

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
ФАКУЛЬТЕТ АРХІТЕКТУРИ, БУДІВНИЦТВА ТА ДИЗАЙНУ
КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНОЇ ГЕОДЕЗІЇ ТА ЗЕМЛЕУСТРОЮ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____ Юрій ВЕЛИКОДСЬКИЙ

«_____» _____ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»
ЗА СПЕЦІЛЬНІСТЮ 193 «ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ»**

Тема: «3D сканування: методика оцінки точності»

Виконавець: здобувач групи Група М-193-24-1-ГС

Пронін Олександр Сергійович _____

Керівник: к.е.н., доцент Третяк Роман Антонович _____

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»:

в.о. завідувача кафедри екології, хімії та хімічної технології, доктор технічних наук, доцент Черняк Лариса Миколаївна _____

Консультант розділу «Охорона праці»:

кандидат тех. наук, доцент кафедри цивільної та промислової безпеки

Федина Василь Петрович _____

Нормоконтролер :PhD, доцент Іщенко Наталія Федорівна _____

КИЇВ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
Факультет архітектури, будівництва та дизайну
Кафедра аерокосмічної геодезії та землеустрою
Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»
Освітньо-професійна програма «Геоінформаційні системи і технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач випускової кафедри

_____ **Юрій ВЕЛИКОДСЬКИЙ**

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Проніна Олександра Сергійовича

1. Тема роботи: «3D сканування: методика оцінки точності», затверджена наказом президента від 06.10.2025 р. № 2183/ст
2. Термін виконання роботи: з 29 вересня 2025 р. по 31 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані роботи: нормативно-правова база України у сфері інженерної геодезії та метрології (ДБН, ДСТУ); технічна документація на геодезичне обладнання (мобільний лазерний сканер, електронний тахеометр); міжнародні стандарти оцінки точності; наукові праці вітчизняних і зарубіжних учених з питань, лазерного сканування та теорії похибок; інтернет-ресурси та технічні посібники до програмного забезпечення.[2]
4. Зміст пояснювальної записки: У першому розділі охарактеризовано принципи роботи мобільних лазерних систем на базі технології SLAM, розглянуто роль інерціальних вимірювальних модулів та лідарної одометрії у позиціонуванні. Проаналізовано специфічні джерела похибок динамічного сканування (зокрема, дрейф траєкторії та «ефект ковзання»), досліджено існуючі підходи до контролю якості SLAM-даних, а також виконано огляд програмного забезпечення для обробки траєкторій та хмар точок. У другому розділі обґрунтовано вибір об'єкта дослідження, детально описано методику створення високоточної еталонної геодезичної основи за допомогою електронного тахеометра. Розроблено та

обґрунтовано методику виконання мобільного сканування із застосуванням замкнених маршрутів для компенсації накопиченої помилки та, у випадку комбінованих систем, інтеграції з GNSS-RTK. У третьому розділі проведено порівняльний аналіз хмар точок, отриманих мобільними сканерами, з еталонними тахеометричними координатами. Виконано оцінку геометричних деформацій моделі (товщини колон, зміщення конструкцій в просторі), розраховано статистичні показники точності (СКП) для різних режимів зйомки, побудовано карти відхилень поверхонь та сформульовано практичні рекомендації щодо мінімізації дрейфу при SLAM-зйомці.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: 4 таблиці, 35 рисунків

6. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1.	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	29.09.2025	
2.	Пошук та опрацювання літературних джерел по темі кваліфікаційної роботи	30.09.2025	
3.	Написання вступу та 1 розділу кваліфікаційної роботи	16.10.2025	
4.	Написання 2 та 3 розділів кваліфікаційної роботи	06.11.2025	
5.	Написання 4 та 5 розділів кваліфікаційної роботи	01.12.2025	
6.	Оформлення пояснювальної записки, підготовка роздаткового матеріалу та презентації до захисту кваліфікаційної роботи	11.12.2025	

7. Консультанти з окремих розділів:

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона навколишнього середовища	в.о. завідувача кафедри екології, хімії та хімічної технології, доктор технічних наук, доцент Черняк Лариса Миколаївна		
Охорона праці	кандидат тех. наук, доцент кафедри цивільної та промислової безпеки Федина Василь Петрович		

Дата видачі завдання: « 29 » вересня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи: _____ Третяк Р.А.

Завдання прийняв до виконання: _____ Пронін О.С.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему: «3D сканування: методика оцінки точності» містить: 81 сторінку, 35 рисунків, 4 таблиці, 35 використаних джерел.

Об'єктом дослідження є технологія мобільного лазерного сканування (MLS) будівельних споруд та методи отримання просторових даних із застосуванням SLAM-навігації.

Предметом дослідження є методи оцінки точності та геометричної достовірності 3D-моделей, а також закономірності виникнення похибок при скануванні в динамічному режимі.

Мета роботи: встановити реальні показники точності мобільних лазерних систем із технологією SLAM (на прикладі CHCNAV RS10 та Green Valley LiGrip) шляхом порівняльного аналізу з еталонними тахеометричними вимірами та розробити практичні рекомендації щодо їх застосування у будівництві.

Методи дослідження: аналіз науково-технічної літератури та нормативно-правової бази; експериментальний метод (польові вимірювання електронним тахеометром та мобільне лазерне сканування); порівняльний аналіз (геометричне зіставлення хмар точок з еталонною моделлю в середовищі CloudCompare); статистичний метод (розрахунок середньоквадратичних похибок RMSE); метод картування відхилень.

Результат магістерської роботи має важливе практичне значення для вдосконалення методики виконавчих зйомок, що дозволяє скоротити час польових робіт у 10-50 разів, обґрунтувати вибір обладнання залежно від умов об'єкта та забезпечити надійну верифікацію даних для створення цифрових двійників (BIM).

3D-СКАНУВАННЯ, МОБІЛЬНЕ ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ (MLS), SLAM-НАВІГАЦІЯ, ОЦІНКА ТОЧНОСТІ, ГЕОДЕЗИЧНИЙ МОНІТОРИНГ, ХМАРА ТОЧОК, ЕЛЕКТРОННИЙ ТАХЕОМЕТР, BIM-ТЕХНОЛОГІЇ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ALS - Airborne Laser Scanning (повітряне лазерне сканування)

BIM - Building Information Modeling (інформаційне моделювання будівель)

CAD - Computer-Aided Design (система автоматизованого проектування)

GNSS - Global Navigation Satellite System (глобальна навігаційна супутникова система)

IMU - Inertial Measurement Unit (інерціальний вимірювальний модуль)

LAS - LASer (стандартний формат файлів для обміну даними лазерного сканування)

LiDAR - Light Detection and Ranging (технологія вимірювання відстані за допомогою світлового променя)

MLS - Mobile Laser Scanning (мобільне лазерне сканування)

RMSE - Root Mean Square Error (середньоквадратична похибка)

RTK - Real Time Kinematic (режим кінематики в реальному часі)

SLAM - Simultaneous Localization and Mapping (одночасна навігація та побудова карти)

TLS - Terrestrial Laser Scanning (наземне лазерне сканування)

БПЛА - безпілотний літальний апарат

ДБН - державні будівельні норми

ДСТУ - державний стандарт України

ПЗ - програмне забезпечення

СКП - середня квадратична похибка

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ 3D-ЗЙОМКИ ТА ОЦІНКИ ЇХ ТОЧНОСТІ.....	12
1.1.Технології 3D-сканування та класифікація методів.....	12
1.2.Класифікація за платформою-носієм та сферою застосування.....	18
1.3.Основні джерела похибок при мобільному (SLAM) скануванні	24
1.4.Існуючі стандарти та підходи до оцінки точності даних мобільного сканування.....	26
Висновки до розділу 1	30
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	32
2.1.Характеристика об'єкта дослідження та інструментальне забезпечення	32
2.2.Створення геодезичної основи	34
2.3.Методика виконання мобільного сканування.....	37
2.4.Первинна обробка даних сканування (Pre-processing).....	38
Висновки до розділу 2	40
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ.....	41
3.1.Оцінка абсолютної точності за контрольними точками	41
3.2.Аналіз геометричної достовірності конструкцій.....	46
3.3.Просторова візуалізація відхилень.....	47
3.4.Порівняльний аналіз ефективності досліджуваних систем.....	55
Висновки до розділу 3	57
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	58

4.1.Нормативно-правове регулювання охорони навколишнього середовища при проведенні будівельних робіт.....	58
4.2.Вплив геодезичних вимірювань на навколишнє природне середовище.	62
Висновки до розділу 4	64
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	66
5.1.Загальні положення.....	66
5.2.Нормативно-правова база з охорони праці	67
5.3 Пожежна безпека.....	72
5.4 Умови та фактори виробничого середовища	74
Висновки до розділу 5	77
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Актуальність теми

Хоча лазерне сканування стає стандартом у будівництві, на практиці ми стикаємося з проблемою «сліпої довіри» до отриманих даних. Замовники часто вважають хмару точок ідеальною, забуваючи, що паспортна точність приладу (наприклад, за ASTM E3125) досягається в лабораторії, а не в умовах реального будмайданчика.[7] У роботі запропоновано методику перевірки сканера в польових умовах за допомогою перевіреної часом тахеометрії, щоб інженер міг гарантувати результат, а не покладатися на рекламні характеристики.

Дослідження базується на симбіозі двох підходів: класичної інженерної геодезії, де тахеометрія виступає беззаперечним еталоном точності, та новітніх технологій сканування. Такий підхід дозволяє оцінити інноваційний інструмент за допомогою перевірених часом методик.

Окремим аспектом є економічна доцільність тому, що сканування виграє в оперативності збору даних, проте вимагає значних ресурсів для їх подальшої обробки. Тахеометрія ж, навпаки, забезпечує високу надійність кожного виміру, але програє у швидкості виконання робіт. У роботі піднімається питання раціональності: де проходить та межа, коли швидкість сканера перебиває його вартість, а де краще залишитися з традиційним тахеометром.

Крім того, в контексті переходу галузі на BIM-проекування, питання точності стає критичним. Цифровий двійник (Digital Twin), побудований на викривлених даних, не несе користі, а навпаки — створює ризики при експлуатації.

Метою роботи є встановлення реальних показників точності мобільних лазерних систем із технологією SLAM шляхом порівняльного аналізу з еталонними вимірами та розробка рекомендацій щодо їх застосування.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- систематизувати теоретичні засади технології мобільного сканування (MLS) та принципів роботи SLAM-навігації, зокрема фізику роботи далекомірів, класифікацію джерел похибок та можливості сучасного ПЗ для обробки даних.

- проаналізувати нормативну базу та існуючі закордонні практики (ASTM, ISO) щодо контролю якості хмар точок.
- розробити програму експерименту, що передбачає створення високоточної геодезичної основи та сценарій сканування в складних умовах.
- виконати натурні дослідження: провести паралельну зйомку тестового об'єкта електронним тахеометром та лазерним сканером.
- здійснити камеральну обробку та аналіз: обчислити розходження координат, вивести статистику відхилень (середньоквадратичні, граничні похибки) та побудувати карту відхилень поверхонь.
- сформулювати рекомендації щодо практичного застосування запропонованої методики контролю точності на будівельних об'єктах.

Об'єктом дослідження є технологія мобільного лазерного сканування (MLS) будівельних споруд та методи отримання просторових даних із застосуванням SLAM-навігації.

Предметом дослідження є методи оцінки точності та геометричної достовірності 3D-моделей, а також закономірності виникнення похибок при скануванні в динамічному режимі.

Наукова новизна отриманих результатів:

Удосконалено методику комбінованого мобільного сканування для об'єктів зі змішаними умовами (приміщення/вулиця) шляхом впровадження маршруту із замиканням петель та використанням точок входу/виходу як «RTK-якорів» для мінімізації дрейфу траєкторії.

Встановлено, що при використанні гібридних систем (SLAM + RTK) критичним фактором точності є ефективна дальність лідара: доведено, що система з більшою дальністю (CHCNAV RS10, 120 м) забезпечує втричі кращу стабільність геометрії (СКП 37 мм), ніж аналог із меншою дальністю (LiGrip O2 Lite, 40 м), який схильний до навігаційного дрейфу (СКП 96 мм) через втрату геометричних орієнтирів на відкритих ділянках.

Дістало подальшого розвитку дослідження систематичних похибок SLAM-алгоритмів: виявлено та класифіковано специфічні деформації моделі, такі як

«геометричне згладжування» гострих кутів та «ефект подвоєння» вертикальних конструкцій, що виникають внаслідок розходження траєкторії навіть за наявності RTK-корекції.

Практичне значення отриманих результатів:

Економічна ефективність: Експериментально доведено, що використання мобільних SLAM-систем дозволяє скоротити час польових робіт у 10-50 разів порівняно з тахеометричною зйомкою при збереженні точності, достатньої для виконавчого контролю габаритів та об'ємів.

Надійність контролю: Обґрунтовано необхідність використання незалежного геодезичного контролю (тахеометрії) для верифікації хмар точок, оскільки візуальна оцінка SLAM-даних не дозволяє виявити приховані глобальні деформації моделі.

Результати досліджень можуть бути використані будівельними компаніями для вибору оптимального комплексу обладнання (гібридний сканер для великих площ vs тахеометр для анкерів) залежно від вимог до точності.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ 3D-ЗЙОМКИ ТА ОЦІНКИ ЇХ ТОЧНОСТІ

1.1. Технології 3D-сканування та класифікація методів

3D-сканування - це високотехнологічний процес безконтактного дистанційного зондування, спрямований на отримання цифрової інформації про форму, розміри та просторове положення фізичних об'єктів. Сутність методу полягає у високошвидкісному вимірюванні координат (X , Y , Z) величезної кількості точок на поверхні об'єкта, що дозволяє з високою точністю відтворити його геометрію у віртуальному середовищі.

На відміну від традиційної геодезії (тахеометрії або GNSS-вимірювань), яка оперує дискретним набором характерних точок (кути будівель, люки, межі), сканування забезпечує суцільне покриття досліджуваної поверхні. Результатом роботи будь-якої скануючої системи є масив даних, який отримав назву «хмара точок». Кожна точка в цьому масиві несе не лише інформацію про своє просторове положення, а й додаткові атрибутивні дані: значення інтенсивності відбитого сигналу (що характеризує матеріал поверхні) та, за наявності фотокамер, реальний колір (RGB).

З точки зору фізики процесу отримання даних, усі сучасні методи 3D-зйомки фундаментально класифікують на дві групи за принципом взаємодії з джерелом енергії (рис. 1.1). [10]



Рис. 1.1 Класифікація за принципом взаємодії

Активні технології

Активні системи характеризуються тим, що вони самостійно генерують та випромінюють енергію (зазвичай у вигляді лазерного променя або світлового патерну) для освітлення об'єкта. Прилад вимірює параметри відбитого сигналу. Ключовою перевагою таких систем є їхня незалежність від зовнішнього освітлення, що дозволяє проводити вимірювання з однаковою ефективністю як вдень, так і в повній темряві.

Найпоширеніша активна технологія в інженерній геодезії. LiDAR (Light Detection And Ranging) — це метод прямого вимірювання, що визначає відстань до об'єкта за допомогою лазерного променя.[10] В основі будь-якого сканера лежить один і той самий принцип: прилад випускає лазерний промінь, який відбивається від поверхні (стіни, землі, колони) і повертається назад. Прилад фіксує два ключові параметри:

1. Точну відстань до точки.
2. Точні горизонтальний та вертикальний кути до цієї точки.

Комбінація цих трьох значень (два кути + відстань) дозволяє миттєво обчислити унікальну 3D-координату кожної точки (X, Y, Z).

Залежно від способу вимірювання відстані, технологія поділяється на два основні фізичні методи:

1. Імпульсний метод:

Принцип роботи аналогічний до «ехолота». Прилад випромінює короткий, потужний лазерний імпульс і запускає надточний секундомір. Фіксуючи час (t), який знадобився імпульсу, щоб дістатися об'єкта, відбитися і повернутися до приймача, система обчислює відстань (D) за формулою

$$D = (c \times t) / 2, \quad (1.1)$$

де c - швидкість світла;

t - час.

Цей метод є ідеальним для зйомки на великі відстані і є домінуючим у повітряному скануванні (ALS) та при роботі з великими інфраструктурними об'єктами.

2. Фазовий метод:

Цей метод використовує не короткий імпульс, а безперервну лазерну хвилю з відомою частотою. Прилад порівнює фазу хвилі, що повернулася, з фазою хвилі, яку він випромінює в той самий момент. Різниця «зсув фази» між цими двома хвилями дозволяє обчислити відстань. Фазові сканери зазвичай працюють на менших відстанях (до 150-200 м), але забезпечують надзвичайно високу швидкість та щільність сканування, що робить їх ідеальними для детальної зйомки фасадів, інтер'єрів та інженерного контролю в будівництві.

Технологія структурованого підсвічування менш поширена в геодезії, але є важливою частиною активних методів. Принцип полягає у проектуванні на об'єкт відомого світлового патерну (наприклад, серії паралельних смуг або сітки). Камера, розташована під кутом до проектора, фіксує, як цей патерн деформується на поверхні об'єкта. Аналізуючи ці деформації, програмне забезпечення методом тріангуляції обчислює тривимірну форму. Цей метод забезпечує дуже високу роздільну здатність, але на малих відстанях, і тому використовується переважно для сканування дрібних об'єктів (музейні експонати, промислові деталі).

Пасивні технології

Пасивні системи не випромінюють власної енергії. Вони покладаються на фіксацію відбитого або випроміненого зовнішнього освітлення від об'єкта. Головним і найважливішим представником цього класу є фотограмметрія.

Фотограмметрія (SfM) - це головний «конкурент» та водночас доповнення до лазерного сканування. Це технологія непрямого вимірювання 3D-координат. Вона не вимірює 3D-точки безпосередньо. Натомість, вона використовує серію звичайних 2D-фотографій, зроблених з різних, частково перекритих, ракурсів.

Сучасне програмне забезпечення аналізує всі фотографії і автоматично знаходить тисячі однакових «ключових точок» на різних знімках. Аналізуючи зміщення (паралакс) цих точок відносно одна одної, алгоритми одночасно обчислюють дві речі:

- 1) структуру - тривимірні координати всіх цих точок;
- 2) рух - точне положення та орієнтацію кожної камери в момент зйомки.

Ключова відмінність від LiDAR полягає в тому, що фотограмметрія обчислює 3D-модель, тоді як LiDAR її вимірює. Фотограмметрія є надзвичайно гнучкою (використовується як з ручних камер, так і з БПЛА), дешевшою, і автоматично створює фотореалістичні, текстуровані моделі. Однак її точність сильно залежить від якості освітлення, наявності текстури на об'єкті та складності обробки.

Висока точність, швидкість отримання даних та універсальність описаних вище методів зумовили стрімку інтеграцію технологій лазерного сканування у виробничі процеси різних галузей. На сьогодні можна виділити п'ять ключових напрямів застосування цієї технології.

Сфери застосування технологій 3D-сканування

Висока точність, швидкість отримання даних та універсальність описаних вище методів зумовили стрімку інтеграцію технологій лазерного сканування у виробничі процеси різних галузей. Насамперед, ця технологія стає драйвером переходу від двовимірного до багатовимірного 3D-кадастру в землеустрої (рис. 1.2). Сканування дозволяє ефективно інвентаризувати об'єкти у щільній міській забудові «міських каньйонах», де робота GNSS ускладнена, а також фіксувати

просторові межі багаторівневих об'єктів, таких як підземні паркінги чи мости. Крім того, лідарні системи незамінні при вирішенні земельних спорів завдяки високій точності та при зйомці заліснених територій, де лазер здатний отримувати рельєф крізь рослинність.

