0,7.

Невелика від’ємна кореляція між цими точками позитивно вплинула на надійність результатів, отриманих при вирішенні задачі щодо пунктів, які визначають відстані.

Натомість, в процесі калібрування, який відбувався, лише площини В та J містили точки, що показували значні псевдодальності, необхідні для калібрування.

Згідно з інформацією з таблиці 5, ці значення псевдодальностей змінювались в межах приблизно від 35,3 м до 41,8 м.

У наступних дослідженнях, якщо будуть задіяні більші площі калібрування або ж вдаліша траєкторія сканування для збору даних ручним LiDAR, можна буде збільшити кількість точок з високими псевдодальностями.

Це може потенційно знизити негативну взаємодію між дистанційними точками, а також збільшити ймовірність визначення параметрів S та C.

За результатами оцінювання, величини систематичних параметрів S та C сягнули 0,9996 та -0,0088 відповідно.

Стандартні похибки для цих параметрів були рівні 0,0000397 м та 0,00055 м.

У таблиці 6 містяться відповідні поправки для різних значень виміряної дистанції.

Таблиця 6. Різні значення відстані після корекції (м).

Відстань	1	2	5	10	20	30	40
Відстань після корекції	0.99	1.99	4.99	9.99	19.98	29.98	39.98

У випадку з відстанню 10 метрів, потрібна була корекція в 1 сантиметр.

На дистанції 30 метрів поправка дорівнювала 2 сантиметри, і таке ж значення, тобто 2 см, фіксувалось для 40 метрів.

Навіть на відстані всього 2 метри спостерігалось відхилення, яке вимагало коригування на 1 см.

Отже, під час точних геодезичних робіт з портативним лазерним сканером, особливо при кадастрових зйомках, слід враховувати та компенсувати помилки вимірювання відстаней.

Це дозволяє досягти більшої точності в отриманих даних.

3. Детальне кадастрове дослідження

Ділянка, що обрали для детального вивчення міського кадастру, знаходилась в столиці України - місті Києві, між проспектом Володимира Івасюка та Оболонським проспектом, згідно з графічним зображенням на рисунку 15.

Згідно з аерофотознімками, можна ствердити, що обрана територія характеризується щільною забудовою.

На ній наявна значна кількість будівель різної висоти та форми.

Ці особливості ускладнюють ефективне застосування GNSS-обладнання, що унеможлиблює досягнення точних результатів. Використання тахеометрів, своєю чергою, потребує значних часових витрат під час проведення відповідних кадастрових робіт.



Рисунок 15. Досліджувана територія міського кадастрового обстеження.
(а) Фрагмент кадастрової карти; (б) Зображення з аерофотозйомки.

3.1. Наземне контрольне дослідження

На малюнку 16 зображено розміщення чотирьох ключових кадастрових контрольних точок (позначені червоним) та двох додаткових (виділені синім), що були задіяні у даному дослідженні.

Чотири основні точки були офіційно зареєстровані в державній системі координат УСК2000 та мали такі номери: 10005, NA0591, NA0657 та GA0477.

Дві додаткові точки, що їх позначено номерами №1 та №2, не були включені до первинного списку.

Аби визначити їх координати, було використано процес зрівнювання, заснований на методі найменших квадратів, про що йшлося у попередній частині дослідження.



Рисунок 16. Области сканування та скановані шляхи.

Контрольні пункти QT77 та NA0587 було розташовано під навісом об'єкта, що унеможливило встановлення ортометричних висот способом RTK.

З огляду на це, висоти цих пунктів були обчислені за допомогою геометричного нівелювання, шляхом відліку від відомої ортометричної висоти пункту 10005.

Після збору даних RTK для інших шести точок, координати контрольних пунктів №1 та №2 було обчислено методом найменших квадратів, результати яких представлено у таблиці 10.

Усі остаточні координати та ортометричні висоти контрольних пунктів, що використовувалися в дослідженні, наведено у таблиці 7.

Таблиця 7. Просторове розташування та висотні характеристики використаних контрольних точок.

Номер точки	Північна координата (м)	Східна координата (м)	Ортовисота (м)
1	2,764,678.099	308,072.529	17.996
2	2,764,693.030	308,157.005	18.589
NA0591	2,764,668.076	307,997.099	18.491
100005	2,764,569.887	307,967.553	17.213
NA0657	2,764,853.892	308,221.181	19.417
GA0477	2,764,471.261	308,372.474	18.782
QT77	2,764,538.592	308,073.022	18.017
NA0587	2,764,532.553	308,106.479	17.991

* У зв'язку з воєнним станом всі координати змінні

3.1.1. Планування шляху для збору даних

Після аналізу масштабу охоплення території та тривалості запланованої перевірки визначеної області, було вирішено розділити простір на два окремі траєкторії сканування.

Перший маршрут, позначений червоним кольором, починався з контрольної точки № QT77. Він пролягав через пункти № NA0587, 1, 2, знову через NA0587, а потім повертався до початкової позиції.

Другий маршрут, відображений синім кольором, також розпочинався з точки QT77, проходив через контрольні пункти № 100005, 1, NA0591 і завершувався поверненням до вихідної точки.

3.2. Фільтрація хмар точок, виправлення системних помилок та перетворення координат.

З метою отримання якнайбільше точкових даних, що необхідні для детального кадастрового вивчення міської забудови, проведено налаштування граничних показників якості SLAM.

Вони були встановлені на значеннях R50, G50 та B250.

Це робилося задля збереження частин хмари точок, що виглядали ближче до синього. Це вважається ознакою високої точності при визначенні шляху за допомогою SLAM.

