

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет Геоінформаційних систем управління територіями

Кафедра Інженерної геодезії

Освітній рівень: «магістр за ОПП/ОНП»

Спеціальність: 193 геодезія та землеустрій

Спеціалізація: Інженерна геодезія

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Декан факультету

Нестеренко О. В.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_  
року

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

Кравчук Артур Ігорович

1. Тема роботи «Методика та технологія наземного сканування об'єктів спортивної інфраструктури» затверджена наказом ректора КНУБА № \_\_\_\_\_ від “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року.

2. Керівник роботи: Дем'яненко Роман Анатолійович

1. Строк подання студентом роботи до захисту:

2. Зміст пояснювальної записки за розділами:

**Вступ**

**Розділ 1. Архітектурно-будівельні характеристики об'єкту**

1.1. Місце розташування будівлі. Її призначення.

1.2. Архітектурно-будівельні характеристики будівлі.

**Розділ 2. Технології лазерного наземного сканування**

2.1. Створення геодезичної мережі для лазерного сканування

2.2. Загальні принципи наземного сканування

- 2.3. Методика виконання лазерного сканування
- 2.4. Аналіз роботи наземних сканерів.

### **Розділ 3. Технології Slam сканування**

- 3.1. Загальні принципи Slam сканування
- 3.2. Аналіз роботи Slam сканерів
- 3.3. Сфера застосування Slam сканування

### **Розділ 4. Оброблення даних знімання**

- 4.1. Процес обробки даних стаціонарного сканера
- 4.2. Процес обробки даних Slam сканера

### **Розділ 5. Дослідження точності вимірних результатів**

- 5.1. Порівняльна результатів лазерного сканування
- 5.2 Переваги та недоліки

### **Висновки**

### **Список використаної літератури**

- 3. Графічний матеріал за розділами:

- P. 1. \_\_\_\_\_
- P. 2. \_\_\_\_\_
- P. 3. \_\_\_\_\_
- P. 4. \_\_\_\_\_
- P. 5. \_\_\_\_\_

- 4. Календарний план виконання роботи: а) наукова частина;  
б) практична частина.

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1.	
Розділ 2.	
Розділ 3.	
Розділ 4.	
Розділ 5.	
Остаточне оформлення роботи	

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	
Попередній захист роботи на кафедрі	

5. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			
Розділ 4.			
Розділ 5.			

6. Дата видачі завдання:

\_\_\_\_\_

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_

Дем'яненко Р. А.

Керівник

\_\_\_\_\_

Дем'яненко Р. А.

Студент

\_\_\_\_\_

Кравчук А.І

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**ФАКУЛЬТЕТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ  
ТЕРИТОРІЯМИ**

**Кафедра Інженерної геодезії**

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

на тему:

Методика та технологія наземного сканування об'єктів спортивної  
інфраструктури

Кравчук Артур Ігорович

Київ 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**ФАКУЛЬТЕТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ  
ТЕРИТОРІЯМИ**

**Кафедра Інженерної геодезії**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_  
року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему

Методика та технологія наземного сканування об'єктів спортивної  
інфраструктури

Виконав студент групи ГДм-23  
спеціальність 193 Геодезія та Землеустрій  
спеціалізація Інженерна геодезія

Кравчук А.І.

Керівник: Дем'яненко Р.А.

Доцент, кандидат технічних наук,

\_\_\_\_\_  
*Ідентичність підтверджую*

Київ 2024 р.

<b>РЕЗЮМЕ</b> (summary)		<b>Кравчук Артур Ігорович</b>	
до атестаційної випускної роботи студента:			
Назва ВНЗ	Київський національний університет будівництва і архітектури		
Тема	Методика та технологія наземного сканування об'єктів спортивної інфраструктури		
Освітній ступень	Магістр за освітньо-професійною програмою навчання		
Факультет	Геоінформаційних систем та управління територіями		
Кафедра	Інженерної геодезії		
Спеціальність	193 Геодезія та землеустрій		
Спеціалізація	Геодезія		
Керівник	к.т.н. доцент Дем'яненко Р.А.		
Обсяг роботи:	пояснювальна записка, стор.	розділів	креслень формату А1
	78	5	0
Розділ 1	<i>Розкриває основні параметри будівлі, включаючи планувальні рішення, конструктивні особливості та використані матеріали. У ньому також оцінюється відповідність об'єкта сучасним будівельним нормам і вимогам функціональності.</i>		
Розділ 2	<i>Принципи роботи, обладнання та методи збору тривимірних даних за допомогою лазерних сканерів. Також розглядаються переваги, точність і практичне застосування цієї технології у будівництві, архітектурі та геодезії.</i>		
Розділ 3	<i>Описує методи одночасного локалізації та картографування, що використовуються для створення тривимірних моделей середовища в реальному часі. Особливу увагу приділено принципам роботи, застосуванню портативних сканерів і перевагам цієї технології для мобільного збору даних.</i>		
Розділ 4	<i>Присвячений методам обробки отриманих геодезичних даних для створення точних планів, моделей. У ньому розглядаються етапи опрацювання, програмне забезпечення та підходи для забезпечення високої точності результатів.</i>		
Розділ 5	<i>Аналіз похибок, що виникають під час проведення вимірювань, та оцінює їх вплив на кінцеві дані. У ньому розглядаються методи перевірки точності, способи її підвищення та відповідність результатів нормативним вимогам</i>		
Висновки по роботі:	<i>Стационарне лазерне сканування в тричі точніше за Slam технологію</i>		

**Ключові слова:** Лазерне сканування, топографія, фотограмметрія, 3D моделювання, хмара точок, Slam.

**Keywords:** Laser scanning, topography, photogrammetry, 3D modeling, point cloud, Slam.

Укладач: Кравчук А.І.

Керівник: Дем'яненко Р.А.

GISUT KNUCA 2024

## Зміст

<b>Вступ</b> .....	9
<b>Розділ 1. Архітектурно-будівельні характеристики об'єкту</b> .....	11
1.1. Місце розташування будівлі. Її призначення .....	11
1.2. Архітектурно-будівельні характеристики будівлі .....	14
<b>Розділ 2. Технології лазерного наземного сканування</b> .....	16
2.1. Створення геодезичної мережі для лазерного сканування .....	16
2.2. Загальні принципи наземного сканування .....	26
2.3. Методика виконання лазерного сканування .....	29
2.4. Аналіз роботи наземних сканерів .....	37
<b>Розділ 3. Технології Slam сканування</b> .....	39
3.1. Загальні принципи Slam сканування .....	39
3.2. Аналіз роботи Slam сканерів .....	42
3.3. Сфера застосування Slam сканування .....	44
<b>Розділ 4. Оброблення даних знімання</b> .....	47
4.1. Процес обробки даних стаціонарного сканера .....	47
4.2. Процес обробки даних Slam сканера .....	62
<b>Розділ 5. Дослідження точності вимірних результатів</b> .....	69
5.1. Порівняльна результатів лазерного сканування .....	69
5.2 Переваги та недоліки .....	76
<b>Висновки</b> .....	77
<b>Список використаної літератури</b> .....	78

## Вступ

Сучасний розвиток інженерної геодезії значно впливає на процеси створення та модернізації інфраструктурних об'єктів, зокрема спортивних споруд. Технології лазерного сканування набула широкого поширення завдяки своїй здатності забезпечувати високу точність, швидкість та деталізацію при зборі геометричних даних. Застосування цих технологій відкриває нові перспективи у сфері обстеження та проєктування спортивних об'єктів, що є особливо актуальним у контексті зростаючих вимог до якості й ефективності таких робіт.

Спортивні споруди вирізняються складною геометрією, великими масштабами та вимогою до високої точності моделювання. Лазерне сканування забезпечує можливість отримання детальних тривимірних моделей об'єктів, які можна використовувати для аналізу, реконструкції, ремонту або створення нових проєктів. Ця технологія дозволяє фіксувати навіть найдрібніші елементи конструкцій, забезпечуючи точне відтворення реального стану споруд.

Водночас відсутність чітких нормативно-правових вимог і рекомендацій щодо застосування лазерного сканування у спортивній інфраструктурі ставить перед геодезистами низку питань, пов'язаних із вибором методик та технологій для забезпечення необхідної точності і відповідності результатів.

Метою цієї дипломної роботи є дослідження технології та методики лазерного сканування, оцінка її ефективності для потреб спортивної інфраструктури, а також розробка рекомендацій щодо оптимального використання цієї технології у практичній діяльності. Завданнями роботи є аналіз існуючих технічних засобів і програмного забезпечення, порівняння методів обробки отриманих даних та їх інтеграції у процеси обстеження і проєктування спортивних споруд.

Результати цього дослідження сприятимуть подальшому вдосконаленню геодезичних технологій, оптимізації процесів роботи з об'єктами спортивної інфраструктури та підвищенню ефективності використання сучасних методів лазерного сканування у геодезії.

GISUT KNUCA 2024

## Розділ 1. Архітектурно-будівельні характеристики об'єкту

### 1.1 Місце розташування комплексу. Його призначення.

Будівельний майданчик розташований у середмісті Києва на вул. Освіти 3, Солом'янського району.



Рис. 1 Розташування будівельного майданчику на карті Google

Ця будівля належить до категорії «спортивний комплекс». Вона сучасна, з прилеглою територією, підземним і наземним паркінгом, забезпечуючи зручний доступ для відвідувачів і персоналу.

Для будівництва використано інноваційні технології та якісні матеріали, що відповідають сучасним вимогам енергоефективності, екологічності та міжнародним стандартам. Архітектура поєднує функціональність і привабливий дизайн, підкреслюючи статус комплексу.

Раціональне зонування враховує потреби користувачів і оптимізує простір для занять спортом і змагань. Проект передбачає ергономіку та безпеку, роблячи комплекс зручним для людей різного віку. Планування базується на генеральному плані, який гармонійно організовує простір і визначає розташування ключових зон і сервісів.

GISUT  
KNUCA  
2024

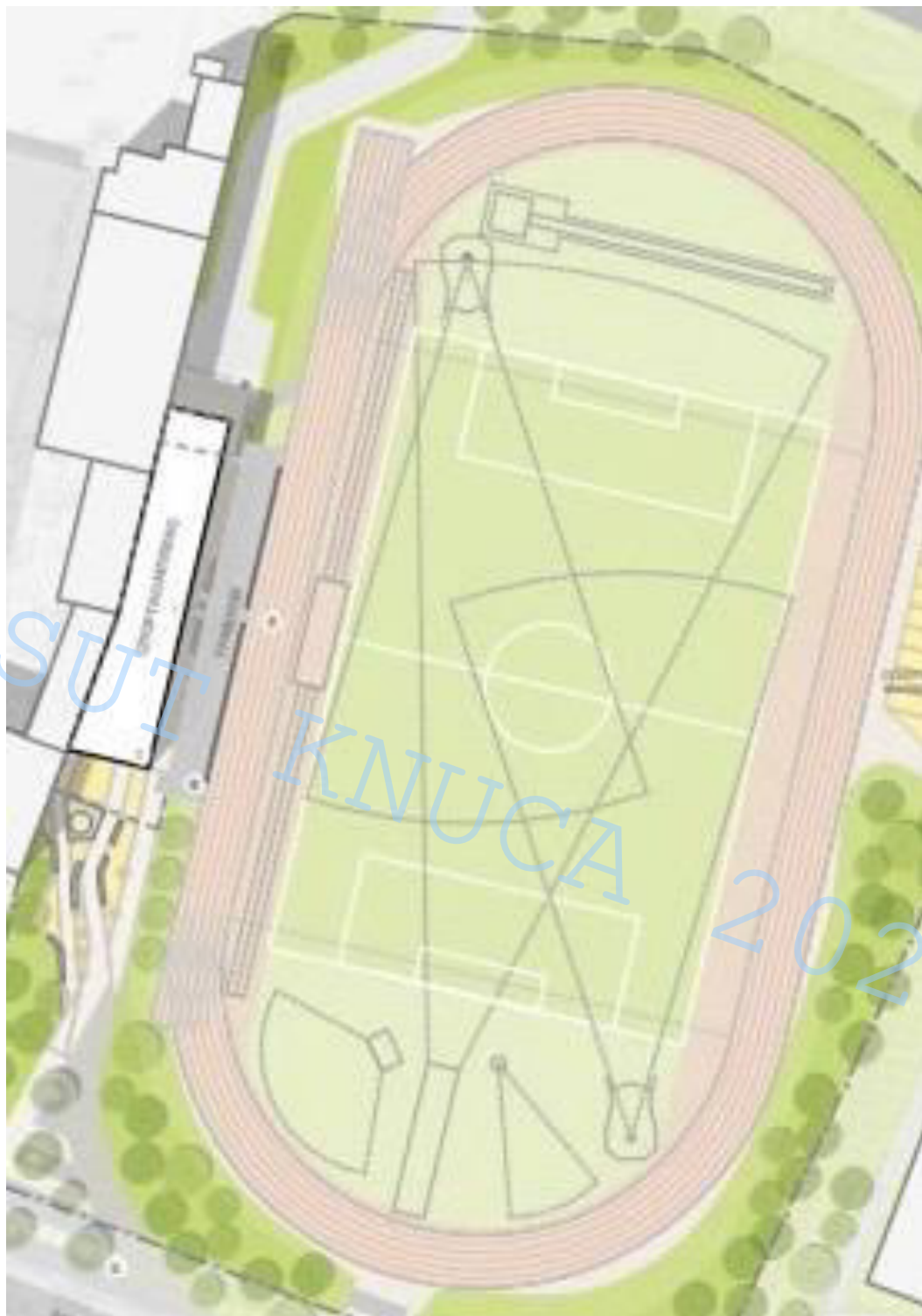


Рис. 2 Фрагмент генерального плану будівництва

## 1.2. Архітектурно-будівельні характеристики будівлі.

Комплекс складається з однієї будів:



Рис.3 Архітектурний вигляд будинку

Табл 1

Будівля	Кількість поверхів	Довжина, м	Ширина, м	Висота надземної частини, м
1	2	70,230	24,400	10,600

Загальна площа забудови — 1712,88 м<sup>2</sup>.

Монолітно-каркасна технологія будівництва формує основний каркас будівлі із залізобетонних елементів, таких як колони, балки та плити перекриття. Така структура є основою для забезпечення міцності, стійкості та здатності витримувати великі навантаження. Коли каркас готовий, простір між окремими секціями заповнюється легкими будівельними матеріалами з відмінними тепло- і звукоізоляційними властивостями, такими як газоблоки, пінобетон і сучасні сендвіч-панелі..

Метод монолітно-каркасного будівництва характеризується рядом значущих переваг:

- Зменшення навантаження на основу
- Легкі заповнювальні матеріали, такі як газоблоки чи сендвіч-панелі, мають значно меншу вагу порівняно з традиційними цегляними або бетонними стінами. Це сприяє зниженню загального тиску на основу споруди, дозволяючи використовувати полегшені типи фундаменту.

Як наслідок, зменшуються обсяги земляних робіт та споживання бетону, що є важливим фактором при будівництві на нестабільних ґрунтах.

- Прискорення будівельного процесу та економія ресурсів  
Завдяки монолітно-каркасній технології будівництво значно прискорюється. Несучі елементи каркасу забезпечують поетапне зведення поверхів, а процес заповнення простору між ними можна здійснювати паралельно. Це зменшує витрати на додаткові обробні роботи і мінімізує кількість матеріалів, що використовуються.
- Гнучкість у дизайні та плануванні  
Каркасна система відкриває широкі можливості для архітектурних і дизайнерських рішень. Вона дозволяє змінювати внутрішнє планування без впливу на основну конструкцію, що забезпечує простоту адаптації простору відповідно до нових потреб чи вимог.
- Підвищення енергоефективності та збереження тепла  
Заповнювальні матеріали мають чудові теплоізоляційні характеристики, що знижує тепловтрати будівлі. Це сприяє створенню комфортного мікроклімату та зменшує витрати на опалення, підвищуючи загальну енергоефективність споруди.

Таким чином, монолітно-каркасна технологія є оптимальним поєднанням міцності, довговічності та функціональності. Використання сучасних легких матеріалів не лише знижує навантаження на фундамент, але й забезпечує економічність, зручність і високу архітектурну варіативність.

## Розділ 2. Технології лазерного наземного сканування

### 2.1. Створення геодезичної мережі для лазерного сканування

Відповідно до ДБН В.1.3-2:2010 "Геодезичні роботи у будівництві", точність геодезичних вимірювань повинна дотримуватись встановлених норм. Згідно з цими вимогами, максимальна похибка у визначенні координат та висот точок не може перевищувати 6 мм на відстані 50 метрів. Для оцінки відповідності робіт цим нормам проведемо аналіз точності виконання геодезичних вимірювань.

Оскільки виміряти всі елементи об'єкта з однієї точки неможливо, процес сканування виконуватиметься з декількох станцій. Для встановлення точного взаємного положення цих точок спостереження буде створено опорну геодезичну мережу, розташовану навколо об'єкта.

Точність опорної геодезичної мережі оцінюватиметься шляхом розрахунків. Відповідно до принципу мінімізації впливу, середня квадратична похибка побудови такої мережі має бути щонайменше втричі меншою за допустиму похибку геодезичних вимірювань.

Отже,

$$m_0 = \frac{m_r}{3},$$

де  $m_0$  – середня квадратична похибка створення опорної геодезичної мережі;

$m_r$  – середня квадратична похибка виконання вимірювань.

Якщо  $m_r = 6$  мм, відповідно  $m_0 = 2$  мм. Це означає, що положення станцій одна від одної маємо визначати з точністю 2 мм.

Як вже згадувалося, взаємне розташування станцій необхідно визначити з точністю до 2 мм. З цією метою була розроблена опорна геодезична мережа у вигляді геодезичного прямокутника. Для побудови цієї мережі виконувались вимірювання за допомогою тахеометра, який має точність

визначення відстаней  $1 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$  і кутову точність  $2''$ .

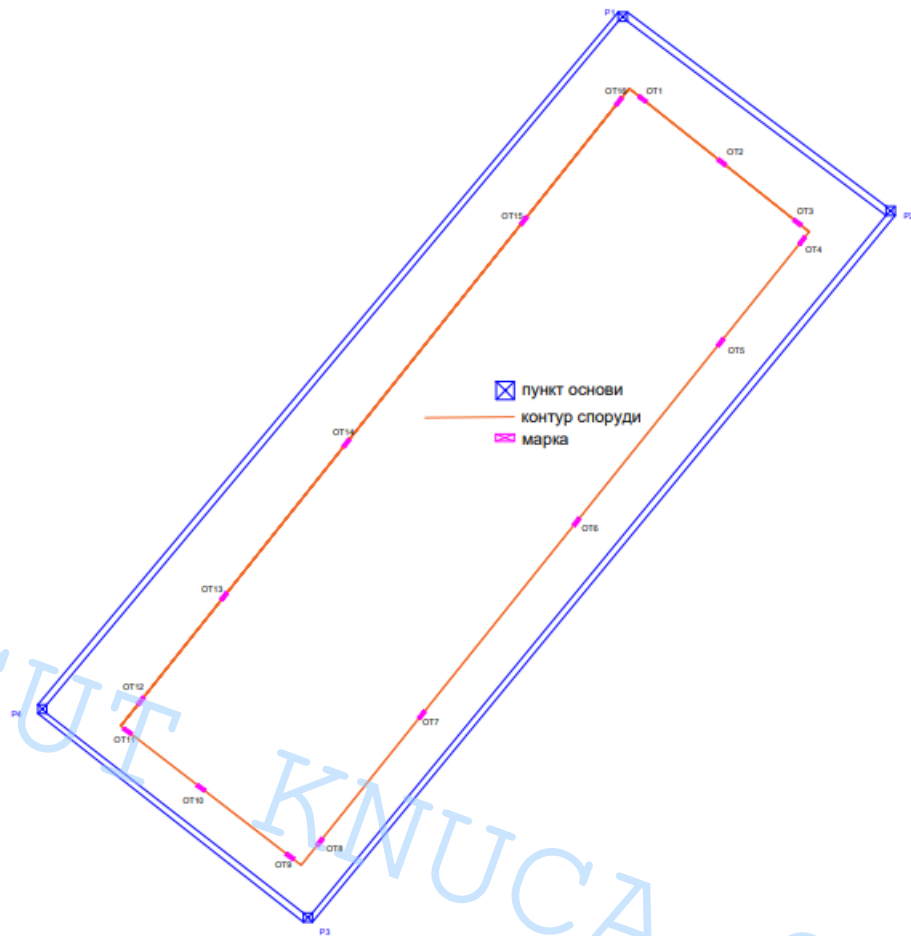


Рис.4 Схема розташування пунктів основи

Мережа складається з чотирьох контрольних точок, розташованих таким чином, щоб мінімізувати виникнення великих кутів між еталонною мішенню і центром приладу під час вимірювання.