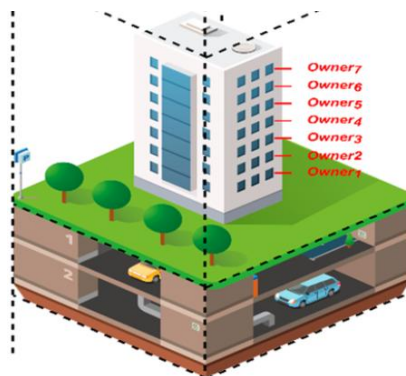


Рис. 1.2 Приклад реалізації 3D-кадастру

Водночас важливо враховувати геодезичний аспект визначення площ. Площа земельної ділянки (кварталу) для юридичних та податкових цілей в Україні вираховується в горизонтальній проекції (на площині), а не як площа фізичної поверхні рельєфу. Юридична площа — це площа геометричної фігури, утвореної проекцією меж цієї ділянки на горизонтальну площину в державній референційній системі координат УСК-2000 (технічно це проекція Гаусса-Крюгера). На практиці це означає, що якщо ділянка знаходиться на схилі, її фізична площа (площа поверхні ґрунту) буде більшою за документальну. Проте в кадастр вноситься саме «плоска» площа (вид зверху), що є стандартною світовою практикою для уникнення спорів, оскільки рельєф може змінюватися, а планові координати (X, Y) залишаються незмінними.

У сфері архітектури та будівництва сканування виступає фундаментом для інформаційного моделювання (BIM), забезпечуючи створення цифрових двійників будівель та автоматизований контроль якості шляхом порівняння факту з проектом (рис 1.3).

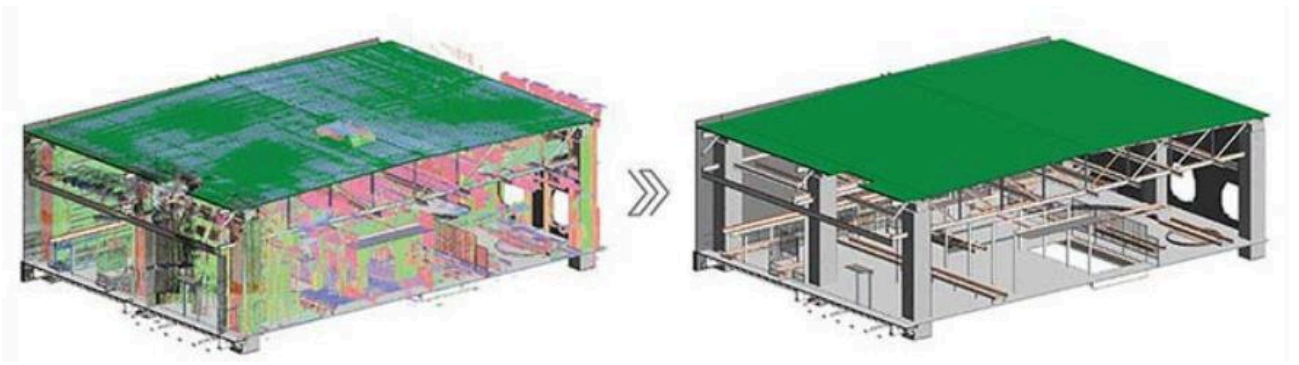


Рис. 1.3 Технологія Scan to BIM: процес векторизації хмари точок (ліворуч) у твердотільну інформаційну модель будівлі (праворуч)

Технологія також є стандартом для обслуговування транспортної інфраструктури: мобільні системи дозволяють виконувати паспортизацію доріг (рис. 1.4), моніторинг залізничних шляхів та інспекцію мостів без перекриття руху, фіксуючи деформації та габарити з високою деталізацією.



Рис. 1.4 Результат мобільного лазерного сканування транспортної інфраструктури

Значний потенціал технології розкрито у промисловості та енергетиці, де вона застосовується для реверс-інжинірингу втраченої документації, модернізації цехів із віртуальною перевіркою сумісності нового обладнання, а також у маркшейдерії для безпечного дистанційного підрахунку обсягів сипучих матеріалів. Окремим важливим напрямом є збереження культурної спадщини

(рис. 1.5) та криміналістика, де створення прецизійних цифрових копій дозволяє як реставрувати пам'ятки архітектури, так і оперативно фіксувати місця подій для подальшого експертного аналізу.

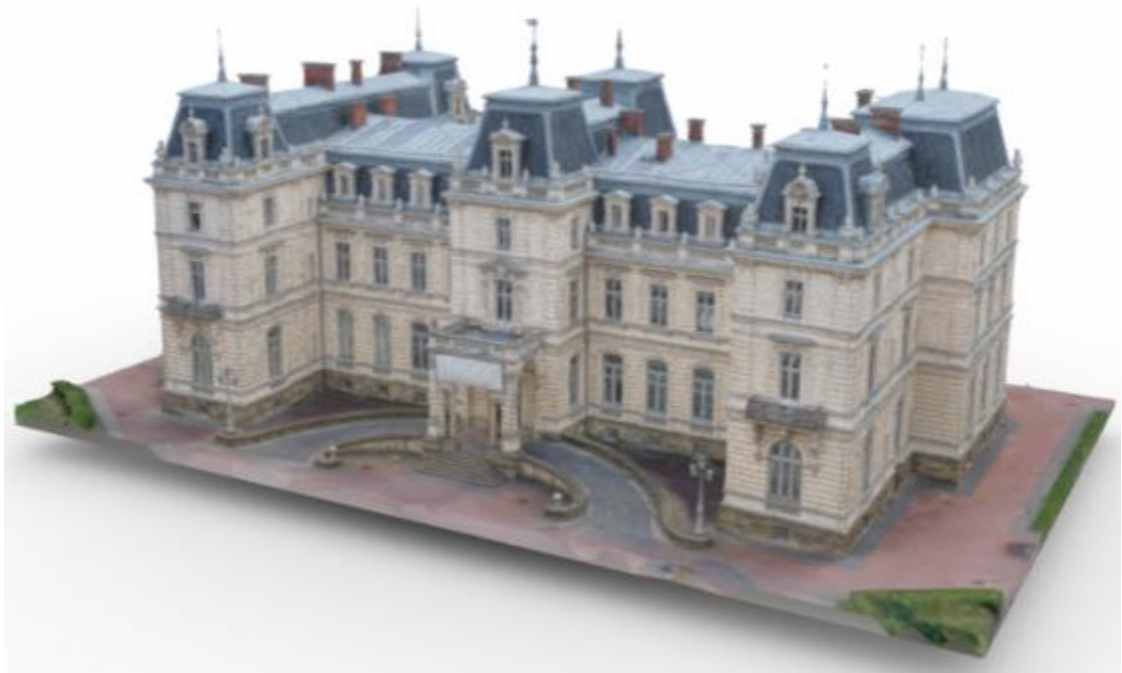


Рис. 1.5 Цифрова модель Палацу Потоцьких

1.2. Класифікація за платформою-носієм та сферою застосування

Ефективність та сфера застосування технологій 3D-зйомки визначаються не лише їхніми фізичними принципами, але й платформою-носієм, на якій розміщено сенсор (рис. 1.6). Спосіб переміщення приладу у просторі безпосередньо впливає на точність, швидкість, вартість та детальність збору даних. За цією ознакою, всі сучасні системи 3D-зйомки можна класифікувати на чотири основні категорії.

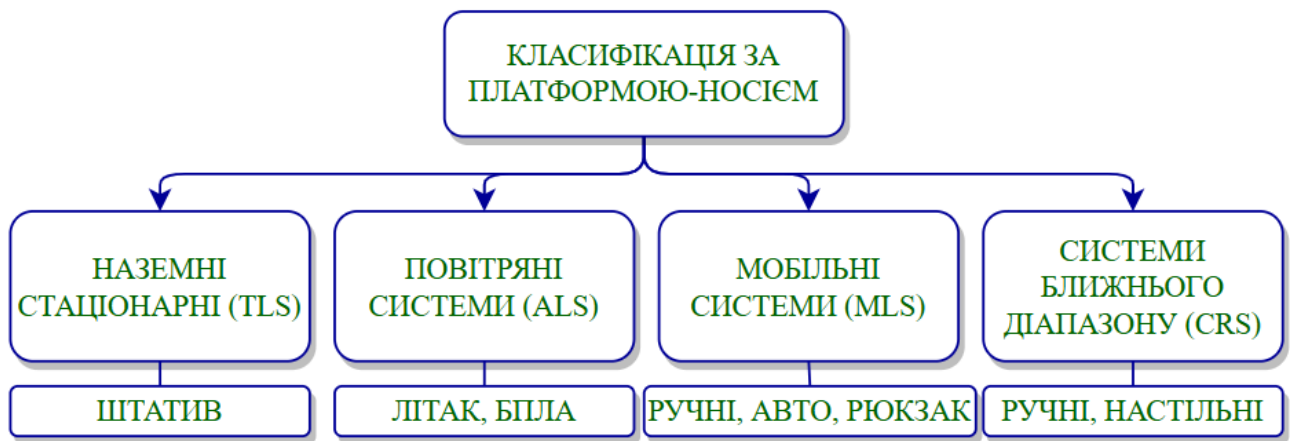


Рис. 1.6 Класифікація за платформою-носієм

Наземні стаціонарні системи (TLS)

Наземне лазерне сканування (TLS) - це активний метод дистанційного збору даних (рис. 1.7), що дозволяє отримати точну тривимірну копію об'єкта у вигляді «хмари точок». Якщо говорити просто, то сканер — це геодезичний прилад, подібний до тахеометра, який замість однієї точки за раз вимірює мільйони точок на секунду

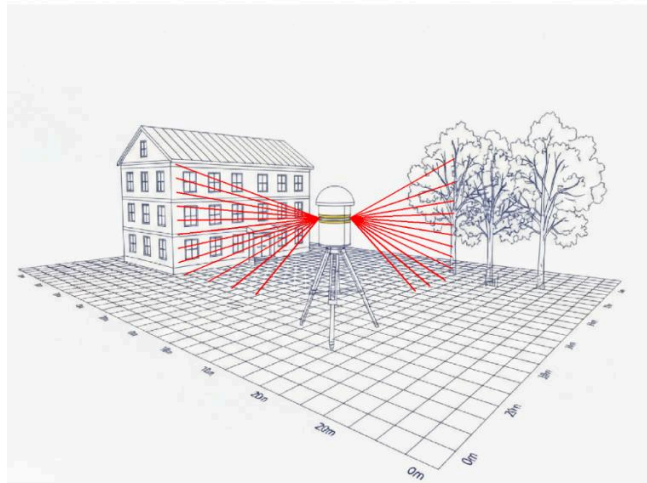


Рис. 1.7 Схематичне зображення наземного сканування

Це «класичний» підхід в інженерній геодезії, де скануюча система встановлюється статично на геодезичний штатив. Принцип роботи полягає у послідовній зйомці об'єкта з кількох фіксованих точок станцій (рис. 1.8), оскільки один сканер не може побачити об'єкт з усіх боків — завжди будуть «тіні» (місця, куди промінь не потрапив через колони чи кути).

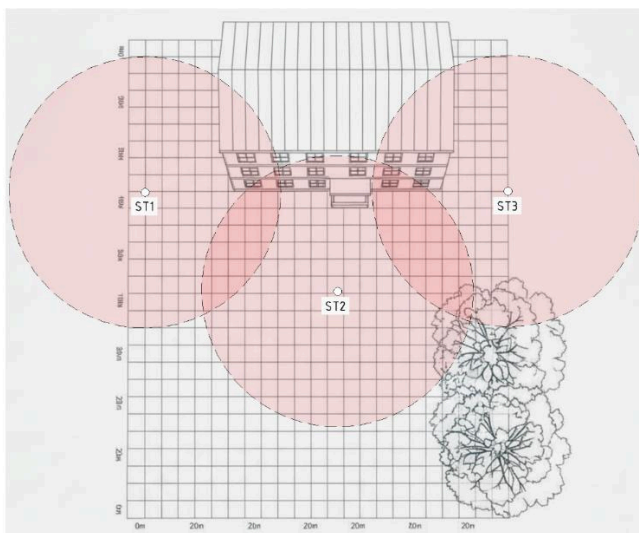


Рис. 1.8 Схематичне зображення наземного сканування з кількох станцій

З кожної станції прилад виконує повне панорамне сканування, після чого кремлі хмари точок потім програмно «зшиваються» в єдину систему координат. Це робиться або автоматично (програма сама знаходить спільні площини), або за допомогою спеціальних марок чи сфер, які ставляться на об'єкті і є видимими з різних станцій.

Додавання кольору (RGB) та інтенсивності

Окрім 3D-координат, сканер фіксує два додаткові параметри:

1. Інтенсивність: Сканер записує силу відбитого сигналу. Поверхні, що добре відбивають світло (світлі, гладкі), дають високу інтенсивність, а ті, що поглинають (темні, шорсткі), — низьку. Це створює детальне чорно-біле зображення, яке часто є більш інформативним, ніж звичайне фото.

2. Колір (RGB): Більшість сучасних сканерів мають вбудовану цифрову фотокамеру. Після сканування вона робить панорамний знімок. Потім програма «накладає» кольори з фотографії на кожну точку хмари, створюючи фотореалістичну 3D-модель.

Завдяки високій точності (від долей міліметра до кількох міліметрів) та можливості прив'язки до високоточної геодезичної мережі, TLS є золотим стандартом для задач, де точність є пріоритетом. Це включає виконавчу зйомку та контроль якості будівництва (порівняння «факт-проект»), високоточні

архітектурні обміри, збереження культурної спадщини та моніторинг деформацій (мости, греблі, зсуви).

Повітряні системи (ALS – Airborne Laser Scanning)

Цей метод є прямою протилежністю TLS за масштабом. У ньому скануюча LiDAR-система встановлюється на рухомій повітряній платформі (рис. 1.9) — літаку, гелікоптері або, останнім часом, на безпілотних літальних апаратах (БПЛА).

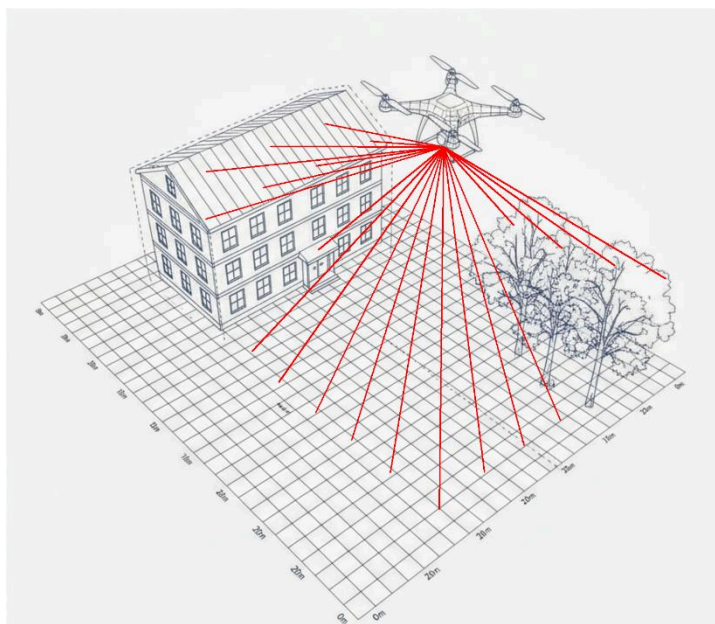


Рис. 1.9 Схематичне зображення повітряного сканування

Система ALS є комплексом, що складається з трьох ключових компонентів: лазерного сканера (зазвичай імпульсного, для великих відстаней), високоточного приймача GNSS (для визначення траєкторії польоту) та інерціальної системи (IMU) (для визначення точних кутів нахилу платформи). Це дозволяє визначати координати кожної точки на землі з високою швидкістю «зверху-вниз».

Головна перевага — надзвичайно висока продуктивність, що дозволяє за короткий час картографувати величезні території. Основне застосування — створення високоточних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) для цілих областей чи країн. Ключова перевага LiDAR у цій сфері — здатність променя «пробивати» рослинність та отримувати точки безпосередньо на земній поверхні, що

неможливо для фотограмметрії. Також ALS є незамінним для моніторингу ліній електропередач, інспекції кар'єрів та аналізу лісового господарства.

Мобільні скануючі системи (MLS)

Мобільне лазерне сканування я розглядаю як кінематичний метод збору просторових даних, при якому сканер виконує вимірювання в русі, будучи встановленим на рухомій платформі. На відміну від дискретного методу TLS (станція – перестановка – станція), MLS забезпечує безперервність процесу, формуючи єдиний масив даних уздовж траєкторії руху.

Залежно від платформи-носія та способу позиціонування, сучасні мобільні системи я класифікую на дві великі групи:

1. Транспортні системи (MLS).

Це класичний вид мобільного сканування, де високопродуктивні сканери встановлюються на автомобілі, залізничні платформи або катери.

Вони жорстко залежать від інтеграції з супутниковою навігацією (GNSS) та високоточними інерціальними системами (INS/IMU). Координата кожної точки обчислюється шляхом прямої геодезичної засічки від супутникової антени в момент часу.

Паспортизація доріг, зйомка залізниць, створення цифрових двійників міст. Хоча ці системи надзвичайно продуктивні, вони обмежені прохідністю транспортного засобу і залежністю від відкритого неба (сигналу GNSS).

2. Портативні та носимі системи (Portable MLS).

Саме ця категорія є основним предметом мого дослідження. До неї належать рюкзачні системи та ручні сканери, такі як використані в дослідженні CHCNAV RS10 та GreenValley LiGrip.

Оскільки такі системи часто працюють у зонах без супутникового сигналу (приміщення, тунелі, густий ліс, щільна забудова), вони використовують технологію SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Замість жорсткої прив'язки до GNSS, система обчислює своє положення відносно попереднього моменту часу, аналізуючи зміщення навколишньої геометрії (лідарна одометрія) та дані вбудованих акселерометрів і гіроскопів (IMU).

Сучасні портативні сканери часто оснащуються обертовими лідарами (для збільшення кута огляду до 360°) та панорамними камерами для розфарбовування хмари точок.

Новітні моделі (зокрема CHCNAV RS10) поєднують обидва підходи: вони використовують RTK-модуль для отримання точних координат на вулиці (як транспортні системи) і SLAM-алгоритми для стабілізації траєкторії та роботи в «тіні» (як портативні системи).

Таким чином, з точки зору фізики процесу, ключова відмінність мобільного сканування від стаціонарного полягає у необхідності точного відновлення траєкторії руху сенсора (рис. 1.10). Якщо у TLS координата центру сканування є константою для однієї станції, то в MLS вона є змінною функцією часу, що висуває специфічні вимоги до алгоритмів обробки даних, які я детально розгляну в аналізі джерел похибок.

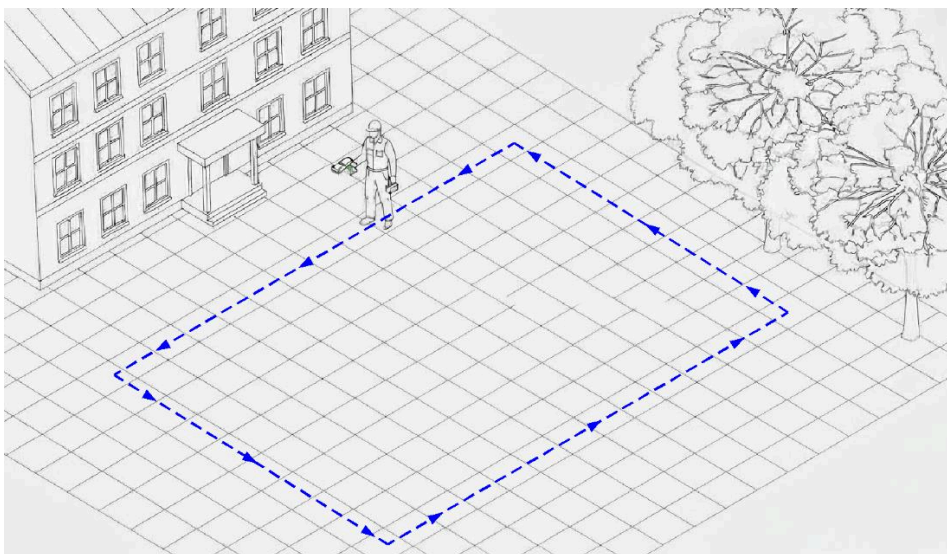


Рис. 1.10 Схематичне зображення маршруту портативного сканування SLAM
Системи ближнього діапазону

Ця категорія охоплює прилади, призначені для роботи на дуже малих відстанях (від кількох сантиметрів до кількох метрів) з максимально можливою роздільною здатністю.