Параметр кута падіння було налаштовано відповідно до стандартів калібрування та зафіксовано на рівні 70 градусів.

Крім того, згідно з технічними нормами, було вирішено, що сканування має проводитись на відстані, що не перевищує 50 метрів.

Як показали результати калібрування, вихід за межі цього діапазону, як правило, призводить до зростання похибки.

Враховуючи вищесказане, в межах цього дослідження максимальну дистанцію сканування було встановлено на позначці 50 метрів.

У таблиці 8 наведені конкретні умови та значення порогів, які використовувалися під час фільтрування хмари точок у процесі здійснення кадастрової зйомки.

Таблиця 8. Параметри та порогові значення фільтрації хмари точок для детального кадастрового обстеження

Умови фільтрації	Граничні значення
Якість SLAM	$R \leq 50 G \leq 50 B \geq 250$
Кут падіння	$\leq 70^\circ$
Відстань сканування	$\leq 50\text{м}$

Використовуючи вихідні дані корекції похибки для системи локації, здійснено коригування псевдовідстаней, виміряних між точками розташування та їхніми лазерними центрами.

Після цього, з врахуванням цих виправлень, було виконано перерахунок координат кожної точки.

$$r_{i \text{ кореговане}} = r_i * 0.9996 - 0.0088 \quad (3)$$

Дані хмари точок, здобуті зі сканованих маршрутів 1 та 2, після фільтрації, об'єднання і перетворення, показані на рисунку 17.



Рисунок 17. Хмара точок після застосування фільтрації.
 (а) Хмара точок, отримана після фільтрації для сканованого шляху 1.
 (б) Хмара точок, отримана після фільтрації для сканованого шляху 2.

На траєкторії сканування №1 були задіяні чотири контрольні пункти: QT77, NA0587, 1 та 2.

Середньоквадратичне відхилення (СКО) при перерахунку координат склало 0,0354 м.

Після фільтрування хмари точок, кількість елементів сягнула 68 118 612, що відповідає приблизно 40% від вихідного об'єму даних.

Для траєкторії сканування №2 були використані пункти контролю: QT77, 100005, NA0591 та 1.

Середньоквадратична похибка (СКП) перетворення координат зафіксована на рівні 0,0309 м.

В результаті фільтрації, було збережено 93 961 336 точок, що становить приблизно 31% від загальної кількості вихідних даних.

Відфільтровані дані були використані для проведення детального кадастрового аналізу в межах міської забудови.

3.3. Отримання детальних даних міського кадастру

Відповідно до принципів, викладених у попередніх розділах щодо цифрування деталізованих кадастрових ліній, у тестовій зоні цього дослідження умовно можна виділити два головні типи таких ліній: межі між спорудами та існуючі межі доріг.

Зразки цих двох типів деталізованих кадастрових ліній після їх ручного оцифрування зображено на рисунках 18 та 19.

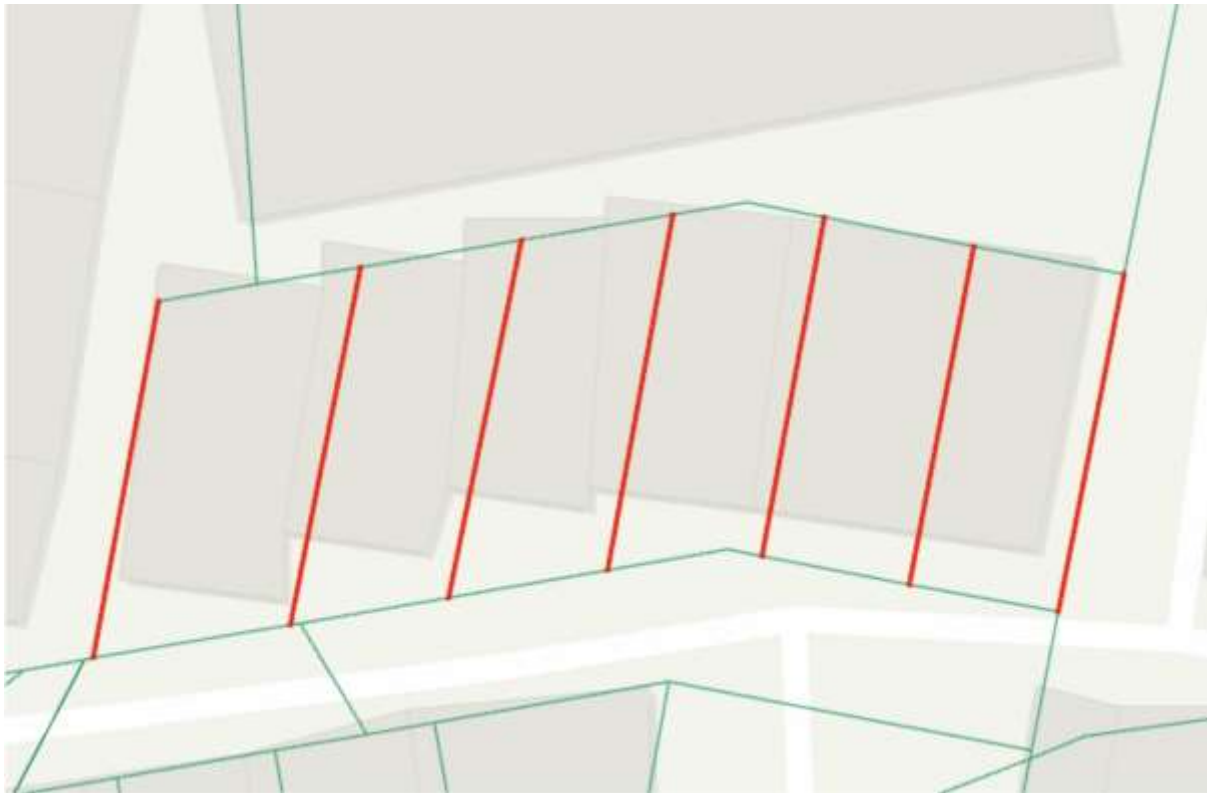


Рисунок 17. Приклад можливої детальної кадастрової лінії, що проходить на межі між будинками.

