

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Козакевич Дмитро Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оцінка точності GNSS-позиціонування смарт-пристроїв на основі фазових
спостережень

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня

Д.В. Козакевич

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Ковтун Віталій Миронович ст.викладач

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Козакевич Дмитро Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Оцінка точності GNSS-позиціонування смарт-пристроїв на основі фазових спостережень»

керівник роботи: _____

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

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

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

1. Теоретичні основи GNSS-позиціонування та можливості його застосування на смарт-пристроях
2. Проведення дослідження
3. Отримані результати

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Теоретичні основи GNSS- позиціонування та можливості його застосування на смарт-пристроях		
2	2. Проведення дослідження		
3	3. Отримані результати		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент _____ Козакевич Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

У бакалаврській роботі зосереджено увагу на проблематиці визначення стійкості метричних характеристик систем наземного лазерного сканування, які використовуються в Україні для проведення високоточних геодезичних та картографічних завдань.

Здійснено розгляд ключових чинників, що визначають точність та незмінність даних лазерного сканування, а саме: коливань температури, недоліків калібрувальних процедур, умов експлуатації апаратури та впливу зовнішніх факторів середовища.

Вивчено засади роботи нинішніх наземних лазерних сканерів, а також підходи до перевірки їхніх геометричних властивостей.

Суттєво зосереджено увагу на визначенні сталості параметрів сканування під час повторних замірів об'єктів у різних середовищах. Здійснено розбір точності згенерованих тривимірних відомостей та ідентифіковано головні чинники системних і стохастичних неточностей.

У межах проведеного аналізу викладено методики, спрямовані на збільшення стійкості та зворотності наземної лазерної акроскопії при здійсненні геодезичних завдань та наглядових операцій у межах теренів України.

Знайдені висновки стануть у пригоді для просування методів тривимірного конструювання, спостереження за технічними конструкціями, формування електронних планів місцевості та верифікації змін у стані споруд.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, лазерний сканер, геометричні параметри, 3D-моделювання, геодезичний моніторинг, калібрування сканерів, просторові дані.

Abstract

The bachelor's thesis focuses on the problem of determining the stability of metric characteristics of terrestrial laser scanning systems used in Ukraine for high-precision geodetic and cartographic tasks.

The key factors that determine the accuracy and immutability of laser scanning data are considered, namely: temperature fluctuations, shortcomings in calibration procedures, equipment operating conditions and the influence of external environmental factors.

The principles of operation of current terrestrial laser scanners are studied, as well as approaches to verifying their geometric properties.

Significant attention is focused on determining the stability of scanning parameters during repeated measurements of objects in different environments.

The accuracy of the generated three-dimensional information is analyzed and the main factors of systemic and stochastic inaccuracies are identified.

Within the framework of the analysis, methods are outlined aimed at increasing the stability and reversibility of terrestrial laser acroscopy when performing geodetic tasks and surveillance operations within the territories of Ukraine.

The findings will be useful for advancing three-dimensional design methods, monitoring technical structures, generating electronic terrain maps, and verifying changes in the condition of structures.

Keywords: terrestrial laser scanning, laser scanner, geometric parameters, 3D modeling, geodetic monitoring, scanner calibration, spatial data.

ЗМІСТ

Вступ

1 Досліджувані наземні лазерні сканери

2. Випробування геометричної точності в лабораторії

2.1 3D-тестове поле

2.2 Дослідження на стенді

2.3 Вимірювання на площині

3. Процедура польових випробувань

Висновок

Список використаної літератури

Вступ

Наземне лазерне сканування (TLS) вже понад п'ятнадцять років поспіль знайшло широке застосування у професійній геодезичній сфері. Нинішні апарати, доступні на ринку, належать до четвертої генерації сканувальних пристроїв, демонструючи виняткову точність, подальше значне підвищення якої видається малоймовірним.

Тим не менш, задекларовані виробниками метрологічні параметри вимагають постійної верифікації та моніторингу, аби гарантувати надійність і незмінність даних, отриманих під час роботи з апаратурою.

Поточний прогрес у сферах геодезії, картування, зведення споруд та планування територій неможливо уявити без інтеграції високоточних цифрових способів отримання геопросторової інформації.

Серед цих новаторських та ефективних інструментів ключову роль відіграє наземне лазерне сканування, яке дає змогу швидко збирати обсяги координатної інформації з винятковою мірою точності та деталізації.

Блоки наземного лазерного сканування активно використовуються для створення об'ємних моделей будівель і споруд, контролю за станом критичної інфраструктури, документування геометричних трансформацій, реставрації пам'яток архітектури, а також проведення топографічних та інженерно-геодезичних вишукувань.

Беручи до уваги прогрес цифровізації в Україні та зростання потреби у створенні надійних геопросторових моделей, критично важливим постає питання забезпечення стабільності геометричних параметрів апаратури наземного лазерного сканування.

Якість зібраної просторової інформації, а відповідно, і достовірність результатів наступного опрацювання та аналізу цих відомостей, прямо корелює з точністю й незмінністю роботи лазерного сканера.

Навіть незначні зміщення у просторовому розташуванні апаратури можуть призвести до утворення постійних помилок, спотворення моделей та зниження метрологічної точності.

Збереження незмінності розмірностей у лазерних сканерах залежить від цілої низки чинників.

Серед них ключовими є аспекти конструкції апаратури, ступінь її юстування, вплив температурних режимів, умови, у яких пристрій використовується, наявність вібраційних навантажень, час безперервної роботи комплексу, а також зовнішні чинники довкілля.

Під час тривалого використання навіть найсучасніші сканери високої точності можуть продемонструвати зсуви у параметрах їхнього позиціонування, а також похибки у вимірюванні як відстаней, так і кутів, що, своєю чергою, безпосередньо позначиться на якості фінальних даних.

Надзвичайно значущим є вивчення стійкості розмірів у царині геодезичного нагляду за спорудами, шляховою мережею, виробничими комплексами та природними явищами, адже тут критично необхідне високоточне багаторазове вимірювання.

Щодо українських теренів, ця проблематика набуває особливої ваги паралельно з відбудовою інфраструктурних об'єктів, виконанням геодезичних робіт та формуванням актуальних цифрових планів ландшафту.

Завданням цього дослідження є з'ясування стійкості габаритних характеристик систем наземного лазерного сканування та виявлення ключових чинників, котрі зумовлюють достовірність фінальних даних сканування.

Щоб реалізувати окреслену мету, планується здійснити огляд актуальних методик наземного лазерного сканування, вивчити першоджерела систематичних та випадкових похибок вимірювань, проаналізувати, як середовище експлуатації відбивається на сталості

характеристик сканера, а також обґрунтувати дієві стратегії для верифікації точності згенерованих тривимірних даних.

Наземні лазерні скануючі системи, що застосовуються у геодезичних вимірюваннях, становлять собою предмет вивчення.

Конкретно ж увага зосереджена на таких аспектах, як визначення геометричних характеристик лазерних сканерів та стійкість їхніх показників за різних умов використання.

Отримані висновки мають вагоме практичне застосування, оскільки вони дають змогу покращити точність і загальну достовірність геодезичних операцій, виконаних із використанням наземного лазерного сканування.

Крім того, це сприятиме вдосконаленню методів перевірки (контролю) параметрів самих сканувальних пристроїв, а також розширенню сфери застосування технологій тривимірного моделювання та просторового аналізу на території України.

1 Досліджувані наземні лазерні сканери

З метою здійснення замірів у лабораторних умовах та різноманітних натурних польових дослідженнях було задіяно низку передових, високоточних систем лазерного сканування наземного базування.

Ці пристрої активно впроваджуються у таких галузях, як інженерна топографія, формування тривимірних моделей та стеження за станом різноманітних структур.

До числа апаратури, що була залучена до огляду та тестування, увійшли сканери Leica BLK360, Leica RTC360, а також Faro Focus3D X330 (як це демонструє Малюнок 1).



Рис. 1 Досліджені наземні лазерні сканери

Вибране апаратне обладнання належить до останнього покоління пристроїв для лазерного сканування з землі, вирізняючись вражаючою швидкістю збору тривимірної інформації, високою насиченістю точкових кластерів та покращеною мірою достовірності отриманих вимірів.

Кожна із наявних установок має унікальні технічні специфіки, що відкриває шлях для зіставлення стійкості їхніх геометричних характеристик у різноманітних робочих сценаріях та режимах функціонування.

У процесі вивчення акцент було зроблено на визначенні достовірності координатних значень точок, сталості кутових та просторових вимірювань, а також на тому, як зовнішнє середовище позначається на підсумках сканування.

Залучення різноманітних модифікацій лазерних сканерів дозволило провести комплексний розгляд особливостей роботи актуальних TLS-комплексів та зробити висновок щодо їхньої спроможності для виконання геодезичних операцій високої точності на території нашої держави.

Серед апаратури наземного лазерного сканування, що викликала значний інтерес, виділяються такі зразки, як Leica BLK360, Leica RTC360 та Faro Focus3D X330.

Ці сканери належать до класу сучасного TLS-обладнання, ключовою рисою якого є надзвичайна швидкість збору тривимірних даних, що водночас гарантує достатню ступінь точності, критичну як для геодезичних робіт у сфері інженерії, так і для задач, пов'язаних із контролем змін.

Прилад Leica RTC360 демонструє вражаючу точність у вимірюванні як дистанцій, так і кутів, що робить його ідеальним інструментом для створення деталізованих 3D-моделей та високоточних геодезичних зйомок.

Ця апаратура поєднує у собі подвійний підхід до вимірювання: використовуючи метод фазової інтерферометрії для розрахунку відстані та технологію імпульсного лазерного вимірювання часу прольоту.