Тут часто використовуються не тільки лазерні, але й ручні сканери та технологія структурованого підсвічування. Вони проектують на об'єкт відому

сітку світла і аналізують її деформацію, обчислюючи 3D-форму з мікронною точністю.

Сфера застосування цих систем виходить за межі класичної геодезії і переходить у промисловий дизайн та метрологію. Вони незамінні для реверс-інжинірингу (рис. 1.11) (створення точного креслення деталі, для якої воно втрачене), контролю якості на виробництві, збереження дрібних артефактів та застосувань у медицині (напр., сканування для протезування).

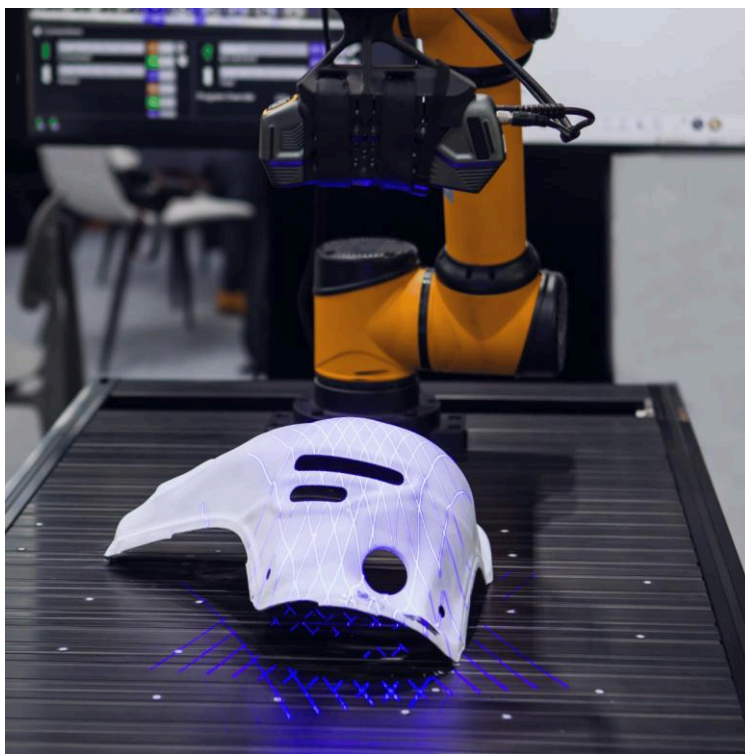


Рис. 1.11 Зйомка об'єктів малого та середнього розміру з високою точністю

1.3. Основні джерела похибок при мобільному (SLAM) скануванні

На відміну від стаціонарного сканування, де прилад жорстко зафіксований на штативі, а похибки зводяться переважно до точності далекоміра та кутомірної системи, у мобільному скануванні (MLS) природа похибок є кардинально іншою.

Точність кінцевої хмари точок у SLAM-системах є результатом складної взаємодії між якістю сенсорів (LiDAR + IMU) та, що найважливіше, коректністю роботи математичного алгоритму побудови траєкторії. Аналіз літератури та досвід експлуатації дозволяють виділити три ключові групи похибок.

1. Похибки навігації та дрейф траєкторії

Це найбільш критична група похибок, специфічна саме для SLAM. Оскільки система обчислює нове положення сканера відносно попереднього, будь-яка мікроскопічна помилка у визначенні кута повороту чи довжини кроку не зникає, а накопичується з часом.

Накопичений дрейф : Це поступове відхилення обчисленої траєкторії від реальної. Без зовнішньої корекції (наприклад, GNSS або контрольних точок) «хвіст» довгого маршруту може відхилитися на метри. Візуально це проявляється як викривлення геометрії будівлі (наприклад, прямий коридор стає дугоподібним).

Помилка «проковзування»: Виникає у середовищі з бідною геометрією (довгі гладкі коридори, тунелі, відкриті поля). Коли лідар не бачить унікальних геометричних ознак (кутів, колон), алгоритму нізащо «зачепитися», і він може неправильно оцінити швидкість руху оператора вздовж осі коридору.

Похибки замикання контуру: Алгоритм SLAM намагається розпізнати місце, де сканер вже був, щоб «стягнути» накопичений дрейф. Якщо алгоритм помилково ідентифікує схожі, але різні місця (наприклад, схожі сходові клітки на різних поверхах), відбувається «хибне замикання», що повністю руйнує модель.

2. Інструментальні похибки

Це похибки самого «заліза», які присутні навіть при ідеальній траєкторії.

Шум далекоміра: Характеризує «товщину» плоскої стіни у хмарі точок. Для мобільних сенсорів (наприклад, Livox у LiGrip або Hesai у RS10) цей показник зазвичай вищий (1-3 см), ніж у прецизійних наземних сканерів.

Похибки IMU: Акселерометри та гіроскопи бюджетного та середнього класу мають властивість «плисти» з часом. Якщо сканер рухається надто різко, IMU може не встигнути коректно відпрацювати кутове прискорення, що призведе до «розвалу» хмари на поворотах.

Похибка взаємного орієнтування: Це кутова невідповідність між осями лазерного сканера та осями IMU/камери. Навіть мінімальне відхилення у

калібруванні (на долі градуса) призводить до того, що при обертанні сканера об'єкти на відстані «роздвоюються».

3. Зовнішні та середовищні похибки

Фактори навколишнього середовища, які заважають коректній роботі алгоритмів SLAM.

Динамічні об'єкти: SLAM-алгоритми працюють за припущенням, що світ навколо статичний. Рухомі об'єкти (люди, автомобілі), що потрапляють у поле зору, створюють «фантомні» точки і можуть збити орієнтування, якщо вони займають значну частину кадру (наприклад, коли оператор йде у натовпі).

Складні поверхні: Дзеркальні, скляні або чорні поверхні є проблемою для будь-якого лазера. У випадку SLAM це небезпечно подвійно: не тільки втрачаються точки, але й зникають орієнтири для навігації, що може призвести до втрати трекінгу.

Вібрації та хода оператора: Нерівномірна, «стрибаюча» хода оператора створює високочастотні шуми, які можуть бути неправильно інтерпретовані IMU як реальне переміщення, викликаючи хвилеподібні викривлення на рівних поверхнях (підлозі, стінах).

Таким чином, на відміну від TLS, де точність гарантується стабільністю штатива, у мобільному скануванні точність є ймовірнісною величиною, яка залежить від майстерності оператора (плавності руху, побудови правильного маршруту із замиканням петель) та умов середовища. Саме дослідженню впливу цих факторів і присвячена практична частина моєї роботи.

1.4. Існуючі стандарти та підходи до оцінки точності даних мобільного сканування

На сьогодні в інженерній геодезії склалася парадоксальна ситуація: технології SLAM розвиваються швидше, ніж нормативна база. Класичні стандарти для стаціонарних сканерів (TLS) не враховують динаміку руху та

фактор часу, критичні для мобільних систем. Тому оцінка точності SLAM-систем вимагає комбінованого підходу.

Нижче наведено ключові підходи, адаптовані під специфіку мобільного сканування.

1. Підхід «Еталон-Факт» (Порівняння з контрольними точками)

Це найбільш практичний метод верифікації мобільних систем на реальному об'єкті, який покладено в основу даного дослідження. Він базується на принципах, викладених у керівництвах ASPRS (Американського товариства фотограмметрії та дистанційного зондування).[7]

Суть методу:

Контрольні точки : На об'єкті створюється мережа точок, координати яких визначені методом вищої точності (тахеометрія або GNSS). Важливо, щоб ці точки були рівномірно розподілені вздовж траєкторії руху.

Порівняння: Хмара точок накладається на ці координати.

Критерій оцінки: Розраховується середньоквадратична похибка (RMSE) окремо по осях (X, Y, Z) та повна просторова похибка. Для SLAM-систем критично важливим є перевірка точок у найвіддаленіших ділянках маршруту, де накопичений дрейф є максимальним.

2. Формалізовані стандарти тестування

Якщо стандарти на кшталт ASTM E3125 або ISO 17123-9 розроблялися для статички, то для мобільних систем застосовуються інші критерії. [6], [8]

Стандарти ASPRS

Це головний документ для оцінки точності мобільного картографування. Він класифікує точність не за «паспортом приладу», а за результатами перевірки на контрольних точках. Це дозволяє легітимізувати дані SLAM, якщо вони вписуються, наприклад, у «Клас точності 5 см».

Специфікація TLSI та виробників SLAM

Для мобільних сканерів вводиться специфічний параметр точності, якого немає у стаціонарних приладах — відносна похибка траєкторії (зазвичай вказується як відсоток від пройденого шляху).

Якщо наприклад виробник заявляє точність «0.1% від пройденого шляху», це означає, що пройшовши 100 метрів без замикання контуру, накопичена помилка (дрейф) може скласти 10 см. Перевірка цього параметра є частиною мого дослідження.

3. Поділ точності: Локальна vs Глобальна

У контексті SLAM поняття точності розділяється на два рівні, які часто плутають:

- локальна точність характеризує похибку вимірювання в межах одного «кадру» або на короткій ділянці. Вона залежить від якості самого лідара (Livox/Hesai). Для цього робиться переріз плоскої стіни. Якщо хмара точок «пухнаста» і стіна має товщину 3 см замість реальної плоскості — це шум сенсора;

- глобальна точність визначає надійність зшивки кадрів у єдину модель.

Вона залежить від алгоритму SLAM та роботи IMU. Адже стіна може бути тонкою і чіткою (гарна локальна точність), але сама кімната може бути повернута на 2 градуси або «вигнута» дугою відносно реальності. Це помилка глобальної геометрії, викликана дрейфом.

Таким чином, оцінка точності SLAM-сканера не може обмежуватися лише перевіркою «шуму» на площині. Вона обов'язково повинна включати перевірку правильності геометрії всієї траєкторії шляхом порівняння з жорстким каркасом геодезичних пунктів, що і реалізовано в практичній частині роботи.

Огляд програмного забезпечення для обробки даних сканування.

Огляд програмного забезпечення є ключовим, оскільки саме воно перетворює «сирі» дані сканера на кінцевий, корисний продукт.

Процес обробки хмари точок складається з кількох етапів, і для кожного з них існують різні типи програмних рішень.

Програмне забезпечення виробників (Vendor Software) - ПЗ, яке створюється виробником сканера. Його основна задача — первинна обробка та зшивка (реєстрація) сканів.

Leica Cyclone: Галузевий стандарт для сканерів Leica. Його головна сила - у потужних інструментах для реєстрації (зшивки) хмар точок з різних станцій. Він дозволяє зрівноважити мережу сканів з високою точністю, очистити дані від шумів та виконати базові вимірювання.

Trimble RealWorks: Аналогічний продукт від Trimble. Окрім реєстрації, він має потужні інструменти для створення 3D-моделей та виконавчої документації, наприклад, для контролю площинності підлоги чи вертикальності колон.

Faro SCENE: Програмне забезпечення, орієнтоване на сканери Faro. Його особливість - швидка реєстрація (часто ще в польових умовах) та зручна веб-візуалізація, що дозволяє ділитися результатами з замовниками.

Autodesk ReCap: Хоча це продукт Autodesk, він часто використовується як універсальний «конвертер» і «індексатор». Він готує хмари точок (часто з різних сканерів) для їх подальшого легкого використання в усій лінійці Autodesk (AutoCAD, Revit).

Спеціалізоване ПЗ для обробки та аналізу

Це сторонні програми, які часто мають більш глибокий функціонал для специфічних задач, таких як контроль якості, реверс-інжиніринг або аналіз.

Для реалізації методики оцінки точності використовується пакет CloudCompare. За допомогою функціоналу порівняння хмар точок можна співставити дані сканування з еталоном, що дозволяє отримати просторовий розподіл відхилень та верифікувати результати через розрахунок RMSE.

Geomagic (Oqton/3D Systems): Це «швейцарський ніж» для роботи з 3D-даними.

Geomagic Design X: Лідер у реверс-інжинірингу. Він дозволяє перетворити складну хмару точок у точну, параметричну CAD-модель.

Geomagic Control X: Лідер у метрології та контролі якості. Він ідеально підходить для порівняння скану деталі з її проектною 3D-моделлю та створення детальних звітів про відхилення.

PolyWorks (InnovMetric): Прямий конкурент Geomagic Control X, надзвичайно потужний у промисловому контролі якості та високоточному вимірюванні геометрії.

Програмне забезпечення CAD та BIM

Це програми, які самі не обробляють хмари, але використовують їх як «підоснову» для проектування або моделювання:

- Autodesk AutoCAD / Civil 3D: Найпоширеніший інструмент. Геодезисти та проектувальники підвантажують хмару точок як фон і по ній «обводять» контури для створення 2D-креслень (топопланів, планів фасадів) або 3D-поверхонь (створення ЦМР у Civil 3D);

- Autodesk Revit: Стандарт для BIM (Building Information Modeling). Архітектори та конструктори використовують хмару точок для створення точної BIM-моделі існуючої будівлі (Scan-to-BIM) або для контролю якості будівництва, накладаючи проектну модель на хмару точок фактично збудованої конструкції;

- Bentley MicroStation: Потужна CAD- та BIM-платформа, дуже популярна в інфраструктурних проектах, яка має власні вбудовані інструменти для роботи з дуже великими хмарами точок.

Висновки до розділу 1

Проведений у першому розділі аналітичний огляд засвідчив динамічну трансформацію сучасних методів 3D-зйомки: відбувається поступовий перехід від статичних систем (TLS), що вимагають встановлення на штатив, до високопродуктивних мобільних кінематичних рішень (MLS) на базі технології SLAM.

Встановлено, що точність мобільних SLAM-систем, на відміну від стаціонарних, не є гарантованою «паспортною» константою. Вона є ймовірнісною величиною, яка критично залежить від стабільності траєкторії руху. Виявлено, що домінуючими джерелами похибок тут виступають не лише

шуми далекоміра, а й специфічні фактори навігації: накопичення дрейфу (Drift), похибки інерціальних модулів (IMU) та помилки геометричного ковзання у складних умовах.

Аналіз нормативної бази показав, що існуючі формалізовані стандарти (наприклад, ASTM E3125) здебільшого орієнтовані на тестування приладів у статистиці. Вони не враховують фактор часу та динаміки руху, що є критичним для мобільного сканування. Це виявило ключову методологічну прогалину: відсутність уніфікованої методики перевірки фактичної точності SLAM-траєкторій безпосередньо на будівельному майданчику.

Водночас огляд програмного забезпечення (CHCNAV CoPre, GreenValley LiFuser, CloudCompare) підтвердив наявність потужних інструментів для гібридної обробки даних (SLAM + GNSS) та їх незалежного аналізу. Це створює необхідну технологічну базу для розробки методів контролю якості.

Таким чином, даний розділ підтверджує високу актуальність обраної теми. Для впровадження SLAM-технологій у відповідальні інженерні задачі необхідний перехід від сліпої довіри до алгоритмів «чорної скриньки» до обов'язкової польової верифікації. Це визначає головне завдання дослідження: розробку та експериментальну перевірку методики оцінки точності мобільних сканерів шляхом їх порівняння з еталонними геодезичними вимірюваннями.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика об'єкта дослідження та інструментальне забезпечення

В якості об'єкта експериментальних досліджень обрано складську будівлю на території будівництва логістичного центру, що розташований на південь від м. Львова, між с. Зубра та с. Пасіки-Зубрицькі (кадастрові номери земельних ділянок 4623683500:02:000:0115 і 4623683500:02:000:0112), на території с. Кротошин (Давидівська ОТГ).

Цей об'єкт є вдалим полігоном для тестування SLAM-систем через поєднання двох складних середовищ:

Зовнішній контур: відкритий простір, доступний для супутникового сигналу (GNSS), що дозволяє протестувати гібридний режим роботи.

Внутрішній простір: частина складського приміщення довжиною 108 м, шириною 54 м та висотою 12 м, що складається з виготовлених на заводі залізобетонних конструкцій (колони, балки, прогони), а також металевих конструкцій. По периметру частково виконаний монтаж сендвіч панелей що мають металеву глянцева структуру покриття. Відсутність GNSS-сигналу всередині створює жорсткі умови для перевірки роботи інерціальних систем (IMU) та алгоритмів SLAM на предмет накопичення дрейфу.



Рис. 2.1 Ділянка складського приміщення

Інструментальне забезпечення експерименту

Для реалізації порівняльного аналізу в таблиці 2.1 було сформовано комплект обладнання, що включає еталонний геодезичний прилад та дві досліджувані SLAM-системи різних класів.

Таблиця 2.1.

Технічні характеристики обладнання

Характеристика	Контрольний прилад	Досліджуваний прилад №1	Досліджуваний прилад №2
Модель	Sokkia CX-105	CHCNAV RS10	GreenValley LiGrip O2 Lite
Тип системи	Електронний тахеометр	Ручний лазерний сканер з RTK та SLAM	Портативна мультисенсорна система SLAM
Лазерний сенсор (LiDAR)	—	Власний модуль (Hesai)	Livox Mid-360
Принцип навігації	Геометричний (статика)	Гібридний: SLAM + GNSS RTK	LiDAR SLAM + Visual SLAM + RTK
Дальність сканування	до 500 м (без відбивача)	до 120 м	40 м (10% відбиття) 70 м (80% відбиття)
Швидкість сканування	~1 точка за 0.9 с	320 000 точок/с	200 000 точок/с
Точність	2 мм + 2 ppm (лінійна)	Абсолютна: 3-5 см Відносна: 1-2 см	Абсолютна: < 3 см Відносна: < 2 см

Характеристика	Контрольний прилад	Досліджуваний прилад №1	Досліджуваний прилад №2
Камери	—	3 камери	4 камери (2 панорамні 12 Мп + 2 візуальні)
Вага	~5.6 кг	~2.5 кг	1.3 кг (вкл. батарею та RTK-модуль)
Час роботи	до 36 год	~60 хв (одна батарея)	2 години (одна батарея)



Рис. 2.2 Сканери CHCNAV RS10 та GreenValley LiGrip O2 Lite

2.2. Створення геодезичної основи

Для незалежної оцінки точності SLAM-алгоритмів на об'єкті було створено високоточну геодезичну мережу, яка слугувала еталоном.

Проектування мережі

Експериментальний полігон охоплював територію складського приміщення розмірами 108x54 м. Вздовж запланованого маршруту сканування, по периметру на несучих конструкціях, було рівномірно закріплено 8 (вісім) контрольних марок (рис.2.3 та 2.4).