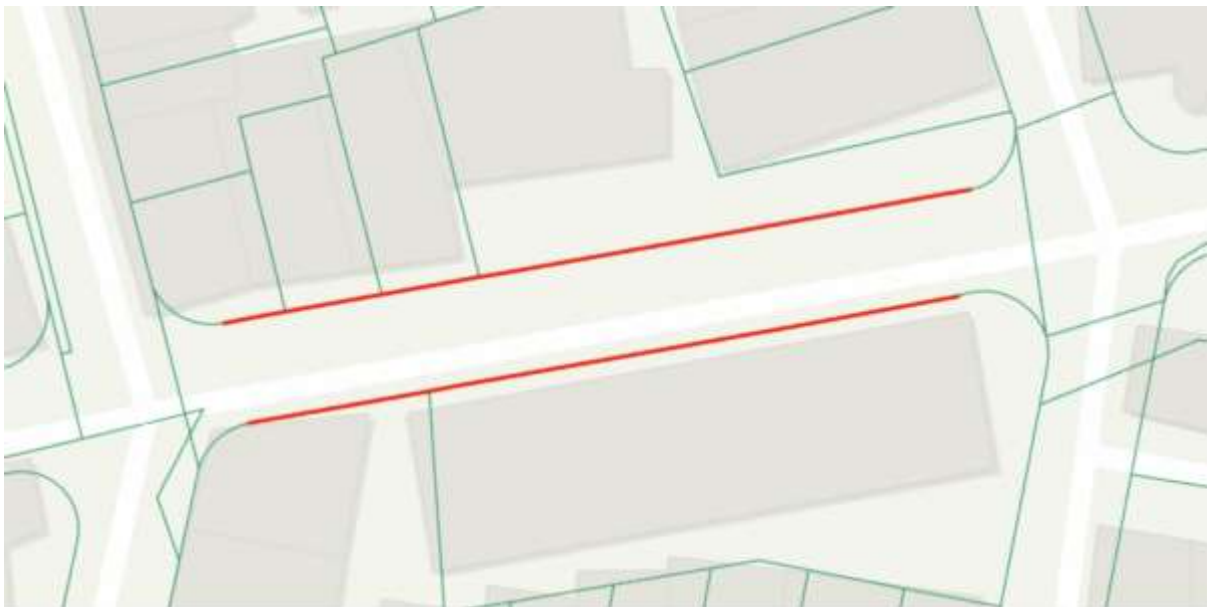


Рисунок 18. Приклад потенційної детальної кадастрової лінії, розташованої вздовж існуючої дороги.

Імовірна детальна кадастрова лінія споруд переважно визначається серединою стін або віссю сходових клітин.

Наприклад, на рисунку 19 представлено накладання обраної імовірної кадастрової лінії на дані хмар точок та кадастрову карту.

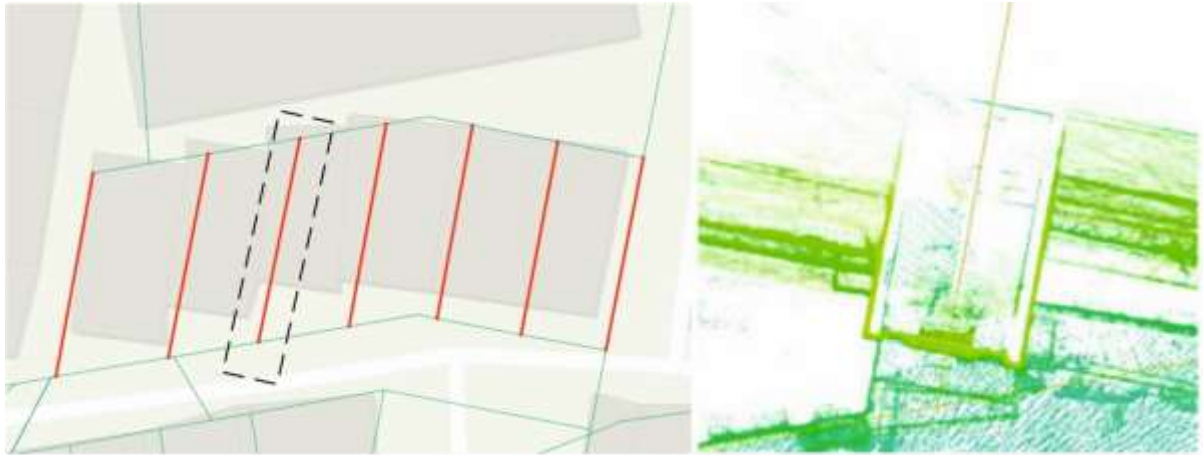


Рисунок 19 Співставлення хмари точок з кадастровою картою

Як бачимо, кадастрова лінія пролягає по центральній лінії сходів споруди, фактично співпадаючи з її серединою, і є, по суті, паралельною до поверхонь, що знаходяться обабіч.