Такий комплексний підхід забезпечує високу швидкість сканування, водночас зберігаючи бездоганну якість зібраної інформації.

Сканер Faro Focus3D X330, котрий належить до сімейства високоточних наземних лазерних систем, використовує технологію фазового вимірювання.

Завдяки цьому інструменту є можливість захоплювати щільні поля точок навіть на значних відстанях, знаходячи широке застосування у галузях архітектурної геодезії, інспектування промислових об'єктів, а також для створення віртуальних моделей дещо заплутаних за формою структур.

Leica BLK360 являє собою легку та портативну установку для лазерного сканування, розроблену для оперативного збору даних безпосередньо на об'єкті.

Хоча він менший за розмірами та має простішу конфігурацію, ніж повноцінні високоточні сканери TLS, його точність цілком задовольняє потреби широкого кола застосувань у топографії, архітектурно-будівельній галузі та 3D-копіюванні.

Вбудовані елементи, такі як цифрові фотоапарати, вимірювачі крену та механізми автоматичного налаштування положення, сприяють підвищенню продуктивності цих скануючих пристроїв, дозволяючи вдосконалити етапи накопичення та подальшої комп'ютерної обробки отриманих просторових даних.

Ключові технічні параметри розглянутих лазерних сканерів представлені у Таблиці 1.

Таблиця 1 Технічні характеристики протестованих лазерних сканерів

Характеристика	Leica BLK360	Leica RTC360	Faro Focus3D X330
Метод вимірювання	ToF із WFD	ToF та фазовий метод	Фазовий метод
Поле огляду Н/В (°)	360/300	360/300	360/300
Дальність сканування (м)	0,6–60	0,5–130	0,6–330

Швидкість вимірювання (точок/с)	360 000	< 2 000 000	< 1 000 000
Кутова точність Н/V (°)	Немає даних	0,005	0,009/0,009
Точність вимірювання відстані	4 мм на 10 м	1 мм + 10 ppm	2 мм + 0,3 мм на 25 м
Роздільна здатність сканування	3 режими вибору роздільної здатності	3 режими вибору роздільної здатності, 3/6/12 мм на 10 м	1/1–1/32, 1,5–49 мм на 10 м
Шум вимірювання відстані	0,3–0,5 мм на 10 м	0,4 мм на 10 м	0,3 мм на 10 м
Точність 3D-точок	6 мм на 10 м	5,3 мм на 40 м	Немає даних
Камера	Інтегрована	Інтегрована	Інтегрована
Датчик нахилу	Немає даних	Візуальна інерціальна система	Двовісний компенсатор
Габарити (Ш × Г × В), мм	165 × 100 (Н/D)	120 × 240 × 230	240 × 200 × 100
Маса з акумулятором (кг)	1,0	6,0	5,2
Рік виходу на ринок	2017	2018	2013

2. Випробування геометричної точності в лабораторії

2.1 3D-тестове поле

Територія, обрана для проведення тестування, була розташована всередині геодезичної лабораторії.

Основне завдання полягало у виконанні калібрувальних вимірювань та остаточному доведенні незмінності експлуатаційних властивостей сканерів лазерного типу, що працюють із наземними об'єктами.

Дана локація відрізняється обмеженим простором і охоплює виключно один поверх споруди.

Проте, завдяки значній довжині приміщень лабораторії, було досягнуто можливості здійснювати промірювання на лініях завдовжки, що сягають тридцяти п'яти метрів, таким чином надавши змогу оцінити роботу сканерів у широкому діапазоні кутів огляду.

Структура полігону для проведення експериментів включала двадцять маркованих мішеней — чорно-білих орієнтирів, які були розміщені з рівномірним кроком уздовж поверхонь стін і стелі лабораторного приміщення (рис. 2).

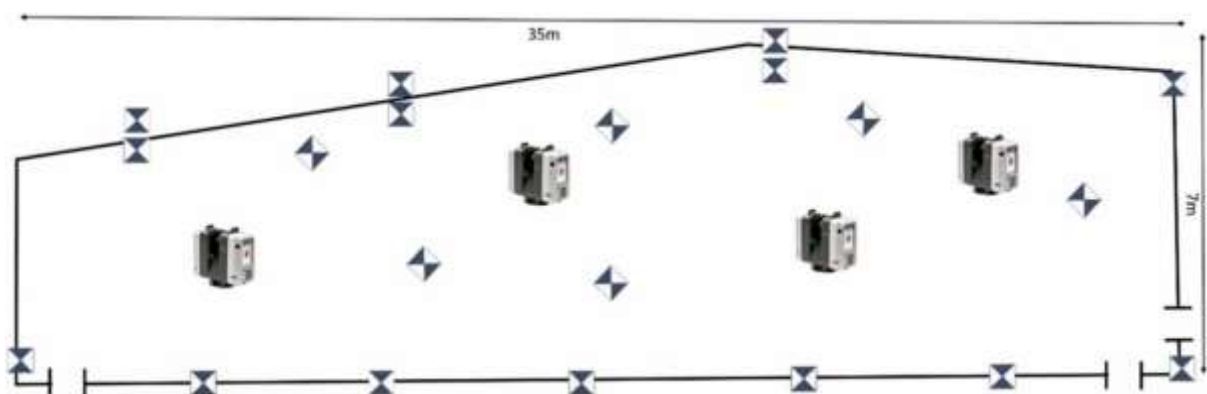


Рисунок 2 Схема 3D-тестового поля, з розподілом чорно-білих мішеней та розташування сканера

Така розстановка давала змогу досягти найкращого охоплення території та уможливлювала виконання численних, дуже точних знімків.

Кожен еталон було спеціально обладнано для монтажу кутового дзеркального відбивача, що слугував для референсних вимірів лазерним трекером.

Використання такої схеми випробувального майданчика сприяло покращенню точності перевірочних замірів, зменшенню впливу сторонніх чинників і гарантуванню стабільного зіставлення даних, здобутих різними типами наземного лазерного сканера.

З метою апробації наземних лазерних скануючих апаратів застосовувалися специфічні контрастні цілі. Завдяки цьому вдалося сформувати незмінну систему реперних точок та гарантувати відтворюваність отриманих даних упродовж здійснення дослідів.

Аналіз, проведений на спеціалізованому тривимірному полігоні, надав змогу визначити сумарний ефект різнорідних складових хибності лазерного сканера.

У процесі такого тестування не є реальним відокремити вплив кожного окремого чинника помилки, адже на фінальний результат впливають не лише коректність вимірювання дистанцій та кутів скануючим пристроєм, а й методики комп'ютерної обробки для автоматичного виявлення центрів мішеней.

Виходячи з вищевикладеного, для виконання аналізу застосовувався програмний комплекс, що має пряме підключення до задіяних моделей сканерів.

Завдяки такій методології стало можливим провести ґрунтовну експертизу функціонування системи, охоплюючи як технічні компоненти, так і програмне забезпечення.

Усі сканери, що брали участь у випробуваннях, а саме Leica BLK360, Leica RTC360 та Faro Focus3D X330, виконували збір даних на полігоні, працюючи з чотирьох фіксованих позицій.

Стосовно апарату Faro Focus3D X330, було встановлено ступінь деталізації, що відповідає показнику 1/5, що приблизно дає похибку 7,7 мм на дистанції у десять метрів, при цьому якість сканування була встановлена на рівні 3×.

Максимальні можливі параметри роздільної здатності сканування, що застосовувалися для апаратів Leica RTC360 та Leica BLK360, становили 3 мм на відстані 10 метрів та 5 мм на 10 метрів відповідно.

З огляду на конфігурацію випробувального майданчика та часткове затемнення елементів, не всі реперні точки були доступні для огляду в рамках будь-якого конкретного сканування.

Зазвичай, в межах одного сеансу сканування фіксувалася присутність від 16 до 18 таких контрольних маркерів.

Для забезпечення високої точності базисних координат задіювався лазерний трекер Leica Absolute Tracker AT960.

Вимірювання кожної цілі проводилося із трьох різних позицій спостереження, після чого отримані значення зводилися до спільної системи координат та піддавалися процедурі усереднення.

Згідно з даними, наданими виробником обладнання, кутова роздільна здатність лазерного трекера Leica AT960 оцінюється у межах ± 15 мікрометрів плюс 6 мікрометрів на кожен метр вимірювання, тоді як похибка визначення відстані не перевищує 10 мкм.

Завдяки цим показникам стало можливим отримати контрольну геодезичну прив'язку з помітно вищою точністю, аніж ту, що була досягнута за допомогою методів лазерного сканування.

Це, своєю чергою, дало змогу адекватно зіставити просторові інтервали та провести валідацію стійкості функціонування систем сканування.

Наступний етап опрацювання здобутих відомостей, який охоплював й автоматичне знаходження контрольних точок, був реалізований за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення від виробників: LaserControl, Leica Cyclone Register 360, а також Faro Scene.

У тих програмах, що були розроблені для обладнання від Faro, процес визначення маркерів переважно відбувався без втручання користувача, тоді як для даних, отриманих з використанням апарату Leica RTC360, частину реперних знаків довелося коригувати власноруч.

Для опрацювання відомостей, здобутих завдяки скануванню апаратом Leica BLK360, було задіяно спеціалізований софт ReCap Pro від Autodesk, який входив до комплекту постачання цього сканувального обладнання.

Завдяки застосуванню інтегрованої функції визначення місцезнаходження референційних маркерів, здійснювалася високоточна ідентифікація їхніх центрів на кожній точці фіксації даних.