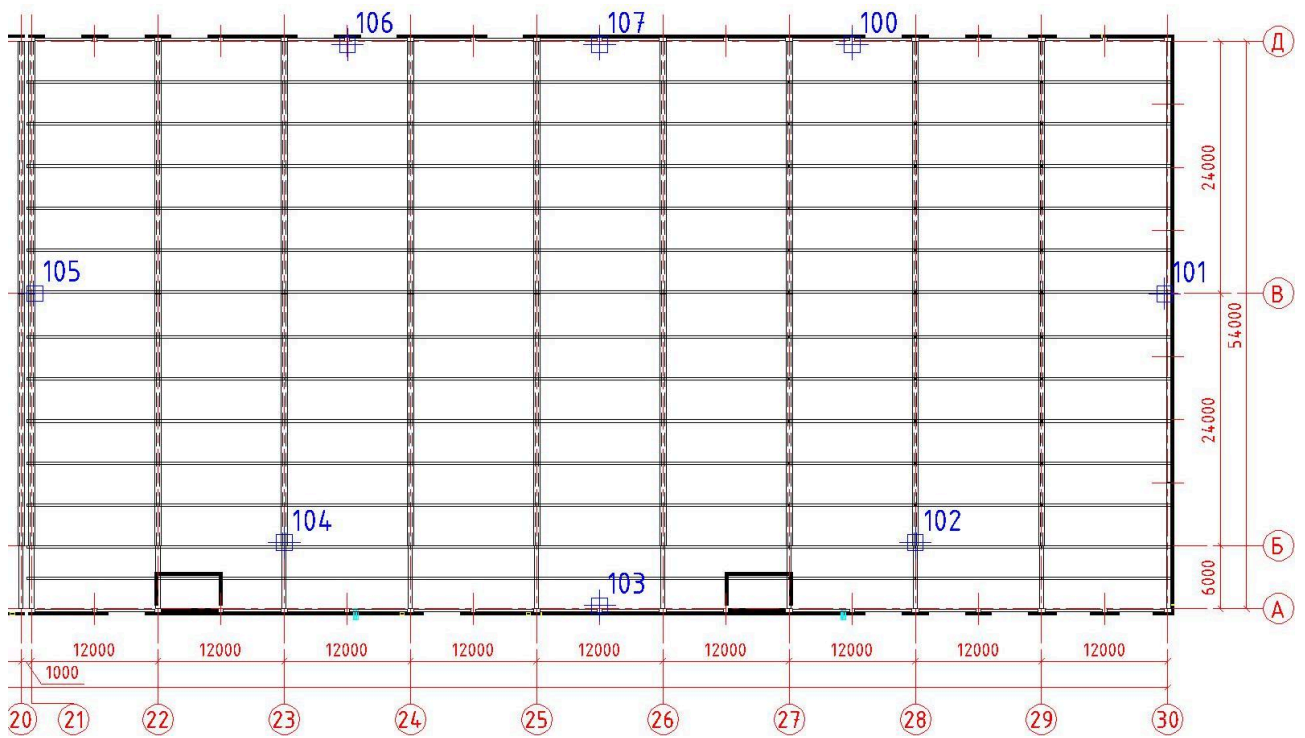


Рис. 2.3 Схема опорної мережі

В якості марок використано чорно-білі шахові мішені формату А4. Такий тип маркування був обраний через його високу контрастність у діапазоні інтенсивності лазерного випромінювання, що дозволяє однозначно ідентифікувати геометричний центр мішені як на хмарі точок LiDAR, так і при візуванні оптичним тахеометром.



Рис. 2.4 Закріплення марок

Методика вимірювань

Визначення координат марок виконувалось електронним тахеометром Sokkia CX-105 в умовній системі координат, оскільки метою дослідження є оцінка відносної геометрії моделі, а не її прив'язка до державної мережі.

Вимірювання проводилися за наступною технологічною схемою:

- встановлення тахеометру в центрі досліджуваної ділянки (вільна станція) забезпечувало максимальну видимість усіх марок та стабільність штатива;
- вимірювання координати центрів марок визначалися прямим вимірюванням у режимі безвідбивача. Це дозволило виключити похибку встановлення віхи з призмою;
- контроль якості створеної основи виконувався безпосередньо в полі шляхом вирішення оберненої лінійно-кутової засічки по вже визначених точках з декількох станцій.

Результати зрівноважування станції (рис. 2.5) засвідчили високу точність побудови мережі: середня квадратична похибка (СКП) визначення станції склала: $\sigma_X = 0.0002$ м, $\sigma_Y = 0.0002$ м.



Рис. 2.5 СКП визначення координат станції та залишкові нев'язки

Залишкові нев'язки на вихідні пункти не перевищували 1-3 мм, що на порядок вищою за заявлену точність досліджуваних SLAM-сканерів (2-3 см), що дозволяє використовувати отримані координати як абсолютну істину при розрахунку похибок.

2.3. Методика виконання мобільного сканування

Оскільки обидва досліджувані прилади (CHCNAV RS10 та GreenValley LiGrip O2 Lite) були оснащені модулями GNSS RTK, це дозволило застосувати єдину методику гібридного сканування.

Етап 1. Планування маршруту .Було розроблено комбінований маршрут типу «Вхід-Вихід-Вхід», який дозволяє мінімізувати дрейф SLAM-алгоритму всередині приміщення за рахунок періодичної фіксації супутникових координат.

Схема руху (рис. 2.6):

1. Старт (Точка А): Ініціалізація та отримання фіксованого рішення RTK у системі координат об'єкта.

2. Вхід у склад: Перехід у зону чистого SLAM, з невеликими зупинками поблизу контрольних марок для кращої деталізації хмари.

3. Вихід на вулицю (Точка Б): Оператор виходив із будівлі на відкритий простір. Це критичний етап, на якому алгоритм знову фіксував супутники і коригував накопичену за час проходження помилку.

4. Повернення у склад (Інший маршрут): Вхід назад у приміщення, прохід по правому периметру з петлями до центру будівлі.

5. Фініш (Точка А): Повернення на стартову точку для виконання класичного замикання контуру.



Рис. 2.6 Траєкторія та схема руху

Етап 2. Ініціалізація та синхронізація перед початком руху обидва прилади проходили процедуру статичної ініціалізації на вулиці протягом 30-60 секунд для узгодження роботи інерціальних систем (IMU) з даними RTK.

Етап 3. Особливості зйомки Зйомка виконувалася в безперервному кінематичному режимі. Ключовою вимогою було забезпечення плавності переходів між зонами відкритих ділянок (GNSS+SLAM) та приміщенням (тільки SLAM). У моментах входу/виходу швидкість руху сповільнювалася до 0.5 м/с, щоб дати алгоритмам час на адаптацію до різкої зміни освітлення та геометрії.

2.4. Первинна обробка даних сканування (Pre-processing)

Первинна камеральна обробка «сирих» даних вимірювань виконувалася у спеціалізованому програмному забезпеченні виробників обладнання: CHCNAV CoPre (для сканера RS10) та GreenValley LiFuser BP (для сканера LiGrip).

Завдяки використанню RTK-модулів на обох приладах, процес обробки базувався на методиці Georeferenced SLAM (геоприв'язаного SLAM), де супутникові дані слугували жорстким каркасом для корекції лідарної одометрії.

Автоматизована обробка включала наступні етапи (рис. 2.7):

1. Розрахунок траєкторії : Виконано комплексування даних інерціального модуля (IMU) та лідарного сенсора. При цьому ділянки з впевненим прийомом

GNSS (старт, прохід вулицею, фініш) були використані програмними алгоритмами як «жорсткі якорі» для фіксації та вирівнювання траєкторії в зонах відсутності сигналу (всередині складу).

2. Оптимізація та замикання контуру: Застосовано алгоритми глобальної оптимізації для усунення накопиченого дрейфу шляхом аналізу збігу геометрії на точці старту/фінішу.

3. Генерація та експорт хмари точок: Масиви вимірів було перетворено у щільні хмари точок та експортовано у відкритий формат обміну даними .LAS в єдиній системі координат.

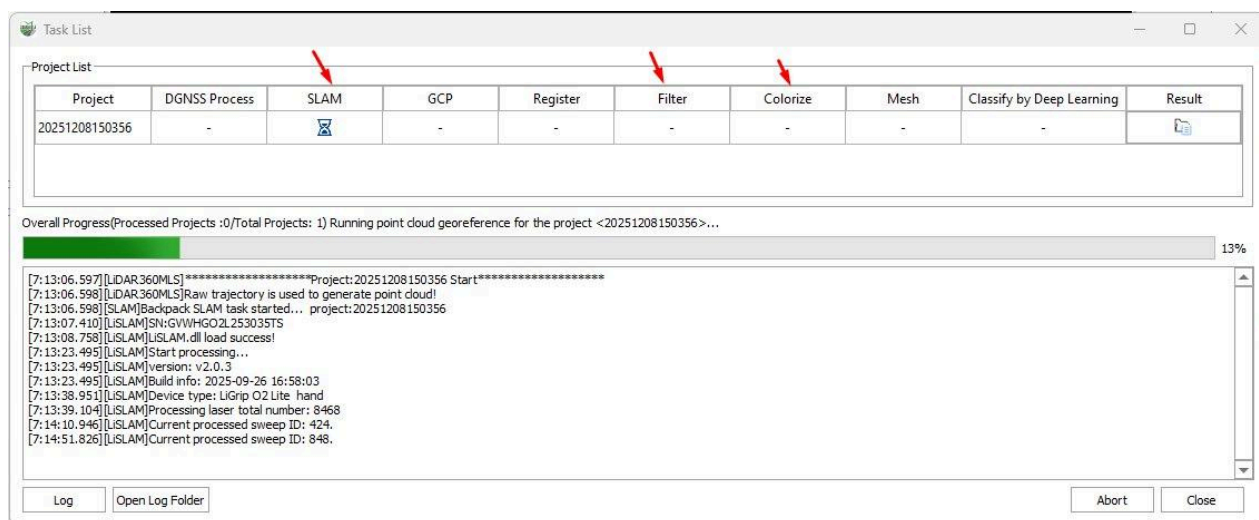


Рис. 2.7 Процес створення хмари точок в Lidar 360 MLS

Важливо зазначити: Оскільки траєкторії були скориговані за допомогою GNSS RTK, марки, закоординовані тахеометром, не використовувалися для трансформації (прив'язки) хмар. Вони слугували виключно як контрольні точки для незалежної оцінки точності на етапі аналізу.

Подальший порівняльний аналіз, побудова карт відхилень та статистична обробка виконувалися у програмному середовищі CloudCompare.

Висновки до розділу 2

У другому розділі обґрунтовано та розроблено комплексну методику експериментального дослідження точності мобільних SLAM-систем на прикладі сканерів CHCNAV RS10 та GreenValley LiGrip O2 Lite.

За результатами розробки методичної частини можна зробити наступні висновки:

Забезпечення метрологічної достовірності: Створена на дослідному полігоні еталонна геодезична основа відповідає найвищим вимогам точності. Використання методу вільної станції з перехресним контролем дозволило визначити координати контрольних марок із середньою квадратичною похибкою 0.0002 м. Оскільки цей показник перевищує заявлену точність досліджуваних сканерів (2–3 см), отримана мережа може вважатися абсолютним еталоном для оцінки похибок.

Оптимізація методики сканування: Розроблений сценарій зйомки за маршрутом «Вулиця – Склад – Вулиця» з використанням замкнених петель дозволяє максимально ефективно компенсувати головний недолік SLAM-навігації — дрейф інерціальної системи. Використання точок входу та виходу як «RTK-якорів» забезпечує жорстку геометрію траєкторії навіть у зонах відсутності супутникового сигналу.

Стратегія незалежної оцінки: У методиці камеральної обробки реалізовано принцип розділення функцій: контрольні марки свідомо виключені з процесу трансформації хмар точок. Це гарантує «чесність» експерименту, дозволяючи оцінити реальну роботу алгоритмів навігації та RTK, а не результат математичної підгонки під відомі координати.

Таким чином, розроблена програма експерименту та зібраний масив польових даних (хмари точок у форматі .LAS та каталог еталонних координат) створюють необхідну базу для виконання об'єктивного порівняльного аналізу точності, який буде проведено у третьому розділі.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ

3.1. Оцінка абсолютної точності за контрольними точками

Оскільки еталонні вимірювання електронним тахеометром виконувалися в умовній системі координат об'єкта, а дані мобільного сканування (RS10/LiGrip) отримані в системі координат УСК-2000 (завдяки GNSS RTK), пряме порівняння координат є неможливим.

Для приведення даних до єдиного простору було виконано процедуру просторової трансформації у програмному середовищі CloudCompare. Суміщення виконувалося за методом «Вирівнювання за парами точок» з використанням 8-ми спільних контрольних марок (рис. 3.1).

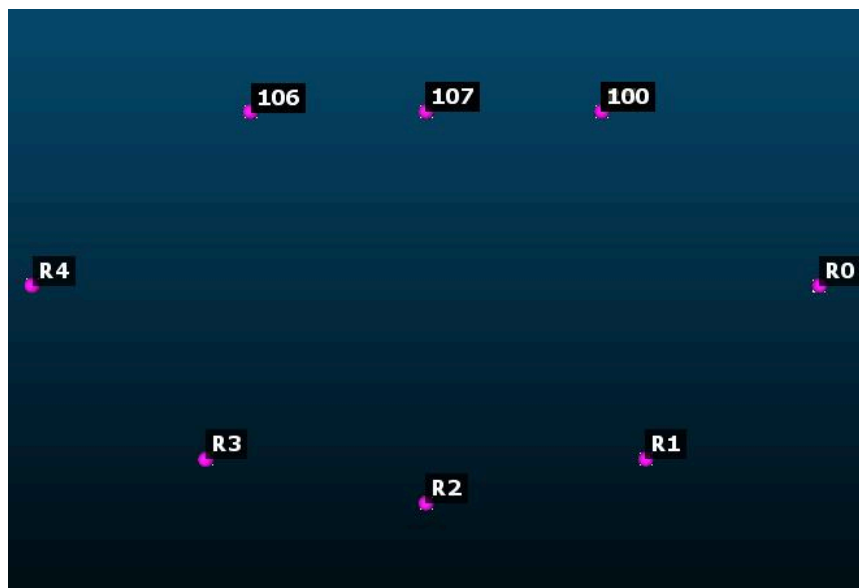


Рис. 3.1 Послідовний вибір контрольних точок
(умовна система координат)

Для забезпечення максимальної точності прив'язки було проведено відбраковування контрольних точок. Пункти 106 та 107 показали незадовільну візуалізацію на скан-матеріалах (розмиття контурів), що могло внести грубі помилки в розрахунок. Тому трансформацію виконано за 6-ма найбільш чіткими марками (рис. 3.2), що забезпечило рівномірний розподіл помилок і фінальну точність.

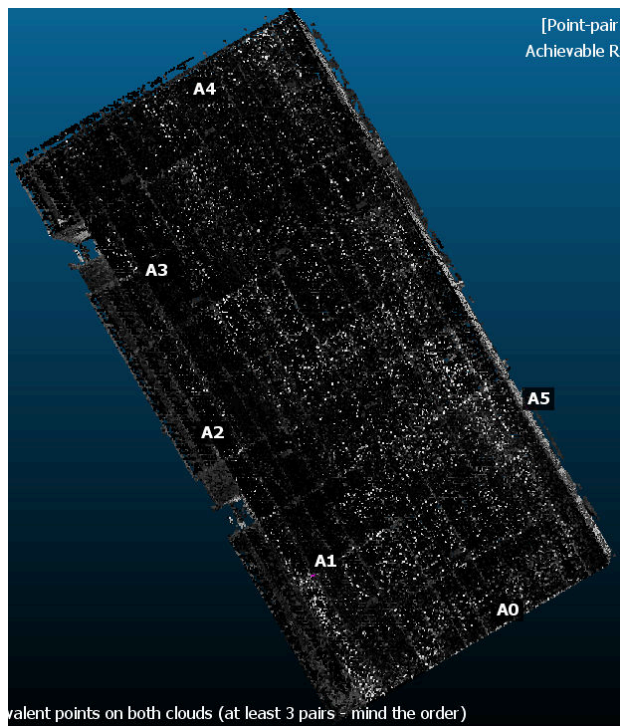


Рис. 3.2 Послідовний вибір точок визначених на хмарі
(міська система координат)

В основу процесу покладено метод найменших квадратів, який мінімізує відхилення між парами точок. Було виконано просторову трансформацію за принципом «твердого тіла» (лише трансляція та ротація), при цьому масштабний коефіцієнт залишався фіксованим (Scale=1.0), що забезпечило збереження метричної цілісності моделі. Результат суміщення наведено на рисунку 3.3.

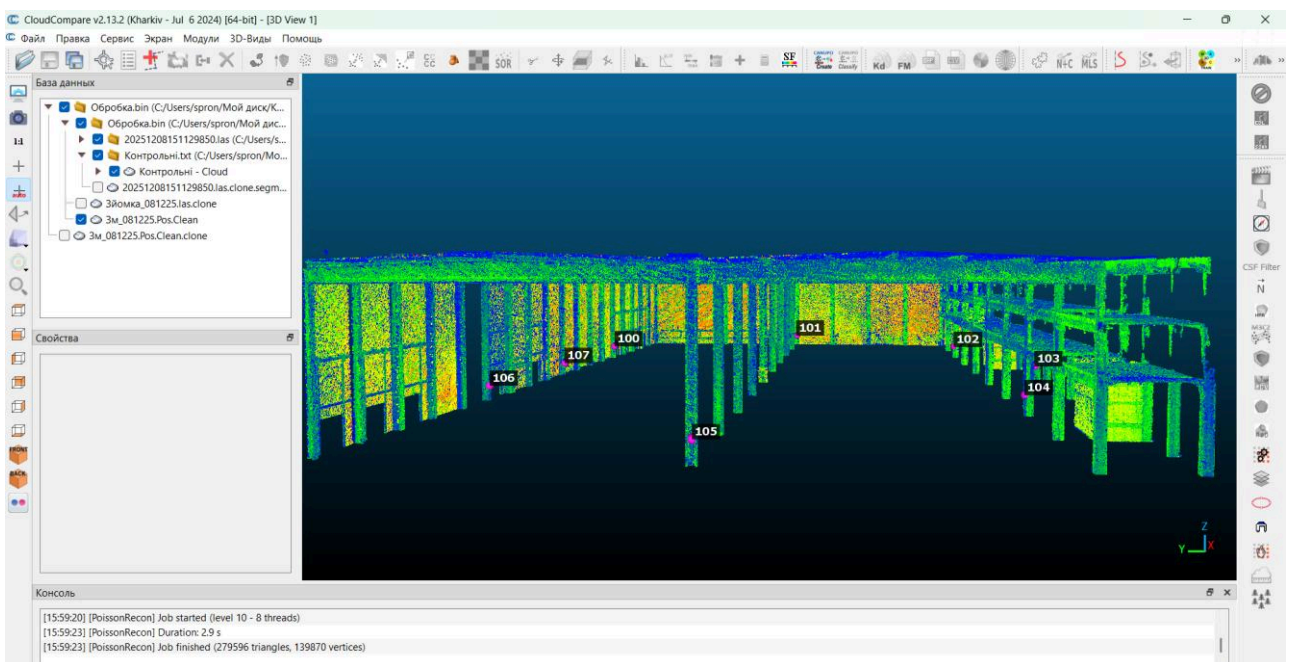


Рис. 3.3 Результат суміщення хмари та контрольних точок

На етапі суміщення програмний комплекс CloudCompare надає інструментарій для інтерактивного контролю точності в реальному часі (рис. 3.4). Діалогове вікно відображає таблицю поточних нев'язок для кожної пари точок, розкладених на складові по осях ΔX , ΔY , ΔZ . Функціонал вікна дозволяє оператору аналізувати вплив кожної точки на загальну похибка (СКП) та, у разі виявлення грубих відхилень, виключати конкретні пари з розрахунку або перепризначати їх без необхідності перезапуску всього процесу. Після кожної зміни набору точок перерахунок матриці трансформації відбувається автоматично.