Процес оцифрування ймовірної лінії кадастрової деталізації, що проходить між будівлями, показано на малюнку 20.

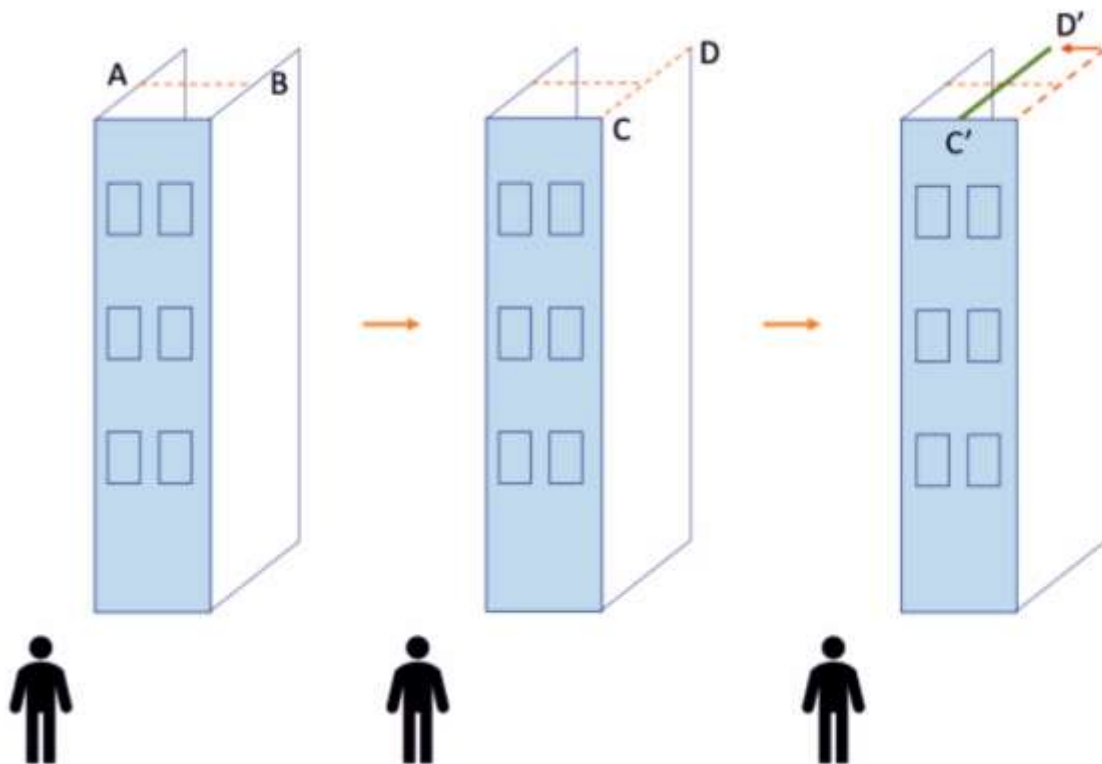


Рисунок 20. Ручне оцифрування можливої кадастрової лінії деталізації між будинками

Спочатку цифризували лінію АВ, вимірявши ширину сходової клітки, а також лінії CD, відштотвхуючись від стіни сходів.

Наступним етапом стало перенесення лінії CD до середини лінії АВ, що дало нам паралельну лінію C'D', яка показує можливе положення детальної кадастрової лінії.

На рисунку 21 червоною лінією позначено потенційну детальну кадастрову лінію, котра розташована вздовж межі наявної дороги.

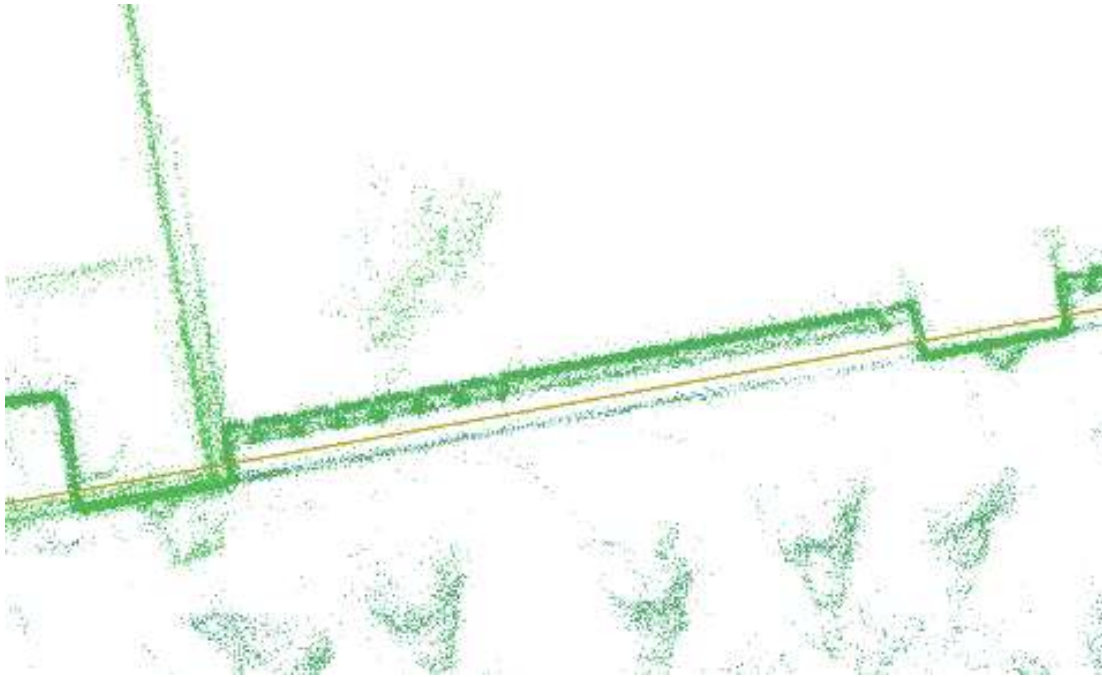


Рисунок 21. Можлива кадастрова детальна лінія розташована вздовж існуючої межі дороги.