Точність спроектованої сітки була перевірена за допомогою програмного забезпечення Leica Infinity.

Аналіз показав, що середньоквадратична похибка (СКП) сітки становить менше 2 мм, що повністю відповідає заданим критеріям і вимогам.

## Відомість оцінки точності положення пунктів за результатами зрівнювання

M min	Пункт	M max	Пункт	M середня
0,0008	P1	0,0016	P4	0,0012

Пункт	M	Mx	My	a	b	$\alpha$
1	2	3	4	5	6	7
P2	0,0009	0,0005	0,0008	0,0008	0,0005	128°08'45,7"
P3	0,0015	0,0012	0,0009	0,0014	0,0003	196°32'00,1"
P4	0,0016	0,0015	0,0005	0,0016	0,0003	264°13'34,5"

Рис.5. Оцінка точності положення пунктів мережі за результатами вирівнювання

Для того, щоб забезпечити правильну орієнтацію сканера в кожній точці і перехід в систему координат опорної геодезичної мережі, було прийнято рішення нанести розмітку по всьому периметру будівлі. Розмітка рівномірно розподілена таким чином, щоб було видно щонайменше три розмітки точки до і після кожної точки, де знаходиться сканер.

Такий спосіб підвищує точність і надійність орієнтації сканера. Розташування цих маркерів показано на малюнку

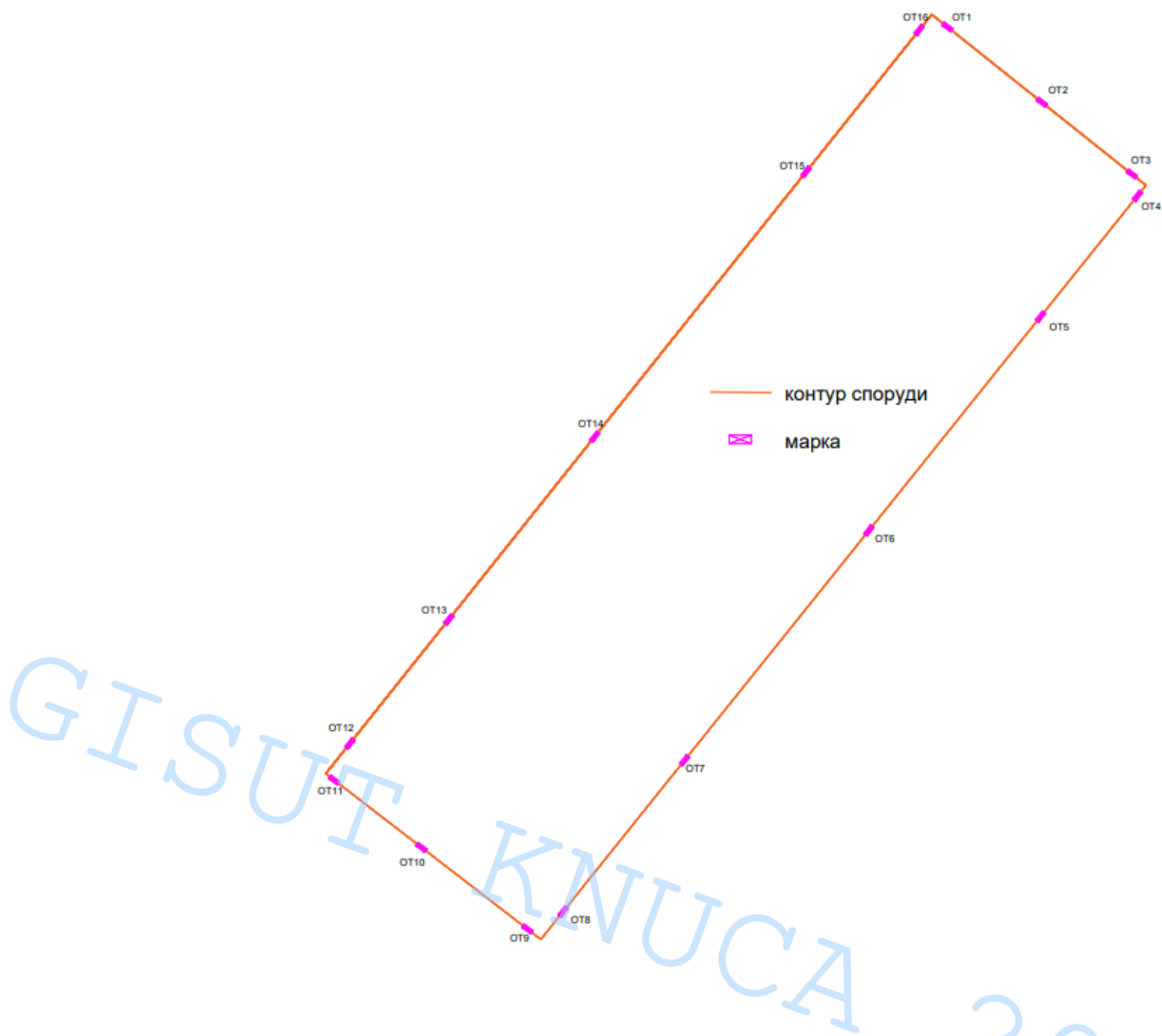


Рис. 6 Схема розташування марок

Координати були перенесені з пунктів опорної геодезичної мережі на етикетки за допомогою методу полярних координат. Для цього використовувався тахеометр з точністю вимірювання відстані  $1 \text{ мм} + 1$  проміле та кутовою точністю  $2''$ .

Точність позиціонування міток за допомогою методу полярних координат

$$\text{визначалася за формулою: } m_M^2 = m_S^2 + \frac{m_B^2}{\rho^2} \cdot S^2,$$

де  $m_S^2$  – це СКП відкладення відстані;  $m_B^2$  – СКП побудови кута;  $S$  – найдовша сторона.

$$\text{Отже, } m_M = \sqrt{1^2 + \frac{2^2}{206265^2} \cdot 35000^2} = 1 \text{ мм;}$$

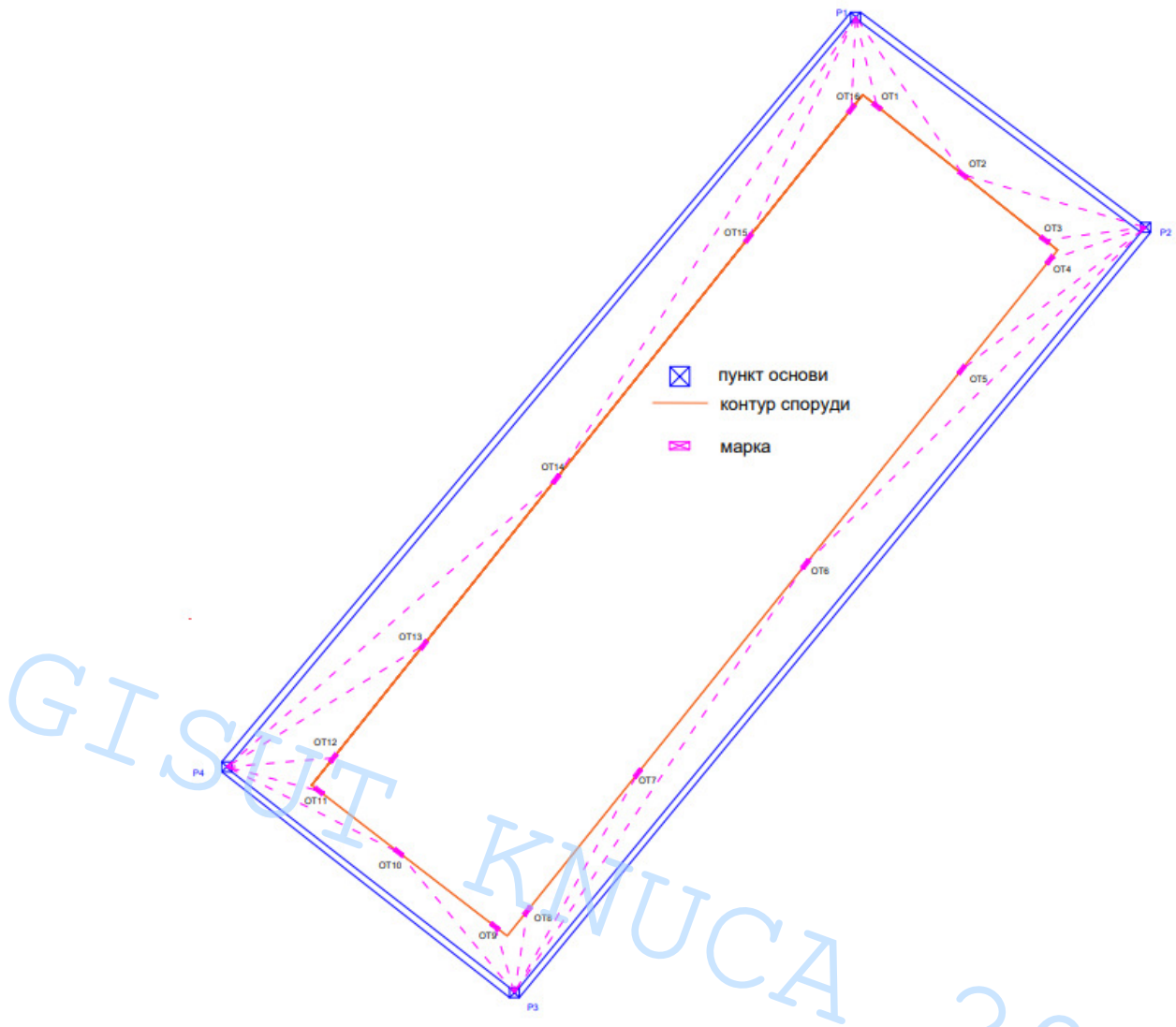


Рис.7 Схема координування марок з пунктів основи

Наступним кроком є визначення положення станції сканера за допомогою попередньо скоординованих орієнтирів у системі координат референційної мережі. Цей процес також базується на полярній системі координат. Тому точність визначення положення НЛС можна розрахувати

$$\text{за наступним рівнянням: } m_{LP}^2 = m_S^2 + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot S^2,$$

де  $m_S^2$  – це СКП відкладення відстані;  $m_\beta^2$  – СКП побудови кута;  $S$  – найдовша сторона.

$$\text{Таким чином, } m_{LP} = \sqrt{2^2 + \frac{15^2}{206265^2} \cdot 35000^2} = 2,2 \text{ мм;}$$

Останнім важливим кроком є розрахунок сумарної похибки, яка враховує похибку визначення координат опорної точки, похибку перенесення координат з опорної точки мережі на марку та похибку визначення координат станції на основі опорної цілі. Формула розрахунку виглядає наступним чином:

$$m_3^2 = m_P^2 + m_M^2 + m_{LP}^2,$$

де  $m_P^2$  – це похибка визначення координат пунктів основи;  $m_M^2$  – похибку визначення координат марок;  $m_{LP}^2$  – похибка визначення координат станцій НЛС.

Таким чином,  $m_3 = \sqrt{1,6^2 + 1^2 + 2,2^2} = 2,9$  мм;

Як висновок, можна зазначити, що необхідної точності вимірювань досягнуто.

GTSUT  
КНУСА  
2024

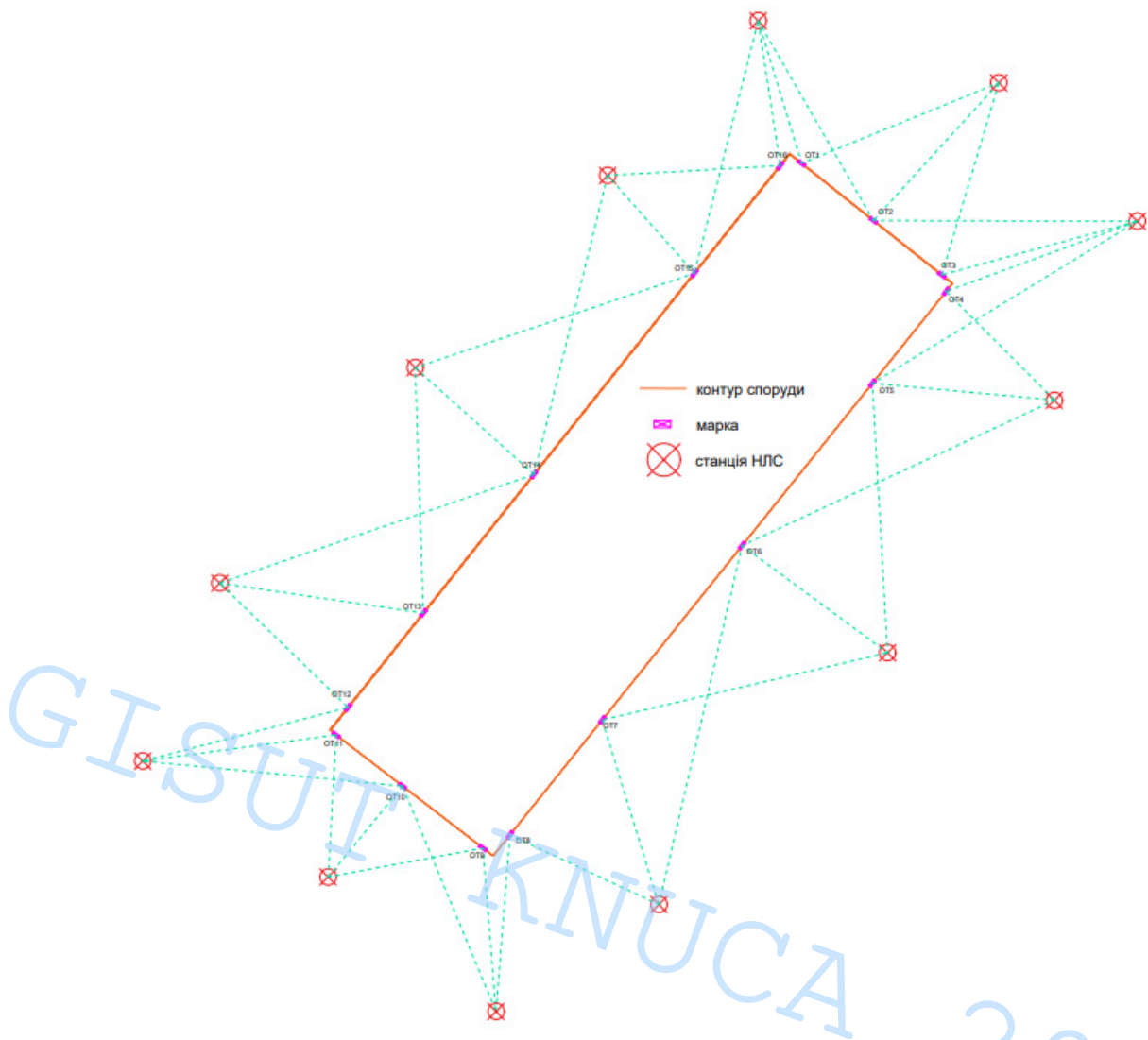


Рис.8 Схема розміщення станцій НЛС та опорних цілей у вигляді марок

Сканування виконувалося з декількох станцій, розташованих таким чином, щоб з кожної сусідньої станції можна було спостерігати три опорні мішені. Координати передавалися через ці мішені, розташовані на фасаді будівлі. Нижче наведено аналіз точності визначення положення точок вимірювання.

Сканер повинен бути встановлений таким чином, щоб між сусідніми точками сканування покривалося щонайменше 30% поверхні об'єкта і щоб можна було виміряти ділянки, недоступні при сусідніх скануваннях. Ефективніше збільшити кількість знімків, які повністю відповідають усім вимогам, ніж зменшити кількість знімків, які не відповідають критеріям. У цьому випадку було використано 14 станцій днопоглиблення по периметру об'єкта, щоб виконати всі необхідні вимоги.

Процес сканування визначає параметри, які впливають на інтенсивність вимірювання та якість окремих точок. Сканування може виконуватися як в чорно-білому, так і в кольоровому режимах. При чорно-білому скануванні

відтінок сірого залежить від інтенсивності лазерного променя, відбитого від об'єкта. Час, необхідний для сканування, залежить від обраних налаштувань якості та інтенсивності зображення. У нашому випадку ми надали перевагу чорно-білому скануванню, оскільки воно, як правило, більш точне. Кольорове сканування може бути менш точним через різні колірні характеристики та відповідність хмари точок.

Контроль вимірювань є одним з найважливіших етапів при використанні лазерного сканера. Як і в звичайній геодезії, контроль необхідний як під час вимірювання, так і на етапі обробки даних:

**Під час вимірювання** контроль включає:

- перевірку виконаних сканів на місці;
- перевірку наявності всіх необхідних ділянок вимірювання;
- проведення альтернативних вимірів кількох геометричних характеристик об'єкта.

**На етапі обробки даних** контроль передбачає:

- перевірку координат однієї й тієї ж точки між різними сканами;
- замикання об'єкта між першим і останнім сканом по замкненому колу;
- аналіз основних геометричних вимірів, отриманих альтернативними методами, у порівнянні зі скануванням і 3D-моделлю (якщо вона доступна);
- перевірку рівності горизонтальних і вертикальних поверхонь.