При тому, що на отриманих зображеннях зазвичай реєструвалося до вісімнадцяти таких маркерів, автоматична процедура спромоглася виявити лише між одинадцятьма та тринадцятьма мішенями у межах кожної знімкової позиції.

Основними причинами, які зумовили цю невідповідність, виявилися як технічні обмеження, притаманні рівню деталізації сканування, так і значна віддаленість окремих елементів досліджуваного полігону від самого обладнання.

Розрахунки відстаней, зроблені на основі координат центрів, порівнювалися з просторовими дистанціями, встановленими під час еталонних вимірювань.

Далі проводили дослідження розбіжностей між отриманими розрахунковими та еталонними показниками, а підсумки цього зіставлення представляли у вигляді частотного розподілу на гістограмі (рис. 3).

Це дозволило зробити візуальну оцінку властивостей розподілу помилок та визначити ступінь точності виконаних обчислювальних операцій.

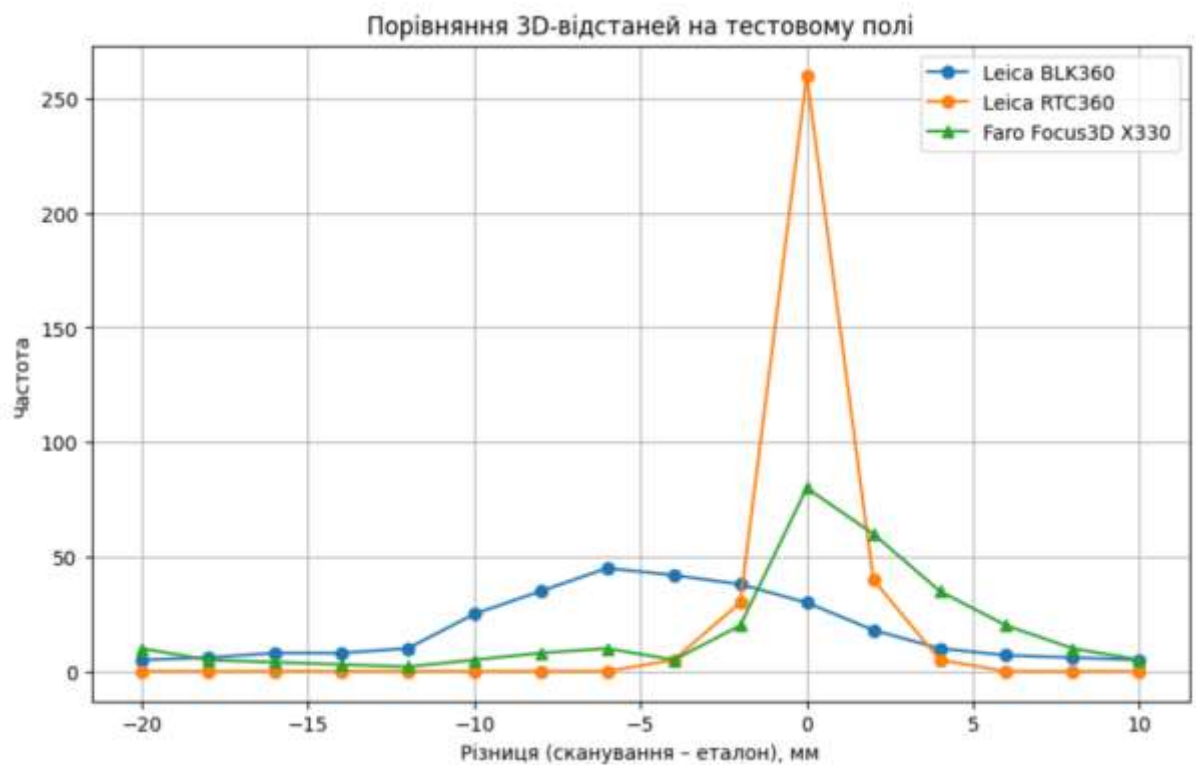


Рисунок 3 Результати порівняння просторових відстаней у тестовому полі

Щодо обох типів сканувальних апаратів від Leica Geosystems, найбільші відхилення, які спостерігалися, знаходились у межах від нуля до позитивних 0,5 міліметра.

При цьому спосіб розподілу цих фіксованих величин виявився майже бездоганним і практично однаковий, демонструючи нормальну форму.

Сукупний розмах помилок, котрий обраховувався як додаток модулів найбільших від’ємних та додатних неточностей, склав, відповідно, 3,9 мм та 3,8 мм.

Однак, апарат серії Faro Focus від FARO Technologies отримав для себе значно більшу толерантність — а саме, близько 8,0 мм, що фактично вдвічі перевищує значення, зафіксоване для приладів Leica.

Зроблений аналіз зібраних даних свідчить про те, що просторові координати, визначені за допомогою Faro Focus та Leica BLK360, виявляють нижчий рівень точності на випробувальному 3D полігоні, коли зіставляти їх із результатами інших сканерів, які також брали участь у тестуванні.

Цей же напрямок доводить і розгляд просторових похибок у межах граничних значень ± 1 мм.

Конкретно, якщо йдеться про прилад RTC360, то 77,6 відсотка вимірів мали помилку, що не перевищувала зазначеної позначки ± 1 мм.

Натомість, для апарату Faro Focus цей відсоток склав лише 40,5%.

Найменш вдалі показники зафіксовано у моделі Leica BLK360, де лише 21,2% усіх зареєстрованих даних потрапили у вказаний діапазон точності (таблиця 2).

Таблиця 2 Результати порівняння просторових відстаней

Показник	Faro Focus	RTC360	BLK360
Кількість відстаней	30	66	26
Мінімальне відхилення (мм)	-33.4	-4.5	-26.5
Максимальне відхилення (мм)	23.9	3.5	9.8
Діапазон (мм)	57.3	8.0	36.3
Середнє значення (мм)	-0.6	-0.3	-0.5
Середньоквадратичне відхилення (мм)	4.0	0.8	4.2
S ³ D мм (%)	40.5	77.6	21.2

Усереднений показник, отриманий з різниці між відсканованими та еталонними дистанціями, свідчить про ледь помітне систематичне зсув у вимірах для кожного апарату (окрім BLK360, де ця похибка становить 5,0 мм) у межах випробуваного діапазону еталонних проміжків.

Референтні відстані охоплюють інтервал від 1,8 м до 35,9 м (це найменша та найбільша дистанції у тривимірному просторі).

В середньому, лазерні далекоміри дають показники на 0,3 мм більше та на -0,6 мм менше, при цьому апарат BLK360 демонструє чіткий систематичний збій, фіксуючи відстані у середньому на 5 мм коротшими.

2.2 Дослідження на стенді

Вивчення правильності визначення проміжків, використовуючи наземні лазерні сканувальні апарати, здійснювалося на спеціально обладнаному тестовому полігоні, що знаходився у приміщенні геодезичного полігону.

Стійка цього полігону уможливлювала проведення замірів на віддаль аж до 20 метрів: відстані, з одного боку, фіксувалися лазерним сканером, а з іншого — надточною апаратурою вимірювання, базованою на електронному теодоліті Leica TS60.

З метою здійснення контрольних замірів застосовували чорно-білу мішень, розміщену разом із кутовим відбивачем (КВ).

Подібне компонування дало можливість проводити еталонні проміри на проміжках від 1 до 20 метрів, із кроком у 1 метр.

Добуті дані слугували для визначення хибності вимірювання дальностей за допомогою різноманітних наземних лазерних сканувальних установок.

План експериментального обладнання, розробленого для валідації точності визначення відстані, відображено на рис. 4.

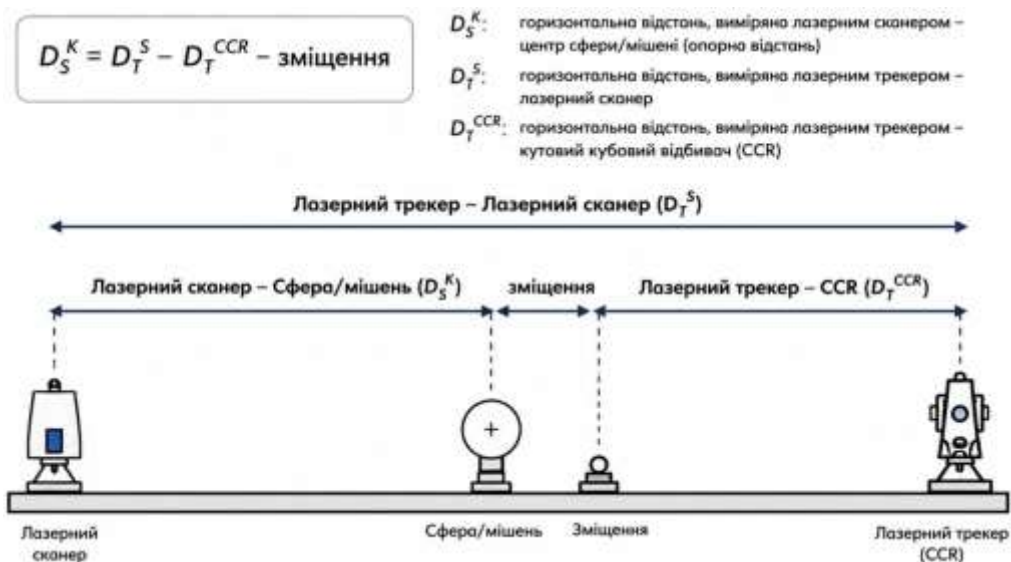


Рисунок 4. Вимірювальна установка 20-метрової доріжки

Для визначення просторового розташування лазерного сканера була використана система координат лазерного трекера, що дало змогу розрахувати дистанцію, яка існує між трекером та апаратурою сканування.