Процес оцифрування деталізації кадастру, а саме лінії, що окреслює межу дороги, показано на рисунку 22.

На цьому малюнку блакитними лініями зображено зовнішні контури споруди, що подано у вигляді плану зверху.



Рисунок 22. Процес оцифрування потенційної кадастрової лінії біля межі дороги.

Оцифрували зовнішній край муру, розташованого вздовж дороги, після чого ці прямолінійні відрізки об'єднали у можливий кадастровий контур лінії EF, що зображено на рисунку 22.

Відповідно до зібраної хмари точок LiDAR, потенційні межі кадастру між таунхаусами та вздовж існуючих доріг були вручну оцифровані й сполучені через програму AutoCAD, що дало змогу створити деталізовані міські кадастрові лінії досліджуваної місцевості.

Кінцеві результати показано на рисунку 23.



Рисунок 23. Результат оцифрування детальних ліній, виконаного на основі скоригованої хмари точок, отриманої за допомогою ручного сканування.

3.4. Аналіз результатів

3.4.1 Аналіз даних ліній деталей

На малюнку 24 показано цифрові дані відкоригованої хмари точок, утвореної завдяки ручному лідарному скануванню, разом із результатами тахеометричної зйомки.

Помаранчевим кольором виділено точки деталей, що було знято тахеометром.

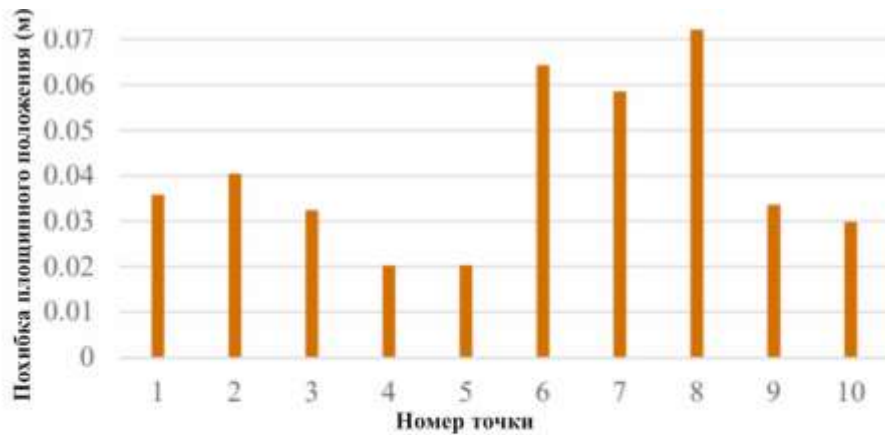
Візуальна оцінка засвідчила, що суттєвих невідповідностей між оцифрованими лініями деталей і точками, отриманими за допомогою тахеометра, не виявлено.



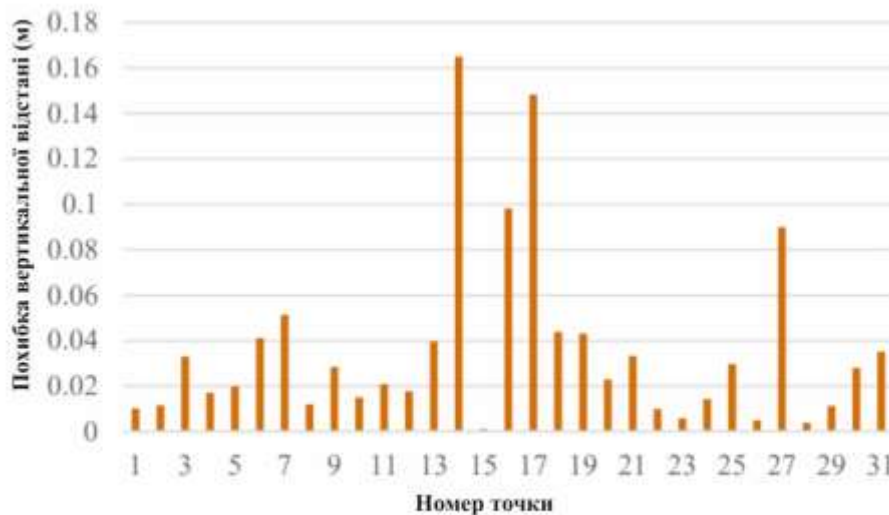
Рисунок 24. Оцифровані результати скоригованих точок, отриманих за допомогою ручного лідарного сканування, та детальні точки, зафіксовані тахеометром, наведено для порівняння

Випробувальна ділянка включала 10 докладних точок, отриманих за допомогою тахеометра, які застосовувалися для аналізу планового положення, плюс 32 детальні точки, також зняті тахеометром, використані для оцінки похибки у вертикальній відстані.

Підсумки обчислення похибок представлені на Малюнку 25.



(а)



(б)

Рисунок 25. Аналіз похибок оцифрованих детальних ліній

(а) Оцінку похибок площинного положення.