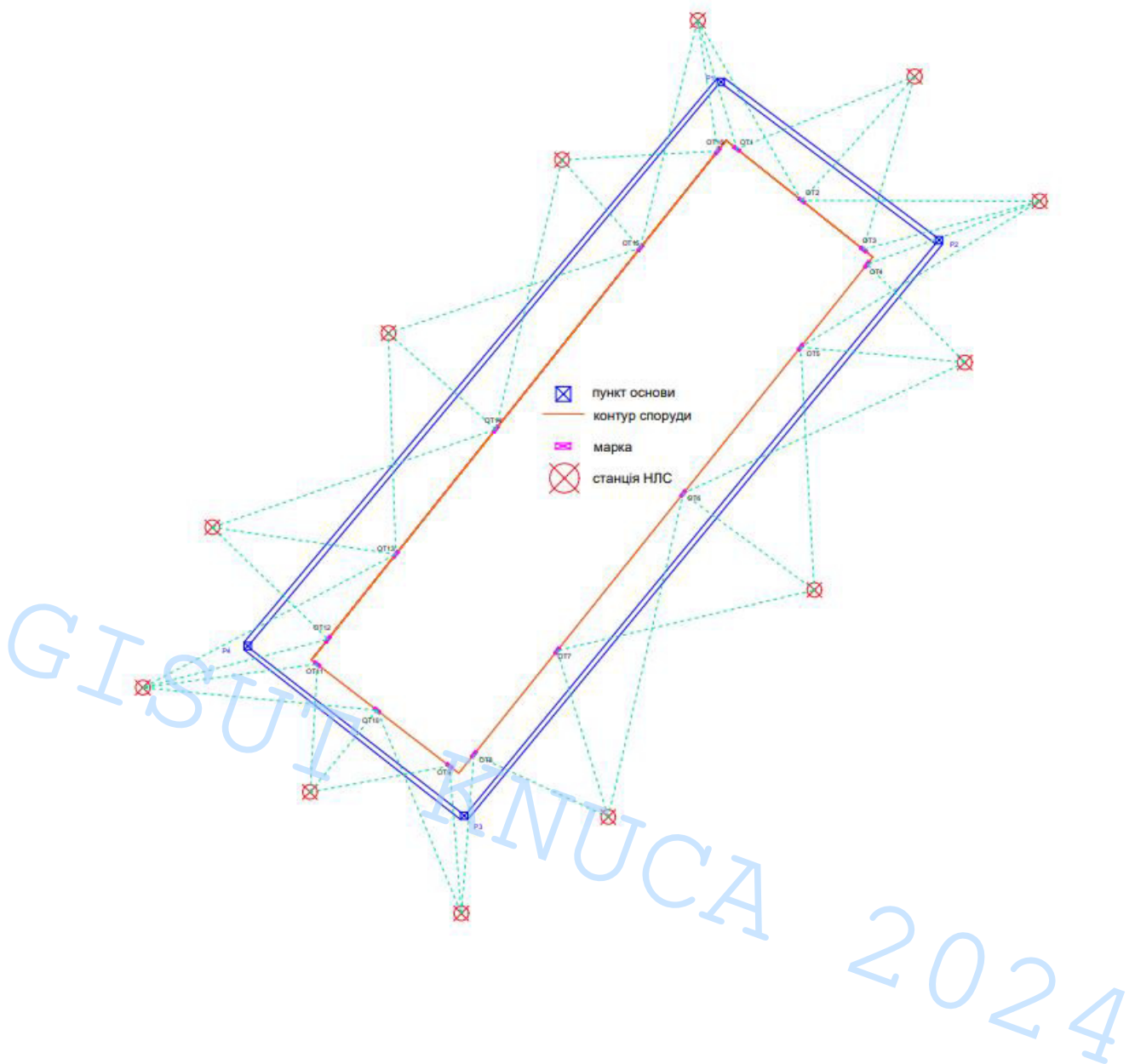


Рис. 9 Загальна схема виконання геодезичних робіт для лазерного сканування  
Переваги та основи розташування опорних цілей

У цьому випадку опорними цілями є спеціальні мітки, що закріплені по всьому периметру фасаду будівлі. До основних переваг цього підходу можна віднести наступні аспекти:

- Можливість застосування великої кількості опорних міток;
- Можливість ручного визначення координат центру цілей;
- Можливість застосування традиційних геодезичних методів для визначення координат цілі.

Основні правила розташування опорних міток під час процесу сканування:

- Мітки повинні бути встановлені в надійних і стійких місцях, які забезпечують довговічність їх розташування;
- Мітки слід розташовувати на відстані не більше 20-25 м від позиції сканера;
- Кількість точок вимірювання на кожній мітці повинна бути достатньою для забезпечення високої точності;
- Між сусідніми сканами повинно бути встановлено щонайменше три мітки;
- Використання міток, які будуть спостерігатися якомога більшою кількістю сканів.

Особливості лазерного сканування та вплив відстані на точність вимірів:

Лазерні сканери не вимірюють безпосередньо кут з ціллю, як у звичайній геодезії. Тому збільшення відстані між сканером і міткою не збільшує точність наведення на ціль. Лазерні сканери сканують цілі відповідно до заданого нахилу.

Збільшення відстані зменшує кількість точок на поверхні, що сканується, що негативно впливає на точність вимірювання відстані до мітки. Тому максимальне збільшення відстані призводить до зниження точності вимірювання координат.

Оптимальний діапазон відстаней для локалізації цілей за допомогою локалізованого лазерного сканування становить від 2 до 10 м. При цьому максимальна відстань між сканером і опорною міткою становить 18 м.

## **2.2. Загальні принципи наземного лазерного сканування**

Сучасні геодезичні інструменти та програмне забезпечення пропонують нові можливості для інноваційного землеустрою. Одним з найбільш перспективних і сучасних методів є лазерне сканування, яке дозволяє проводити високоточні 3D-вимірювання територій та об'єктів. Основне призначення цієї технології - створення детальних 3D-моделей територій, будівель та різноманітних об'єктів з урахуванням їх особливостей.

Лазерне сканування здійснюється за допомогою спеціального пристрою - лазерного сканера, який фіксує координати точок для отримання максимально повної інформації про об'єкт або місцевість. Сканер працює за принципом лазерного далекоміра, який вимірює відстань до заданої точки, а адміністративний процес здійснюється за допомогою портативного комп'ютера. Всі дані, отримані під час сканування, записуються в режимі реального часу, що дозволяє швидко отримати необхідну інформацію.

3D-сканування дозволяє визначити просторові координати об'єкта в трьох вимірах з високою точністю. Зібрані дані можна аналізувати та обробляти за допомогою спеціального графічного програмного забезпечення, що дозволяє проводити різноманітні аналізи та точну візуалізацію.

Технологія лазерного сканування особливо корисна, коли об'єкти розташовані у важкодоступних місцях, фізично важкодоступні або становлять загрозу безпеці. Цей метод широко використовується для створення моделей складних об'єктів, які потребують детального огляду, або для документування об'єктів різного призначення.

### **Галузі застосування лазерного сканування**

Лазерне сканування активно використовується в багатьох сферах, таких як:

- **Нафтогазова галузь та важка промисловість:** Сканування дозволяє вивчати родовища сировини, а також визначати місце розташування та стан трубопроводів.
- **Будівництво та реконструкція:** Лазерне сканування дозволяє проводити моніторинг будівельних робіт, коригувати проектну документацію та відстежувати зміни в конструкціях.
- **Транспортні інфраструктури:** Сканування використовується при будівництві доріг, щоб з'ясувати параметри місцевості, а також для обстежень під час ремонту.

Ця технологія дозволяє отримувати топографічні карти різних масштабів і створювати цифрові 3D-моделі територій, об'єктів і рельєфу. Основними перевагами цього методу є швидкість і висока ефективність отримання повних наборів даних.

#### **Складнощі застосування**

Хоча лазерне сканування є потужним інструментом, воно також має певні складнощі:

1. **Повітряне сканування:** Може займати додатковий час через необхідність отримання дозволів на зйомку з повітря.
2. **Високі витрати:** Придбання лазерних сканерів та необхідність залучення професіоналів, які працюють з цими інструментами, роблять метод недоступним для всебічного застосування.

#### **Типи лазерних сканерів**

Лазерні сканери можна класифікувати за двома основними категоріями:

##### **1. Імпульсні сканери:**

- Ці прилади вимірюють відстані на основі часу, за який лазерний імпульс повертається до сканера.

- Вони мають велику дальність дії і часто використовуються для дослідження великих територій або об'єктів.
- Однак, їхня точність може знижуватися на коротких відстанях, особливо при складному рельєфі чи нерівностях.

## 2. Фазові сканери:

- Цей тип сканерів використовує фазові зміни лазерного сигналу для вимірювання відстані.
- Фазові сканери забезпечують високу точність на коротких відстанях.
- Вони особливо ефективні при роботі зі складними поверхнями, архітектурними елементами, реставраційними завданнями та в археологічних дослідженнях.

### 2.3. Методика виконання лазерного сканування

Геодезична зйомка будівель і споруд може бути виконана різними методами, три з яких є найбільш поширеними: тахеометрична зйомка, лазерне сканування і фотограмметрія. У цьому розділі ці методи детально проаналізовано з урахуванням їхніх основних переваг та недоліків. Результати аналізу зведені в таблицю 1.

#### Тахеометрична зйомка

Тахеометрична зйомка є одним з традиційних методів вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів і відстаней до певних точок на вимірюваному об'єкті. Цей метод забезпечує отримання високоточних геометричних даних, але його ефективність залежить від професіоналізму оператора та зовнішніх факторів, таких як погода і рельєф місцевості.

#### Лазерне сканування

Лазерне сканування - це сучасний метод, здатний створювати високоточні 3D-моделі об'єктів шляхом аналізу великої кількості точок, отриманих за допомогою лазера. Основними перевагами цього методу є швидке отримання даних і висока деталізація складних геометричних форм. Однак основними недоліками є висока вартість спеціалізованого обладнання та навичок, необхідних для його правильного використання.

#### Фотограмметричні методи

Фотограмметричний метод - це метод визначення геометричних розмірів і координат об'єкта шляхом обробки фотографій. Цей метод має низку суттєвих переваг, таких як низька вартість обладнання, доступність і простота використання. Однак його основний недолік полягає в тому, що він менш точний, ніж інші методи.

Особливо в районах зі складним рельєфом або великими перепадами висот.

У наступній таблиці наведено порівняння переваг і недоліків різних методів для кращого розуміння їхніх можливостей і сфери застосування в геодезичних дослідженнях..

Таблиця 2.

Порівняння методів геодезичного знімання по декільком параметрам

Назва методу:	Точність	Швидкість роботи	Деталізація
Тахеометричний	Постійно висока	Повільно	Низька
Фотограмметричний	Низька	Дуже швидко	Висока
Лазерне сканування	Висока	Швидко	Висока

Електронні тахеометри залишаються одним із стандартних і найточніших методів геодезичної зйомки завдяки своїй універсальності. Хоча метод широко використовується в різних геодезичних дослідженнях, він може бути неефективним і трудомістким при вимірюванні структурних елементів через необхідність запису великої кількості точок на поверхні об'єкта. Інші проблеми включають складність вимірювання структурних елементів, проблеми з геодезичною основою та необхідність встановлення контурів.

Фотограмметричні методи також вважаються традиційними методами зйомки. Професійне фотограмметричне обладнання забезпечує високу точність, але швидкість зйомки залишається досить низькою. Сучасні технології підвищують швидкість і зручність, але часто супроводжуються зниженням точності. Основними недоліками цього методу є зашумленість отриманої хмари точок та її залежність від умов освітлення. Це ускладнює

вимірювання в умовах поганого освітлення, особливо при роботі зі складними фасадами і дрібними деталями на будівлях. Завдання в цьому випадку полягає в тому, щоб забезпечити максимальну надійність і точність.

Методи лазерного сканування є більш ефективними, поєднуючи в собі високу точність, швидкість і деталізацію отриманих даних. Однак рівень точності залежить від відстані до об'єкта. У більшості випадків, якщо відстань не перевищує 20 метрів, за допомогою цього методу можна отримати необхідні результати.

Для створення тривимірної моделі будівлі ми обрали метод наземного лазерного сканування (НЛС). Цей метод використовує лазерний сканер для вимірювання даних на високій швидкості (від тисячі до мільйона точок в секунду) і записує відповідні кути як по горизонталі, так і по вертикалі: НЛС вимірює об'єкт в цілому, а не тільки окремі точки НЛС досліджує об'єкт в цілому, а не тільки окремі точки. Цей метод надає тривимірну модель у вигляді хмари точок.

**Система наземного лазерного сканування (НЛС)** складається з кількох основних компонентів:

- **Лазерний далекомір**, що працює на високих частотах;
- **Блок розгортки лазерного променя**, який може бути оснащений сервомеханізмом, полігональним дзеркалом або призмами.

Сучасні НЛС включають у себе наступні функції:

- Вимірювання горизонтальних і вертикальних відстаней за допомогою ендокодерів;
- Використання обертового дзеркала для здійснення обертальних рухів;
- Примінення імпульсного методу для вимірювання відстані.

Різні моделі НЛС можуть працювати на основі різних геодезичних систем координат. Наприклад:

- **Сканери Leica** функціонують на основі геодезичних координат;
- **Сканери Faro** працюють з математичними координатними системами.

Тому наземне лазерне сканування (НЛС) є потужним інструментом, який надає швидку, точну і детальну інформацію при створенні 3D-моделей об'єктів, а також при виборі геодезичної системи координат для конкретних завдань..

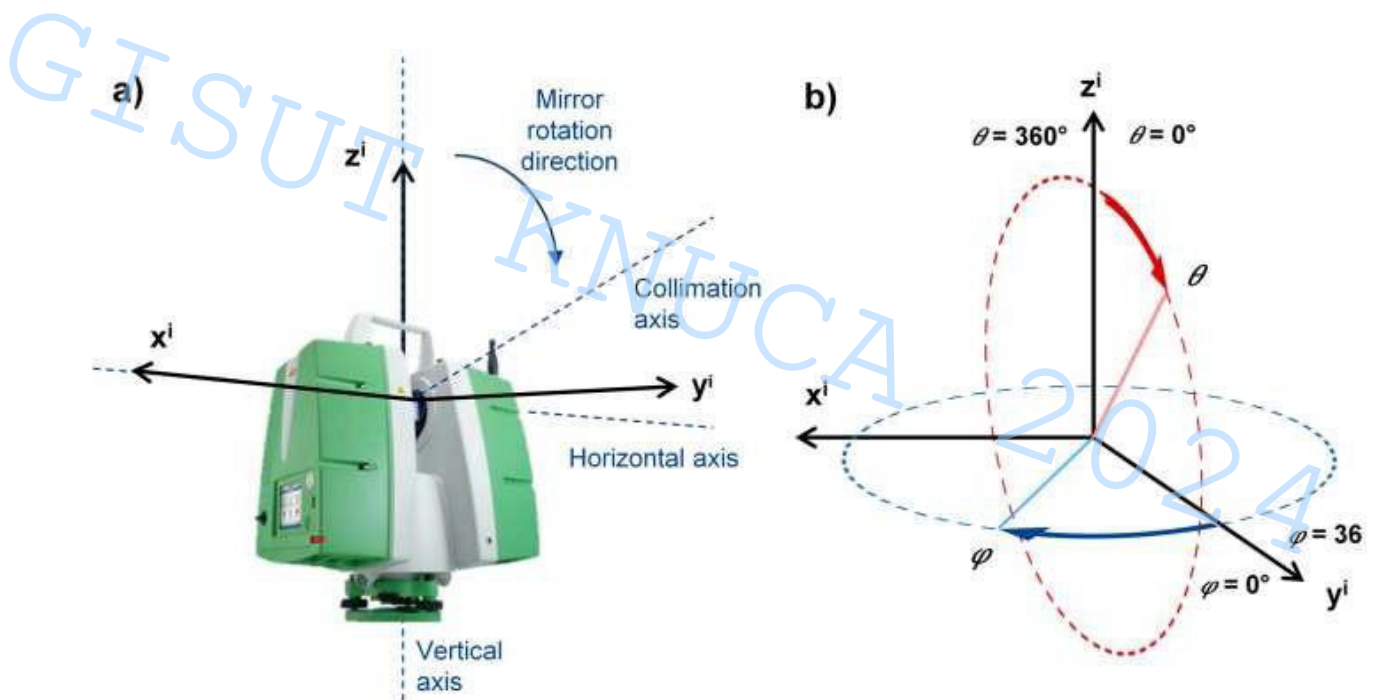


Рис.11. а) Локальна декартова система координат сканера відносно головних осей приладу; б) Локальна система координат сканера, перетворена у полярні координати.

Найпопулярнішими виробниками наземних лазерних сканерів в Україні є Leica, Faro та Trimble. Наземне лазерне сканування - це сучасна технологія, що швидко розвивається і активно

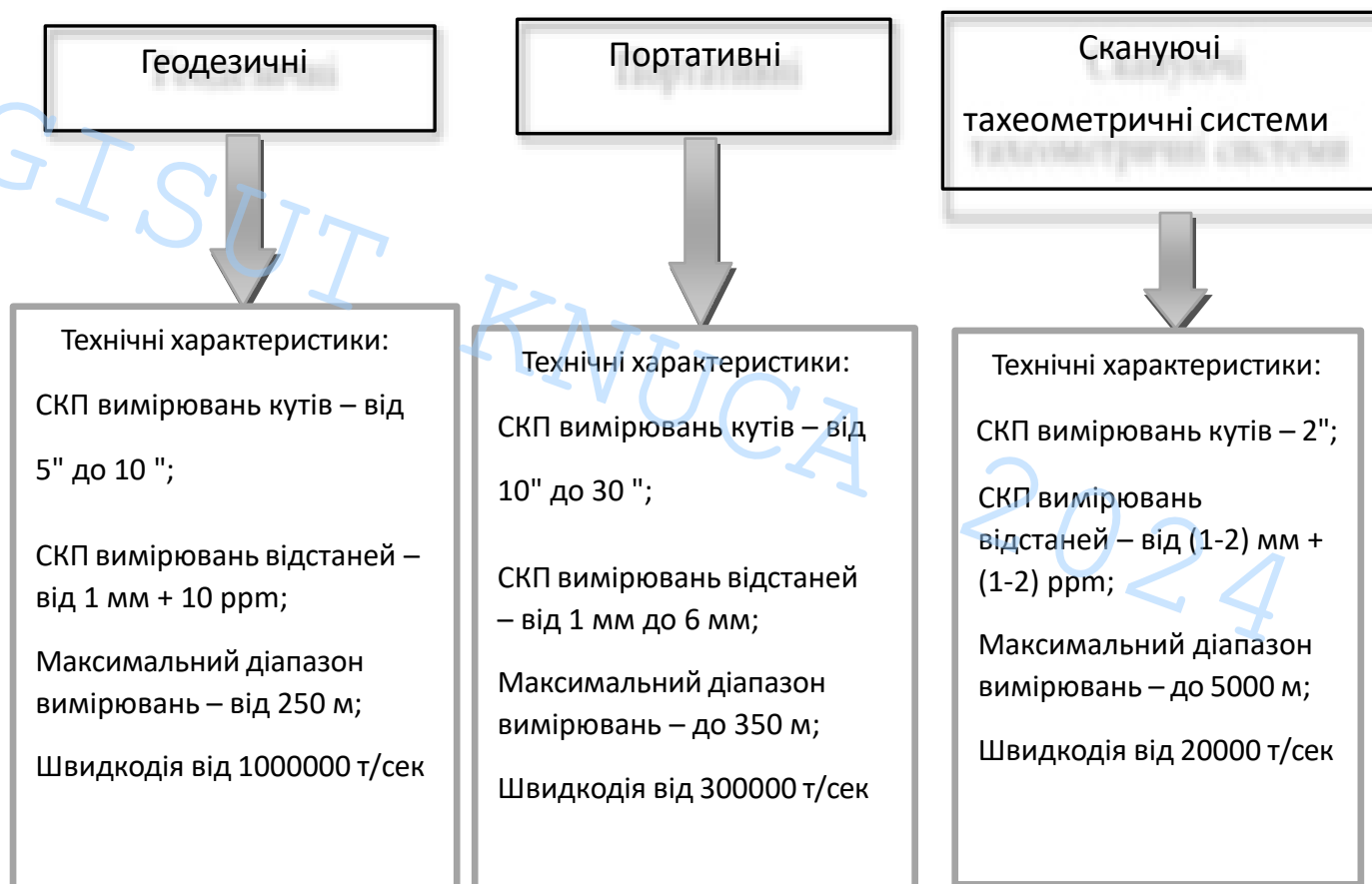
використовується в сфері геодезичної зйомки.

Виробники геодезичного обладнання пропонують широкий спектр технічних рішень і можуть випускати сканери з різними характеристиками і параметрами точності.

Виходячи з цього, було проведено детальний аналіз існуючих моделей геодезичних лазерних сканерів.