Контроль якості цих вимірювань здійснювався шляхом їх повторення двічі: один раз — як прелюдія до початку сканування об'єктів (мішеней і сфер), і другий раз — після того, як сканування було повністю виконано.

Похибку, що існувала між сферою чи мішенню та кутовим кубічним відбивачем (CCR), з'ясовували на практиці, окремо фіксуючи розташування як сфери, так і самого відбивача.

У процесі обчислень брали до уваги й особливості геометрії деталей: товщина мішені становила 2,03 міліметра, а радіус кутового відбивача досягав 19,05 міліметра.

Ці виміряні значення потім додавали до вже розрахованої різниці у положеннях.

Зрештою, було визначено, що проміжок між центром сфери та кутовим відбивачем складає 300,21 мм, а відстань від відбивача до мішені зафіксовано на рівні 129,06 мм.

Щодо кожного апарату для сканування, який підлягав випробуванню, на вимірjuвальній лінії проводилося по два незалежних проходження сканування: перше стосовно тестового об'єкта, друге — стосовно сферичного репера.

Початкову серію замірів виконували на відстані 1000 мм від позиції сканера, після чого процедуру сканування повторювали, збільшуючи дистанцію на один метр на кожному наступному кроці, аж до досягнення 20 метрів.

Для апарату Faro Focus застосовувалася ступінь деталізації 1/5 з параметром якості 3×, що приблизно еквівалентно 7,7 мм на десятиметровій відстані.

Для версій BLK360 та RTC360 були встановлені граничні параметри точності: для першого — 5 мм на 10 м, а для другого — 3 мм на 10 м.

У роботі сканер Faro Focus охоплював лише незначну частку об'єкта сканування, тоді як апарати Leica вимагали повного охоплення панорами, оскільки не мали функції поблокового збору інформації.

При цьому, завдяки значній швидкодії приладів Leica, загальний час, витрачений на заміри в полі, не збільшився критично, незважаючи на суттєве зростання обсягу зібраних даних.

Зі свого боку, цей надлишок інформації спричинив необхідність приділяти більше часу етапу подальшої комп'ютерної обробки отриманих результатів.

Щодо всіх сканів, здійснених апаратом BLK360, як мішені, так і сфери були піддані обробці у програмному забезпеченні Autodesk ReCap Pro.

При цьому точне ідентифікування мішеней було можливим лише на дистанціях, що не перевищували 15 метрів, тоді як для сфер цей ліміт сягав 18 метрів.

Причиною цього є зниження щільності та роздільної здатності хмар точок, які фіксувалися на більших відстанях.

Додатково слід зазначити, що закріплення сфери не вдалося виконати на найменшій дистанції у 1 метр, що, ймовірно, пов'язано із занадто близьким розміщенням об'єкта відносно сканера.

Як це впливає з технічних даних, наданих виробником, гранична похибка визначення відстані для моделі BLK360 заявлена як 4 мм на кожні 10 метрів або 7 мм на 20 метрах.

З огляду на це, логічно було припустити, що результати, отримані під час вимірювання цілей, здебільшого вкладатимуться у вказані межі чи навіть демонструватимуть певну перевагу за точністю.

Однак, коли було проведено аналіз отриманих даних, виявилось, що не всі з них відповідали заявленим стандартам, що детально проілюстровано на рисунку 5.

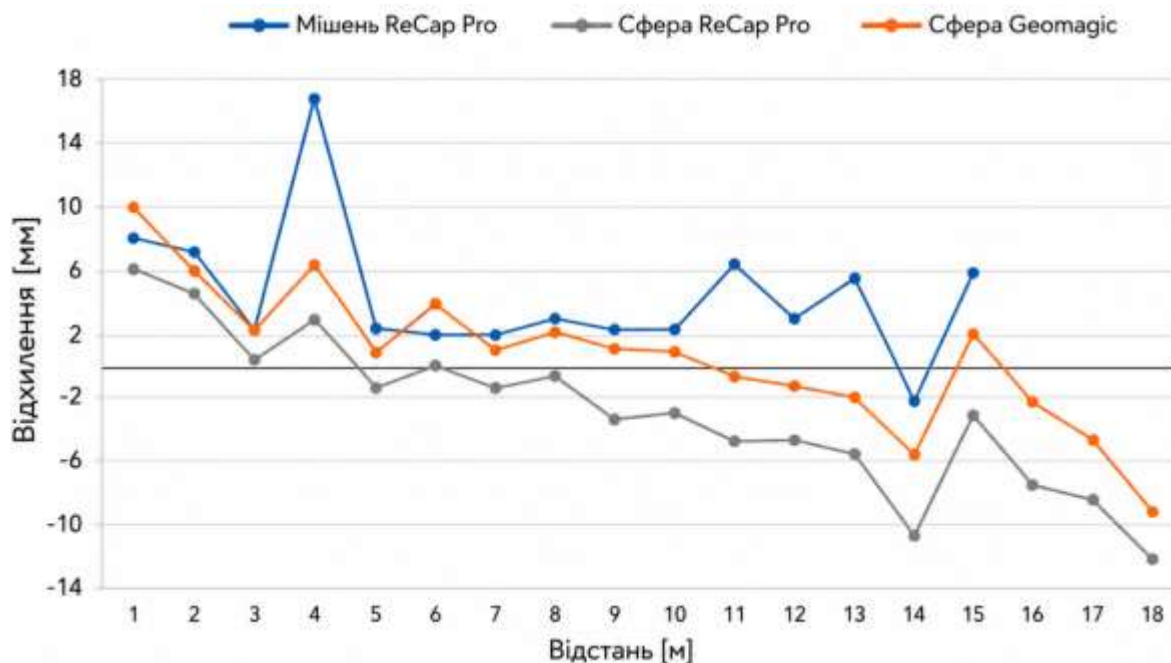


Рисунок 5. Точність вимірювання відстані

Тим часом, досі незрозумілим є питання, чи то хибне розміщення об'єкта у програмному забезпеченні призвело до похибок у вимірюванні дистанцій, чи ж ці прорахунки безпосередньо впливають із роботи самого пристрою.

Для формування більш вагомих суджень, життєво необхідно провести додаткові дослідження експериментального характеру та глибше проаналізувати зібрану інформацію.

Незважаючи на це, проведений аналіз виявив виразну закономірність: усі зафіксовані відстані виявилися меншими, аніж належні еталонні показники.

Паралельно, опрацювання сферичних реперів у програмному інструменті Autodesk ReCap Pro продемонструвало помітно вищу надійність та зіткнулося з меншою кількістю ускладнень, якщо порівнювати з роботою над плоскими маркерами.

Переважна більшість спроб закріплення сфери завершилася позитивно, за винятком випадків, коли фіксація відбувалася на найнайменшій дистанції.

Подальше валідування отриманих даних, виконане у програмному забезпеченні Geomagic Design X з використанням сфери вільного радіусу, засвідчило співмірні показники.

Зокрема, було зафіксовано доволі сталу похибку близько 4 мм на дистанціях, що не перевищують 16 метрів (див. Рис. 5).

Дані, отримані під час сканування чорно-білої калібрувальної мішені, відображені на графічному матеріалі, що розташований на рис. 6.

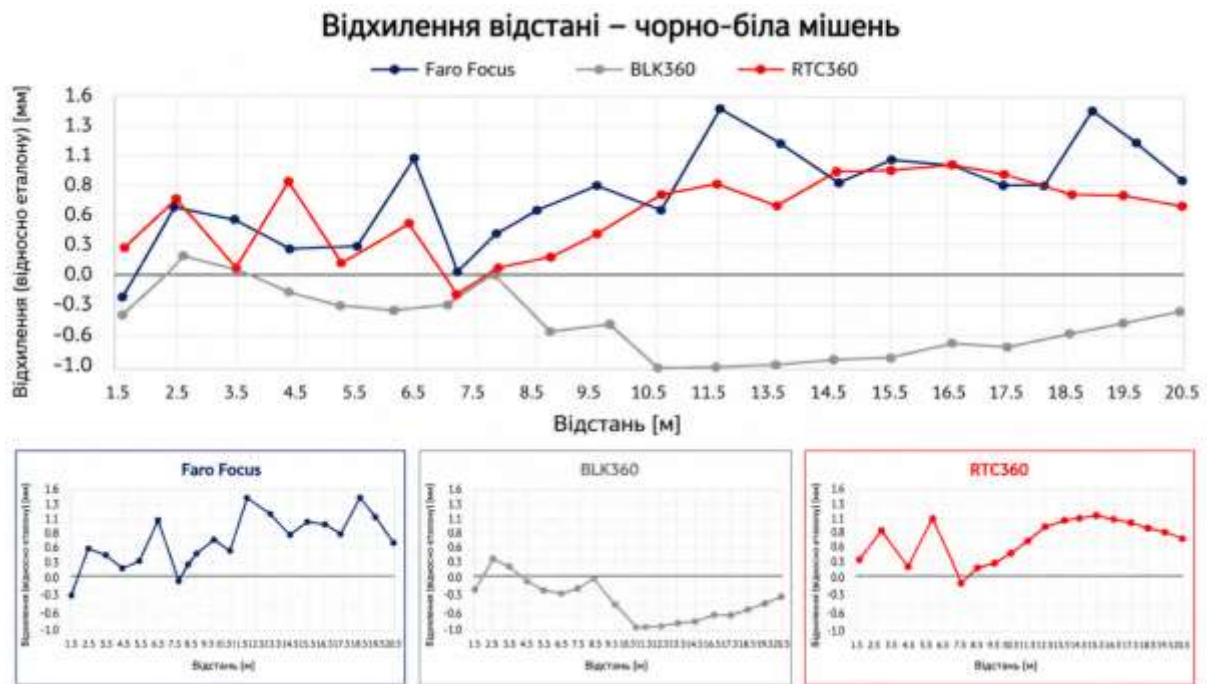


Рисунок 6 Точність вимірювання відстані для сканування чорно-білої цілі

Щодо розглянутих сканувальних пристроїв, виявлено відносно невеликі розбіжності порівняно з еталонними показниками, які варіювалися у діапазоні від мінус одного міліметра до плюс одного цілого й шість десятих міліметра.