(б) Оцінку похибок вертикальної відстані..

Найбільша похибка у плановому положенні для визначених пунктів сягає близько 8,3 см.

Більшість же відхилень коливаються у межах від 2 до 4 сантиметрів.

Найбільше вертикальне відхилення між цифровими детальними лініями та контрольними точками становить близько 16,5 см, хоча, зазвичай, не більше 5 см.

В Україні найбільший масштаб картографічних матеріалів у зонах графічної оцифровки може сягати 1:500, а точність на місцевості складає приблизно 15 см.

Отже, для аналізу похибок застосовано такі категорії:

- Перший рівень – відхилення до 5 см включно,
- Другий рівень – від 5 до 10 см,
- Третій рівень – від 10 до 15 см,
- Четвертий рівень – більше 15 см.

На рисунку 26 представлено статистику похибок з врахуванням цих чотирьох градацій, згрупованих за результатами планового та вертикального аналізу.

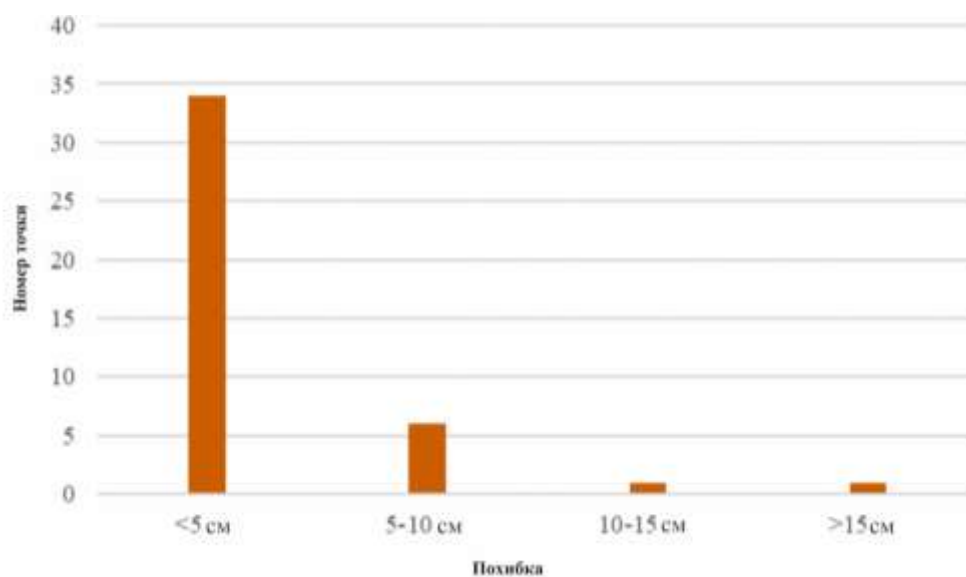


Рисунок 26. Статистичний огляд результатів двох видів аналізу похибок оцифрованих лінійних даних

Помилка оцифрованих детальних даних, здобутих з хмари точок після корекції похибок системи вимірювання відстані, що були верифіковані контрольними вимірами тахеометром, у середньому становила 3,44 см.

Приблизно 97,62 % оцифрованих лінійних даних мали похибку, меншу за 15 см.

Зафіксовано лише одну детальну точку з похибкою, що перевищувала 15 см, однак визначення її положення тахеометром, найімовірніше, було обумовлено суб'єктивним судженням геодезиста.

У районах з щільною забудовою положення детальних точок, визначене геодезистом, могло незначно відрізнитися від оцифрованих координат.

Оскільки під час тахеометричної зйомки геодезист міг лише приблизно, на око визначати осьову лінію об'єкта.

Порівнюючи з кутовими координатами, деталізовані точки, які фіксував тахеометр, великою мірою залежали від суб'єктивного судження оператора.

Відповідно, результати дослідження продемонстрували, що оцифровані деталізовані лінії, які сформовані з виправленої портативної хмари точок LiDAR, демонструють достатню точність для створення деталізованої кадастрової графіки.

Завдяки високій швидкості сканування та мобільності, мобільний LiDAR забезпечує оперативний збір значного обсягу детальних даних безпосередньо на місцевості, що дає змогу швидко формувати високоякісні кадастрові лінії для подальшого аналізу.

Відмінності похибок оцифрованих деталізованих ліній до та після калібрування системи вимірювання відстані відображено на рисунку 27.