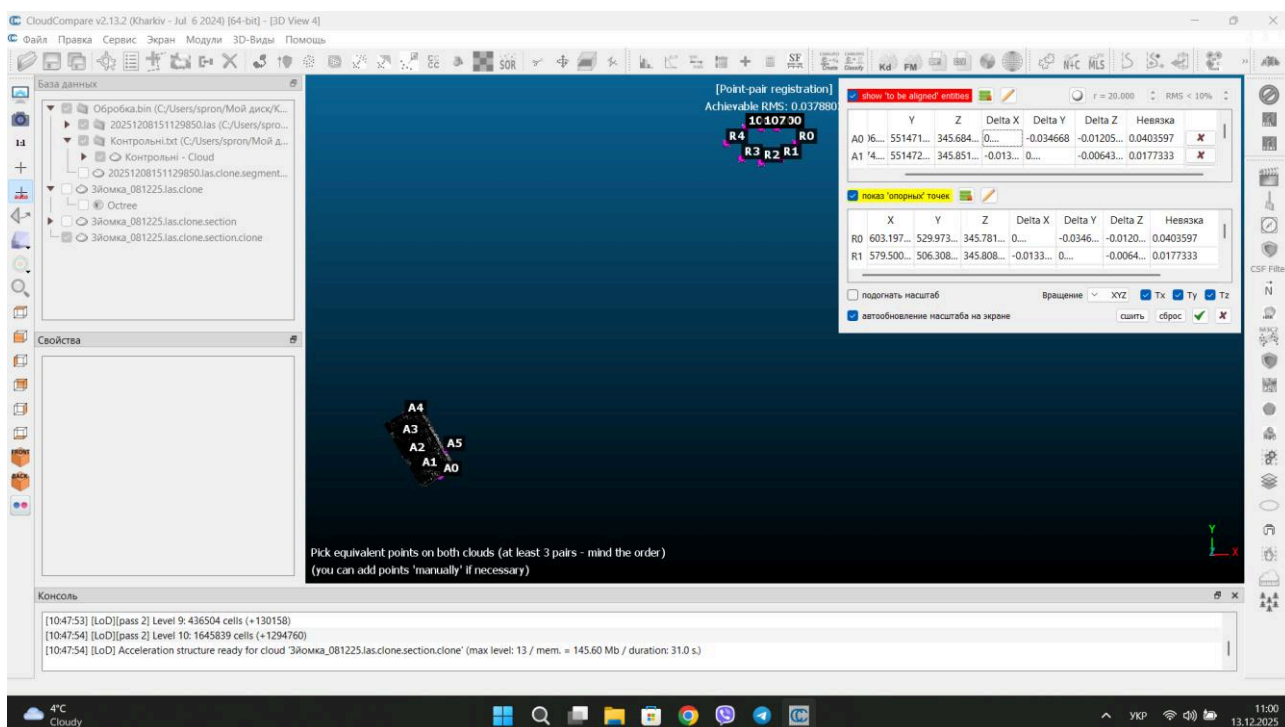


Рис. 3.4 Діалогове вікно попередньої обробки точок суміщення

Процедура жорсткої трансформації масиву точок CHCNAV RS10 на 6 контрольних марок дозволила досягти показника узгодженості моделі СКП = 0,037 м (37мм). Це підтверджує високу якість роботи SLAM-алгоритму даного приладу та коректність польових вимірювань.

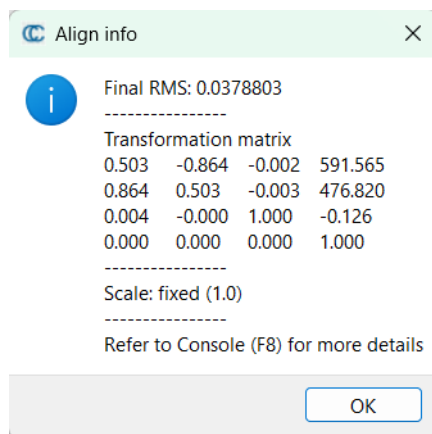


Рис. 3.5 Результат суміщення хмари точок з контрольними точками (CHCNAV RS10)

Ця величина характеризує якість прив'язки моделей і приймається як базова похибка для подальшого аналізу. В таблиці 3.1 наведено детальний аналіз по точкам.

Таблиця 3.1

Таблиця нев'язок суміщення хмари для CHCNAV RS10

Ref.name	Ref.x	Ref.y	Ref.z				
R0 (101)	603,198	529,973	345,781				
R1 (102)	579,500	506,308	345,808				
R2 (103)	549,504	500,304	345,757				
R3 (104)	519,514	506,302	346,059				
R4 (105)	495,804	530,004	345,938				
R5 (100)	573,496	553,700	345,878				
Aligned.name	Aligned.x	Aligned.y	Aligned.z	Delta X	Delta Y	Delta Z	Distance
A0 (101)	603,215	529,938	345,769	0,01678	-0,03467	-0,01205	0,04036
A1 (102)	579,487	506,318	345,802	-0,01331	0,00980	-0,00644	0,01773
A2 (103)	549,494	500,343	345,759	-0,00970	0,03888	0,00250	0,04015
A3 (104)	519,507	506,282	346,079	-0,00671	-0,01990	0,01965	0,02876
A4 (105)	495,785	529,974	345,919	-0,01889	-0,03021	-0,01944	0,04059
A5 (100)	573,528	553,736	345,894	0,03192	0,03613	0,01596	0,05079
Final RMS:	0,03788						

За результатами обробки даних сканування приладом LiGrip O2 Lite, величина середньої квадратичної похибки склала 0,096 м (96 мм). Це значення майже втричі перевищує аналогічний показник, отриманий першим комплектом обладнання, що свідчить про меншу стабільність роботи SLAM-алгоритму даної моделі в умовах складного контуру об'єкта.

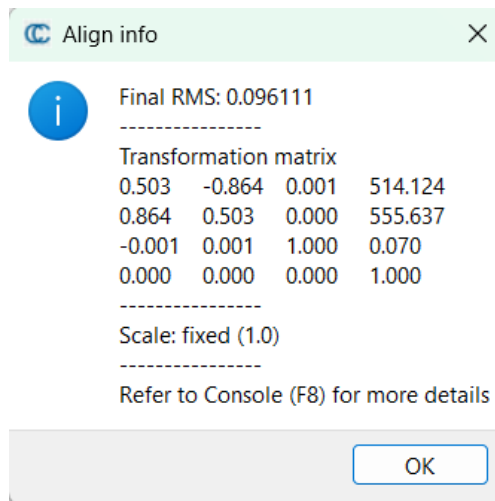


Рис. 3.6 Результат суміщення хмари точок з контрольними точками (LiGrip O2 Lite)

Таблиця нев'язок 3.2 для альтернативного сканера показує, що незважаючи на вищу щільність сканування, у результатах спостерігається значне погіршення геометричної точності.

Таблиця 3.2

Таблиця нев'язок суміщення хмари для LiGrip O2 Lite

Ref,name	Ref,x	Ref,y	Ref,z				
R0 (101)	603,198	529,973	345,781				
R1 (102)	579,500	506,308	345,808				
R2 (103)	549,504	500,304	345,757				
R3 (104)	519,514	506,302	346,059				
R4 (105)	495,804	530,004	345,938				
R5 (100)	573,496	553,700	345,878				
Aligned,name	Aligned,x	Aligned,y	Aligned,z	Delta X	Delta Y	Delta Z	Distance
A0 (101)	603,109	529,950	345,853	-0,08850	-0,02344	0,07208	0,11652
A1 (102)	579,513	506,358	345,792	0,01257	0,04953	-0,01617	0,05360
A2 (103)	549,536	500,260	345,746	0,03180	-0,04364	-0,01062	0,05503
A3 (104)	519,485	506,249	346,024	-0,02887	-0,05319	-0,03470	0,06976
A4 (105)	495,932	530,073	345,992	0,12778	0,06909	0,05365	0,15485
A5 (100)	573,441	553,702	345,814	-0,05457	0,00171	-0,06418	0,08426
Final RMS:	0,09611						

3.2. Аналіз геометричної достовірності конструкцій

Аналіз внутрішньої геометричної якості хмари точок (рис. 3.7) показав, що діапазон випадкового розсіювання точок відносно реальної поверхні об'єкта складає $\Delta X=9\text{мм}$. Така низька шумова складова підтверджує високу прецизійність лазерного сенсора CHCNAV RS10.

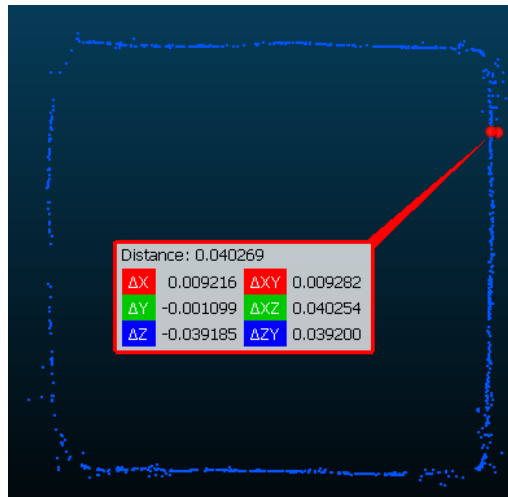


Рис. 3.7 Дослідження шумової складової сканера CHCNAV RS10

Детальне вивчення структури хмари точок (рис. 3.8) дозволило підтвердити низький рівень шуму ($\Delta X=5\text{мм}$) лазерного далекоміра сканера LiGrip проте, на кутових елементах та стиках конструкцій спостерігається чіткий геометричний зсув. Навіть при тонкій лінії сканування, контур стіни має «подвоєння» або неприродний вигин. Це підтверджує, що проблема полягає не у вимірюванні відстані лазером, а у помилці позиціонування сканера в просторі. Тобто, прилад вимірює «тонко», але наносить ці точки не на своє місце через дрейф інерціальної системи.

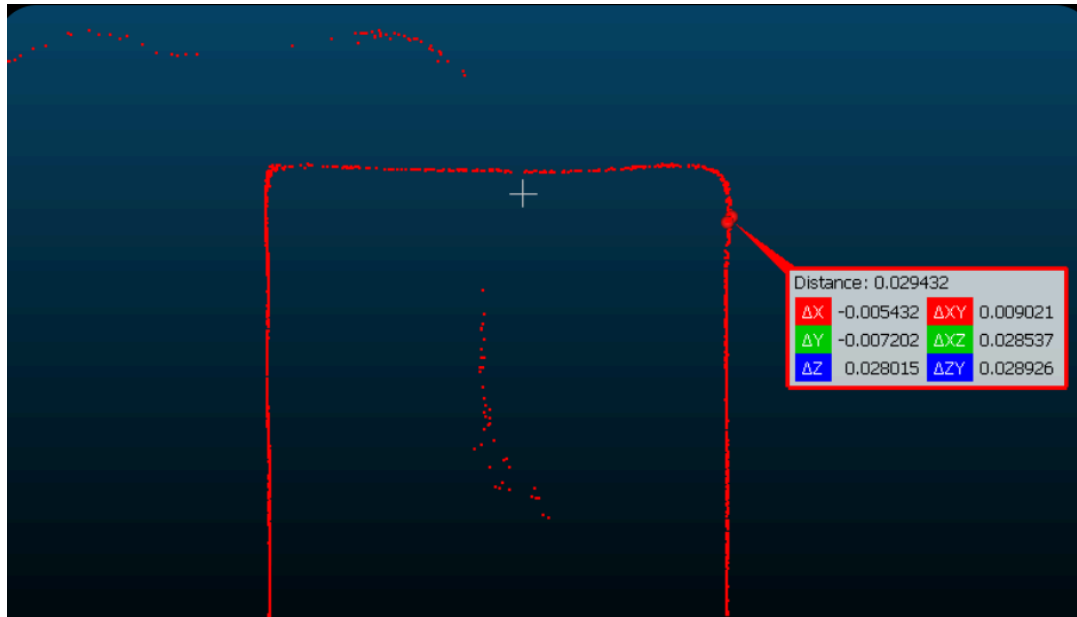


Рис. 3.8 Дослідження шумової складової сканера LiGrip O2 Lite

3.3. Просторова візуалізація відхилень

Аналіз «Хмара-Хмара»

Наступним етапом дослідження стало виконання кількісного порівняльного аналізу геометричних розбіжностей між двома моделями. Для цього було використано алгоритм «Хмара-Хмара», який обчислює найкоротшу відстань від кожної точки порівнюваної хмари до найближчої точки еталонної поверхні.

Для отримання коректних статистичних даних порівняння хмар точок було застосовано фільтрацію викидів. У налаштуваннях алгоритму встановлено поріг максимального відхилення $\text{Max. distance limit} = 0.5$ м. Це дозволило виключити з розрахунку динамічні об'єкти, залишивши для аналізу лише статичні конструкції будівлі (колони, балки)

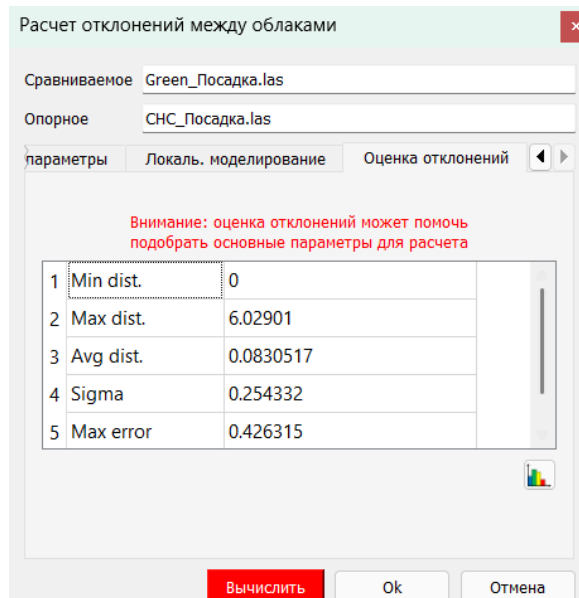


Рис. 3.9 Попередня оцінка відхилень

На етапі глобального візуального порівняння (рис. 3.10) суттєва різниця між моделями є малопомітною. Загальні габарити та просторове положення конструкцій візуально співпадають. Однак, наявність зон із різним ступенем перекриття свідчить про приховані геометричні деформації. Для їх виявлення та кількісної оцінки недостатньо загального огляду, що зумовило необхідність виконання детального аналізу на горизонтальних перерізах.

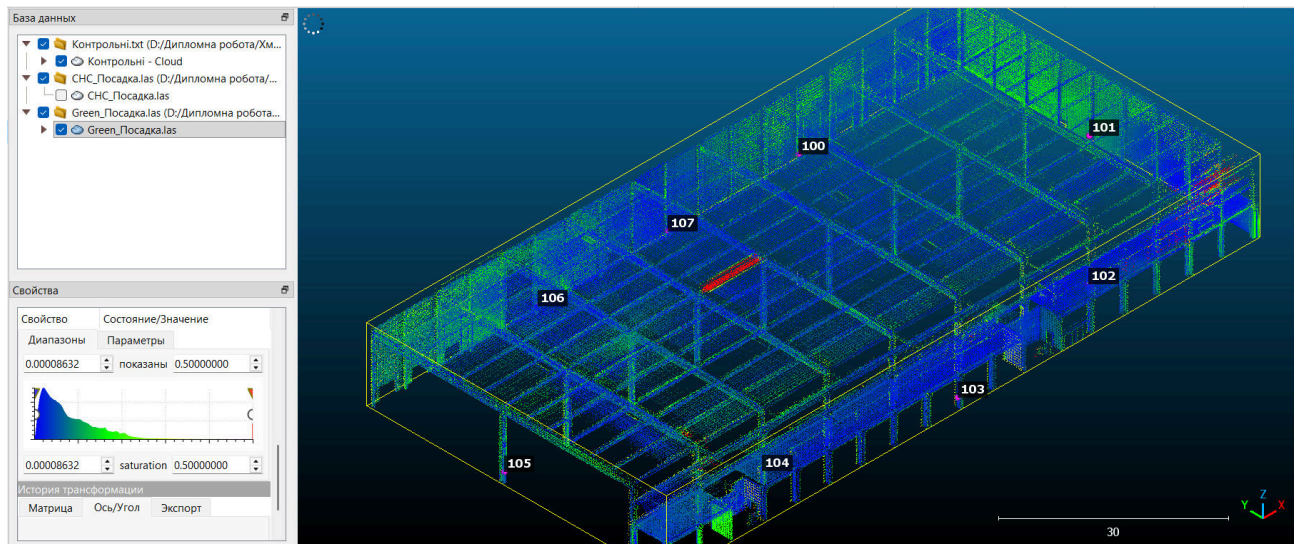


Рис. 3.10 Первинний візуальний аналіз двох моделей

На суміщеному зображенні (рис. 3.11) чітко простежуються недоліки геометричної побудови моделі сканером LiGrip. По-перше, зафіксовано розходження вертикальних конструкцій: червоний контур колон зміщений

відносно синього еталону, що підтверджує наявність дрейфу траєкторії. По-друге, червона хмара має вищу шумову складову. По-третє, спостерігається наявність паразитних точок у просторі між колонами, які відсутні на еталонній моделі CHCNAV.

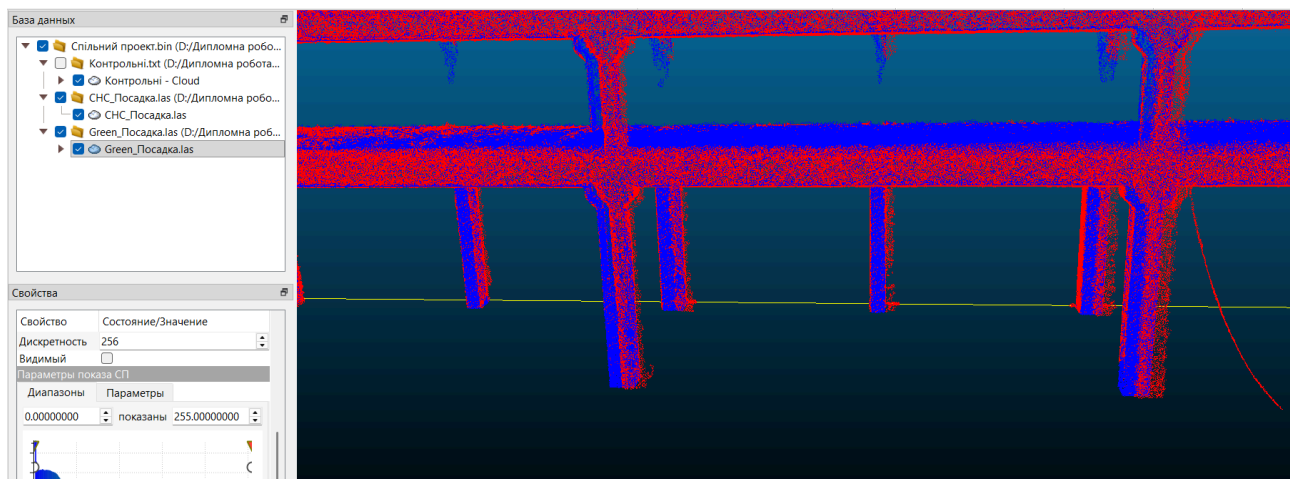


Рис. 3.11 Детальний візуальний порівняльний аналіз моделей (Синій колір – еталонна модель CHCNAV, Червоний – LiGrip O2)

Для більш детального дослідження характеру розбіжностей було виконано горизонтальний розріз хмар точок на висоті 0.5 м від рівня підлоги. Візуалізація перерізу (рис. 3.12) демонструє чітке розмежування контурів конструкцій, спостерігається «ефект подвоєння» вертикальних елементів. Червоний контур зміщений відносно еталонного синього контуру. Величина лінійного зсуву на даній ділянці сягає $\Delta X=10$ см, що корелює з розрахованим раніше значенням середньої квадратичної похибки.

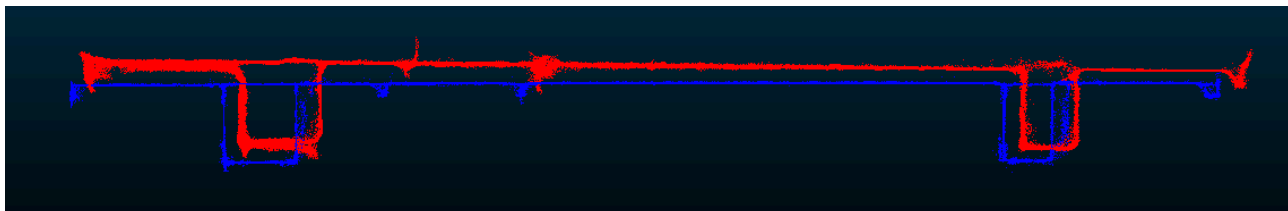


Рис. 3.12 Фрагмент горизонтального перерізу суміщених моделей (Синій – CHCNAV, Червоний – LiGrip)

Детальний аналіз горизонтальних перерізів (рис. 3.13) у різних частинах будівлі виявив нерівномірний характер відхилень. На ділянці А зсув становить

0.19 м, тоді як на ділянці Б він зменшується до 0.11 м. Відсутність сталого вектора помилки спростовує гіпотезу про неякісну геоприв'язку. Натомість, це підтверджує наявність внутрішніх нелінійних деформацій моделі LiGrip, спричинених накопиченням помилки SLAM-алгоритму під час проходження маршруту.