Таблиця 3

Таблиця 3



Типи наземних лазерних сканерів

Найпопулярнішими представниками першої категорії вважаються наземні лазерні сканери серії R від компанії *Leica Geosystems*. Ці сканери

зазвичай мають вагу від 15 до 20 кг і найчастіше застосовуються для створення 3D-моделей фасадів будівель.

Сканер характеризується високою точністю і широким діапазоном вимірювання, що робить його особливо корисним для роботи на великих відкритих територіях. Він також ідеально підходить для сканування великих промислових підприємств і лінійних інфраструктурних об'єктів.



Рис. 12. Геодезичні НЛС: Trimble TX8 і Leica P40

До другої групи наземних лазерних сканерів (НЛС) можна віднести переважно моделі від компанії *FARO*, а також сканери *Leica RTC360*, *BLK360* і *Trimble TX5*. Ці сканери характеризуються невеликою вагою (приблизно 5 кг) та компактними габаритами.

Проте через обмежений діапазон вимірювань і трохи нижчу точність ці сканери мають більш вузькі сфери застосування. Вони ефективні у визначенні просторового положення будівельних конструкцій всередині приміщень, а також у роботі на обмежених територіях або у вузьких місцях, де є щільне розташування технологічного обладнання. Технічні характеристики та метрологічні параметри сканерів визначають їхні основні сфери застосування.

Багато моделей цієї категорії здатні виконувати вимірювання під різними кутовими ракурсами або в перевернутому положенні без потреби в активному компенсаторі. Приклади подібних сканерів наведені на рисунку.



Рис. 14. Скануючі тахеометричні системи

Останньою категорією є **скануючі тахеометричні системи**, до яких належить, зокрема, модель **Trimble SX10**. Хоча ці системи працюють зі значно більшою швидкістю, ніж звичайні НЛС, їхня швидкість сканування менша. Однак вони компенсують це своїм великим діапазоном вимірювання та високою точністю. Унікальною особливістю скануючих тахеометричних систем є їх здатність точно спрямовуватися в обраний напрямок, використовуючи власну кутомірну систему. На відміну від інших НЛС, які визначають напрямки лише в горизонтальному та вертикальному кругах під час сканування, ці системи забезпечують більш точний напрямок вимірювання. Завдяки таким характеристикам, ці сканери ефективно застосовуються для **розмічання територій** та **контролю за деформаціями** будівель чи споруд. Приклад скануючої тахеометричної системи можна побачити на рис.



Рис.15 Скануюча тахеометрична система Trimble X7

Основними параметрами, які враховуються під час процесу лазерного сканування, є щільність хмари точок та її точність. Ці характеристики є ключовими та зазвичай вказуються в технічному завданні до початку роботи.

У сучасних портативних та високоточних наземних лазерних сканерах щільність хмари точок розраховують на основі середньої відстані між окремими точками на відстані 10 метрів. Точність хмари точок, що встановлюється через параметри приладу, є умовною величиною, оскільки вона не завжди повністю відображає кінцеву точність вимірювання. Це пояснюється впливом "шуму", тобто помилок, які можуть виникати під час сканування.

Рівень точності, що обирається під час роботи, безпосередньо впливає на кількість замірів, які здійснюються для кожної точки в хмарі. Це дає користувачеві можливість регулювати рівень деталізації та якість кінцевих результатів сканування.

## 2.4. Вимоги до точності виконання лазерного сканування

У сучасній Україні наземне лазерне сканування залишається відносно новою технологією, для якої досі не розроблені відповідні нормативні документи, що регулюють методи роботи та стандарти точності. В Україні спостерігається відсутність чітко встановлених вимог щодо застосування наземних лазерних сканерів (НЛС) з різними рівнями точності. Такі стандарти могли б бути схожі на положення, наведені в нормативному документі ДБН В.1.3.-2-2010 «Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві. Зміна 1».

Згідно із Законом України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», геодезичні та картографічні роботи можна класифікувати на такі основні напрями:

- основні геодезичні роботи;
- загальнодержавні топографічні зйомки;
- інженерні вишукування у будівельному секторі та масштабні топографічні зйомки.

Відповідно до ДБН А.2.1-1-2014, пункту 4.4, інженерні вишукування для будівельних цілей охоплюють такі види досліджень:

- інженерно-геодезичні;
- інженерно-геологічні;
- геотехнічні та інженерно-гідрогеологічні дослідження (у складі комплексних досліджень або окремо);
- інженерно-гідрометеорологічні;
- дослідження, спрямовані на раціональне використання навколишнього середовища.

Відсутність відповідних регуляторних документів у сфері наземного лазерного сканування значно ускладнює його інтеграцію, особливо у будівельній галузі та суміжних інженерних напрямках. У зв'язку з цим необхідно розробити відповідні нормативи, які б регулювали стандарти точності робіт і визначали області застосування НЛС у різних секторах.

Запровадження таких стандартів допоможе популяризувати технологію лазерного сканування, підвищити якість робіт, а також забезпечити надійність отриманих результатів.

GISUT  
KNUCA  
2024

## Розділ 3. Технології Slam сканування

### 3.1. Загальні принципи SLAM-сканування

**SLAM** (Simultaneous Localization and Mapping) — це технологія, що забезпечує одночасне визначення місцеположення об'єкта у просторі та побудову карти середовища навколо нього. SLAM-технології стали важливим інструментом в геодезії та скануванні, зокрема завдяки їх здатності працювати в складних умовах, де недоступне традиційне супутникове позиціонування.

SLAM-сканування базується на обробці даних, зібраних сенсорами пристрою, таких як **лідар (лазерний далекомір), камери, інерційний модуль (IMU)**, які передають інформацію про відстані до об'єктів, зміну положення та орієнтацію пристрою у просторі.

Принцип роботи SLAM-сканування полягає в наступному:

1. **Локалізація:** визначення місця пристрою у просторі. За допомогою сенсорів пристрій фіксує своє положення, постійно оновлюючи дані про координати. Наприклад, камера може фіксувати орієнтири у просторі, порівнюючи їх між різними кадрами, а лазерний далекомір визначає відстані до об'єктів, створюючи тривимірну хмару точок.
2. **Картографування:** одночасно зі своєю локалізацією пристрій будує карту оточення. Лазерні сканери та камери фіксують об'єкти навколо пристрою, і система поступово створює модель середовища, яка уточнюється при накопиченні нових даних.
3. **Корекція помилок:** алгоритми SLAM постійно звіряють отримані дані, усуваючи накопичувальні похибки, що є важливою перевагою цієї технології. Це забезпечує більш точну локалізацію та картографування навіть у динамічному середовищі.

Існують різні види SLAM-систем, що базуються на використанні різних сенсорів:

- **Лазерний SLAM** — використовує дані від лідара, який дозволяє створити точні хмари точок і будувати 3D-моделі оточення.
- **Візуальний SLAM** — використовує камери, які допомагають визначати відстань до об'єктів за допомогою стереозображення або аналізу змін у кадрах.
- **Гібридний SLAM** — об'єднує лазерний і візуальний методи, покращуючи точність завдяки комбінованій обробці даних.

Використання SLAM-сканування значно полегшує роботу на об'єктах, де традиційні геодезичні методи потребують багато часу, особливо у важкодоступних місцях, наприклад, у підземних приміщеннях, густих лісах або складних архітектурних структурах.



Рис. 16. Зображення Slam сканерів

Табл. Характеристики точності Slam сканерів 4

Тип SLAM-сканера	Технологія	Точність (мм)	Відстань вимірювання	Переваги	Недоліки
Лазерний SLAM	Лідар (LiDAR)	1–10 мм	до 100 м і більше	Висока точність, детальність, хороша для 3D-моделювання	Погіршення точності при дощу або тумані
Візуальний SLAM	Камери (стерео/моно)	5–50 мм	до 30 м	Менше енергоспоживання, доступність	Залежність від освітлення і текстури
Гібридний SLAM	Лідар + Камери	1–20 мм	до 100 м	Поєднання точності лідара і гнучкості камер	Складність у синхронізації сенсорів
Інерціальний SLAM	IMU (інерційний модуль)	0,1–10 мм	до 50 м	Підвищує стабільність і точність у русі	Обмежена точність на великих відстанях

### 3.2. Аналіз роботи SLAM-сканерів

Робота SLAM-сканера охоплює використання низки компонентів, що забезпечують одночасне позиціонування і картографування. Основні компоненти SLAM-сканера включають:

1. **Лідар (лазерний далекомір)** — за допомогою лазерних променів вимірює відстані до об'єктів, створюючи тривимірну хмару точок, яка є основою для побудови карти.
2. **Камери** — у разі використання візуального SLAM, камери можуть відтворювати зображення об'єктів навколо пристрою. Візуальний SLAM використовує алгоритми розпізнавання об'єктів, які допомагають SLAM-сканеру ідентифікувати та запам'ятовувати особливі точки в середовищі.
3. **Інерційний модуль (IMU)** — забезпечує вимірювання прискорення і змін орієнтації пристрою, що особливо важливо при русі пристрою у просторі. За допомогою IMU SLAM-система фіксує, коли і в якому напрямку змінився рух, що дає змогу ефективно компенсувати похибки у побудові карти.
4. **Процесор** — здійснює обробку даних від сенсорів, розрахунки положення та побудову карти в реальному часі. Процесор має бути достатньо потужним для швидкої обробки даних і корекції помилок.

Основні етапи роботи SLAM-сканера включають:

- **Збір даних** — пристрій фіксує просторові дані від лідара, камер і IMU, збираючи велику кількість інформації для побудови тривимірної карти.
- **Оцінка положення** — на основі зібраних даних пристрій визначає своє положення відносно оточення.
- **Картографування** — формує карту, яка доповнюється новими даними.

- **Корекція помилок** — система періодично перевіряє дані, враховуючи попередні вимірювання, для зниження похибок, які можуть накопичуватися протягом роботи.

SLAM-сканери можна використовувати як у великих відкритих просторах, так і у вузьких закритих приміщеннях. Їх ефективність залежить від якості сенсорів, частоти лазерних імпульсів та алгоритмів обробки даних.

GISUT KNUCA 2024

### 3.3. Сфера застосування SLAM-сканерів

Завдяки здатності працювати у реальному часі й створювати точні тривимірні моделі, SLAM-сканери знайшли застосування в різних галузях.

1. **Геодезія і будівництво** — SLAM-сканери дозволяють здійснювати швидке й точне обстеження будівельних ділянок. Вони використовуються для створення карт ділянок, моніторингу стану будівель і споруд, аналізу фасадів. SLAM-сканування спрощує контроль за відповідністю фактичних параметрів будівлі проєктній документації та дозволяє виявляти деформації, що можуть виникати в процесі експлуатації споруди.
2. **Архітектура** — у сфері архітектури SLAM дозволяє створювати точні тривимірні моделі історичних об'єктів. Це важливо для збереження культурної спадщини, адже такі 3D-моделі слугують основою для реставраційних робіт і досліджень. SLAM-сканери можуть використовуватись як усередині об'єктів, так і ззовні, фіксуючи деталі конструкцій та складні архітектурні елементи.
3. **Промисловість** — SLAM-технології є корисними для обстеження великих промислових об'єктів. Це можуть бути заводи, склади, промислові цехи, де точність 3D-моделей важлива для планування виробничих процесів і розміщення обладнання. Завдяки SLAM можна швидко відсканувати об'єкти та отримати модель їх просторового положення, що зменшує час на обстеження і мінімізує переривання в роботі підприємства.
4. **Інженерні комунікації** — SLAM-сканування дозволяє створювати тривимірні моделі інженерних мереж, таких як трубопроводи, кабельні магістралі, вентиляційні шахти. Це спрощує завдання з обстеження, ремонту та модернізації інфраструктури. Тривимірні карти, створені

SLAM-сканерами, дають змогу побачити розташування комунікацій та оцінити їхній стан.

5. **Робототехніка** — SLAM-сканування широко використовується у мобільних роботах, які потребують автономного пересування. Наприклад, у складських роботах SLAM дозволяє орієнтуватися в просторі, розміщувати товари та пересуватися серед товарних стелажів без зіткнень з перешкодами. Висока точність побудови карти за допомогою SLAM дозволяє роботам ефективно пересуватися навіть у складних середовищах з великою кількістю об'єктів і перешкод.
6. **Агросектор** — в сільському господарстві SLAM-сканери використовуються для моніторингу стану полів і рослинності. Вони встановлюються на дронах або роботизованих пристроях, що дозволяє виконувати сканування великих ділянок і визначати оптимальні зони для поливу, внесення добрив або обробки пестицидами. SLAM-сканування також допомагає в управлінні агротехнічними операціями, оптимізуючи використання ресурсів.
7. **Картографія** — SLAM-сканування надає нові можливості для оновлення картографічних даних, особливо для створення 3D-карт міських і природних середовищ. Традиційні методи топографічних зйомок можуть бути трудомісткими, але завдяки SLAM-скануванню можна швидко отримати детальну 3D-модель, яка відображає рельєф місцевості, інфраструктуру, зелені зони та інші важливі об'єкти. Це особливо корисно для складних територій, як-от каньйони, густі ліси, або гірські ділянки.
8. **Військова та рятувальна сфера** — SLAM-сканери допомагають створювати карти територій під час військових операцій або рятувальних робіт. SLAM дозволяє створювати карту місцевості навіть у небезпечних для людини зонах, таких як зруйнованих будівель,

печери або місцевості, що перебувають під загрозою обвалів. Це значно підвищує безпеку робіт і дозволяє швидше знаходити оптимальні шляхи проходження.

9. **Наукові дослідження** — SLAM-технології широко використовуються у дослідженнях природних і штучних середовищ, таких як печери, тунелі, підземні структури, а також у підводних та арктичних дослідженнях, де традиційні системи позиціонування (наприклад, GPS) не працюють. SLAM дозволяє дослідникам збирати точні дані та формувати тривимірні моделі, навіть у важкодоступних місцях.

10. **Охорона навколишнього середовища** — SLAM-сканування стає важливим інструментом для моніторингу екосистем і оцінки впливу людської діяльності на довкілля. Сканери встановлюють на дрони або мобільні платформи для фіксації змін ландшафту, стеження за станом лісів і вивчення наслідків кліматичних змін. Тривимірні моделі допомагають екологам краще зрозуміти природні процеси та приймати обґрунтовані рішення.

11. **Висновок:** SLAM-сканери, завдяки своїй універсальності, точності та здатності до роботи у динамічних середовищах, стають необхідним інструментом в різних галузях. Їх використання значно підвищує ефективність і точність у багатьох сферах, де потрібне точне тривимірне картографування, а їх адаптивність і портативність розширюють сферу застосування. З розвитком технології можна очікувати подальшого вдосконалення SLAM-систем, що сприятиме появі нових можливостей для їх інтеграції в інші галузі та сфери діяльності.

## **Розділ 4. Оброблення даних знімання**

### **4.1. Процес обробки даних стаціонарного сканера**

Дані були оброблені за допомогою програмного забезпечення Trimble RealWorks.

Trimble RealWorks — це потужне програмне забезпечення для обробки даних, отриманих за допомогою лазерного сканування. В основному використовується для роботи з тривимірними сканами, створення точкових хмар, моделей і підготовки аналітичних звітів. Програма дозволяє легко інтегрувати дані в інші додатки для проектування, будівництва, архітектури та геодезії.

#### **Основні можливості Trimble RealWorks:**

##### **1. Обробка хмар точок:**

- Імпорт і об'єднання даних з різних лазерних сканерів.
- Видалення шуму та небажаних точок.
- Редагування, об'єднання та вирівнювання хмар точок.

##### **2. Створення 3D-моделей:**

- Генерація точних 3D-моделей для різних галузей.
- Підтримка текстурованих поверхонь для більш реалістичного відображення.

##### **3. Аналіз об'єктів:**

- Порівняння реальних даних із проектними моделями.
- Вимірювання відхилень, деформацій або змін у структурі.
- Створення поперечних перерізів, профілів та інженерних креслень.

##### **4. Автоматизація робочих процесів:**

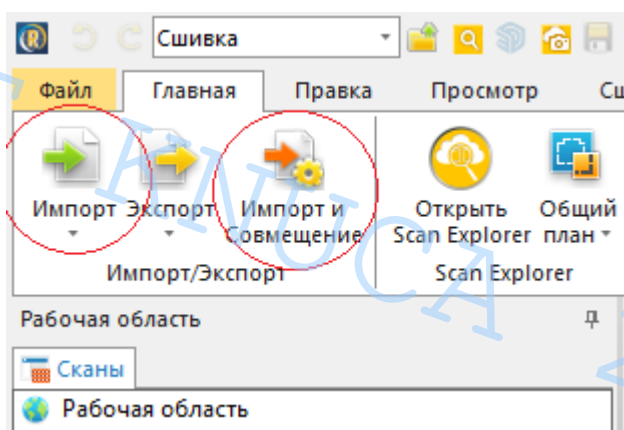
- Зручні інструменти для швидкого вирівнювання сканів.
- Автоматична сегментація хмар точок.
- Підтримка пакетної обробки даних.

### 5. Інтеграція з іншими продуктами Trimble:

- Легка інтеграція з Trimble SketchUp, AutoCAD, Revit та іншими інженерними додатками.
- Експорт у різні формати файлів (LAS, E57, OBJ, DWG, DXF).

### TRIMBLE REAL WORKS

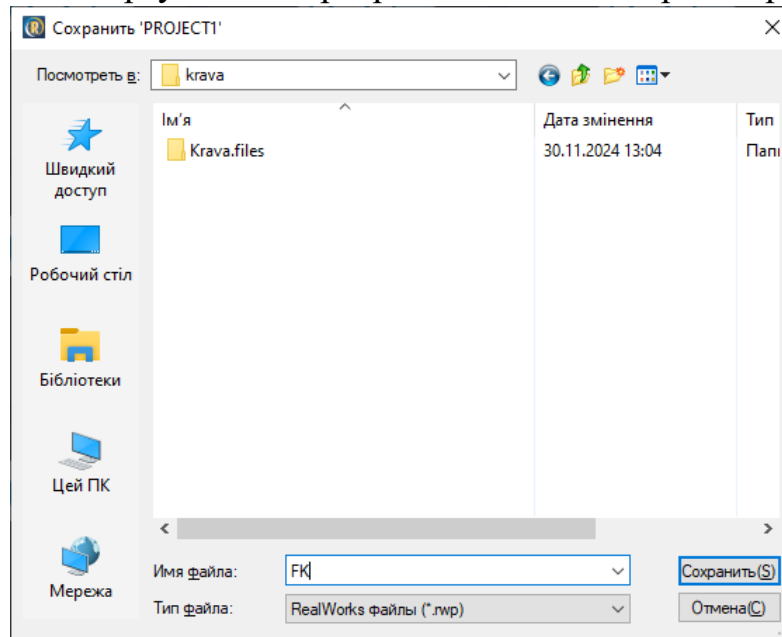
Існує два варіанта імпорту даних в TRW



«Імпорт і суміщення» передбачає автоматичне імпортування всіх вимірювань і одразу спробу їх зшити.

Але так як автоматичне зшивання не потрібно, тому використовую звичайний «Імпорт»

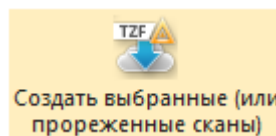
Перед імпортуванням програма вимагає створити проект.