Переважна частина здобутих даних знаходилася близько до позначки "нуль", як у позитивному, так і в негативному векторах, на що вказує середній показник зсуву, який становить мінус сім сотих міліметра.

У той самий час, апарати RTC360 та Faro Focus головним чином демонстрували зсуви у похибках у бік позитиву.

Середньозважені значення для цих сканерів склали близько +0,5 мм та +0,7 мм відповідно, і ця тенденція простежувалася у переважній кількості зроблених вимірювань.

З цього випливає висновок, що вони, як правило, реєстрували відстані, які були дещо меншими за еталонні величини.

Лише один прилад із тих, що підлягали аналізу, вирізнявся перевагою негативних відхилень, середній рівень яких сягав приблизно -0,5

мм, що вказує на помітну тенденцію цього окремого сканера до завищення вимірюваної відстані.

Стосовно вимірювань, проведених у межах сферичних поверхонь, зафіксовано певну відмінність у характері отриманих даних (рис. 7).

Тут слід зазначити, що для переважної кількості сканувальних пристроїв була притаманна домінація від'ємних розбіжностей, тоді як показники з додатним знаком з'являлися лише час від часу.

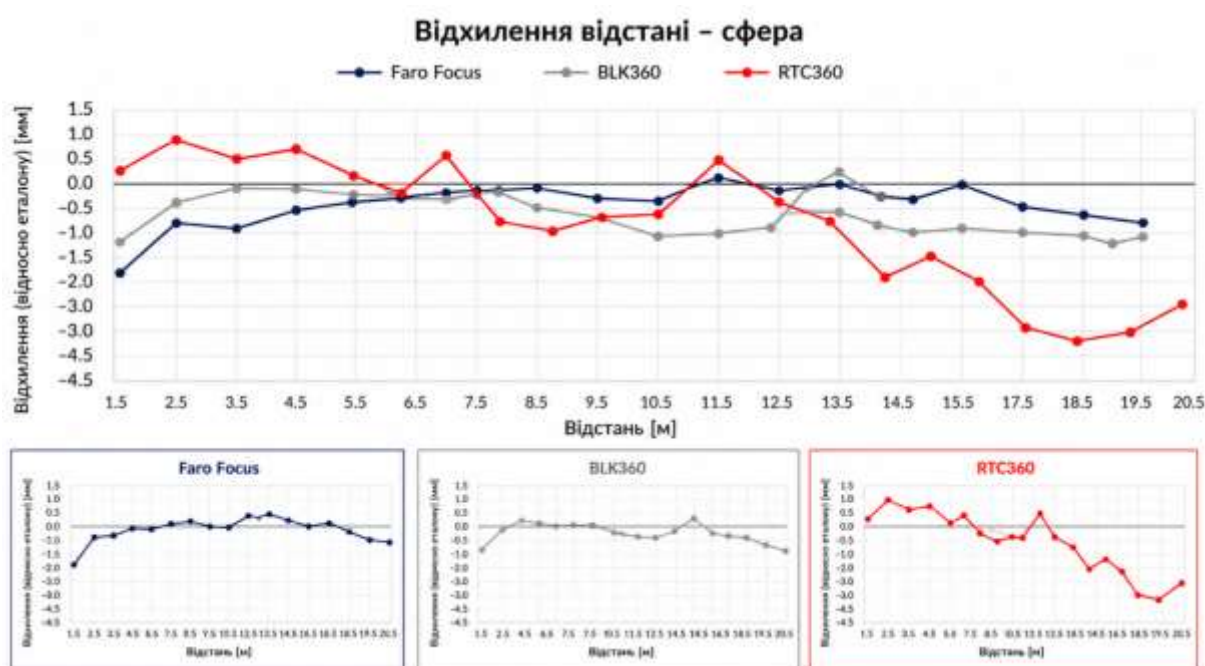


Рисунок 7 Точність вимірювання відстані для сканування до сфери

Щодо сканера BLK360, усі зареєстровані розбіжності виявилися негативними й не виходили за межі 1 мм.

Це дає підстави вважати, що виміряні величини відстаней були трохи більшими за еталонні показники.

Натомість дані, здобуті за допомогою RTC360, продемонстрували меншу консистентність.

Починаючи приблизно з позначки 15 метрів, амплітуда відхилень збільшувалася, сягаючи позначки близько $-3,2$ мм.

При цьому на менших дистанціях похибка утримувалася в межах ± 1 мм, що відповідає рівню, зафіксованому й іншими апаратами, які брали участь у тестуванні.

Ймовірно, зростання неточностей на віддаленіших відстанях зумовлене саме не достатнім рівнем прецизійності при наведенні на сферичні об'єкти.

Додатковим підтвердженням цього є факт, що трапляється потреба у повторному проведенні операції закріплення сфер, адже результати, які виходять, є нестабільними та мінливими.

2.3 Вимірювання на площині

Для забезпечення сталої й тривалої відповідності знайденим у результаті сканування даним, впроваджується такий критерій якості, як «похибка вимірювання».

Обрахунок цього показника здійснюється шляхом виконання вимірювань на ідеально рівній поверхні.

Цей параметр дає змогу визначити точність роботи обладнання та окреслити можливі невідповідності, що виникають у процесі акумулювання просторових відомостей.

Неточність у визначенні характеристик об'єкта вимірюється як відстань між окремими точками фіксації та еталонною поверхнею, що формується відповідно до методу найменших квадратів.

Такий підхід дає змогу створити математичну модель цієї площини, яка має наукове обґрунтування, а також визначити, наскільки густо розташовані зареєстровані точки навколо неї.

У межах реалізації дослідницьких експериментів наземні лазерні сканери розміщували навпроти гладкої, рівної стіни, орієнтовно за десять метрів.

Здійснювалося сканування із застосуванням різноманітних налаштувань роздільної здатності, що дозволило дослідити, як співвідношення густоти вимірів впливає на достовірність одержаних результатів (рис. 8).

Зібрані відомості слугували підставою для визначення точності сканування та верифікації сталості функціонування обладнання в умовах різних робочих режимів.



Рисунок 8 Результати похибки вимірювання площинності

Фрагменти даних сканування, що належать до рівнинної ділянки, спочатку були відокремлені (відфільтровані).

Далі, застосовуючи спеціалізований програмний комплекс, було розраховано найкращу площину, що відповідає всій необробленій сукупності точок.

Ця площа формувалася на засадах методу найменших квадратів, що гарантувало суттєву точність у верифікації геометричних невідповідностей.

Як проілюстровано на рисунку 8, простежується явна, майже прямолінійна залежність між тим, наскільки підвищується роздільна здатність сканування (тобто зростає кількість зареєстрованих точок), та розміром похибки вимірювання, що виникає.

Зі збільшенням частоти сканування також наростає абсолютне відхилення, яке обчислюється як розмах знаків відстаней, зафіксованих між згенерованими точками та ідеальною (еталонною) площиною.

Щодо сканера Faro Focus, можна спостерігати, що похибка вимірювання збільшується приблизно з 1,1 мм при найменшій обраній роздільній здатності до приблизно 3,3 мм, коли встановлено режим найвищої деталізації.

З огляду на те, що температура приладу протягом проведеного дослідження не змінювалася, цей зафіксований діапазон коливань слід розглядати як внутрішній шум апаратури для вимірювання, що демонструє невелику тенденцію до зростання при підвищенні чіткості сканування.

Щодо сканера RTC360, то тут ми спостерігаємо помітніше узгодження результатів: показники дальності змінювалися несуттєво, у межах 4,3–4,6 мм.

Це вказує на те, що систематична похибка залишається майже незмінною, незалежно від того, який режим сканування було активовано.

Ймовірно, така стабільність зумовлена використанням інтегрованого підходу до вимірювань, що об'єднує принципи вимірювання часу прольоту та фазового зсуву.

Здійснивши зіставлення показників стандартного відхилення, було виявлено, що для моделі Faro Focus цей параметр досягав максимуму у 0,36 мм, тоді як у випадку з RTC360 аналогічне значення дорівнювало 0,65 мм.

При цьому, незважаючи на наявність такого розходження, у жодному з розглянутих пристроїв стандартне відхилення не перевищує позначку 1 мм, що слугує підтвердженням задовільно високого рівня точності та сталості функціонування обох лазерних сканерів.

3. Процедура польових випробувань

Атестування апаратури лазерного сканування наземного типу у межах лабораторій або на спеціалізованих тестових майданчиках являє собою дієвий спосіб верифікації метрологічних характеристик та загальної працездатності апарату.

Проте, подібна опція не є універсально доступною для усіх власників приладів.

Ця ситуація особливо виражена стосовно полігонів для випробувань, котрі, для забезпечення своєї експлуатації, потребують суттєвих територій та інженерно облаштованої бази.

За правилом, такі комплекси зосереджені при вищих навчальних закладах, науково-дослідних осередках чи профільних інститутах, тоді як малі геодезичні чи проєктувальні фірми доволі часто не мають можливості скористатися цими потужностями.

Якщо у процесі ревізії фіксуються значні розбіжності між отриманими показниками і тими, що вважаються нормою, варто розглянути необхідність проведення повторного градуювання апаратури.