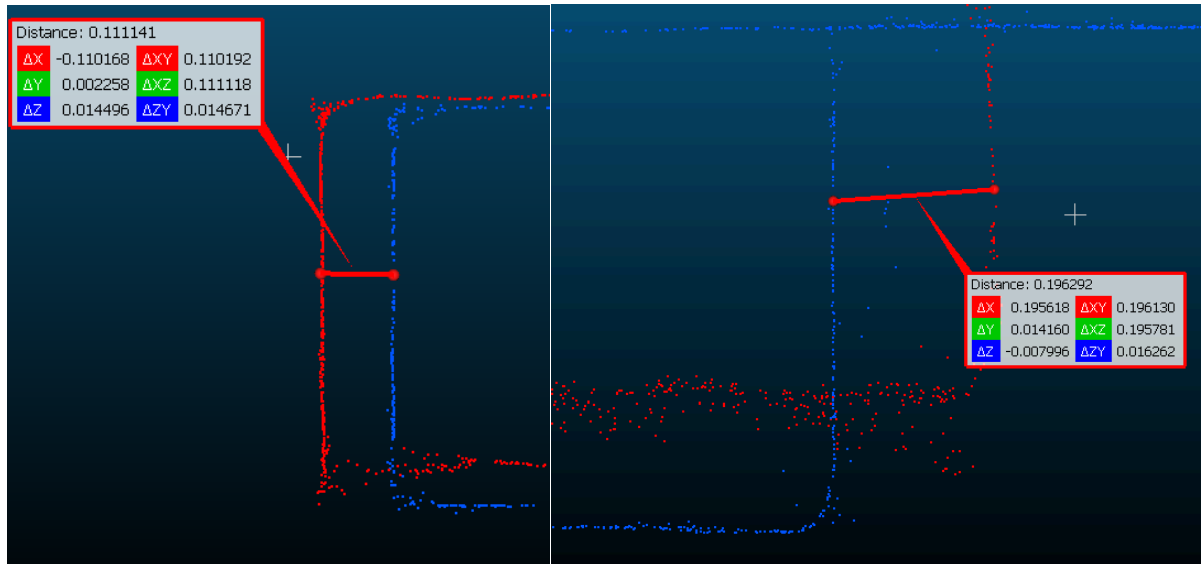


Рис. 3.13 Демонстрація нерівномірності деформацій: зсув на різних ділянках відрізняється, що свідчить про викривлення простору моделі.

Враховуючи, що порівняльний аналіз двох хмар точок вже продемонстрував значні глобальні деформації моделі LiGrip, детальніше дослідження її локальних похибок не проводилося через очевидну невідповідність загальної геометрії вимогам технічного завдання.

Аналіз «Хмара-Модель»

Для детального аналізу геометричної вірності поверхонь (колон) було застосовано метод «Хмара-Модель». В якості еталонної моделі використано спрощену векторну 3D-модель, побудовану за координатами точок, отриманих електронним тахеометром. Оскільки тахеометричні вимірювання мають найвищий клас точності, побудовані за ними площини прийнято за «ідеальну геометрію» об'єкта.

Процедура порівняння полягала в обчисленні найкоротшої відстані від кожної точки хмари сканування до найближчої еталонної площини. Це

дозволило отримати суцільну карту відхилень, яка на відміну від дискретних замірів, дозволяє оцінити не тільки зсув конструкції, але і її деформації (випуклість, увігнутість, невертикальність) по всій площі поверхні.

Окрему увагу було приділено аналізу відхилень на марках 106 та 107. Важливо зазначити, що ці пункти не використовувалися у процесі трансформації хмари точок на еталонну основу. Вони виступали в ролі незалежних контрольних точок для верифікації результату.

Візуалізація відхилень у зоні цих марок (рис. 3.14) демонструє максимальні розбіжності на мішені №107. Такий результат пояснюється сукупністю двох факторів:

Геометрія зйомки: Дана ділянка є найвіддаленішою точкою маршруту відносно стартової позиції. Сканування тут виконувалося з більшої відстані та під гострішим кутом падіння лазерного променя, що фізично знижує точність визначення координат точок.

Накопичення дрейфу: Оскільки ці точки знаходяться в «петлі» маршруту до моменту замикання контуру, на них припадає пікове значення накопиченої помилки інерціальної системи (IMU).

Саме показники на точці 107 відображають реальну точність зйомки у найскладніших зонах об'єкта, на відміну від точок 100-105, де алгоритм мінімізував помилку математично.

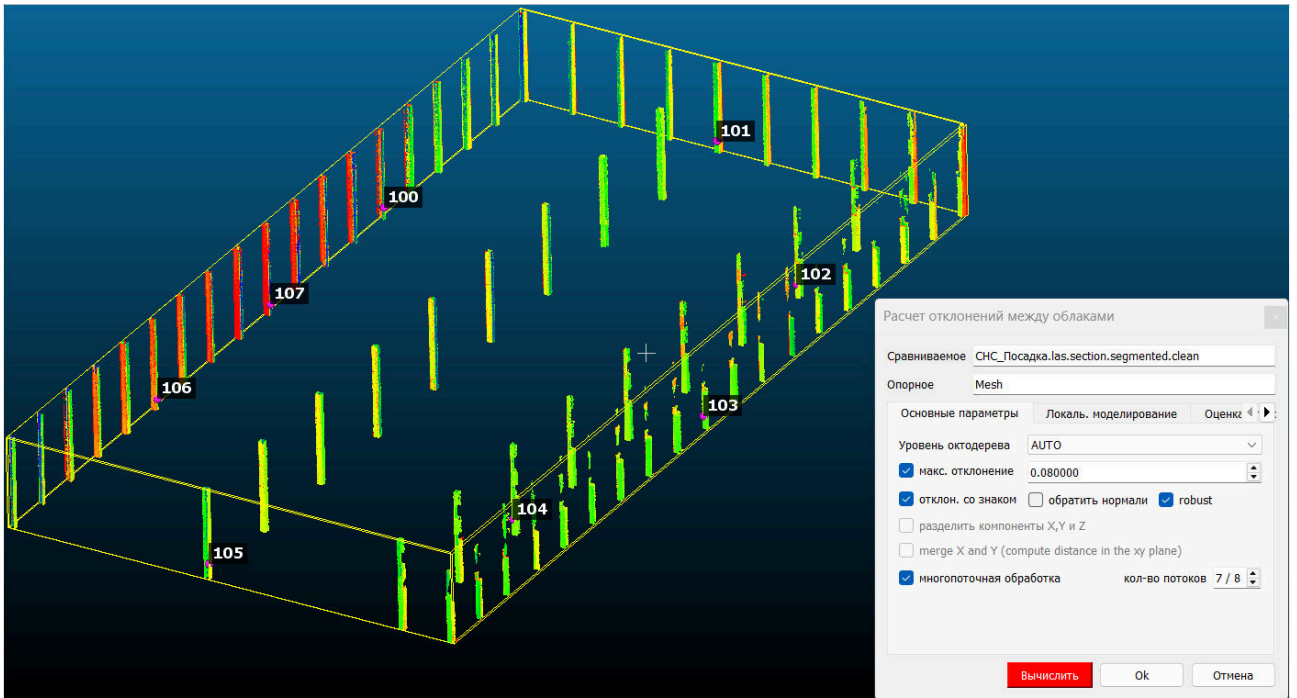


Рис. 3.14 Демонстрація нерівномірності деформацій моделі CHCNAV

Аналіз статистичного розподілу відхилень (рис. 3.15) підтверджує геометричну відповідність моделі. Графік має вигляд нормального розподілу з центром у точці 0.00 м.

Як видно з діаграми, абсолютна більшість вимірювань (понад 85% точок) знаходиться в межах допуску ± 0.04 м (± 4 см).

pproximate distances (4523875 values) [8 classe:

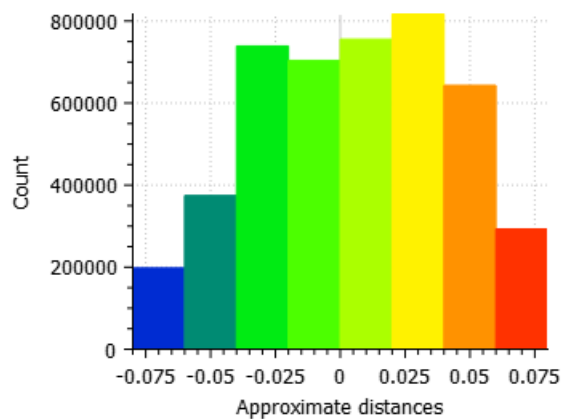


Рис. 3.15 Гістограма розподілу відхилень точок від еталонної поверхні

Найбільш показовим прикладом накопичення навігаційної помилки є ситуація на контрольній точці 107.

Як видно на рисунку 3.16, реальна залізобетонна колона (відображена сірою моделлю з проектними розмірами 600x400 мм) не співпадає з її відображенням у хмарі точок.

Позиційний зсув: Результати вимірювання фіксують зміщення площини колони по осі У на величину $\Delta Y = 0.069$ м (69 мм). Це є грубою помилкою, яка унеможлиблює використання таких даних для будівельного контролю без додаткової корекції.

Геометрична деформація: Окрім зсуву, спостерігається спотворення форми об'єкта на величину $\Delta X = 0.520$ м (52 см). Хмара точок (показана червоно-жовтим градієнтом) «розтягнута» у просторі від проекту на величину 12 см, створюючи ефект «фантомної колони», яка знаходиться за межами фізичного контуру реальної конструкції.

Цей артефакт підтверджує, що на найвіддаленіших ділянках траєкторії, які не були закріплені замиканням контуру або жорсткою прив'язкою, SLAM-алгоритм втратив метричну точність.»

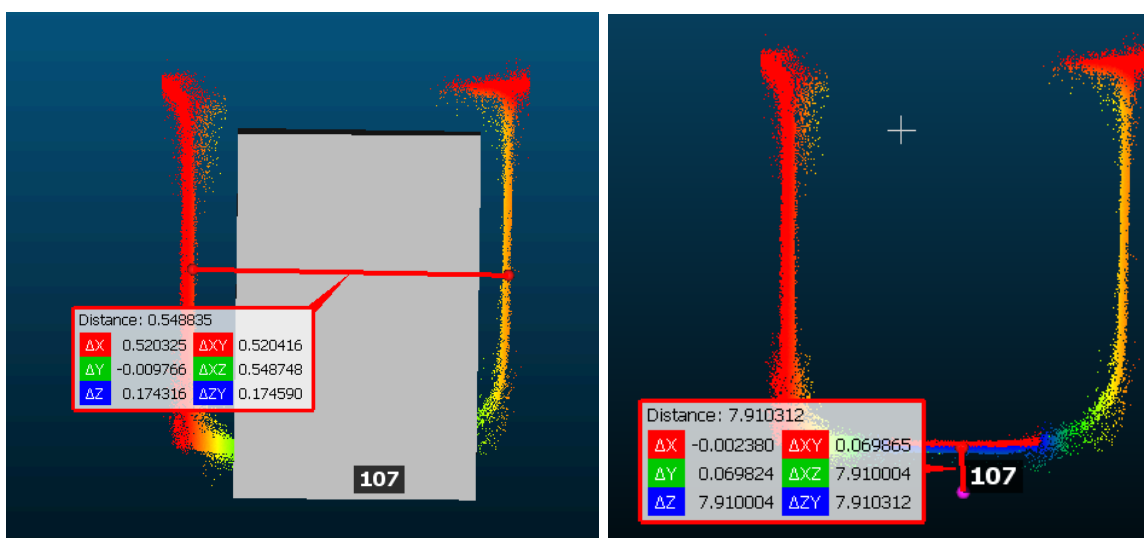


Рис. 3.16 Геометрична деформація та зсув на контрольній точці 107

Поряд із виявленими локальними артефактами на периферії маршруту (точка 107), аналіз решти контрольних зон демонструє високу метричну відповідність моделі.

Дослідження геометрії конструкцій, що знаходилися в зоні впевненого перекриття сканів та оптимального кута падіння променя, показало, що

відхилення від реальних розмірів колони 600x600 мм знаходяться в межах допустимої похибки 10–15 мм.

Зокрема, порівняння перерізів колон (рис. 3.17) у центральній частині об'єкта (рис 3.17) з еталонною векторною моделлю зафіксувало фактичні габарити: $\Delta Y = 0.589$ м (відхилення -11 мм) та $\Delta X = 0.614$ м (відхилення +14 мм).

Такий показник підтверджує, що при дотриманні методики зйомки (уникнення гострих кутів, великих дистанцій та правильне замикання маршрутів) мобільний сканер може забезпечити сантиметрову точність відтворення геометрії.

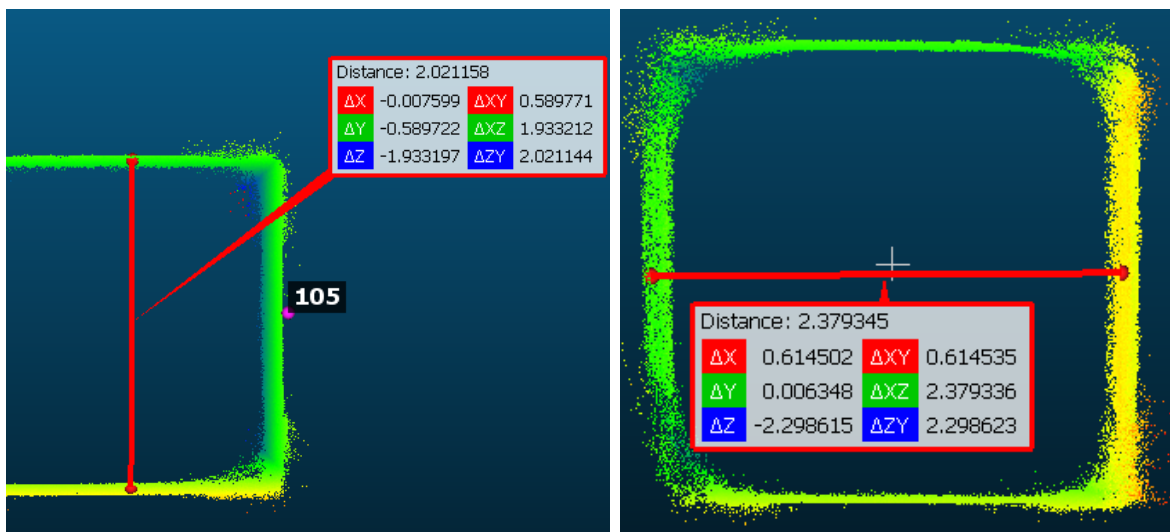


Рис. 3.17 Оцінка локальної геометричної точності сканера CHCNAV RS10 на прикладі горизонтального перерізу колони

Детальний аналіз мікрогеометрії хмари точок (Рис. 3.17) виявив суттєву відмінність у якості відтворення плоских поверхонь та кутових елементів.

Площинні об'єкти: на рівних ділянках стін спостерігається мінімальний рівень шуму та висока щільність точок. Алгоритм SLAM коректно будує площину.

Кутові сполучення: на зовнішніх кутах колон та стін зафіксовано ефект «геометричного згладжування». Гострі кути відображаються у хмарі точок як заокруглені фаски радіусом 3-4 см.

Підвищений шум на краях: У зонах різкого перепаду глибини (краї колон) спостерігається підвищене «розмиття» точок, викликана фізичним явищем

розходження лазерного пучка та ефектом «змішаного пікселя», коли промінь одночасно потрапляє на край об'єкта та на фон.

При векторизації планів за такими даними не можна просто з'єднувати крайні точки кута. Необхідно використовувати метод перетину ліній, побудованих по стабільних плоских ділянках стін, ігноруючи шумні зони безпосередньо на кутах.

3.4. Порівняльний аналіз ефективності досліджуваних систем

На основі детального аналізу технічної документації та результатів польового експерименту було сформовано комплексну оцінку ефективності досліджуваних систем. Кожен із приладів зайняв свою нішу, продемонструвавши як унікальні переваги, так і специфічні обмеження.

Електронний тахеометр Sokkia CX-105

Цей прилад підтвердив свій статус безальтернативного інструменту для задач, що вимагають високої точності.

При дотриманні технології робіт та виконання повірок, тахеометр забезпечує міліметрову точність, недосяжну для мобільного сканування. Він незамінний для контролю якості монтажу відповідальних конструкцій (анкери, колони), виносу осей та створення геодезичної основи.

Головним мінусом є низька інформаційна щільність та швидкість набору даних. Тахеометр вимірює конкретні точки: він не бачить провисання дротів чи викривлення стіни між пікетами. Крім того, фізика лазерного далекоміра (EDM) так само чутлива до різних поверхонь, як і у сканерів, але людський фактор та час виконання зйомки великих площ роблять його економічно неефективним для масових обмірів.

Мультиплатформна система CHCNAV RS10

Комплекс продемонстрував найкращий баланс між швидкістю та стабільністю результату в умовах будівельного майданчика.

Ключовим фактором успіху стала комбінація більшої дальності сканування (120 м) та жорсткої інтеграції з RTK-модулем. Це дозволило приладу «бачити» периметр об'єкта навіть із центру майданчика, ігноруючи локальну одноманітність конструкцій. Якісна інерціальна система IMU та алгоритми SLAM дозволили отримати готову модель з точністю 3–4 см без використання контрольних марок.

Ідеальний вибір для виконавчих зйомок великих площ, благоустрою та фасадів, де важлива швидкість отримання результату.

Мобільна система GreenValley LiGrip O2 Lite

Сканер показав високу щільність хмари точок та відмінну деталізацію, маючи потенціал досягати точності дорожчих аналогів, проте виявив чутливість до методики зйомки.

Виявлені відхилення на маршруті обумовлене не якістю сенсорів, а фізичним обмеженням дальності та алгоритмами обробки. В закритому одноманітному просторі та різких кутах повороту прилад втратив геометричні орієнтири.

LiGrip здатний видавати високу точність, але вимагає суворішого контролю: прокладання маршрутів ближче об'єктів сканування, обов'язкового подвійного проходу та, найголовніше, використання опорних точок для корекції траєкторії. Це інструмент, який потребує більшої кваліфікації оператора для планування робіт.

Таблиця 3.3

Комплексна характеристика досліджуваних систем

Параметр	Sokkia CX-105	CHCNAV RS10	LiGrip O2 Lite
Природа даних	Вибіркові точки	Суцільна хмара+GNSS	Суцільна хмара+GNSS
Точність	Висока (2–3 мм)	Середня (3–4 см)	Варіативна (від 5 см до >10 см)
Ефективна дальність	500 м	80 м (Макс. 120 м)	40 м (Макс. 70 м)

Параметр	Sokkia CX-105	CHCNAV RS10	LiGrip O2 Lite
Залежність від методики	Висока (кваліфікація геодезиста)	Середня (автоматизація процесів)	Висока (потребує додаткового контролю)
Продуктивність	Низька (дні)	Надвисока (години)	Надвисока (години)

Висновки до розділу 3

Проведене експериментальне дослідження наочно продемонструвало, що в технології мобільного сканування висока якість сенсорів не є єдиною гарантією точності. Ми встановили критичну відмінність між локальною деталізацією, де шум становить міліметри, та глобальним позиціонуванням, де без належного контролю помилка може сягати півметра.

Порівняння систем у реальних умовах виявило вирішальну роль дальності лідара та алгоритмів інтеграції. Якщо гібридна система CHCNAV RS10 завдяки «далекозорості» (120 м) та жорсткій прив'язці до GNSS забезпечила стабільний результат (3–4 см), то компактний сканер LiGrip через обмежену дальність (40 м) втратив геометричні орієнтири на відкритому просторі, що призвело до значного навігаційного дрейфу.