Однак, після імпортування спостеріємо лише ярлики станцій сканування

Имя	Марка	Тип	Число точек	Цвет
	SkafisKorp...	Станция	0	
	SkafisKorp...	Станция	0	
	SkafisKorp...	Станция	0	
	SkafisKorp...	Станция	0	

В даному випадку треба створити TZF file



Создание скана выборки

Выборка по шагу

Тип выборки: Пространственная выборка

Разрешение: 0.10 m

Фильтрация (необязательная)

Фильтр диапазона

Максимальное 40.00 m

Фильтровать по области:

Точка -80.00 m; -80.00 m; -22.66 m

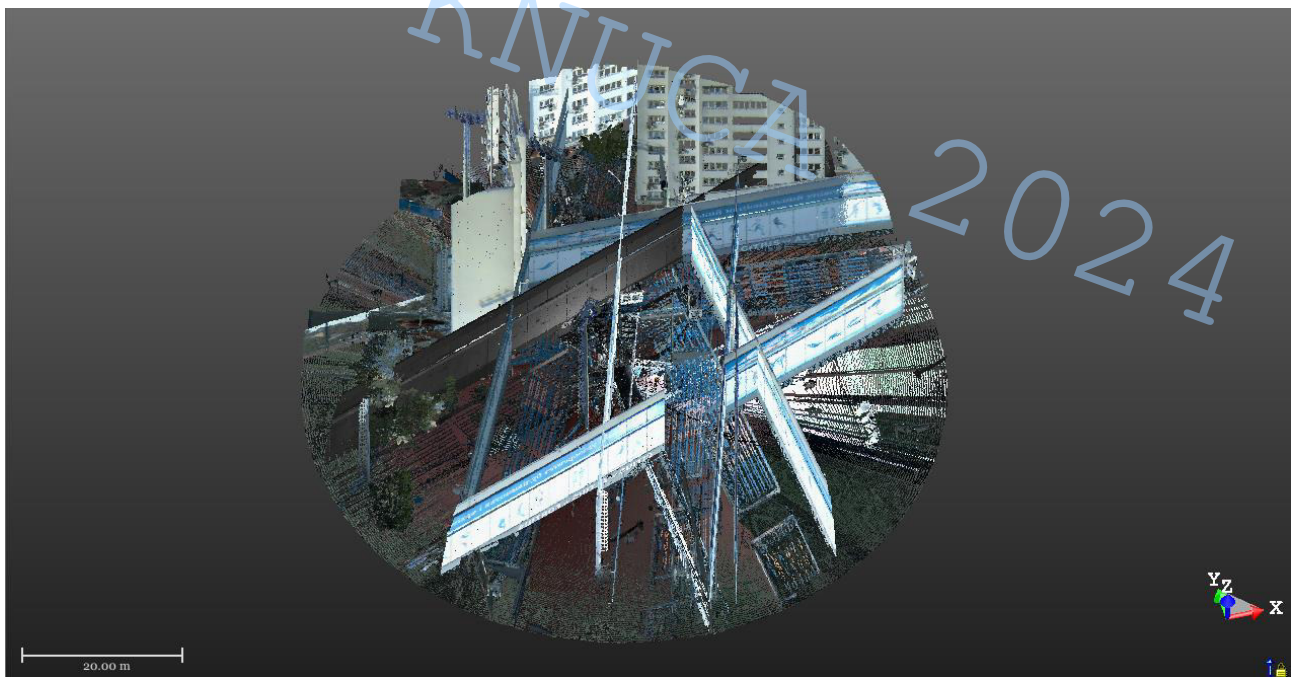
Точка 80.00 m; 79.83 m; 78.91 m

Оценить количество точек: неопределенный

Да Отмена Справка

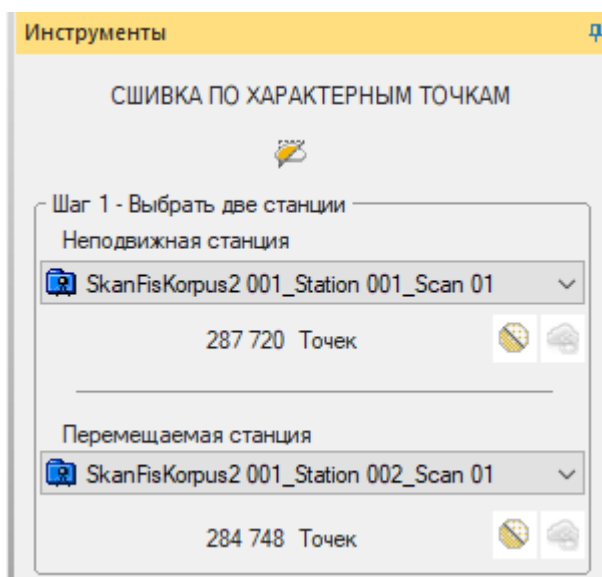
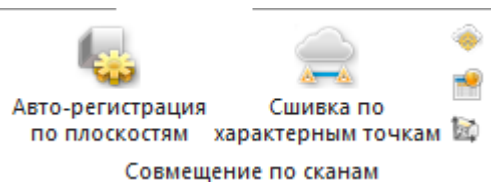
Обрано потрібну роздільну здатність та фільтр діапазону

Далі отримано скани зі станцій у вигляді сфери з діаметром 40 метрів



Наступний етап - реєстрація сканів

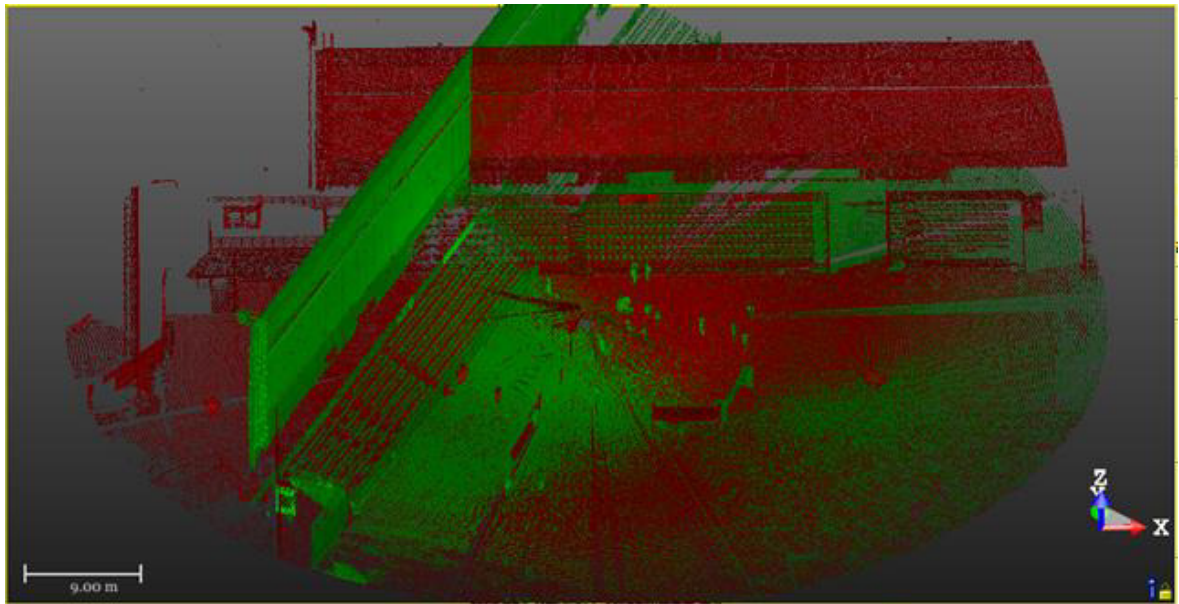
Існує два варіанти реєстрації за суміщенням: автореєстрація по площинам і зшивка по характерним точкам. Втім за допомогою першої опції, яка швидка і зручна, ми не зможемо показати точність кращу, ніж в режимі ручного зшивання.



Обираємо перший скан до якого зшиваємо, нижче – який зшивається.

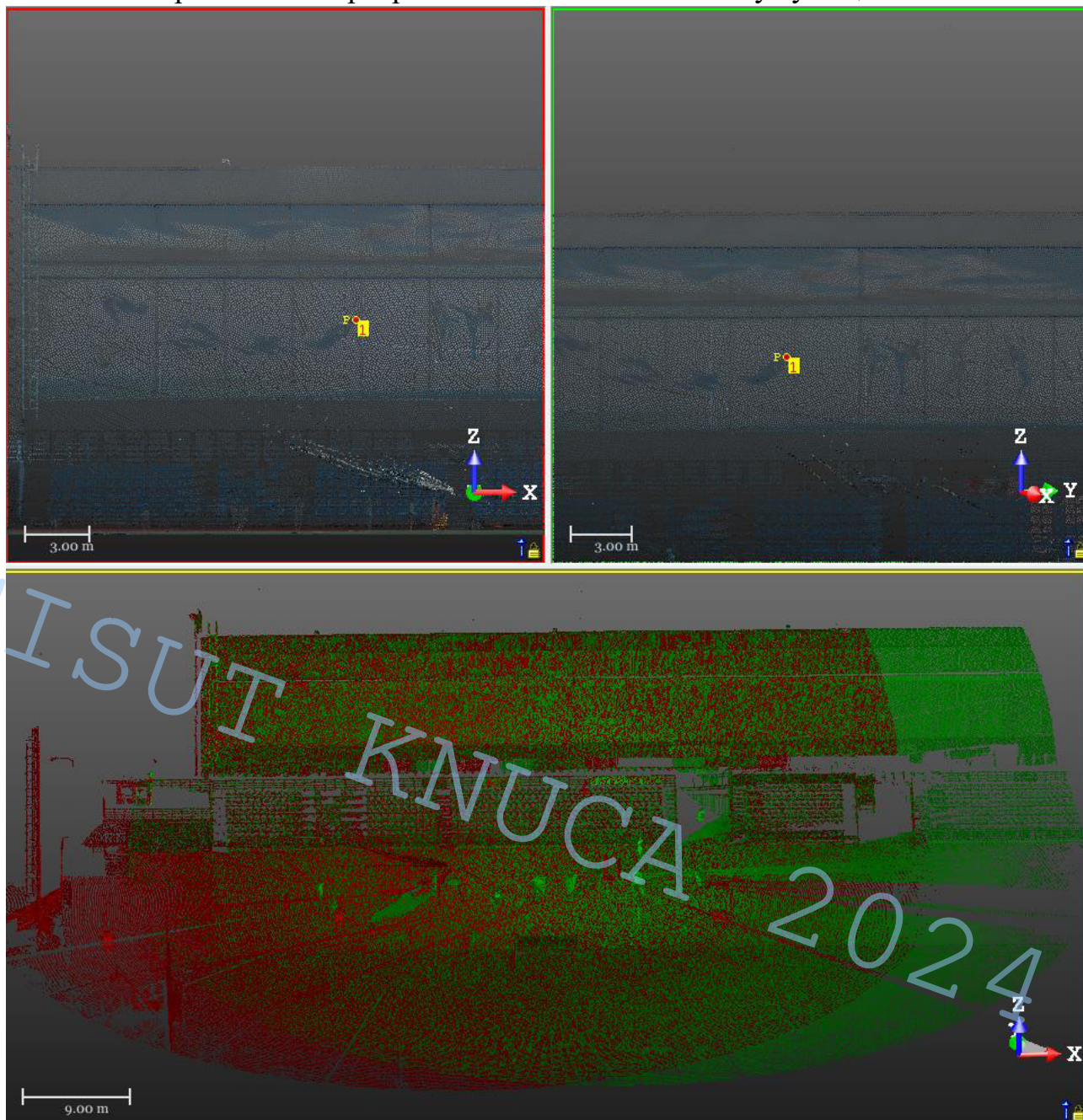
Є декілька технік зшивання, одна з них це візуальне суміщення. Однак в цьому випадку це просто для приблизного орієнтування, як кожен з них знаходиться

GISUIT  
КІНУСА  
2024

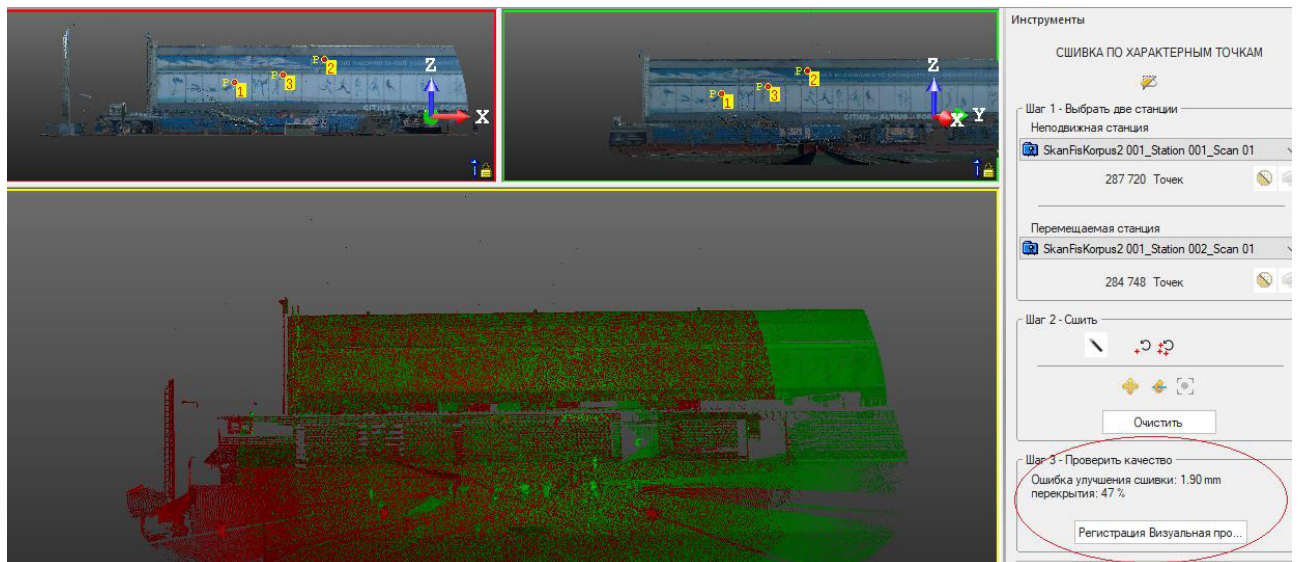


Інша техніка – характерні точки, тобто обираємо однакові співвідносячі точки на обох сканах.

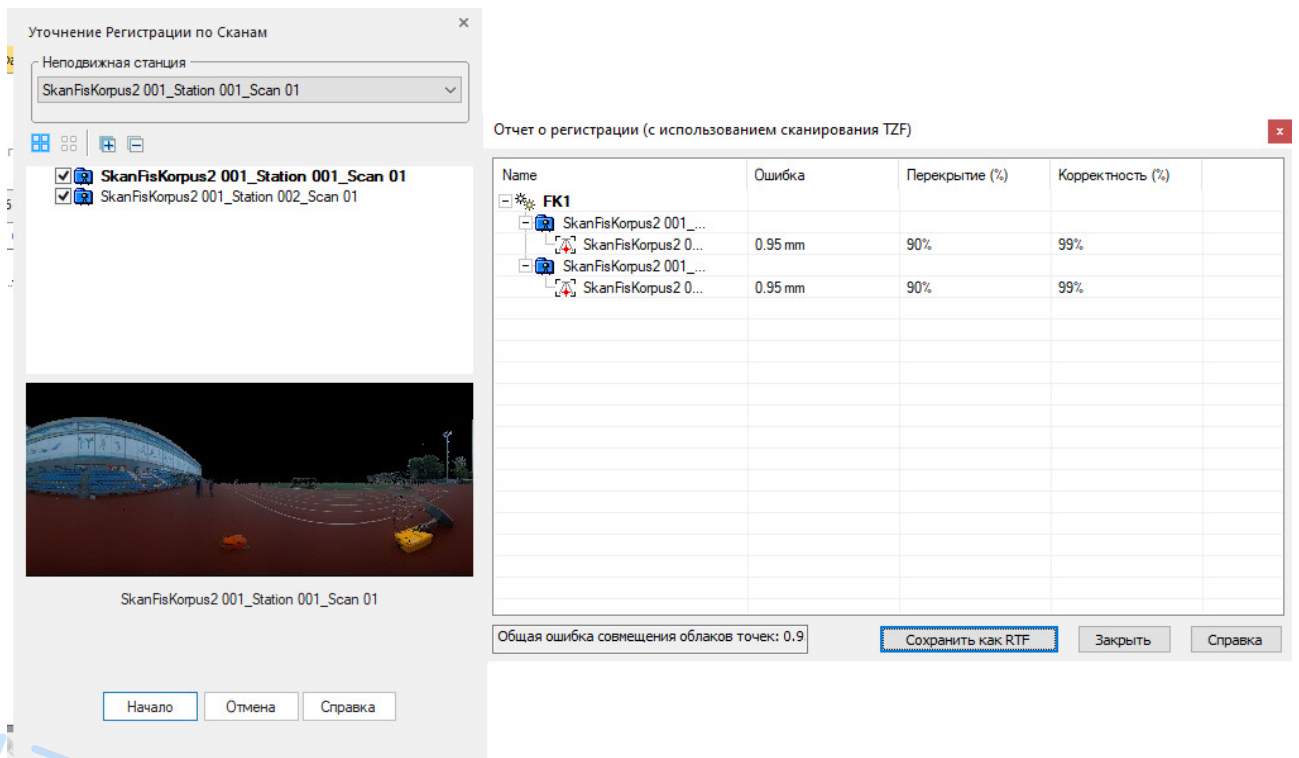
Після першої точки програма вже автоматично знизу суміщає об'єкти.



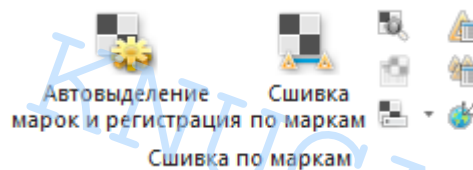
Додаючи наступні точки програма далі досуміщує і одразу показує точність зшивання і перекриття



Програмне забезпечення може зробити оптимізацію зшитих сканів



Наступною варіацією реєстрації є зшивання по маркам



В даному випадку це було «Автовиділення марок і реєстрація». Задано параметри.

Автоматическое извлечение целей

Типы марок

Сферическая марка  
Диаметр: 0.10 m

Черная и белая поверхность таргета

Выполнение сканирования (дополнительно)

Выполнить обзорное сканирование

Неподвижная станция

SkanFisKorpus2 001\_Station 001\_Scan 01

Да Отмена Справка

Використовувані опорні точки – плоскі та сферичні марки



Отримуємо контроль зшивки

Контроль сшивки

Список станций | Продвинутый | Невязка (Объединенных станций) 4.11 mm

Объединить... | Отвязать | Авто-совмещени... | Авто-совмещени... | Экспорт отчета...

Привязанные станции

Имя	Ска...	Соответ...	Скано...	Ошибка	Delta X	Delta Y	Delta Z	Ошибка вписывания	Расстояние до сканера
028	028	2	--	--	--	--	--	0.90 mm	5.56 m
Sk...	9	--	--	1.53 mm	--	--	--	--	0.00 m
S...	--	--	--	--	--	--	--	--	0.00 m
004	004	2	0.87 mm	0.86 mm	-0.12 mm	-0.01 mm	0.89 mm	12.50 m	
003	003	2	0.99 mm	0.98 mm	-0.02 mm	0.17 mm	0.92 mm	14.25 m	
006	006	2	2.52 mm	2.40 mm	0.47 mm	0.58 mm	0.83 mm	8.38 m	
005	005	2	1.82 mm	1.75 mm	0.15 mm	0.46 mm	0.88 mm	10.83 m	
001	001	4	1.62 mm	-0.75 mm	-0.65 mm	-1.28 mm	1.10 mm	21.96 m	
002	002	5	2.43 mm	-2.28 mm	0.19 mm	0.81 mm	0.89 mm	28.94 m	
008	008	2	1.10 mm	0.40 mm	0.35 mm	-0.96 mm	1.26 mm	11.33 m	
007	007	2	0.86 mm	0.81 mm	-0.03 mm	0.28 mm	1.17 mm	12.14 m	

У випадку якщо існують некоректності у попередній варіації зшивання, використовується ручна реєстрація по маркам.