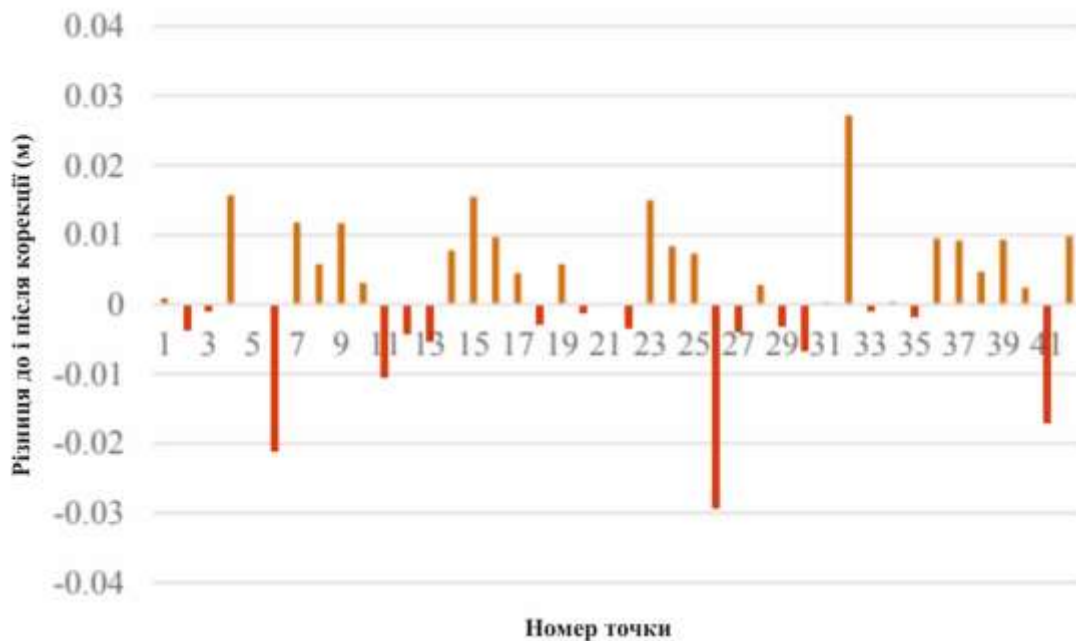


Рисунок 27. Відмінність у похибках оцифрованих лінійних даних деталей, отриманих із скоригованої та нескоригованої хмари точок портативного сканера

З 42 детальних вузлів, проаналізованих у 25 випадках, похибка при порівнянні з цифровими лініями, отриманими з невідкоригованої хмари точок, виявилася значно більшою, аніж при використанні скоригованої.

Додатні значення свідчать про зростання точності, найсуттєвіше зменшення похибки сягало 2,7 см.

У той же час, в 17 випадках похибка, при порівнянні з тими ж оцифрованими лініями, але отриманими з невідкоригованої хмари, виявилась меншою при використанні скоригованої хмари точок.

Від'ємні значення, візуалізовані на рисунку 27, вказують на відсутність покращення точності.

Не зважаючи на коливання похибки в межах 5 мм, приблизно 73% пунктів деталізації продемонстрували зменшення похибки після корекції, у порівнянні з даними, отриманими з невідкоригованої хмари.

Попри те, що в 27% оцифрованих ділянок похибка лишалася більшою, ніж у невідкоригованій хмарі, лише менше ніж 5% виявили розбіжність у похибці, що перевищувала 2 см.

Це свідчить про те, що застосування корекції похибки системи вимірювання відстані помітно підвищує точність більшості оцифрованих деталей.

Водночас, розбіжність у похибці понад 2 см могла бути спричинена не тільки якістю траєкторії переносного лідара, але й особистою оцінкою геодезиста при виборі точок деталізації.

Висновки

У магістерській роботі досліджувалося застосування портативного ручного сканера для ретельного кадастрового аналізу міської території.

Перед початком робіт з детального кадастрового обстеження із застосуванням ручного сканера AlphaGEO SLAM R100, було здійснено його калібрування з використанням наземного лазерного сканера для отримання двовимірної хмари точок у спеціально визначеному внутрішньому калібрувальному полі.

Це дозволило обчислити параметри калібрування на основі плоских поверхонь.

Параметри системної похибки вимірювання відстані, а саме коефіцієнти масштабування S та зміщення C багатопроменевого далекоміра, встановленого на сканері AlphaGEO SLAM R100, було визначено методом площинного калібрування.

Після внесення змін, спостережено, що залишки сконцентрувались поблизу нульової позначки та наблизились до нормального розподілу.

Середні значення залишків стали близькими до нуля, а стандартне відхилення апостеріорної ваги одиниці знизилось, що свідчить про покращення у порівнянні з корекціями, які ігнорували параметри помилки вимірювальної системи дистанції.

Таким чином, запропонована методика динамічного площинного калібрування ефективно усунула значну частину систематичних похибок вимірювання відстані портативного сканера AlphaGEO SLAM R100.

Аналіз середньоквадратичних похибок на контрольних площинах показав підвищення точності після корекції: на окремих площинах покращення сягнуло 2,4 см або 72,12%, а середнє покращення на всіх площинах становило 32,61%.

Це свідчить про те, що запропонований метод калібрування значно покращує загальну якість хмари точок, згенерованої портативним сканером.

Дослідження взаємодії між додатковими параметрами S і C показало значний негативний зв'язок $(-0,82)$, що сприяло отриманню більш достовірних результатів оцінювання цих параметрів.

Однак, через обмеження калібрувального простору, де переважали коротші дистанції для калібрування (близько 20 м замість 40-45 м), кореляція виявилася дещо завищеною $(-0,985)$.

В майбутньому розширення калібрувального простору та використання схеми сканування з ширшим діапазоном відстаней могли б пом'якшити цей ефект.

Виявлено, що навіть на короткій відстані вимірювання (2 м) необхідне коригування відстані становить приблизно 1 см.

Отже, для гарантування високої точності у геодезичних вимірюваннях, особливо при кадастрових роботах із використанням портативних сканерів, доцільно враховувати ці системні похибки.

Це сприятиме поліпшенню точності одержаних результатів.

З метою практичного вивчення умов детального міського кадастру було виконано два незалежні сканування однієї тестової території. Кожне з цих сканувань тривало близько 15 хвилин.

Кожен сканувальний маршрут було виконано по замкненій траєкторії для гарантування максимально точного визначення шляху сканера.

Отримані дані сканування було оброблено, враховуючи калібрувальні параметри приладу, та застосовано для подальшого ручного оцифрування деталізованих кадастрових ліній.