Окремо слід відзначити роль програмного забезпечення в процесі валідації даних. Дослідження підтвердило, що візуальна оцінка «сирої» хмари точок є недостатньою, оскільки вона може приховувати масштабні деформації. Застосування спеціалізованих алгоритмів у середовищі CloudCompare дозволило виявити приховані відхилення, які неможливо зафіксувати традиційними методами. Саме камеральний етап стає ключовим інструментом контролю якості: він трансформує масив точок у зрозумілу карту відхилень, дозволяючи інженеру миттєво оцінити відповідність конструкцій проекту.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1. Нормативно-правове регулювання охорони навколишнього середовища при проведенні будівельних робіт

Екологічне законодавство України – це ціла система нормативно-правових актів, що містять еколого-правові норми, які здатні регулювати екологічні правовідносини, що виникають у галузі використання природних ресурсів, охорони навколишнього природного середовища і забезпечення екологічної безпеки.

При виконанні будь-яких інженерних робіт, пов'язаних з будівництвом та вишукуванням, в Україні необхідно керуватися чинними нормативно-правовими актами, стандартами тощо з охорони навколишнього природного середовища. Основна мета цього розділу — проаналізувати потенційні екологічні ризики, пов'язані з геодезичним забезпеченням будівництва складського приміщення, та розробити заходи для їх запобігання.

Основними законодавчими актами, що регулюють цю діяльність, є:

1. Закон України від 25.06.1991 № 1264-ХІІ «Про охорону навколишнього природного середовища».

Завданням законодавства про охорону навколишнього природного середовища є регулювання відносин у галузі охорони, використання і відтворення природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки, запобігання і ліквідації негативного впливу господарської та іншої діяльності на навколишнє природне середовище у сфері зміни клімату, збереження природних ресурсів, генетичного фонду живої природи, ландшафтів та інших природних комплексів, унікальних територій та природних об'єктів, пов'язаних з історико-культурною спадщиною.

Основними принципами охорони навколишнього природного середовища є:

- а) пріоритетність вимог екологічної безпеки, обов'язковість додержання екологічних нормативів та лімітів використання природних ресурсів при здійсненні господарської, управлінської та іншої діяльності;
- б) гарантування екологічно безпечного середовища для життя і здоров'я людей;
- в) запобіжний характер заходів щодо охорони навколишнього природного середовища;
- г) екологізація матеріального виробництва на основі комплексності рішень у питаннях охорони навколишнього природного середовища, використання та відтворення відновлюваних природних ресурсів, широкого впровадження новітніх технологій;
- д) збереження просторової та видової різноманітності і цілісності природних об'єктів і комплексів;
- е) науково обгрунтоване узгодження екологічних, економічних та соціальних інтересів суспільства на основі поєднання міждисциплінарних знань екологічних, соціальних, природничих і технічних наук та прогнозування стану навколишнього природного середовища;
- є) обов'язковість оцінки впливу на довкілля;
- ж) гласність і демократизм при прийнятті рішень, реалізація яких впливає на стан навколишнього природного середовища, формування у населення екологічного світогляду;
- з) науково обгрунтоване нормування впливу господарської та іншої діяльності на навколишнє природне середовище;
- и) безоплатність загального та платність спеціального використання природних ресурсів для господарської діяльності;
- і) компенсація шкоди, заподіяної порушенням законодавства про охорону навколишнього природного середовища;
- ї) вирішення питань охорони навколишнього природного середовища та використання природних ресурсів з урахуванням ступеня антропогенної

зміненості територій, сукупної дії факторів, що негативно впливають на екологічну обстановку;

й) поєднання заходів стимулювання і відповідальності у справі охорони навколишнього природного середовища;

к) вирішення проблем охорони навколишнього природного середовища на основі широкого міждержавного співробітництва;

л) встановлення екологічного податку, рентної плати за спеціальне використання води, рентної плати за спеціальне використання лісових ресурсів, рентної плати за користування надрами відповідно до Податкового кодексу України;

м) врахування результатів стратегічної екологічної оцінки.

При виконанні будь-яких інженерних робіт, пов'язаних з будівництвом та вишукуванням, в Україні необхідно керуватися чинними нормативно-правовими актами, стандартами тощо з охорони навколишнього природного середовища. Основна мета цього розділу — проаналізувати потенційні екологічні ризики, пов'язані з геодезичним забезпеченням будівництва складського приміщення, та розробити заходи для їх запобігання.

2. Закон України від 19.06.2003 № 962-IV «Про охорону земель» (далі – Закон № 962-IV).

Закон № 962-IV визначає правові, економічні та соціальні основи охорони земель з метою забезпечення їх раціонального використання, відтворення та підвищення родючості ґрунтів, інших корисних властивостей землі, збереження екологічних функцій ґрунтового покриву та охорони довкілля.

3. Закон України від 20.06.2022 № 2320-IX «Про управління відходами» (далі – Закон № 2320-IX).

Закон № 2320-IX визначає правові, організаційні, економічні засади діяльності щодо запобігання утворенню, зменшення обсягів утворення відходів, зниження негативних наслідків від діяльності з управління відходами, сприяння підготовці відходів до повторного використання, рециклінгу і відновленню з

метою запобігання їх негативному впливу на здоров'я людей та навколишнє природне середовище.

4. Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII «Про оцінку впливу на довкілля» (далі – Закон № 2059-VIII)..

Закон № 2059-VIII встановлює правові та організаційні засади оцінки впливу на довкілля, спрямованої на запобігання шкоді довкіллю, забезпечення екологічної безпеки, охорони довкілля, раціонального використання і відтворення природних ресурсів, у процесі прийняття рішень про провадження господарської діяльності, яка може мати значний вплив на довкілля, з урахуванням державних, громадських та приватних інтересів.

5. Водний кодекс України від 06.06.1995 № 213/95-ВР

Водний кодекс, в комплексі з заходами організаційного, правового, економічного і виховного впливу, сприяє формуванню водно-екологічного правопорядку і забезпечує екологічну безпеку населення України, а також більш ефективному, науково обгрунтованому використанню вод та їх охороні від забруднення, засмічення та вичерпання.

6. ДБН А.3.1-5:2016 «Організація будівельного виробництва».

Державній будівельні норми встановлюють загальні вимоги до організації будівельного виробництва під час нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту, технічного переоснащення (далі - будівництво) будинків, будівель, споруд будь-якого призначення, їх комплексів або частин, лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури.

Організація будівельного виробництва полягає у спрямуванні організаційних, технічних, технологічних рішень та інших заходів на реалізацію проектних рішень щодо будівництва об'єкта з дотриманням вимог законодавства та нормативних документів і забезпеченням під час будівництва:

а) механічного опору та стійкості конструктивних елементів, що споруджуються;

б) пожежної безпеки;

в) унеможливлення загрози здоров'ю або безпеці людей та шкідливого впливу на навколишнє природнесередовище;

г) захисту від шкідливого впливу шуму та вібрації.

7. ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проектної документації на будівництво» із Зміною № 1 і Зміною № 2 – встановлюють склад та зміст проектної документації на нове будівництво, реконструкцію та капітальний ремонт будівель і споруд будь-якого призначення, їх комплексів та частин.

8. ДБН В.1.3-2:2010 «Геодезичні роботи у будівництві» - встановлюють загальні правила проектування, виконання та приймання геодезичних робіт, які потрібно виконувати під час будівництва, реконструкції, технічного переоснащення об'єктів будівництва будь-якого призначення.[4]

4.2. Вплив геодезичних вимірювань на навколишнє природне середовище

На сьогоднішній день екологічно відповідальне будівництво стало ключовими поняттями в сучасній архітектурі. Проекти, що мінімізують вплив на довкілля, знижують вуглецевий слід і зберігають природний ландшафт, формують нову якість життя. Виконання таких проектів неможливе без точного розуміння простору, з яким працює архітектор. І саме геодезичні роботи є першим кроком до екологічно усвідомленого будівництва.

Геодезичні роботи, хоч і є важливими для планування будівництва, можуть мати мінімальний, але помітний вплив на довкілля через застосування техніки (шум, вихлопи), тимчасове порушення ґрунту при встановленні віх та пунктів, а також непрямий вплив через подальші будівельні роботи, але основний негативний вплив несуть саме інженерні споруди, а геодезисти впроваджують заходи для мінімізації цього впливу.

Результатом геодезичних робіт є формування цифрових моделей місцевості, яка включає мікрорельєф, природні особливості, лінії водотоків, розу вітрів,

охоронні зони. На основі цих даних формуються рішення щодо розміщення споруд, орієнтації фасадів, відведення стоків тощо.

Типи геодезичних робіт у природоорієнтованому проєктуванні:

1. Топографічна зйомка з деталізацією природних об'єктів.
2. Цифрове моделювання рельєфу для ВІМ-середовища.
3. Фотограмметрія та супутникове спостереження.
4. Визначення меж земельної ділянки з урахуванням природоохоронних обмежень.
5. Трасування підземних комунікацій та зелених зон.
6. Геодезичний моніторинг впливу на середовище в процесі забудови.

Разом з тим важливим екологічним аспектом геодезичного забезпечення будівництва є мінімізація утворення будівельних відходів шляхом превентивного контролю точності геометричних параметрів:

- високоточні геодезичні вимірювання на етапі земляних робіт дозволяють оптимізувати баланс земляних мас, що мінімізує обсяги вивезення ґрунту у відвали та знижує навантаження на полігони;

- традиційна тахеометрія вимагає прямої оптичної видимості між приладом та рейкою, що часто призводить до необхідності вирубки чагарників або обрізання гілок дерев. Технологія SLAM дозволяє оператору просто обійти перешкоду з іншого боку, зберігаючи рослинність недоторканою;

- оперативний геодезичний моніторинг запобігає виникненню браку будівельної продукції. Своєчасне виявлення відхилень від проектного положення дозволяє уникнути необхідності демонтажу та руйнування вже зведених конструкцій (стін, фундаментів, перекриттів). Це, в свою чергу, попереджає утворення значних обсягів відходів будівництва;

Таким чином, точність геодезичних робіт виступає прямим фактором ресурсозбереження та зниження антропогенного навантаження на довкілля.

Під час проведення дослідження рівень впливу на довкілля є помірний, головними факторами якого є порушення ґрунтового покриву, утворення пилу, відходів.

Для зменшення негативного впливу вищезазначених факторів на навколишнє середовище впроваджено заходи:

1. Проведено калібрування технологічного обладнання.
2. Застосування сучасних методів інженерної геодезії, зокрема 3D-сканування.
3. Виконання робіт з дотриманням правил ДБН В.1.3-2:2010 «Геодезичні роботи у будівництві».
4. Після завершення вимірювань було здійснено збір відпрацьованих маркувальних матеріалів.

Висновки до розділу 4

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що дослідження та практичне застосування технологій мобільного 3D-сканування характеризуються мінімальним безпосереднім впливом на довкілля. На відміну від будівельних процесів, які супроводжуються порушенням ґрунтового покриву, утворенням пилу та відходів, процес сканування є неінвазивним та екологічно нейтральним.

Водночас встановлено, що основний екологічний потенціал даної технології полягає не стільки у відсутності шкідливих викидів під час роботи приладу, скільки у превентивній функції високоточних вимірювань. Дослідження точності SLAM-систем, виконане в даній роботі, доводить, що їх використання дозволяє виявляти відхилення будівельних конструкцій на ранніх етапах.

Це забезпечує значний позитивний еколого-економічний ефект:

1. Зменшення будівельних відходів: Своєчасний контроль запобігає необхідності демонтажу та повторного зведення дефектних конструкцій.
2. Економія ресурсів: Оптимізація геометрії споруди дозволяє уникнути перевитрат бетону та будівельних матеріалів.
3. Логістична ефективність: Висока швидкість зйомки та повнота даних скорочують час роботи техніки та кількість виїздів транспорту на об'єкт.

Таким чином, впровадження кваліфікованого інженерно-геодезичного супроводу на базі SLAM-технологій виступає дієвим інструментом підвищення екологічної безпеки будівництва.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальні положення

Охорона праці - це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності.

Охорона праці в сучасній інженерній геодезії трансформується з суто нормативної дисципліни в ключовий елемент виробничої культури. Впровадження новітніх технологій, таких як мобільне лазерне сканування (MLS) та SLAM-навігація, докорінно змінює характер праці фахівця. Якщо традиційна геодезія передбачала статичну роботу на станції, то використання сканерів типу CHCNAV RS10 або LiGrip перетворює оператора на мобільну одиницю, що безперервно рухається в умовах підвищеної небезпеки.

Метою державної політики в цій галузі є створення умов для безпечної експлуатації складних технічних систем. В умовах виконання дипломної роботи, об'єктом якої є будівельний майданчик (с. Зубра) та інфраструктурні об'єкти, питання безпеки стають пріоритетними. Специфіка роботи полягає в тому, що інженер змушений поєднувати контроль за траєкторією руху, моніторинг якості збору даних на планшеті та візуальну оцінку навколишньої обстановки, що створює значне психофізіологічне навантаження.

У структурі управління геодезичним виробництвом відповідальність за стан охорони праці покладається на керівника підприємства та головного інженера. Служба охорони праці виконує наглядові функції, організовує навчання, проведення інструктажів та атестацію робочих місць. Для робіт із використанням лазерних сканерів обов'язковим є впровадження спеціальних інструкцій, що враховують клас небезпеки лазера та специфіку роботи з літій-іонними джерелами живлення високої ємності.

5.2. Нормативно-правова база з охорони праці

Законодавча база України у сфері охорони праці є розгалуженою системою, що гармонізується з європейськими стандартами. При виконанні досліджень було враховано вимоги наступних нормативно-правових актів (в актуальних редакціях станом на 2024–2025 рр.):

Основними документами для забезпечення безпечних умов праці є:

1. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ. Фундаментальний документ, який гарантує право на безпечні умови праці. Відповідно до статті 14 працівник зоб'язаний дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт.[1]

2. Кодекс законів про працю України від 10.12.1971 № 322-VIII. Регулює трудові відносини, тривалість робочого часу та відпочинку, що є критично важливим при плануванні камеральних робіт з обробки великих масивів даних.

3. Закон України від 30.06.1993 № 3353-ХІІ «Про дорожній рух». Регламентує дії геодезиста при виконанні зйомки вулично-дорожньої мережі та знаходженні поблизу транспортних потоків.

4. Наказ Міністерства соціальної політики України 23.06.2017 № 1050 «Про затвердження Мінімальних вимог з охорони праці на тимчасових або мобільних будівельних майданчиках» (далі – Наказ № 1050).[3]

5. ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення».

Відповідно до законодавства України про охорону праці під час укладання трудових договорів (крім трудового договору про дистанційну роботу, про роботу вдома) роботодавець повинен проінформувати працівника під розписку про умови праці та наявність на його робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які ще не усунено, можливі наслідки їх впливу на здоров'я

та про права працівника на пільги й компенсації за роботу в таких умовах відповідно до законодавства й колективного договору.

Водночас працівникові не можна пропонувати роботу, яка за медичним висновком протипоказана йому за станом здоров'я. А до виконання робіт підвищеної небезпеки й тих, що потребують професійного добору, допускаються особи за наявності висновку психофізіологічної експертизи.

Перший етап організації охорони праці на підприємстві – створення відповідної служби або визначення вповноваженої особи. Така служба обов'язково повинна бути створена на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб у відповідності з Типовим положенням про службу охорони праці. Також має бути розроблено Положення про службу охорони праці цього підприємства, визначено структуру такої служби, її чисельність, основні завдання, функції та права її працівників.

На підприємствах з кількістю працівників менше 50 осіб функції служби охорони праці можуть виконувати в порядку сумісництва (суміщення) особи, які мають відповідну підготовку. А на підприємствах з кількістю працівників менше 20 для виконання функцій служби охорони праці можуть на договірних засадах залучатися сторонні фахівці, які мають не менше 3-х років виробничого стажу і пройшли навчання з охорони праці.

Роботодавець зобов'язаний затвердити відповідні документи, які передбачені законодавством про охорону праці. Такі документи повинні встановлювати правила виконання робіт і поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на будівельних майданчиках і робочих місцях. Інструкції й іншу документацію з охорони праці розробляють керівники структурних підрозділів на підставі положень законодавства з охорони праці, типових інструкцій та технологічної документації підприємства з урахуванням виду діяльності підприємства й конкретних умов праці на ньому.

Перед початком роботи нового працівника роботодавець зобов'язаний проінформувати його під розписку про умови праці, наявні на його робочому місці. Зокрема, про всі небезпечні чи шкідливі виробничі фактори, які ще не

усунуто, та про можливі наслідки їх впливу на здоров'я працівника, а також про можливі пільги та компенсації за роботу в таких умовах.

Крім того, при прийнятті на роботу всі працівники повинні коштом роботодавця пройти вступний інструктаж, навчання, перевірку знань, первинний інструктаж на робочому місці, стажування й набуття навичок безпечних методів праці. Тільки після цього працівники допускаються до самостійної роботи.

Вступний інструктаж проводить спеціаліст з охорони праці, а первинний - безпосередній керівник працівника. Надалі з працівниками повинні проводитися повторні інструктажі (раз на квартал при виконанні робіт підвищеної небезпеки або раз на півріччя), решту позапланові (при зміні правил охорони праці, зміни в обладнанні чи при порушенні правил охорони праці з боку працівника) та цільові інструктажі (зокрема, при разових роботах, не пов'язаних зі спеціальністю). Інформація про проведення інструктажів має вноситися до відповідного журналу, завірена підписом як того, кого інструктували, так і того, хто інструктував.

Роботодавець зобов'язаний за свої кошти забезпечити фінансування й організувати проведення попереднього (під час прийняття на роботу) і періодичних (протягом трудової діяльності) медичних оглядів працівників, зайнятих на важких роботах, роботах зі шкідливими чи небезпечними умовами праці або таких, де є потреба в професійному доборі, а також щорічного обов'язкового медичного огляду осіб віком до 21 року.

Український роботодавець зобов'язаний організувати розслідування та вести облік нещасних випадків, професійних захворювань й аварій у порядку, встановленому законодавством. За результатами такого розслідування роботодавець повинен скласти акт за формою Н-5 (якщо нещасний випадок визнано таким, що не пов'язаний із виробництвом) або Н-1 (якщо він визнаний пов'язаним із виробництвом). Один із примірників повинен видатися потерпілому або іншій зацікавленій особі не пізніше 3-х днів з моменту закінчення розслідування.

Згідно з чинним законодавством, ключовим елементом системи управління безпекою є призначення координаторів з питань охорони праці. Ця вимога є імперативною у випадках залучення до робіт двох і більше підрядників. Нормативно виокремлюються дві стадії діяльності координаторів:

- стадія розробки проектної документації: координатор призначається до початку проектування. Його функція полягає у координації проектних рішень з урахуванням аспектів безпеки;

- стадія будівництва: координатор призначається до початку виконання будівельних робіт. Допускається суміщення цих функцій однією особою за наявності відповідної кваліфікації (вища профільна освіта, стаж не менше 5 років, підтверджена кваліфікація інженера з охорони праці).

Фундаментом безпечної організації робіт є «План з охорони праці будівельного майданчика» (далі - План). Цей документ розробляється одночасно з проектною документацією і має бути завершений до початку робіт. План є динамічним документом, що підлягає коригуванню при зміні умов будівництва. Він повинен містити:

- аналіз професійних ризиків;
- схеми руху транспорту та пішоходів;
- зонування території (визначення небезпечних зон);
- заходи щодо координації дій різних підрядників;
- специфічні заходи безпеки для робіт підвищеної небезпеки.

Важливим адміністративним аспектом є обов'язок замовника надавати «Попередню інформацію» територіальному органу Держпраці не пізніше ніж за 30 днів до початку робіт, якщо обсяг робіт перевищує встановлені нормативи.

Ефективність системи охорони праці базується на чіткому розмежуванні та водночас консолідації обов'язків:

1. Замовник/Керівник будівництва: несе загальну відповідальність за організацію процесу, призначення координаторів та затвердження Плану.

2. Координатори: забезпечують комунікацію, погоджують заходи безпеки у ПВР (проектах виконання робіт), контролюють доступ сторонніх осіб та організують спільну роботу підрядників.

3. Підрядники: зобов'язані виконувати вимоги Плану та вказівки координаторів, забезпечувати безпеку на своїх ділянках роботи.