Инструменты

СШИВКА ПО МАРКАМ

Шаг 1 - Выбрать станции

Неподвижная станция

Sk VizKorp\_Station 002\_Scan 01

Список станций

Имя станции	К...	Невязка
Sk anFis...	5/8	--
Sk anFis...	6/7	--
Sk anFis...	6/7	--
Sk anFis...	5/6	--
Sk anFis...	3/4	--
Sk anVi...	8/9	1.53 mm
Sk an...	1...	<b>1.61 mm</b>
Sk anVi...	1...	7.53 mm
Sk anVi...	1...	8.03 mm
Sk anVi...	6...	1.88 mm

Общая невязка: --

Шаг 2 - Создание/Редактирование Целей

Анализ...

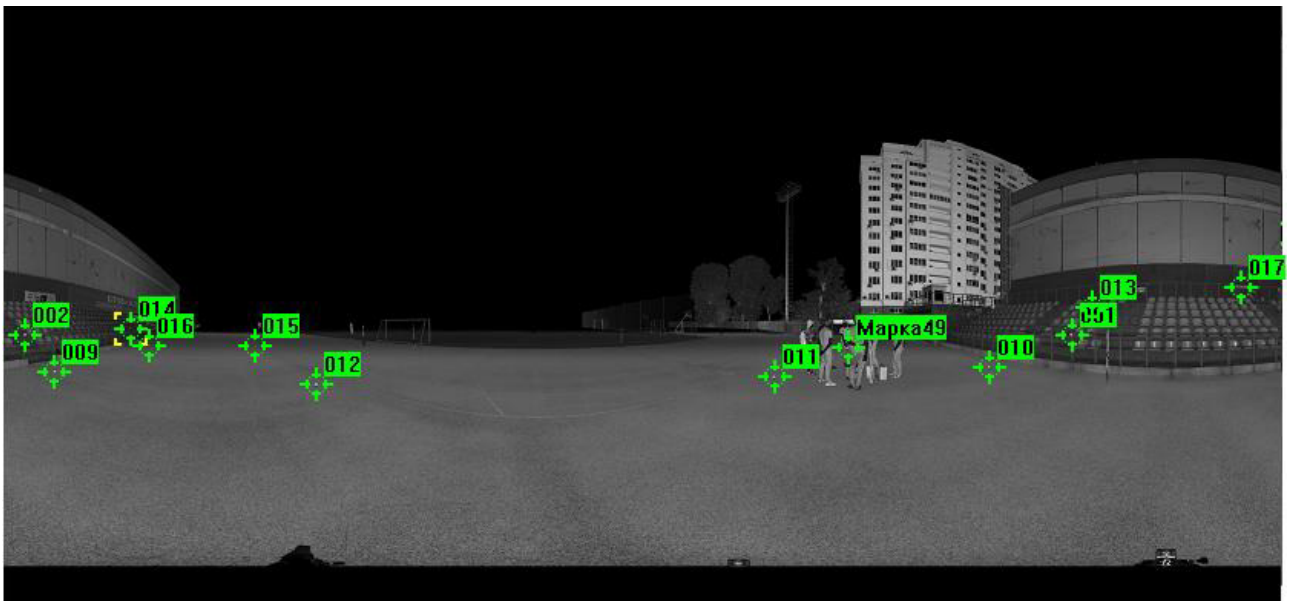
Шаг 3 - Сшить станции

Уравнять | Проверка...

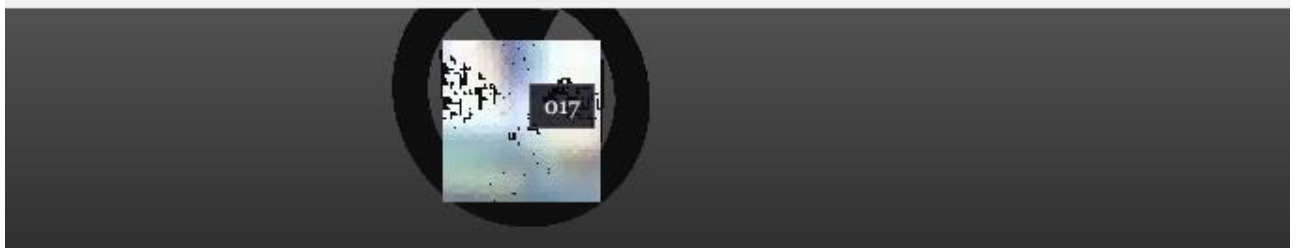
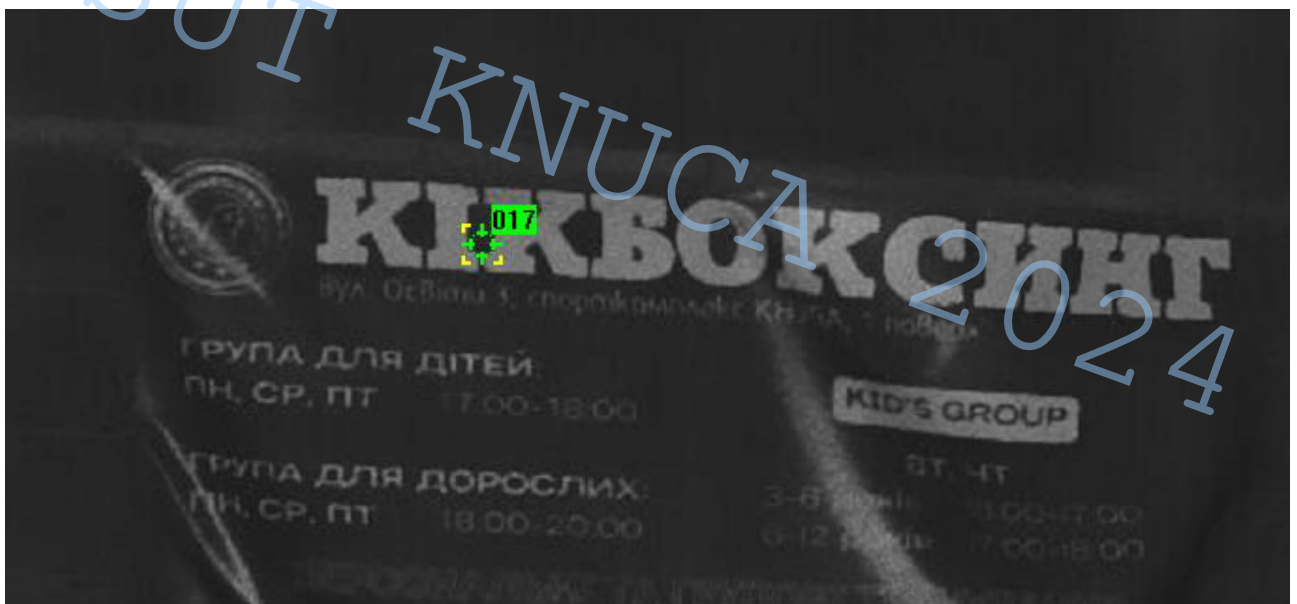
Прим... | Группа | Закр... | Справ...

Обираємо нерухому станцію і натискаємо «Аналіз».

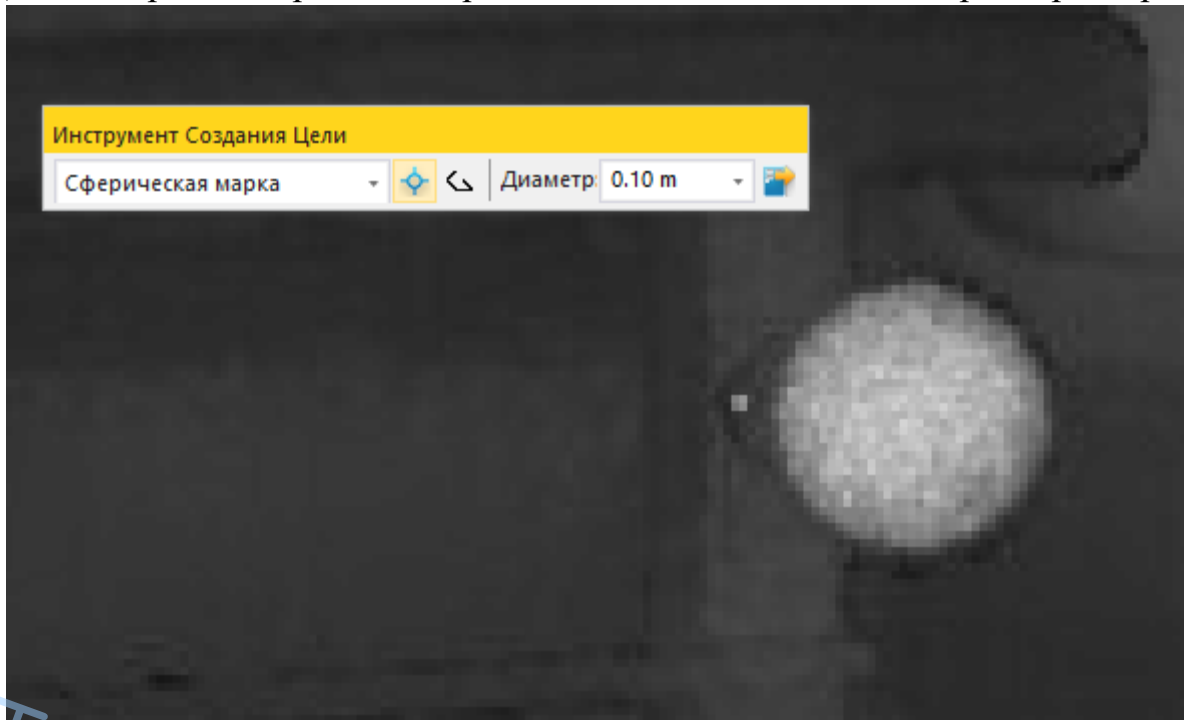
Зеленим відображено, які опорні цілі було визначено автоматично ПЗ. Втім інколи програма теж може помилятися



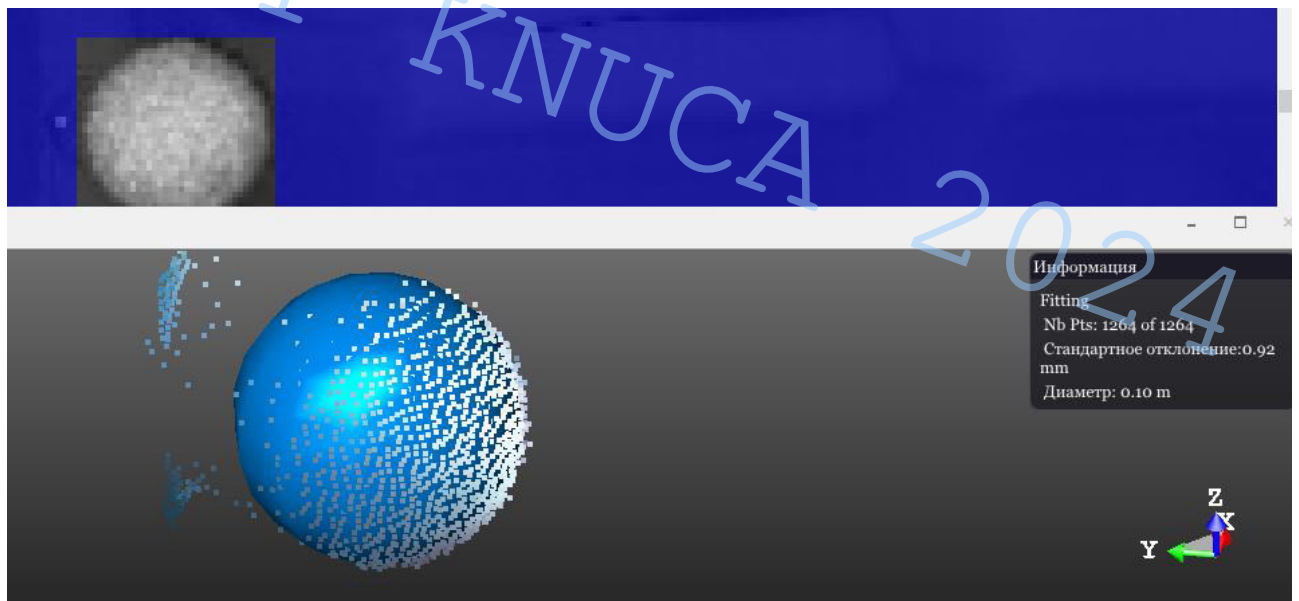
Втім інколи програма теж може помилятися. Видно що обрано ціль, якої не існувало насправді.



Далі відображено процес створення цілі. Встановлюються параметри марки.

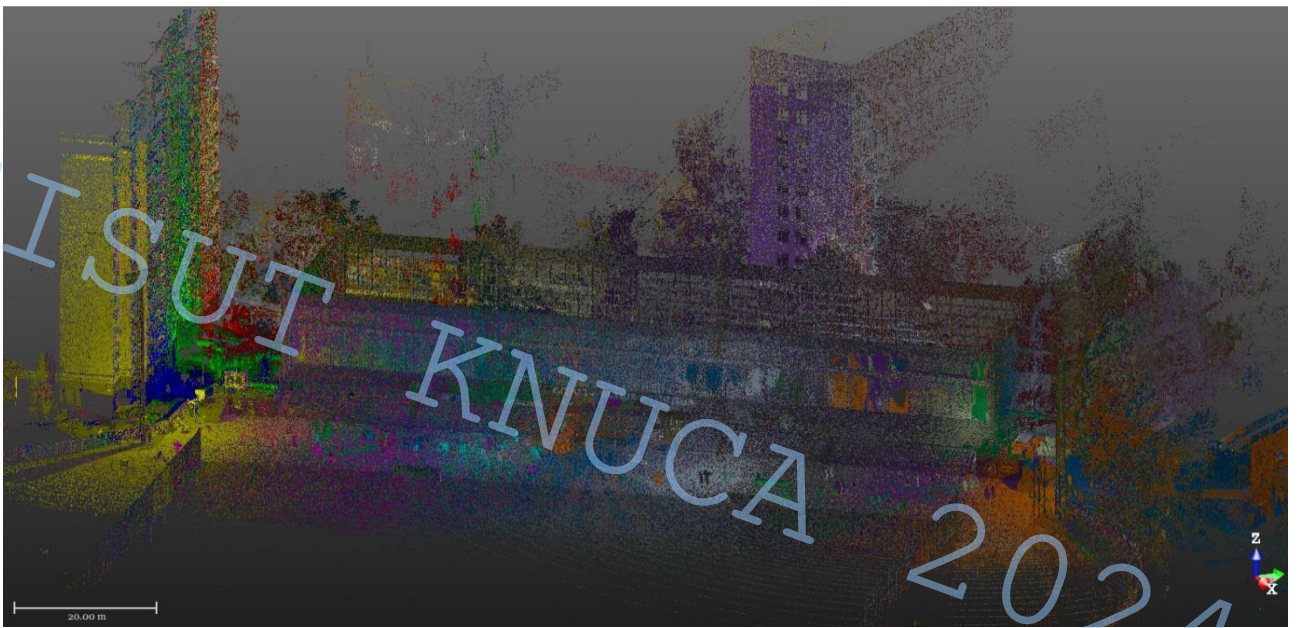
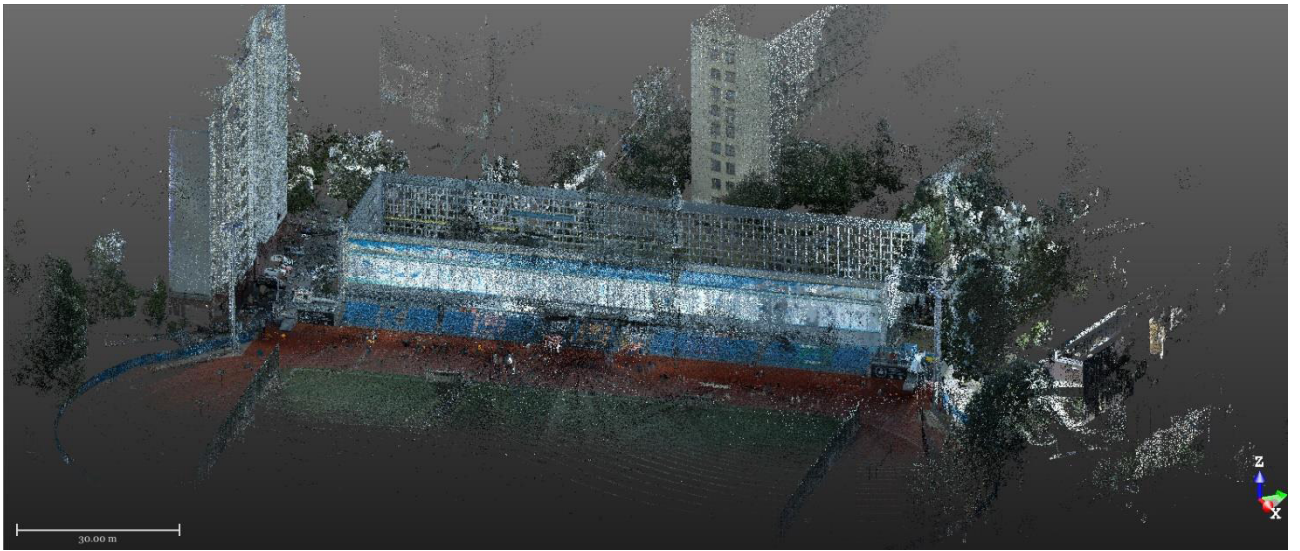


Видно, що діаметр сфери відповідає дійсності. Точність відтворення сфери: 0,9 мм.

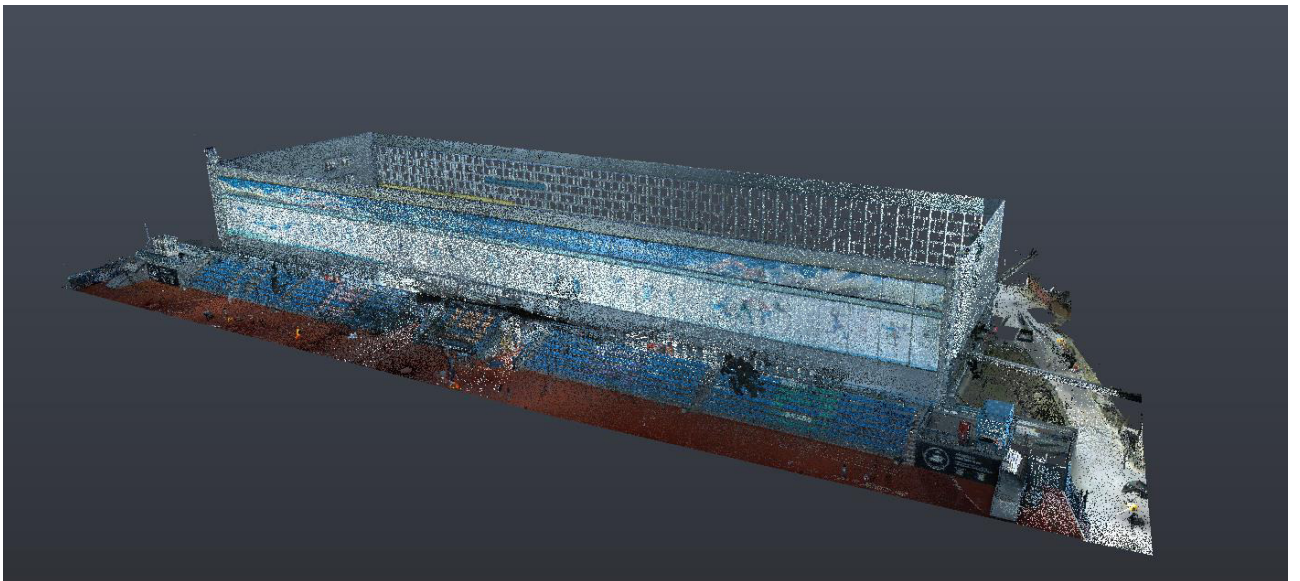


Отже, за таким же принципом відбувається створення/редагування цілей на кожній станції.