Це стає критично необхідним тоді, коли інструкція від виробника не містить опцій для користувача щодо самостійного внесення чи виправлення даних, що стосуються компенсації неточностей.

Завершивши лабораторні огляди, ми продовжили тестування двох апаратів лазерного сканування землі — Faro Focus та Leica RTC360 — уже безпосередньо на об'єктах.

Ключовим завданням цих польових перевірок було достеменно з'ясувати, наскільки обидва сканери придатні до застосування у щоденних робочих умовах, а також встановити, наскільки послідовною й коректною є їхня робота поза межами спеціалізованої лабораторії.

Польові тести охоплювали три сканери: два апарати виробництва Leica та один Faro Focus3D X330.

Для проведення експерименту була підібрана ділянка, що гарантувала ідеальні умови для виконання усіх запланованих вимірювань (рис. 9).

А саме, обрана локація надавала змогу формувати довгі прямі лінії на рівній поверхні, що є критично важливим для верифікації точності лазерного далековимірювання, а також давала можливість розташувати мішені на різній висоті для конструювання вертикальної тріангуляційної схеми та подальшої оцінки просторової коректності даних сканування.

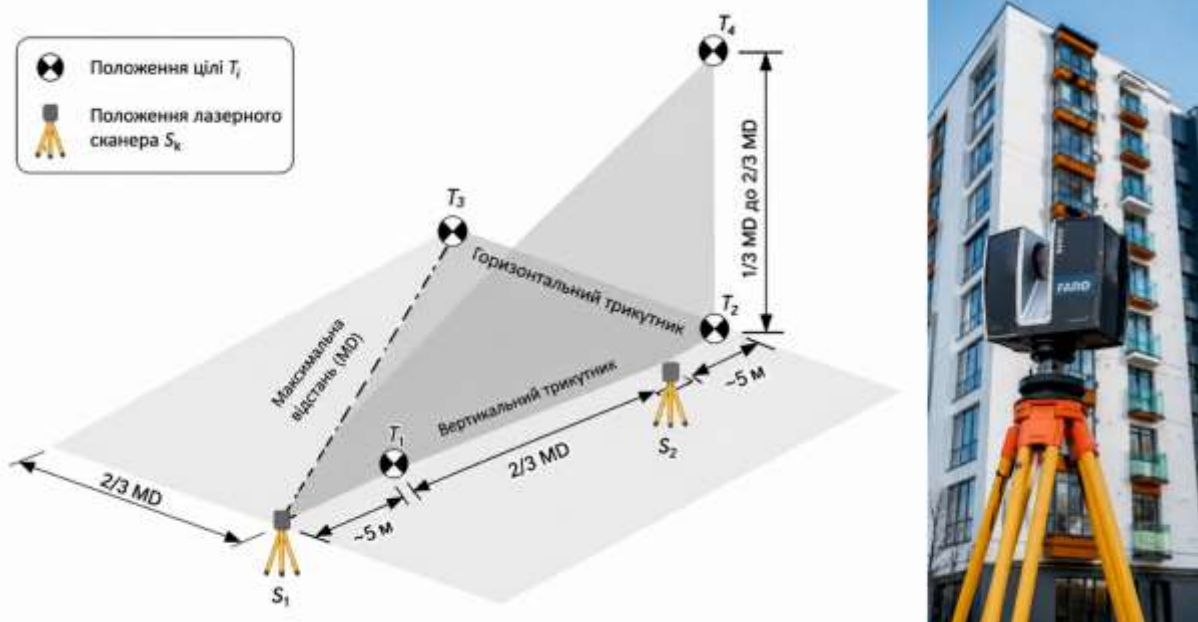


Рисунок 9. Схема польових випробувань

На рисунку 10 представлено огляд ділянки, обраної для випробувань, котра знаходиться у житловому масиві «Липки» в Івано-Франківську.

На цій території облаштовані контрольні точки, відмічені блакитними кружечками, а також позиції, де монтувалися лазерні сканери, що позначені багряними колами.

Такий розподіл складових забезпечив можливість перевірки якості сканування як у площині, так і у висотному вимірі.



Рисунок 10. Панорамний вигляд польових випробувань Червоні кола = станції сканування, сині кола = положення цілей

Проведення тестувань лазерних сканерів, що були предметом дослідження, відбувалося у двох окремих сесіях, кожна з яких тривала приблизно дві та три години відповідно.

Така тривалість була обумовлена потребою здійснити додаткове сканування шести калібрувальних об'єктів, розташованих під прямим кутом стосовно вихідного положення апаратури, на відстанях, що варіювалися від п'яти до тридцяти метрів.

Отримані згодом результати використовувалися для розрахунку похибки у визначенні розташування центрів цих референтних об'єктів, яку позначили як u_T .

Щодо кожної точки збору даних, усі еталонні об'єкти було піддано чотириразовому зчитуванню.

Це було зроблено з метою зміцнення довіри до здобутих даних та для компенсації похибок вимірювань, спричинених значними дистанціями та обмеженнями у показниках роздільної здатності.

При роботі з апаратом Leica RTC360, в усіх ситуаціях використовувався режим найвищої деталізації – із заданням 3 мм на проміжку в 10 метрів, при цьому процес охоплював повне обертання області сканування.

Для приладу Faro була обрана інша послідовність дій: спершу здійснювалося загальне (панорамне) сканування, після чого проводилося лише вибіркове сканування контрольних маркерів із застосуванням найвищого рівня чіткості – 1 мм на 10-метровій дистанції.

Кожен кадр, отриманий за допомогою приладу Faro, фіксувався шляхом повного оберту на 360° , з налаштуваннями роздільної здатності, встановленої на 1/1, та коефіцієнтом якості $1\times$.

Такий метод забезпечує відповідний ступінь точності — у межах 1,5 мм на відстані десяти метрів, паралельно обмежуючи кількість сторонніх елементів у записаних відомостях.

Увесь процес одного повного сканування, без урахування нанесення фарби, займав орієнтовно чверть години.

По закінченні польових заходів для наступного розбору увага зосереджувалася виключно на тривимірних просторових координатах, що відповідали центрам усіх об'єктів, які були зафіксовані скануванням.

Отримання цих координат було здійснене за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення через або цілком автоматичний, або частково ручний процес ідентифікації центрів об'єктів.

Потім ці координати були перенесені у формат електронних таблиць Excel, де на базі отриманих даних відбувався розрахунок інтервалів між точками та визначення фінальних відхилень цих інтервалів.

Аби з'ясувати, наскільки суттєвими є виявлені розбіжності, постало завдання встановити похибку вимірювання uT для кожного з апаратів, що досліджувалися.

Хоча для двох одиниць цей показник спочатку базувався на технічних даних, наданих виробниками, то для решти трьох сканерів фактичну невизначеність вимірювання довелося визначати вже шляхом проведення експериментів.

З цією метою були задіяні дані, отримані з повторних замірів положення центрів еталонних мішеней, на основі яких потім обчислювалися стандартні розбіжності для координат кожного центру (Таблицю 3).

Таблиця 3 Результати процедури польових випробувань

Параметр (мм)	Leica RTC360	Faro Focus X330	Leica BLK360
u_T	1,5	3,3	1,1
u_S	6,0	13,2	4,4
Δ_{12}	6,0	2,2	-2,1
Δ_{13}	5,2	3,1	-2,0
Δ_{14}	3,0	3,1	-1,5
Δ_{23}	0,8	2,6	-3,7
Δ_{24}	3,8	3,3	0,5
Δ_{34}	0,2	11,1	0,5
Δ середнє	3,0	1,1	-1,1

З огляду на визначену невизначеність вимірювань u_T , було розраховано відносну різницю дистанцій, керуючись формулою (1).

Далі ці здобуті дані застосовано для загальної валідації точності апарату, як це представлено у Таблиці 3.

$$u_{\Delta} = k \cdot u_{\Delta} = k \cdot 2 \cdot u_T = 4 \cdot u_T \quad (1)$$

Опісля, ми проводимо усереднення координат усіх зареєстрованих об'єктів, що, своєю чергою, дає змогу підвищити достовірність кінцевих даних.

Базуючись на цих обчислених величинах, визначаються відстані між цілями, а саме $T_i T_j$, окремо для кожної із визначених скануючих установок.

$$T_i T_j = \sin \left((x_j - x_i)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2 \right) \quad (2)$$

З огляду на те, що кожне виміряне значення відстані має два незалежні виміри (по одному від кожної станції сканування), було здійснено розрахунок різниць Δ_{ij} між відповідними показниками.

Зведені результати цих обчислень представлено у Таблиці 3.

$$\Delta_{ij} = T_i T_j(S_1) - T_i T_j(S_2) \quad (3)$$

Зведення підсумків пілотного тестування представлено у Таблиці 3 стосовно трьох апаратур лазерного сканування, що були об'єктом дослідження.

Добуті показники дають змогу провести багатоаспектну валідацію правильності визначення як лінійних відстаней, так і кутів, а також ідентифікувати потенційні систематичні та непередбачувані невизначеності.

Проведений розбір виявив, що для кожного з апаратів величина розбіжності, позначеної як Δ_{12} , склала -1,7мм, -2,4мм та -2,1мм відповідно. Ці величини є помітно меншими за межі, визначені як контрольні (а саме: 2,3мм, 8,0мм, 4,4мм).

Цей фактичний стан речей засвідчує, що суттєвих зсувів у процесі фіксації відстаней між відповідними реперними точками не спостерігається.

Від'ємні показники розбіжностей свідчать про ледь помітне заниження отриманих даних вимірювань, проте такі зсуви є випадковими і не виходять за межі припустимих неточностей.