4. Фізичні особи: зобов'язані дбати про власну безпеку, використовувати засоби індивідуального захисту та інформувати про небезпечні ситуації.

Аналіз розділів XII–XIV Наказу № 1050 дозволяє виділити групи технічних стандартів, спрямованих на попередження травматизму:

- захист від падіння з висоти: роботи на висоті понад 1,3 м вимагають встановлення огорожень (мін. 1,1 м) або застосування засобів колективного/індивідуального захисту;

- електробезпека: сувора регламентація перевірок енергорозподільних установок, винесення або захист повітряних ліній електропередач;

- земляні роботи: обов'язкове кріплення укосів котлованів, перевірка наявності підземних комунікацій та забезпечення шляхів евакуації;

- пожежна безпека та евакуація: шляхи евакуації мають бути позначені, вільні від перешкод та забезпечені аварійним освітленням;

- санітарно-побутове забезпечення: норми чітко регламентують наявність роздягалень, душових, туалетів, приміщень для обігріву та прийому їжі з урахуванням гендерного розподілу та кількості персоналу.

Разом з тим, слід приділити увагу міжнародному стандарту ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT) (далі - ДСТУ ISO 45001:2019 / стандарт), що встановлює мінімальний набір вимог до належної практики безпечного виконання робіт для захисту працівників у всіх країнах світу. Це перший глобальний стандарт, який замінив ДСТУ OHSAS 18002:2015 Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT).

Його ключова відмінність та цінність ДСТУ ISO 45001:2019 для нашого дослідження полягає у впровадженні ризик-орієнтованого підходу. Згідно з стандартом, безпека забезпечується не лише реагуванням на інциденти, а проактивним виявленням небезпек ще на етапі планування. Для технології SLAM це реалізується через цикл ПВПД:

1. Плануй: попередній аналіз маршруту сканування, виявлення «сліпих зон» та перешкод.
2. Виконуй: використання ЗІЗ та дотримання безпечної дистанції під час сканування.
3. Перевірйай: моніторинг стану здоров'я оператора та справності обладнання.
4. Дій: коригування інструкцій у разі виявлення нових ризиків (наприклад, слизька поверхня).

Інтеграція вимог ДСТУ ISO 45001:2019 у практику геодезичних робіт дозволяє знизити травматизм та підвищити ефективність виробничих процесів, що відповідає сучасним європейським практикам.[5]

5.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – відсутність неприпустимого ризику виникнення та розвитку пожеж і пов'язаної з ними можливості завдання шкоди живим істотам, матеріальним цінностям і довкіллю.

Українське законодавство визначає, що належить до завдань й обов'язків суб'єктів господарювання у сфері цивільного захисту.

Загальні вимоги з пожежної безпеки до будівель, споруд різного призначення та прилеглих до них територій, іншого нерухомого майна, обладнання, устаткування, що експлуатуються, будівельних майданчиків, а також під час проведення робіт з будівництва, реконструкції, реставрації, капітального ремонту, технічного переоснащення будівель та споруд встановлюються Наказом Міністерства внутрішніх справ України 30.12.2014

№ 1417 «Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні» (далі - Правила).

На кожному об'єкті відповідним документом (наказом, інструкцією тощо) повинен бути встановлений протипожежний режим, який включає:

- порядок утримання шляхів евакуації;
- визначення спеціальних місць для куріння;
- порядок застосування відкритого вогню;
- порядок використання побутових нагрівальних приладів;
- порядок проведення тимчасових пожежонебезпечних робіт;
- правила проїзду та стоянки транспортних засобів;
- місця для зберігання і допустиму кількість сировини, напівфабрикатів та готової продукції, що можуть одночасно знаходитися у приміщеннях і на території;
- порядок прибирання горючого пилу й відходів, зберігання промасленого спецодягу та ганчір'я, очищення елементів вентиляційних систем від горючих відкладень;
- порядок відключення від мережі електроживлення обладнання та вентиляційних систем у разі пожежі;
- порядок огляду й зачинення приміщень після закінчення роботи;
- порядок проходження посадовими особами навчання й перевірки знань з питань пожежної безпеки, а також проведення з працівниками протипожежних інструктажів та занять з пожежно-технічного мінімуму з призначенням відповідальних за їх проведення;
- порядок організації експлуатації і обслуговування наявних засобів протипожежного захисту;
- порядок проведення планово-попереджувальних ремонтів та оглядів електроустановок, опалювального, вентиляційного, технологічного та іншого інженерного обладнання;

- порядок збирання членів пожежно-рятувального підрозділу добровільної пожежної охорони та посадових осіб, відповідальних за пожежну безпеку, у разі виникнення пожежі, виклику вночі, у вихідні й святкові дні;

- порядок дій у разі виникнення пожежі: порядок і способи оповіщення людей, виклику пожежно-рятувальних підрозділів, зупинки технологічного устаткування, вимкнення ліфтів, підйомників, вентиляційних установок, електроспоживачів, застосування засобів пожежогасіння; послідовність евакуації людей та матеріальних цінностей з урахуванням дотримання техніки безпеки. При розробленні інструкцій дій у разі виникнення (виявлення) пожежі необхідно використовувати розділ VIII Правил.

Працівники об'єкта мають бути ознайомлені з цими вимогами на інструктажах або під час проходження пожежно-технічного мінімуму.

Для кожного приміщення об'єкта або групи його приміщень однакового призначення мають бути розроблені та затверджені керівником об'єкта або уповноваженою ним посадовою особою інструкції про заходи пожежної безпеки.

5.4 Умови та фактори виробничого середовища

При виконанні геодезичних робіт, як і при виконанні багатьох інших видів робіт, існує небезпека для життя і здоров'я робітників. Це пов'язано з тим, що великий обсяг геодезичних робіт проводиться на відкритому повітрі, часто на незнайомій, віддаленій і пересіченій місцевості. Разом з тим, процес створення 3D-моделей методом мобільного сканування супроводжується впливом на організм людини специфічних факторів виробничого середовища.

Рухомі машини та механізми. Це основний фактор ризику на будівельному майданчику. Робота в с. Зубра проводилася в умовах руху будівельної техніки. Небезпека полягає в тому, що SLAM-сканування вимагає від оператора плавного руху по певній траєкторії, часто – уваги, прикутої до екрана контролера. Це звужує периферичний зір і знижує здатність вчасно помітити рухомий транспорт.

Усі потенційні ризики можна розділити на три групи:

1. Небезпечні фактори, пов'язані з перебуванням на будівельному майданчику:

- рухомі машини та механізми: робота самоскидів, екскаваторів, баштових кранів;
- предмети, що падають: ризик падіння інструментів, матеріалів з висоти;
- перепади висот: наявність відкритих котлованів, траншей, неогороджених країв фундаментів та перекриттів;
- шляхи комунікацій: тимчасові дороги, слизькі поверхні, арматура, що стирчить із бетону;
- шум та вібрація від працюючої важкої техніки.

2. Шкідливі та небезпечні фактори, пов'язані безпосередньо з геодезичною роботою:

- метеорологічні умови: виконання робіт на відкритому повітрі (ризик переохолодження взимку, сонячного удару влітку, ураження блискавкою під час грози);

- лазерне випромінювання: хоча більшість сучасних 3d-сканерів належать до класу 1 (безпечні для очей за нормальних умов), тривалий прямий погляд в об'єктив приладу не рекомендується (небезпека виникає при спробі розібрати прилад або при використанні оптичних інструментів (теодолітів, біноклів), що збирають промінь, для спостереження за джерелом випромінювання). Сканери CHCNAV RS10 та LiGrp використовують лазерні діоди для вимірювання відстаней. Більшість сучасних мобільних LiDAR-сенсорів сертифіковані як Class 1 згідно з стандартом IEC 60825-1. Це означає, що випромінювання є безпечним за нормальних умов експлуатації;

- електробезпека: ризик при зарядці акумуляторів, роботі від мережі або небезпека доторку до тимчасових силових кабелів на майданчику. Мобільні сканери є енергоємними приладами, що живляться від потужних Li-Ion акумуляторів. При механічному пошкодженні (падіння приладу) або перегріві

можливий ефект «теплового розгону» , що супроводжується вибухоподібним горінням з температурою понад 600°C та виділенням токсичних газів;

- напруження зору: при тривалій роботі з приладом (тахеометром) або при камеральній обробці (багатогадинна робота за монітором);

- фізичне навантаження: перенесення важкого обладнання (штатив, кейс зі сканером, акумулятори) по нерівній поверхні.

3. Шкідливі фактори при камеральній обробці:

- напруження зору та статична поза: тривала робота за комп'ютером;

- електромагнітне випромінювання від моніторів та оргтехніки;

- недостатня освітленість робочого місця.

Для нейтралізації або мінімізації вищезгаданих ризиків вживаються наступні заходи:

- використовуються захисні каски (шолом) білого або помаранчевого кольору;

- одягається сигнальний жилет яскравого кольору, щоб бути помітним для водіїв техніки;

- використовується спецвзуття із захисним (металевим або композитним) носком та міцною підошвою;

- не виконуються роботи в небезпечній зоні роботи крана (під стрілою або підвішеним вантажем);

- встановлення приладів (сканер, тахеометр) у заздалегідь узгоджених, безпечних місцях, що не заважають руху техніки;

- підтримується візуальний або голосовий контакт з помічником;

- при роботі біля котлованів чи перепадів висот дотримуватись безпечної відстані (не менше 1.5 м).

- організовано робоче місце згідно з вимогами Наказу Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014 № 248 «Про затвердження державних санітарних норм та правил «гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»;

- забезпечується достатнє освітлення та наявність ергономічного крісла;
- дотримується режим праці та відпочинку;
- заборонено заряджати акумулятори без нагляду, використовувати пошкоджені батареї або зарядні пристрої неоригінального виробництва;
- уникати тривалого прямого погляду в об'єктив працюючого сканера з відстані менше 10 см.

Висновки до розділу 5

Забезпечення високого рівня охорони праці є невід'ємною складовою впровадження інноваційних технологій у геодезії. Проведений аналіз показав, що перехід до методів мобільного сканування (SLAM) зміщує акцент з небезпек статичної роботи на ризики, пов'язані з мобільністю та психофізіологічним навантаженням (сенсорний конфлікт).

Дотримання вимог чинного законодавства України, зокрема Закон України «Про охорону праці», та імплементація міжнародних принципів ДСТУ ISO 45001:2019 дозволили створити безпечні умови для проведення експериментальних досліджень. Застосування адекватних засобів індивідуального захисту, правильне планування логістики переміщень на об'єкті та дотримання режимів праці дозволило уникнути виробничого травматизму та забезпечити збереження здоров'я дослідника при досягненні високої продуктивності праці.

ВИСНОВКИ

На основі виконаного дослідження сформульовано критерії доцільності впровадження мобільних SLAM-систем у геодезичне виробництво. Встановлено, що ключовою перевагою методу є радикальне скорочення часу польових робіт, проте його застосування вимагає суворого дотримання методики контролю.

1. Економічна та операційна ефективність. Висока вартість мобільних сканерів та програмного забезпечення для обробки траєкторій виправдана у наступних випадках: – масштабні об'єкти складної конфігурації: інвентаризація складських комплексів, цехів, тунелів або фасадів історичних будівель. Швидкість зйомки мобільним сканером у 10–50 разів перевищує продуктивність тахеометра та у 3–5 разів – стаціонарного сканера, оскільки процес вимірювань відбувається безперервно у русі; – робота в умовах обмеженого часу: об'єкти, де тривале перебування геодезиста неможливе через технологічні процеси або безпекові обмеження (жваві магістралі, аварійні будівлі); – відсутність супутникового сигналу: сканування внутрішніх приміщень, де неможливе використання GNSS, а прокладання класичного теодолітного ходу є надто трудомістким.

2. Обмеження та ніша класичних методів. Для задач, що вимагають гарантованої субміліметрової точності (монтаж технологічного обладнання, моніторинг деформацій, розмічувальні роботи), використання електронного тахеометра залишається безальтернативним. SLAM-технологія, маючи імовірнісну природу точності, наразі не може замінити інструментальні методи у сфері високоточної інженерної геодезії.

3. Проблема достовірності та необхідність верифікації. Критичним висновком роботи є теза про неможливість «сліпого» використання даних SLAM без зовнішнього контролю. На відміну від стаціонарних методів, мобільне сканування схильне до накопичення похибки траєкторії (дрейфу), що може призвести до глобальної деформації геометрії об'єкта (викривлення стін, поворот

будівлі), яку неможливо виявити візуально. Вартість помилки при проектуванні реконструкції (BIM) на основі викривленої моделі значно перевищує економію на геодезичних роботах.

4. Рекомендована методика. Доведено, що найбільш надійним підходом є гібридна методика, яка поєднує: – швидкість SLAM-сканера для набору масиву точок (геометрії); – жорсткість геодезичної основи (тахеометрія/GNSS) для корекції траєкторії та контролю результату.

Таким чином, електронний тахеометр виступає не конкурентом, а обов'язковим інструментом метрологічного забезпечення для мобільних скануючих систем, гарантуючи, що швидкість збору даних не буде досягнута за рахунок втрати їхньої точності.

Перспективи розвитку технології

Оцінюючи отримані результати у контексті світових трендів, можна стверджувати, що геодезична галузь стоїть на порозі зміни технологічного укладу, де мобільне сканування перестане бути експериментальним методом і стане галузевим стандартом для завдань інвентаризації та BIM-моделювання. Прогнозується, що в найближчі 5–10 років розвиток алгоритмів SLAM та мініатюризація сенсорів дозволять досягти стабільної точності на рівні 1–2 см без необхідності використання густої мережі контрольних точок, що наблизить їх до показників стаціонарних сканерів.

Водночас, повного витіснення класичних інструментальних методів не відбудеться. Майбутнє інженерної геодезії полягає не в конкуренції між тахеометром і сканером, а в їх глибокому симбіозі, де роботизовані системи виконуватимуть масовий збір просторових даних, а інженер візьме на себе функцію метрологічного нагляду та високоточного контролю ключових вузлів. Це неминуче призведе до трансформації професії геодезиста: від фахівця з «польових вимірювань» до аналітика «великих даних», чия кваліфікація визначатиметься вмінням верифікувати результати роботи автоматизованих алгоритмів та інтегрувати їх у цифрові двійники будівель. Таким чином, впровадження SLAM-технологій є не просто питанням прискорення

робіт, а необхідною умовою для переходу будівельної галузі на новий рівень цифровізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
2. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність: Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV (зі змінами та доповненнями). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14>
3. Про затвердження Мінімальних вимог з охорони праці на тимчасових або мобільних будівельних майданчиках: Наказ Міністерства соціальної політики України від 23.06.2017 № 1050. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1111-17>
4. Геодезичні роботи у будівництві: ДБН В.1.3-2:2010. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 174 с. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199637436816688486
5. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування: ДСТУ ISO 45001:2019. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=88004
6. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2015. Vol. 81, No. 3. P. 1–26. URL: https://www.asprs.org/a/society/committees/standards/Positional_Accuracy_Standard_s.pdf
7. Standard Test Method for Evaluating the Performance of Spherical Coordinate 3D Imaging Systems in the Medium Range: ASTM E3125-17. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. URL: <https://www.astm.org/e3125-17.html>
8. Географічна інформація. Якість даних: ДСТУ ISO 19157:2015 (ISO 19157:2013, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63346
9. Оптика та оптичні прилади. Польові процедури випробування геодезичних та топографічних приладів. Частина 9. Наземні лазерні сканери:

- ДСТУ ISO 17123-9:2023 (ISO 17123-9:2018, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2024.
URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=106338
10. Шульц Р.В. Основи обробки даних лазерного сканування: навч. посіб. Київ: КНУБА, 2015.
11. Vosselman G., Maas H.-G. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing, 2010. 318 p.
12. Пронін О. С., Третьяк Р. А. Розробка методики оцінки реальної точності наземного лазерного сканування для проєктів BIM/цифрових двійників. Інноваційні технології у плануванні територій: мат-ли VI Міжнар. наук.-практ. конф. (Одеса, 26 листоп. 2025 р.). Одеса: ОДАБА, 2025. С. 144–146.
13. Романишин І., Маліцький А., Лозинський В. Класифікація та основні характеристики наземних 3D-сканерів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2012. Вип. II (24). С. 69–73. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/87c466b8-7a90-42cd-9041-bd5c810dfd07/content>
14. Четверіков Б.В., Бабур М.О. Дослідження точності побудови 3D-моделей за допомогою технології SLAM. Містобудування та територіальне планування. 2023. Вип. 82. URL: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2023/202382.pdf>
15. Шульц Р.В., Білоус М.В. Оцінка точності побудови 3D-моделей об'єктів нерухомості за даними лазерного сканування. Інженерна геодезія. 2019. Вип. 67. URL: <http://eng-geodesy.org/index.php/geodesy/article/view/102>
16. Cadena C. et al. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping IEEE Transactions on Robotics. 2016. Vol. 32, No. 6. P. 1309–1332. URL: <https://arxiv.org/abs/1606.05828>
17. Chiabrando F. et al. Handheld Mobile Mapping Systems for Cultural Heritage Recording: The Case Study of the Sacra di San Michele. Remote Sensing. 2021. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/13/2542>

18. Di Filippo A. et al. SLAM-Based Mobile Mapping Systems for Architectural Survey: Accuracy Assessment and Comparative Analysis with TLS. *Remote Sensing*. 2024. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/2/356>
19. Glira P., Pfeifer N. Assessment of SLAM algorithms for indoor mobile mapping. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B2-2020/559/2020/>
20. Huber D. et al. The ASTM E57 File Format for 3D Imaging Data Data Exchange. *The Magazine of the Society for Imaging Science and Technology*. 2011. URL: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2011/1/2011-huber-e57-v3.pdf
21. Karam S. et al. Comparative Analysis of SLAM-Based Mobile Mapping Systems for Indoor Environments. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(4). P. 1–22. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/4/1024>
22. Lehtola V. et al. Comparison of the Selected State-of-the-Art Simultaneous Localization and Mapping Algorithms for Indoor Mobile Robot Navigation. *Sensors*. 2022. Vol. 17. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/16/6191>
23. Maboudi M. et al. SLAM-based indoor mobile mapping systems: a review. *The Photogrammetric Record*. 2023. Vol. 38(182). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/phor.12461>
24. Mur-Artal R., Tardós J. D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017. Vol. 33(5). URL: <https://arxiv.org/abs/1610.06475>
25. Nocerino E. et al. Accuracy of Typical Low-Cost Handheld 3D Scanners for Cultural Heritage Documentation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W5/515/2017/>
26. Puente I., González-Jorge H. Mobile mapping systems for the geometric inspection of road tunnels. *Measurement*. 2018. Vol. 127. P. 221–227. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026322411830508X>

27. Zhang J., Singh S. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time. Robotics: Science and Systems. 2014. URL: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2014/7/Ji_LidarMapping_RSS2014_v8.pdf
28. Zlot R., Bosse M. Efficient Large-scale Three-dimensional Mobile Mapping for Underground Mines. Journal of Field Robotics. 2014. Vol. 31(5). P. 758–779. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21504>
29. CHCNAV CoPre Software Reference Guide. Shanghai: CHC Navigation Technology Ltd. URL: <https://chcnave.com/support/software-download>
30. CloudCompare (version 2.13) [User Manual]. URL: <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/>
31. RS10 Handheld SLAM LiDAR Scanner: User Manual. Shanghai: CHC Navigation Technology Ltd, 2024. URL: <https://chcnave.com/product-detail/rs10-handheld-slam-lidar>
32. LiGrip O2 Lite User Guide. Berkeley: Green Valley International Inc., 2023. URL: https://www.greenvalleyintl.com/LiGrip_O2
33. Series CX Electronic Total Station: Operator's Manual. Tokyo: Sokkia Co., Ltd. URL: https://us.sokkia.com/sites/default/files/sc_files/downloads/cx_series_e.pdf
34. Everything You Need to Know about Scan-to-BIM. GIM International. URL: https://www.gim-international.com/articles/case-studies?case_studies_archive-page=8
35. What Is SLAM? MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/discovery/slam.html>