Так виглядає зшитий повністю проект. Трохи нижче звіт по реєстрації



Почищена хмара в Autodesk Recap



Отчет о регистрации (с использованием извлеченных сканов)

Name	Ошибка	Перекрытие (%)	Корректность (%)
FK			
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	1.45 mm	79%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанVizKorp_Stati...	1.51 mm	81%	99%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	1.75 mm	73%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанVizKorp_Stati...	1.95 mm	82%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	1.27 mm	73%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	2.60 mm	71%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	1.39 mm	76%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	2.17 mm	71%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	1.92 mm	72%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	1.84 mm	74%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	2.83 mm	61%	99%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	2.70 mm	54%	98%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	2.18 mm	52%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанVizKorp_Stati...	3.28 mm	58%	97%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанVizKorp_Stati...	2.01 mm	56%	98%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	1.89 mm	53%	99%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	2.43 mm	44%	99%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	1.56 mm	59%	99%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	2.95 mm	44%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	2.00 mm	53%	99%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	3.21 mm	37%	98%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанFisKorp2 0...	1.57 mm	46%	96%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	2.37 mm	35%	99%
SkанFisKorp2 001_...			
SkанVizKorp_Stati...	3.23 mm	33%	98%
SkанVizKorp_Station ...			
SkанVizKorp_Stati...	2.54 mm	39%	99%

Общая ошибка совмещения облаков точек: 2.2

Сохранить как RTF    Закрыть    Справка

В ході обробки сканів станцій ми отримали результат:

Найбільша точність зшивання сканів складає 1,27 мм

Найменша точність зшивки сканів складає 3,28 мм

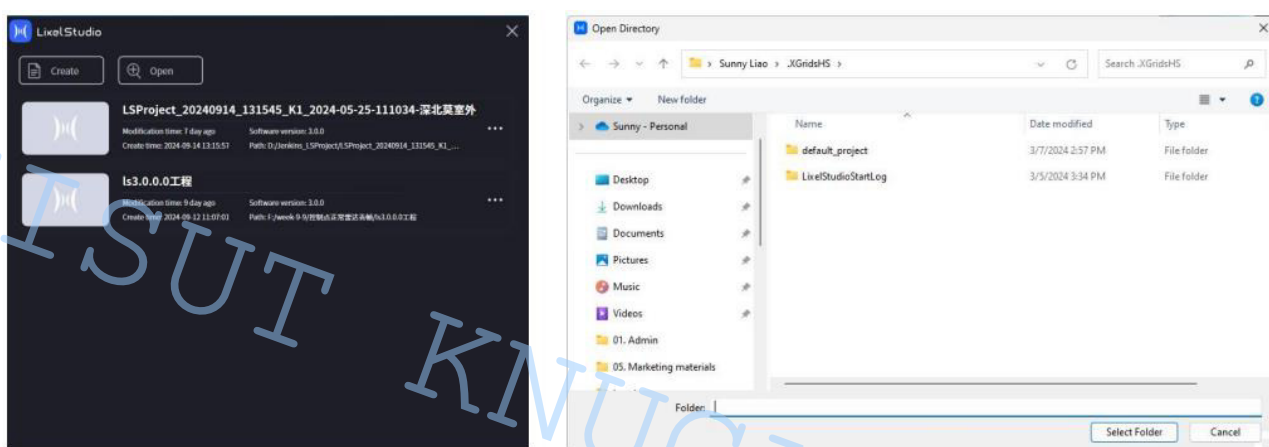
Загальна похибка зшивання 2,2 мм

## 4.2. Процес обробки даних Slam сканера

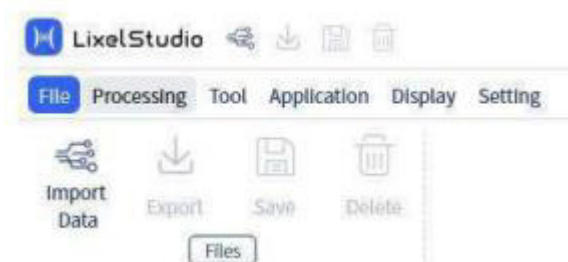
Дані були оброблені за допомогою програмного забезпечення LixelStudio. LixelStudio - це програмне забезпечення для обробки 3D-даних, незалежно розроблене компанією XGRIDS, що забезпечує постобробку проектів, хмари точок та інші послуги з перегляду, редагування, обробки даних.

### LIXELSTUDIO

Отже, спочатку, як зазвичай створюємо проект.



Наступним кроком є імпорт даних. Наразі програма підтримує імпорт даних хмари точок, включаючи такі формати, як LAS, LAZ і PLY. Це якраз ті формати, які і видає SLAM-сканер.



Програма одразу пропонує вибрати зміщення координат для відображення рендерингу (це зміщення вплине лише на відображення хмари точок у вікні і не вплине на координати самих даних хмари точок)

### Coordinate Shift

Original Coordinate	Suggest	Result Coordinate
x= 7.213	◀ 0.000 ▶	x= 7.213
y= 0.154	◀ 0.000 ▶	y= 0.154
z= 1.900	◀ 0.000 ▶	z= 1.900

Далі імпортуємо контрольні точки і дані траєкторії. Програма автоматично призначить таку інформацію, як координата X, координата Y, координата Z, інтенсивність та мітка для кожного стовпчика даних.

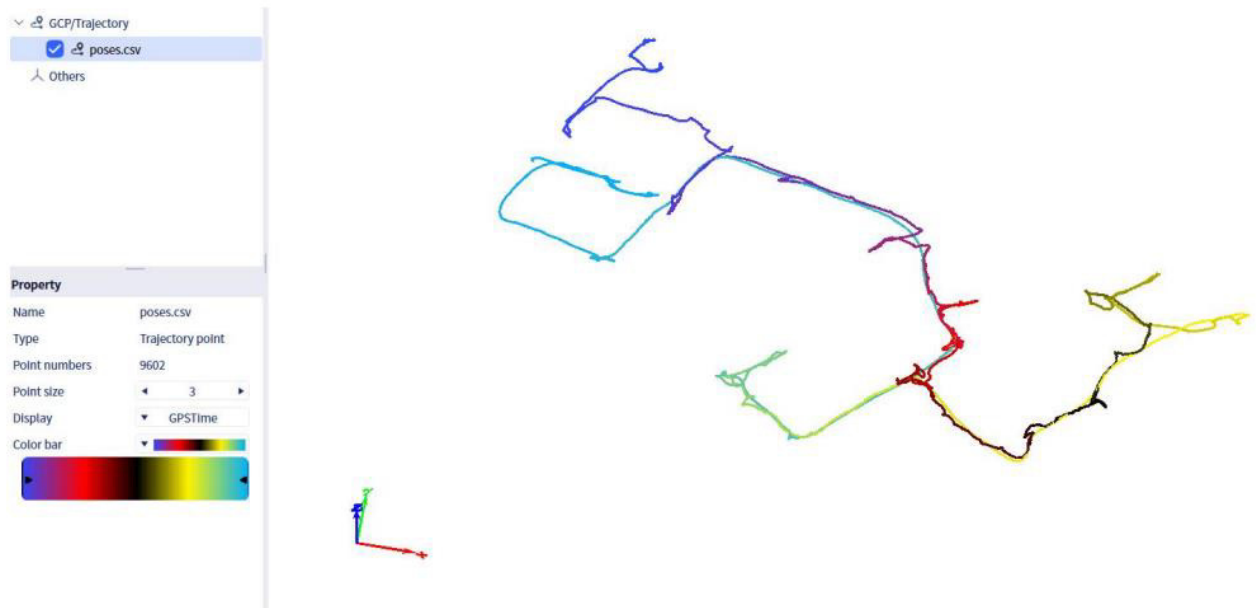
The screenshot shows a file explorer window with the following files:

- 2024-08-28-100926(1).csv
- 2024-08-28-100926(0).csv
- 2024-08-28-100926.csv
- project\_data
- external\_data

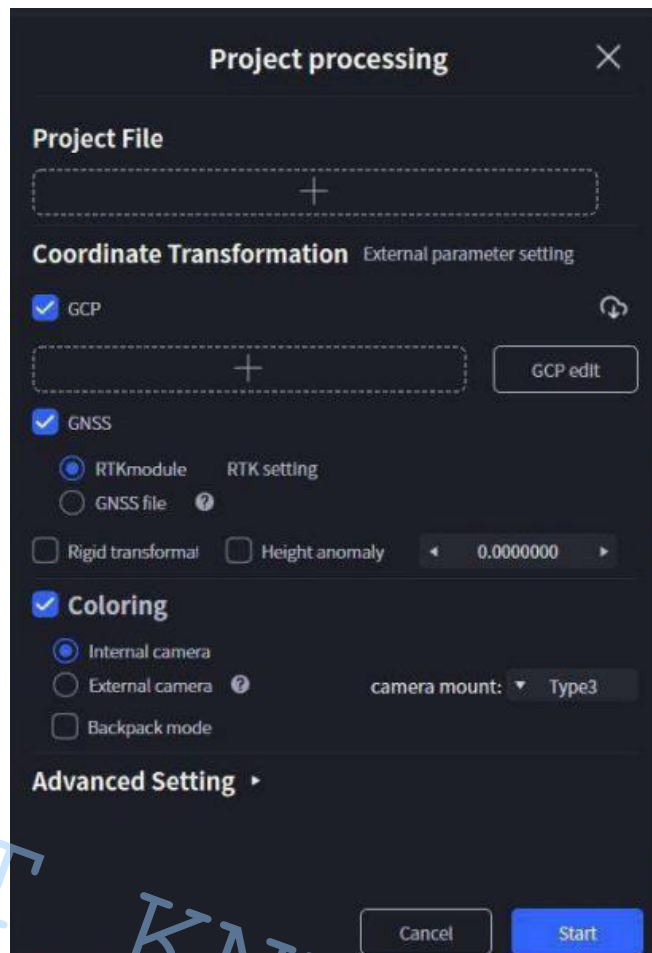
The 'Import GCP/trajectory' dialog box is open, showing the following table:

Label	X	Y	Z	Igno
1	539639.3805	3084835.988	41.9338	XYZ
2	539660.8685	3084791.93	42.6491	XYZ
3	539717.5585	3084753.28	43.6611	XYZ
4	539746.7359	3084780.228	42.3823	XYZ
5	539698.0038	3084737.309	43.3681	XYZ
6	539632.4948	3084796.862	42.0237	XYZ

Separator: \s    Skip lines: 0



Наступним етапом йде обробка проекту. Обробка проекту в основному включає в себе постобробку вихідних даних, отриманих за допомогою ручних сканерів XGIRDS. Модуль обробки проекту включає такі функції, як оптимізація SLAM-карти (наприклад, замикання контурів, динамічне видалення об'єктів), перетворення координат, розфарбовування хмари точок та інші, які в основному використовуються для вторинного уточнення після обробки відсканованих даних.



Розширені налаштування надають користувачам чотири параметри, пов'язані з відображенням SLAM: Динамічне видалення об'єктів, наскрізне замикання контуру, автоматичне завантаження хмари точок після обробки даних і надійний режим.

Для сканерів L2 ще є режим «Покращення хмари точок». Використання функції покращення хмари точок призводить до того, що дані хмари точок стають щільнішими та одноріднішими, але ефективність обробки проекту при цьому знижується. Наразі програма пропонує два режими покращення хмари точок:

1. 5 мм: Якщо цей параметр вибрано, відстань між точками в розширених даних хмари точок становитиме 5 мм.

2. 1 мм: Якщо цей параметр вибрано, відстань між точками в розширених даних хмари точок становитиме 1 мм

### Advanced Setting ▾

- Dynamic object removal
- Start-to-end loop closure
- Automatic importing point cloud after data processing ?
- Robust mode ?

Output path

Запускається прогрес у черзі завдань

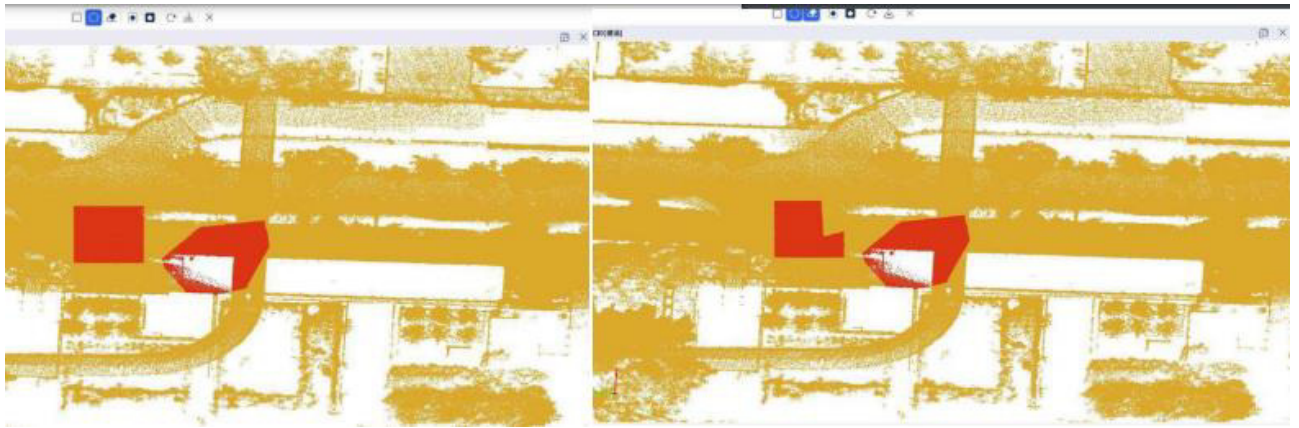
The screenshot shows a 'Progress' window with two sections: 'Running' and 'Completed'. The 'Running' section shows a task 'Project process' with 2% progress, a duration of 00:00:55, and a status of 'In the queue:2'. Below it are sub-tasks: SLAM mapping, Optimization, Filtering, Dynamic object removal, and Coloring. The 'Completed' section shows a task 'Project process' with 0% progress and a status of 'Number:0'.

Так як сканування було виконано однією місією, необхідності в зшиванні/злитті декількох хмар – немає.

Єдине, що було зроблено – це очищення від шумів, і інших заважаючих даних хмари.

Наявні звичайні функції виділення та вирізання, як і в більшості редакторів хмар точок.





### Accuracy checking report

Unit: meter

Point index	DX	DY	DS	DZ
10	-0.031	0.036	0.048	0.004
12	-0.007	0.005	0.009	0.006
13	-0.008	0.009	0.012	0.017
3	-0.026	-0.000	0.026	0.039
4	-0.028	0.007	0.029	0.041
6	-0.010	0.006	0.012	0.009
7	0.001	-0.006	0.006	0.019
9	-0.007	0.018	0.020	0.023

Min Ds: 0.006

Min elevation: 0.004

Max Ds: 0.048

Max elevation: 0.041

Avg Ds: 0.020

Avg elevation: 0.020

Error on plane: 0.024

Error on elevation: 0.024

Рис. 24 . Точність Slam сканера

В ході обробки сканів станцій ми отримали результат:

Найбільша точність зшивання сканів складає 0,004 м

Найменша точність зшивки сканів складає 0,041 м

Загальна похибка зшивання 0,020 м

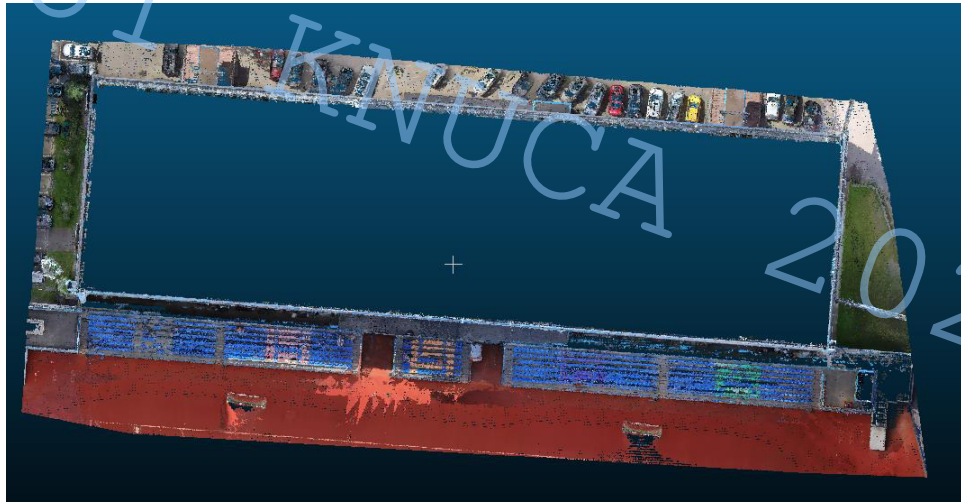
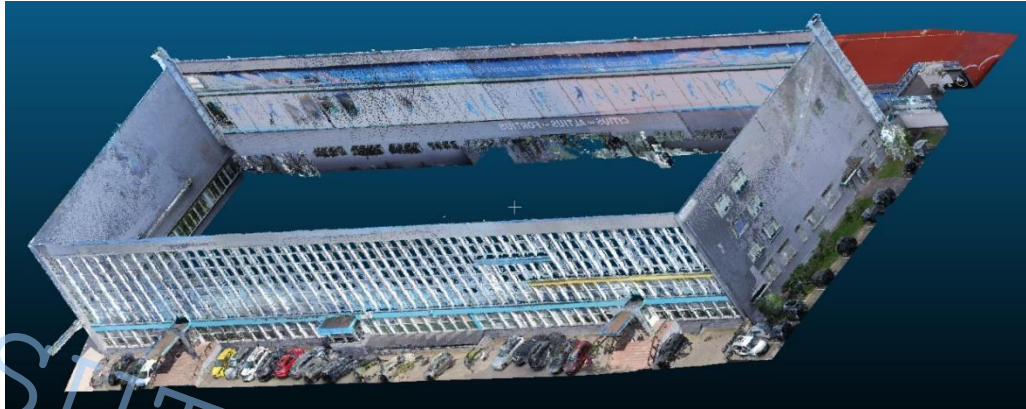


Рис.25. Хмара зроблена Slam сканером

Отже, НЛС демонструє втричі вищу точність порівняно з SLAM-скануванням, завдяки використанню стаціонарного обладнання з точними геодезичними налаштуваннями. Це робить його найбільш ефективним методом для створення детальних 3D-моделей об'єктів, особливо в умовах, де необхідна висока точність вимірювань, таких як обстеження будівель, архітектурних споруд чи складних інженерних конструкцій

## Розділ 5. Дослідження точності вимірних результатів

### 5.1. Порівняльна результатів лазерного сканування

Під час обробки було отримано дві хмари точок. Для оцінки їх якості буде проведено певний ряд порівнянь.

Порівняння координат точок на моделі.

Для цього необхідно розташувати координати характерних точок на моделі. Процес буде виконуватись за допомогою програмного забезпечення *Metashape*, де будуть додані маркери для точок.