Аналіз результатів демонструє, що застосування портативного сканера дозволяє ефективно отримувати тривимірні хмари точок, які містять детальну інформацію, навіть у щільно забудованих міських зонах.

У таких місцях нерідко виникають проблеми зі стабільним сигналом GNSS, а використання тахеометрів чи стаціонарних сканерів стає складним завданням.

Перевірка оцифрованих ліній, що спиралася на детальні точки, зібрані тахеометром, показала: близько 97 % оцифрованих даних мають похибку меншу за 15 см.

Це цілком відповідає вимогам для створення докладного міського кадастру.

Порівняння оцифрованих даних до та після корекції системної похибки показало: приблизно 73 % точок деталізації продемонстрували суттєве покращення точності (або зменшення похибки), хоча різниця між результатами становила близько 5 мм.

Для 27% точок похибка лишалася значною, хоча лише у менш ніж 5% випадків вона перевищувала 2 см.

Це свідчить про те, як усунення систематичної помилки при вимірюванні відстані покращує точність більшості оцифрованих даних.

Отже, проведене дослідження підтвердило можливість використання портативного LiDAR-сканера для формування детальних міських кадастрових даних, зокрема, для встановлення меж кадастру та відповідних зон.

У перспективі, цей метод може бути застосований для створення тривимірного кадастру та оптимізації управління земельними ділянками.

Список використаних джерел

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012
2. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. – Львів, 2008.
3. Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. – Львів, 2003.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: ГКНТА, 1999.
5. Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії – Львів, 2001.
6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.
7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. "Геодезія" (частина перша). Чернівці 2002р.
8. Баувенс, С.; Бартоломеус, Х.; Колдерс, К.; Лежен, П. Лісова інвентаризація за допомогою наземного лідару: порівняння статичного та портативного мобільного лазерного сканування. Ліси 2016, 7, 127. [CrossRef]
9. Парк, Й.К.; Ум, Д.Й. Застосування портативного сканера для дослідження діаметра та висоти дерева. Міжнародний журнал мобільних пристроїв. Пристрій інженерії. 2019, 3, 1.
10. Хунцага, М.; Чуда, Й.; Томаштік, Й.; Сламова, М.; Корен, М.; Чуди, Ф. Порівняння точності кривої стовбура, визначеної з хмар точок, отриманих різними наземними методами дистанційного зондування. Дистанційне зондування. 2020, 12, 2739.

11. Девез, Т.; Плат, Е.; Дега, М.; Річард, Т.; Паннет, П.; Туон, Ю.; Мейре, Б.; Вателет, Ж.-М.; Ковін, Л.; Лукас, Дж. Кишенькові мобільні лазерні сканери Zeb-1 та Zeb-Revo для картографування підземного кар'єру та його наземного оточення. У матеріалах 2-ї віртуальної конференції з геологічних наук: VGC, Берген, Норвегія, 21–23 вересня 2016 р.

12. Кьябрандо, Ф.; Саммартано, Г.; Спано, А. Порівняння різних рівнів оптимізації в 3D-моделях з кількома датчиками: Тестовий випадок у надзвичайних ситуаціях: 2016. Міжнародна архітектурна фотограма. Дистанційне зондування. Космічна інф. наука. 2017, XLII-2/W3, 155–162. [CrossRef]

13. Макконен, Т.; Хейккіля, Р.; Кааранка, А.; Наатсаарі, М. Застосування швидкісного портативного лазерного сканера для підземної топографічної зйомки тунелів. У матеріалах 32-го Міжнародного симпозіуму з автоматизації та робототехніки в будівництві, Оулу, Фінляндія, 15–18 червня 2015 р.

14. Джеймс, М.Р.; Квінтон, Дж.Н. Ультрашвидка топографічна зйомка для складних середовищ: Ручний мобільний лазерний сканер (HMLS). *Earth Surf. Process. Landf.* 2014, 39, 138–142.

15. Сршан, А. Можливості застосування GeoSLAM-технології для вимірювання закритих просторів. Дипломна робота бакалавра, Політехнічний інститут Меджимур'я в Чаковці, Чаковець, Хорватія, 2019. Доступно онлайн: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:110:324934>

16. Хоу, К.-В.; Чіо, С.-Х. Метод калібрування дальності на основі площини для портативного лідара Geoslam Zeb-Horizon. У працях Міжнародного симпозіуму з дистанційного зондування (ISRS) (ISRS 2021), віртуальна конференція, 26–28 травня 2021 р.

17. Гленні, К.; Ліхті, Д.Д. Статичне калібрування та аналіз Velodyne HDL-64E S2 для високоточного мобільного сканування. *Remote Sens.* 2010, 2, 1610–1624.

18. Гленні, К. Калібрування та кінематичний аналіз лідарного датчика Velodyne HDL-64E S2. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2012, 78, 339–347.

19. Фішлер, М.А.; Боллес, Р.К. Консенсус випадкової вибірки: парадигма для апроксимації моделі із застосуванням до аналізу зображень та автоматизованої картографії. *Commun. ACM* 1981, 24, 381–395.

20. Chio, Shih-Hong & Hou, Kai-Wen. (2021). Application of A Hand-Held LiDAR Scanner for the Urban Cadastral Detail Survey in Digitized Cadastral Area of Taiwan Urban City. *Remote Sensing*. 13. 4981. 10.3390/rs13244981.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи:

**«Оцінка точності та використання портативного
LiDAR при виконанні кадастрових робіт у міському
середовищі»**

Обсяг пояснювальної записки: 64 аркушів.

24.12.25 рік

(дата)

(підпис студента)