Щодо розбіжностей $\Delta_{1,4}$ та $\Delta_{3,4}$, спостерігаються лише мінімальні зміни у діапазоні від $-0,2$ мм до $-3,0$ мм.

Це підтверджує сталокуваність отриманих значень та відсутність суттєвих помилок при фіксації кутових величин.

Отже, можна констатувати, що прецизійність визначення кутів задовольняє технічним вимогам апаратури, що піддавалася дослідженню.

Обладнання Leica RTC360 показало найбільшу варіативність у вимірах відстаней, позначену як $\Delta_{1,2}$, що досягла $6,0$ мм.

Тим не менш, ця цифра не перевищує допустимих норм, що свідчить про відсутність серйозних систематичних порушень під час процедури вимірювання.

Для цього сканера розбіжності між $\Delta_{1,4}$ та $\Delta_{3,4}$ становлять $3,0$ мм та $0,2$ мм відповідно, що є ознакою високої стабільності отриманих даних і виключає можливі похибки у фіксації кутових параметрів.

Стосовно сканера Faro Focus X330, можна відзначити, що у нього фіксуються доволі незначні розбіжності для пар $\Delta_{1,2}$ та $\Delta_{1,4}$.

Проте, показник $\Delta_{3,4}$ є найвищим серед усіх протестованих апаратів, досягаючи $11,1$ мм.

Попри це, проведений аналіз свідчить: систематична похибка визначення відстані, яка становить $1,1$ мм, не виходить за межі дозволеного, адже граничне значення для зіставлення дорівнює $13,2$ мм.

Отже, навіть за таких умов, придатність точності вимірювань зберігається.

Додатково, обчислення не виявили значущих прорахунків при визначенні кутових значень, що слугує доказом стабільності функціонування цього обладнання.

Окрім того, варто підкреслити, що збіг даних, зафіксованих різними вузлами сканування, демонструє відмінну відтворюваність вимірювань.

Це слугує вагомим критерієм оцінки якості лазерного просканування, бо засвідчує надійність апаратури в практичному застосуванні "у полі".

Ба більше, несуттєвість розбіжностей між даними, здобутими з різних точок спостереження, свідчить про належне проведення необхідних калібрувань та усунення будь-яких неточностей у налаштуваннях апаратури.

Підсумовуючи здобуті в ході вивчення дані, доходимо переконання, що усі апарати лазерного сканування, взяті до уваги, задовольняють визначені критерії щодо точності та придатні для застосування у реальних геодезичних та інженерних завданнях.

Спостережувані розбіжності як у фіксації дальності, так і визначенні кутових значень є мінімальними і не чинять вагомого впливу на фінальні показники.

Таким чином, апаратура, що була предметом аналізу, може бути результативно задіяна для отримання високопрецизійних даних у польових обставинах.

Дані, здобуті під час 3D-оцінювання сканера Faro Focus3D X330, демонструють дещо меншу точність, якщо порівнювати з іншими пристроями, що були у фокусі дослідження.

Однак, аналізуючи ці висновки, слід пам'ятати, що наземні лазерні сканери є у своїй суті високоінтегрованими системами.

Вони складаються як з фізичних елементів (сенсорні блоки, джерела лазерного світла, модулі орієнтування у просторі), так і з програмного забезпечення, яке керує процесами збору, очищення та аналізу отриманих масивів точок.

Отже, фінальна ступінь якості отриманих даних значною мірою детермінована не лише технічною оснащеністю самого апарату, але й тим, наскільки вправно використовуються алгоритми для опрацювання інформації.

Пристрій Leica BLK360, який виробник виводить на ринок як невеликий та не надто дорогий засіб для виконання 3D-сканувань, має заявлену здатність визначати розташування точок у просторі з похибкою до 8 мм на відстані двадцять метрів.

Якщо зважати на значно дорожчі та орієнтовані на професіоналів аналоги, цей показник виглядає помітно скромнішим, проте його цілком можна вважати достатнім для виконання чималої кількості поточних завдань.

Проведений аналіз засвідчив, що у переважній більшості випадків реальні результати вимірювань співпадають із заявленими характеристиками.

Однак, детальніше дослідження як просторової, так і площинної відстані виявило певні відхилення, які цілком можна класифікувати як аномальні викиди.

Схожі нерівномірності, найімовірніше, походять від хиб, допущених системою автоматичного позиціонування об'єктів у софті ReCap Pro, а також можливих недоліків, спричинених роботою самого скануючого обладнання.

Зокрема, підходи до ідентифікації опорних маркерів можуть бути надзвичайно вразливими до зовнішніх умов: освітлення, просторового розташування об'єктів або рівня шумів (перешкод) у зібраному масиві даних.

Цей факт наголошує на значущості належної попередньої муніципації отриманих після сканування даних та верифікації правильності тих маркерів, що були визначені програмним шляхом.

Окрім тих хиб, що виникають безсистемно, мали місце й такі, що мають певну закономірність: усі виміряні проміжки, отримані за допомогою Leica BLK360, схилилися до невеликої недооцінки.

Ця особливість була помітна як при дослідженні на спеціально облаштованому майданчику, так і під час зіставлення різних збірок інформації.

Систематична похибка, що має місце, здатна продиктована бути як особливостями процедури калібрування апаратури, так і закладеними у вбудоване програмне забезпечення методами обробки отриманих даних.

У будь-якому із зазначених сценаріїв, її амплітуда лишається у межах встановлених норм і не спричиняє суттєвого збою загальної достовірності фіксованих значень.

Слід окремо підкреслити той факт, що комплекс науково-дослідних робіт проводився на етапі, який можна охарактеризувати як ранній, як у контексті розвитку апаратної складової пристрою Leica BLK360, так і стосовно програмного інтерфейсу ReCap Pro.

Звідси випливає, що зафіксовані наслідки, можливо, певною мірою демонструють вихідні недоліки системи, які згодом могли бути усунуті або мінімізовані завдяки випуску нових версій програмного забезпечення та вдосконаленню апаратної частини.

З огляду на це, було б розумно виконати додаткові випробування, залучивши інші зразки обладнання, а також новітні ітерації програмного забезпечення.

Польові заміри були здійснені із залученням різномірних скануючих апаратів, а саме Leica RTC360 та Faro Focus3D X330. Кожному пристрою було приділено близько половини робочого дня, що дозволило зібрати репрезентативний масив інформації для подальшої деталізації та зіставлення результатів.

Як об'єкт дослідження була визначена локація ЖК «Липки», яка вирізняється достатньою відкритістю території та потенціалом для встановлення реперних маркерів у різноманітних схемах.

Обране позиціонування дозволило запровадити вимірювальні схеми, які задіюють рівнобіжні та перпендикулярні трикутники, що становлять основу для підтвердження правильності просторових обчислень.

Проте, необхідно брати до уваги, що досягнення абсолютно однакових умов буває проблематичним у реальних виробничих або функціональних сценаріях, де часто спостерігається обмежена пластичність через складнощі рельєфу, присутність будівель чи ускладнений підхід до необхідних маркерів.

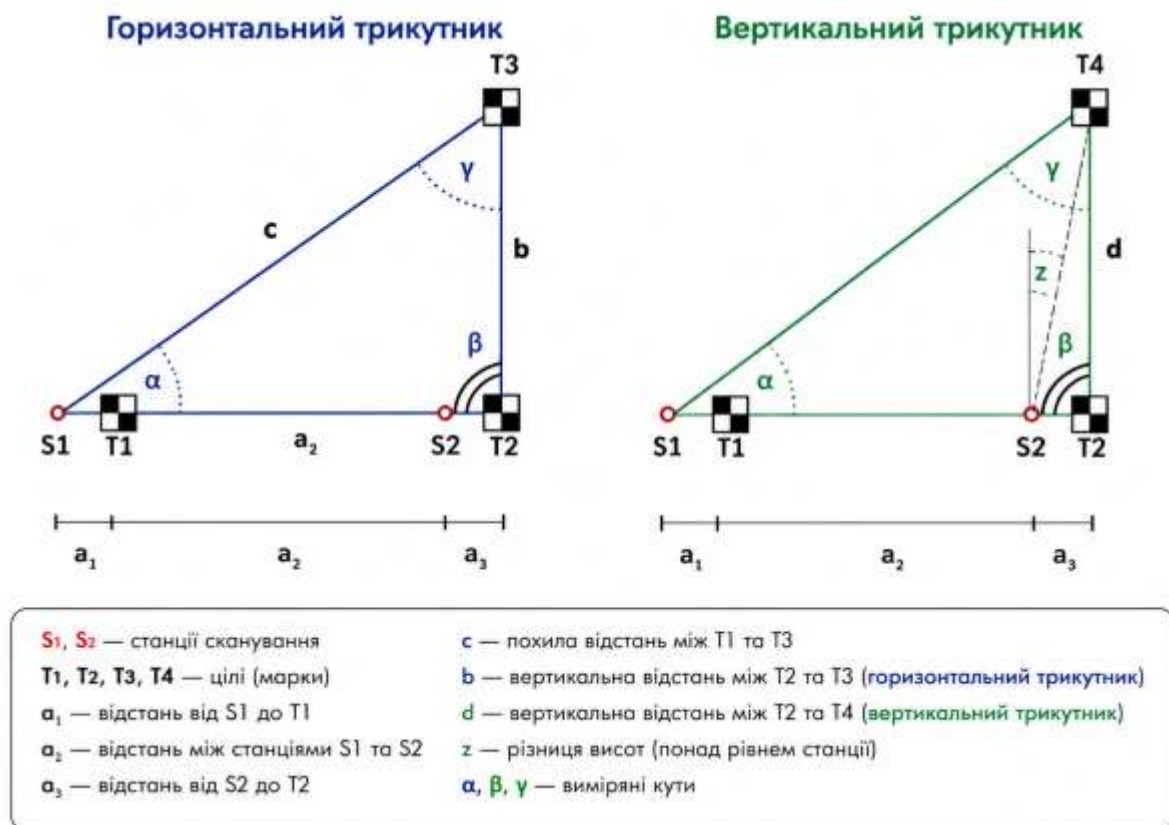


Рисунок 11 Параметри двох трикутників

Під час зняття показників, загалом, вийшло зберегти наперед визначену схему досліджу.