Рисунок .26. Хмара з наземного лазерного сканера

Координати записані та розраховані в Таблиці Середня квадратична похибка дорівнює 0,01 м

Для розрахунку середньої квадратичної похибки точності моделі використано

формулу Гаусса 
$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}$$

$\Delta$  – Різниця відліків

$n$  – кількість вимірів

Таблиця.5. Розрахунок точності моделей за характерними точками

№ точки	Метод зйомки						Розрахунки									
	Каталожні значення			НЛС			$\Delta x$ , м	$\Delta x^2$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta y^2$ , м	$\Delta z$ , м	$\Delta z^2$ , м	m <sub>x</sub>	m <sub>y</sub>	m <sub>z</sub>	M
1	6333776,79	5588397,81	99,26	6333776,8	5588397,82	99,29	0,01	0,0001	-0,01	0,0001	-0,03	0,001	0,01	0,015		
2	6333786,75	5588399,85	108,26	6333786,7	5588399,88	108,24	0,06	0,0036	-0,03	0,00	0,02	0,000				
3	6333770,63	5588387,36	98,84	6333770,6	5588387,39	98,84	0,02	0,0004	-0,03	0,00	0,00	0,000				
4	6333800,29	5588393,33	99,21	6333800,3	5588393,35	99,24	0,01	0,0001	-0,02	0,00	-0,03	0,001				
5	6333758,76	5588373,29	98,89	6333758,8	5588373,29	98,87	0,01	0,0001	0,00	0,00	0,02	0,000				
6	6333718,4	5588364,92	99,02	6333718,4	5588364,91	99,02	0,00	0,0000	0,01	0,00	0,00	0,000				
7	6333687,53	5588358,16	98,98	6333687,5	5588358,13	98,95	0,01	0,0001	0,03	0,00	0,03	0,001				
8	6333655,42	5588351,18	98,82	6333655,4	5588351,15	98,8	0,01	0,0001	0,03	0,00	0,02	0,000				
9	6333655,73	5588372,35	103,15	6333655,8	5588372,38	103,13	-0,02	0,0004	-0,03	0,00	0,02	0,000				
10	6333658,87	5588372,97	103,12	6333658,9	5588372,98	103,11	-0,01	0,0001	-0,01	0,00	0,01	0,000				
ΔСереднє							0,01		0,01		0,006					
ΔСума								0,0050		0,0052		0,004				



Рисунок.27. Хмара з Slam сканера

Координати записані та розраховані в Таблиці Середня квадратична похибка дорівнює 0,03 м

Для розрахунку середньої квадратичної похибки точності моделі використано

формулу Гаусса 
$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}$$

$\Delta$  – Різниця відліків

n – кількість вимірів

Таблиця. 6. Розрахунок точності моделей за характерними точками

№ точки	Метод зйомки						Розрахунки									
	Каталожні значення			Slam сканування			$\Delta x$ , м	$\Delta x^2$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta y^2$ , м	$\Delta z$ , м	$\Delta z^2$ , м	mx	my	mz	M
1	6333776,79	5588397,81	99,26	6333776,8	5588397,84	99,29	0,03	0,0009	-0,03	0,0009	-0,03	0,0009	0,02			
2	6333786,75	5588399,85	108,26	6333786,7	5588399,88	108,23	0,03	0,0009	-0,03	0,0009	0,03	0,0009				
3	6333770,63	5588387,36	98,84	6333770,6	5588387,39	98,88	0,02	0,0004	-0,03	0,0009	-0,04	0,0016				
4	6333800,29	5588393,33	99,21	6333800,3	5588393,36	99,24	0,04	0,0016	-0,03	0,0009	-0,03	0,0009				
5	6333758,76	5588373,29	98,89	6333758,7	5588373,26	98,86	0,03	0,0009	0,03	0,0009	0,03	0,0009				
6	6333718,4	5588364,92	99,02	6333718,4	5588364,89	99,05	0,03	0,0009	0,03	0,0009	-0,03	0,0009				
7	6333687,53	5588358,16	98,98	6333687,5	5588358,13	98,95	0,03	0,0009	0,03	0,0009	0,03	0,0009				
8	6333655,42	5588351,18	98,82	6333655,5	5588351,14	98,79	-0,03	0,0009	0,04	0,0016	0,03	0,0009				
9	6333655,73	5588372,35	103,15	6333655,8	5588372,38	103,12	-0,03	0,0009	-0,03	0,0009	0,03	0,0009				
10	6333658,87	5588372,97	103,12	6333658,9	5588372,94	103,15	-0,03	0,0009	0,03	0,0009	-0,03	0,0009				
ΔСереднє							0,012		0,012		0,001					
ΔСума								0,0092		0,0097		0,0097				

## Аналіз точності довжин між контрольними точками на моделі

Для порівняння довжин були обрані характерні лінії Розрахунок та довжини показані в таблиці

Таблиця. 7. Розрахунок точності моделей за довжинами

Метод зйомки			Розрахунки
НЛС		Slam сканер	
№ лінії	Довжина, м	Довжина, м	Різниця
1	3,22	3,25	0,03
2	3,98	4,00	0,02
3	5,61	5,63	0,02
4	7,31	7,28	0,03
5	7,37	7,35	0,02
6	7,38	7,37	0,01
7	10,84	10,80	0,04
8	13,60	13,60	0,00
9	41,03	41,00	0,03
10	61,80	61,77	0,03

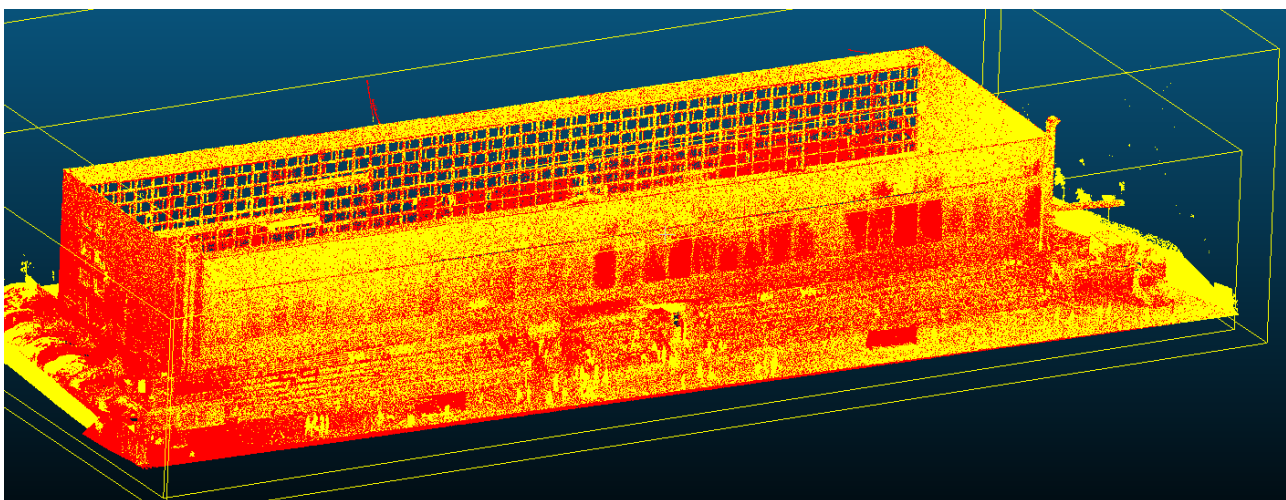
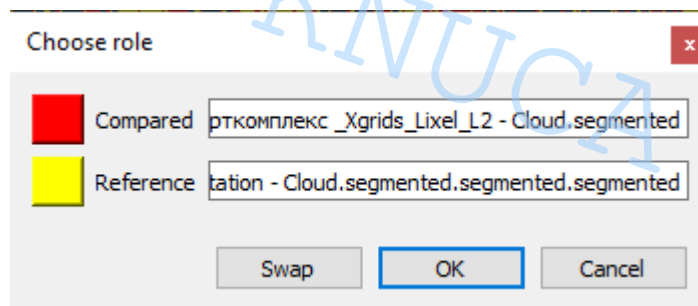
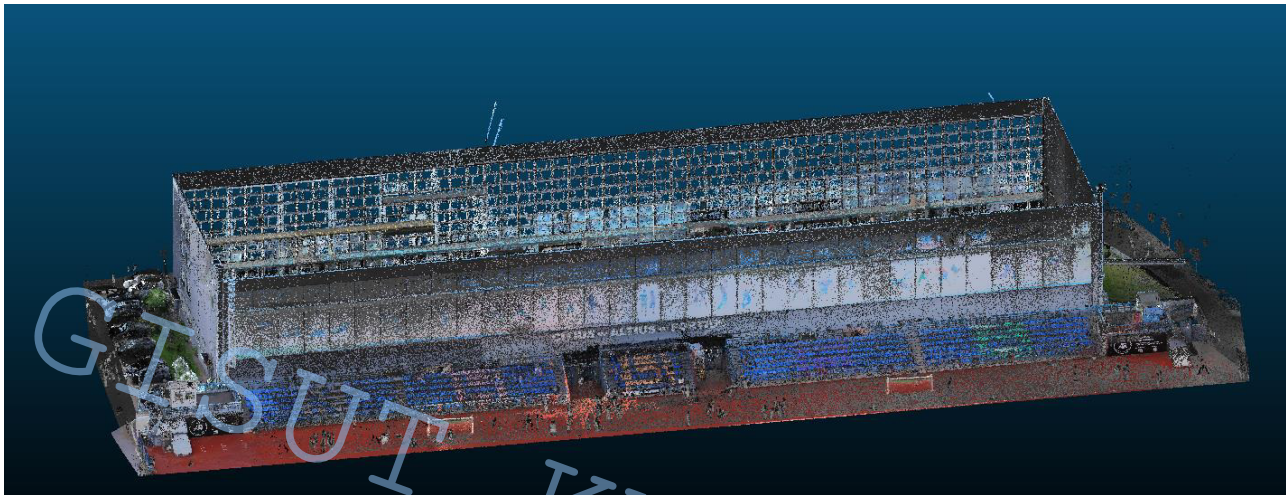
За результатами розрахунків були визначенні:

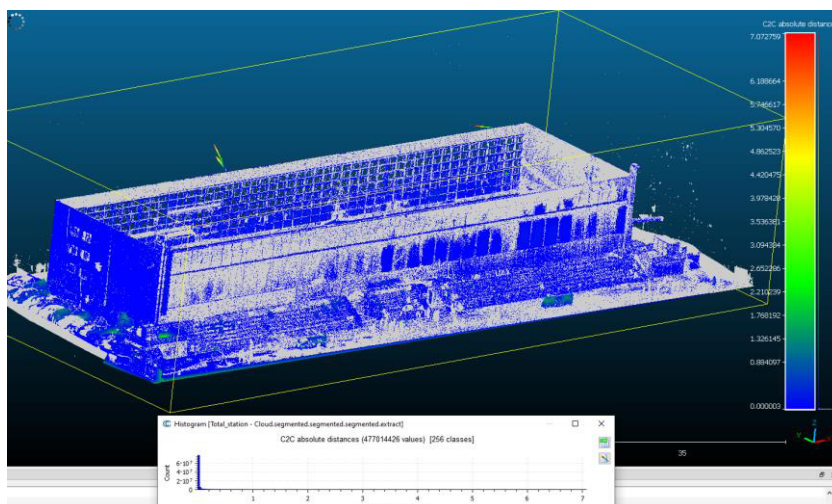
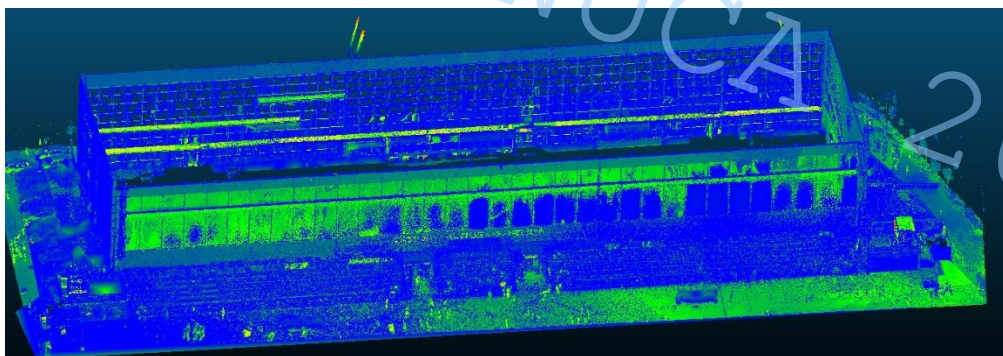
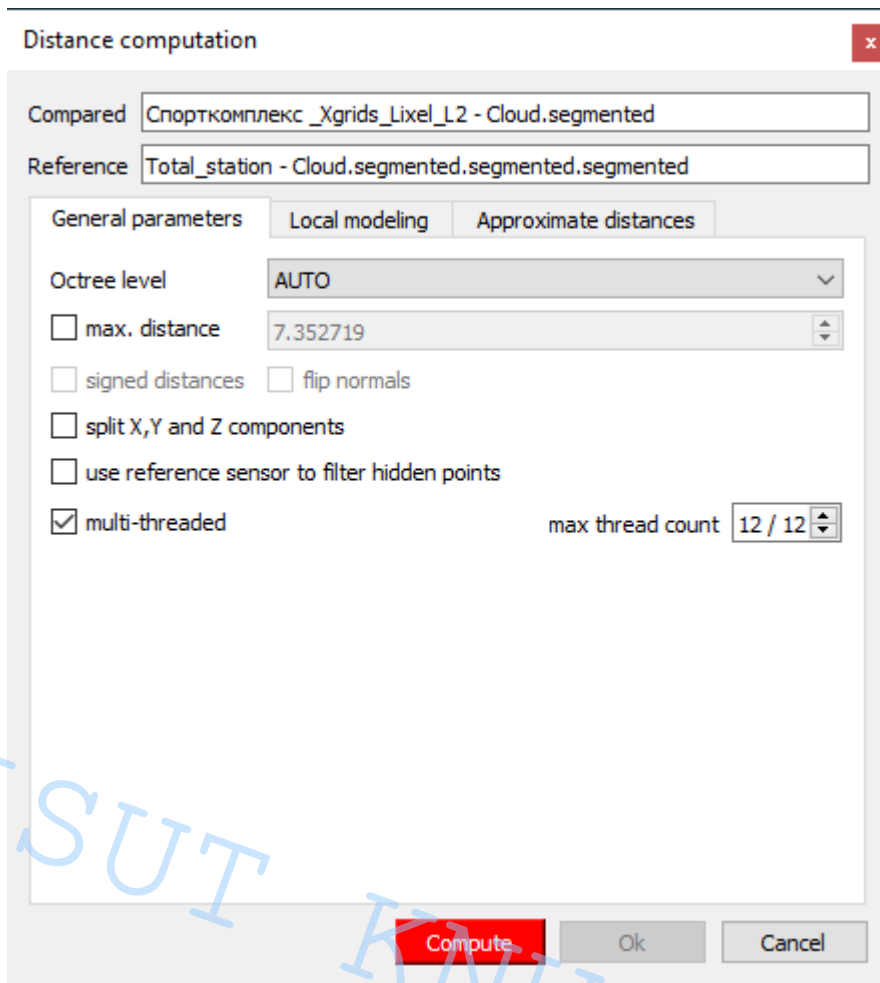
- Найбільша різниця довжин – 0,04 м
- Найменша різниця довжин – 0 м
- Середня різниця довжин – 0,025 м

Найменша різниця довжин – це ширина комплексу, та довжина яку найлегше позначити на моделі, що дає привід вважати інші похибки – людським фактором при вимірі довжин.

## Порівняння дистанцій між точками в хмарах точок

Для порівняння дистанцій між точками в хмарах точок використовували програмне забезпечення CloudCompare. За результатами побудови в минулому розділі ми отримали дві хмари точок. Одна була дана як вихідні дані – хмара точок з наземного лазерного сканера, друга було зроблена Slam сканером, саме їх ми і будемо порівнювати.





## 5.2. Переваги та недоліки

Для виконання цієї роботи були отримані дані лазерного сканування, виконані за допомогою наземного лазерного сканера та SLAM-сканера.

Аналіз отриманих даних показав, що точність зйомки за допомогою SLAM-сканера досить близька до результатів, отриманих за допомогою наземного лазерного сканера. На основі порівняння можна виділити такі переваги та недоліки кожного з пристроїв:

Характеристики	Slam сканер	Наземний лазерний сканер
Швидкість	+	-
Точність	-	+
Компактність	+	-
Функціональність	+	+

### **Швидкість:**

SLAM-сканер швидко створює хмару точок, що є значною перевагою порівняно з наземним лазерним скануванням.

### **Точність:**

Під час аналізу було встановлено, що координати, отримані за допомогою SLAM-сканера, відрізняються результатом, отриманим із наземного лазерного сканера. Результат стаціонарного сканування має вищу точність ніж SLAM технологія

### **Компактність:**

Для роботи з SLAM-сканером достатньо мати невеликий кейс, що робить його мобільнішим. Натомість для роботи з наземним лазерним сканером необхідне встановлення на штатив.

## ВИСНОВОК

У цій дипломній роботі проаналізовано геодезичні дослідження для порівняння двох типів сканерів.

На основі отриманих результатів встановлено, що метод наземного лазерного сканування є найефективнішим при обстеженні об'єктів спортивної архітектури завдяки високій точності, швидкості та економічності.

Підготовчі етапи, зокрема створення опорних геодезичних мереж та розрахунок рівнів точності, є стандартними методами в геодезії. У процесі дослідження були дотримані всі вимоги відповідно до чинних нормативно-правових документів.

Результат сканування представлений у вигляді «хмари точок» — цифрових даних про об'єкт, що використовуються для порівняння методів у подальших дослідженнях.

Інформаційна модель будівлі є тривимірним цифровим відображенням, що містить дані про форми, розміри, матеріали та інші деталі конструкції, дозволяючи зберігати повну інформацію про об'єкт для майбутнього використання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. «Наземне лазерне сканування» - [https://wikipedia.org/wiki/Наземное\\_лазерное\\_сканирование](https://wikipedia.org/wiki/Наземное_лазерное_сканирование)
2. Wassim Moussa(2010). Digital Preservation of the Hirsau Abbey by Means of Static LiDAR & HD Close-Range Photogrammetry
3. Tomislav Medic, Christoph Holst and Heiner Kuhlman(2017). Towards System Calibration of Panoramic LaserScanners from a Single Station - <https://doi.org/10.3390/s17051145>
4. Stanþiü, B., Roiü, M., Maÿer, M. and Vidovü, A.(2014). Building Information Management based on Total Station Measurements and Laser Scanning
5. "Дослідження точності хмари точок методом наземного лазерного сканування" / Володимир Глотов, Х. Марусаж // Випуск 90, 2019, Номер 90: 41-49 - <https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.90.041>
6. ДБН В.1.3-2:2010 Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві. Зі Зміною № 1
7. ДБН В.1.3-2:2010 "Геодезичні роботи у будівництві"
8. «Інженерна геодезія» : навч. посіб. [Електронне видання] / Бачишин Б.Д. – Рівне : НУВГП, 2020. – 196 с. ISBN 978-966-327-480-5
9. «Інженерна геодезія»: Монографія / П.І. Баран. - К.: ПАТ "ВІПОЛ", 2012. - 618 с. ISBN 978-966-646-125-7
- 10.«FARO Laser Scanner Focus3D Users Manual» - <https://www.faro.com/en/Support-Overview/Technical-Documentation>
11. «Leica FlexLine plus User Manual» - <https://leica-geosystems.com>