Однак, щодо величин a_2 та a_3 ми помітили певні розбіжності із тими показниками, що планувалися, і це пов'язано зі специфікою практичного втілення робіт.

Ці зміни були враховані, коли ми аналізували здобуті дані, і тепер вони представлені у Таблиці 4.

Таблиця 4. Опис обладнання, задіяного у випробуваннях

Вимоги згідно з інструкцією		Значення	Перевірка
Пряма лінія	S1, T1, S2, T2 на одній лінії (гон)	0.61	✓
Горизонтальний трикутник	Прямий кут β в T2 (гон)	105.0	✓
Вертикальний трикутник	Прямий кут β в T2 (гон)	98.5	✓
$(\beta \approx 90^\circ, \zeta \approx 30^\circ)$	Кут нахилу (ζ) в S2 до T4 (гон)	27.8	✓
a_1	Приблизно 5 м	5.3	✓
a_2	$2/3 \text{ с (м)} = 31.7 \text{ м}$	21.6	(✓)
a_3	Приблизно 5 м	8.6	(✓)
b	$2/3 \text{ с (м)} = 31.7 \text{ м}$	29.2	✓
c	Максимальна відстань (м)	47.6	-
d	від $1/3$ до $2/3 \text{ с (м)} = 15.9\text{--}31.7 \text{ м}$	17.6	✓

Дані, здобуті під час експлуатаційних тестів, демонструють, що суттєві розбіжності як у вимірюванні дистанцій, так і в кутових визначеннях

не були виявлені в жодному з апаратур, які піддавалися аналізу. Це свідчить про те, що обладнання відповідає заявленим технічним специфікаціям і придатне до застосування у геодезичних та інженерних роботах будь-якого рівня заплутаності.

Проте, важливо пам'ятати: показники, отримані в ході таких тестувань, сильно корелюють з тим, як оцінюються похибки вимірювань, а саме uT та похідне значення Δu .

Якщо у супровідній технічній інструкції бракує скрупульозних відомостей стосовно цих показників, це може створити перешкоди для неупередженого зіставлення характеристик різних видів скануючих пристроїв.

Отже, напрошується потреба у збільшенні відкритості з боку виробників у питанні декларування значущих параметрів.

Крім того, під час аналізу було з'ясовано низку практичних моментів, що мають вплив на ергономіку застосування сканувальних приладів.

А саме, функціонал вивантаження координат орієнтирів не забезпечений у кожному програмному забезпеченні.

Так, якщо у програмних комплексах Leica Cyclone Register 360 та Faro Scene ця можливість присутня, то в Leica Office вона не передбачена, що здатне спричинити додаткові перешкоди на етапі наступної роботи з отриманими відомостями (Таблиця 5).

Окремої уваги вимагає проблема кількості даних, що генеруються. Тестування виявило помітну розбіжність між апаратами: сканер Faro Focus3D X330 формує обсяг, що становить приблизно 1,3 ГБ, натомість Leica RTC360 генерує близько 137,3 ГБ.

Така велика диспропорція зумовлена як підвищеною густиною захоплення інформації, так і специфікою їхніх внутрішніх методів опрацювання.

Таблиця 5. Порівняння обсягу даних, отриманих під час роботи

Сканер	Тест	К-сть станцій	К-сть сканів	Час сканування [хв]	Дані [ГБ]
FARO FOCUS	20-метровий трек, ч/б мішень	1	20	56	0,3
	20-метровий трек, сфера	1	21	29	0,4
	3D тестове поле	4	4	34	0,5
	Пряма поверхня	1	4	8	0,1
RTC360	20-метровий трек, ч/б мішень	21	21	49	59,7
	20-метровий трек, сфера	21	21	48	59,7
	3D тестове поле	4	4	36	14,2
	Пряма поверхня	1	3	5	3,7

З одного боку, більший масив даних здатний надати вищу якість деталізації, проте, з іншого боку, це накладає додаткові вимоги на потужності для архівування та подальшої комп'ютерної роботи.

Підсумовуючи здобуті результати, доходимо думки, що кожен із проаналізованих лазерних сканерів демонструє придатність для застосування на практиці.

Рішення щодо конкретного апарату має враховувати не лише його метрики точності, а й такі аспекти, як потужність супровідного програмного забезпечення, легкість оперування отриманими даними, кількість згенерованої інформації, а також зовнішні умови, в яких планується його використання.

Такий всебічний розгляд критеріїв оцінки забезпечить більш вагомий вибір того обладнання, яке найкраще відповідатиме поставленим цілям.

Висновок

У цій бакалаврській роботі, ми дослідили, наскільки стабільними є габаритні характеристики новітніх наземних лазерних сканерів, а також вивчили нюанси їхньої роботи, коли виконуються геодезичні зйомки з високою точністю.

Значний акцент було зроблено на визначенні надійності та сталості даних, отриманих у процесі сканування, й розгляді, яким чином апаратура та програмне забезпечення відбиваються на якості згенерованих тривимірних даних.

Під час вивчення цих аспектів було приділено увагу технічним параметрам та способам функціонування сканерів Leica BLK360, Leica RTC360, а також Faro Focus3D X330.

Зроблений розбір засвідчив: хоча всі розглянуті апаратури демонструють потрібну ступінь точності для виконання геодезичних завдань у будівництві та інженерії, їхні метрологічні показники значною мірою детерміновані такими факторами, як зовнішні умови, рівень деталізації (роздільна здатність), максимальна дистанція фіксації даних та методи, що застосовуються для їхньої подальшої комп'ютерної обробки.

Облаштований полігон для лабораторних випробувань дав змогу здійснити детальне верифікування стійкості метричних характеристик сканувальних пристроїв у регульованому середовищі.

Застосування надточних референсних точок, зафіксованих лазерним далекоміром Leica Absolute Tracker AT960, уможливило адекватне зіставлення отриманих зображень сканування з еталонною базою даних.

З'ясовано, що найбільш суттєвий вплив на кінцеві показники справляють якість визначення координат центрів мішеней, налаштування калібрування апаратури та специфіка програмного забезпечення, що використовується для опрацювання просторових точкових масивів.

Під час виконання робіт, також було встановлено, що нинішні наземні лазерні сканери здатні надавати просторові дані високої насиченості та точності, навіть якщо об'єкти розташовані далеко.

Однак, коли відстань сканування зростає, а деталізація зменшується, фіксується погіршення точності при автоматизованому виявленні об'єктів та зростання невідповідностей у просторових розрахунках.

Отримані висновки наочно демонструють, що існує нагальна потреба у систематичному контролі стабільності метричних характеристик лазерних сканерів, особливо коли йдеться про виконання високочутливих вимірювальних та будівельно-геодезичних завдань.

Суттєвість нашої роботи полягає у вірогідності її застосування для оптимізації процедур верифікації точності наземного лазерного сканування, що, своєю чергою, веде до зростання надійності просторової інформації та забезпечення більш результативного застосування технологій TLS задля формування цифрових аналогів споруд і територій на території нашої держави.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).
4. Глотов В. М., Ковальчук І. С. Наземне лазерне сканування в інженерно-геодезичних роботах // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2018. – Вип. 1(35). – С. 85–92.
5. Заблоцький Ф. Д., Янків-Вітковська Л. М. Аналіз точності наземного лазерного сканування при створенні цифрових моделей місцевості // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2020. – Вип. 92. – С. 34–42.
6. Костецька Я. М. Геодезичні прилади. Частина 2. Електронні геодезичні прилади : навч. посіб. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 324 с.
7. Маркузе Ю. І. Інженерна геодезія та сучасні технології вимірювань. – Київ : КНУБА, 2017. – 412 с.
8. Мороз О. І., Тревого І. С. Лазерне сканування та його застосування в геодезії // Вісник геодезії та картографії. – 2019. – № 3. – С. 15–22.

9. Тревого І. С., Перій С. С. Сучасні технології 3D-моделювання в геодезії та будівництві. – Львів : Львівська політехніка, 2021. – 280 с.
10. Чибіряков В. К., Баран П. І. Дослідження точності наземних лазерних сканерів у геодезичних роботах // Інженерна геодезія. – 2021. – № 67. – С. 55–63.
11. Autodesk. ReCap Pro User Guide. – San Rafael : Autodesk Inc., 2021. – 185 p.
12. ISO 17123-9:2018. Optics and Optical Instruments – Field Procedures for Testing Geodetic and Surveying Instruments – Part 9: Terrestrial Laser Scanners. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 52 p.
13. Faro Technologies. FARO Focus3D X330 Laser Scanner: User Manual. – Lake Mary : FARO Technologies Inc., 2015. – 210 p.
14. Leica Geosystems. Leica BLK360 Imaging Laser Scanner: Datasheet. – Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 2019. – 12 p.
15. Leica Geosystems. Leica RTC360 3D Laser Scanner: Technical Specifications. – Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 2020. – 15 p.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

«Оцінка точності GNSS-позиціонування смарт-пристроїв на основі фазових спостережень».

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)