КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА і АРХІТЕКТУРИ

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра інженерної геодезії

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Дем'яненко Р.А.
«_____» _____ 2023 року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

GISUT KNUCA 2023

на тему:

Методика комбінованого використання БПЛА знімання та лазерного сканування

Виконав студент групи ГДм-22
193 Геодезія та землеустрій
(спеціальність)
Геодезія
(спеціалізація)
Романюк Богдан Васильович
Керівник Медведський Ю. В.
к.т.н., доцент

Київ 2023 р.

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА і АРХІТЕКТУРИ

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра інженерної геодезії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

на тему:

«Методика комбінованого використання БПЛА знімання та лазерного сканування»

GISUT KNUCA 2023

Романюк Богдан Васильович

Київ 2023р.

Київський національний університет будівництва і архітектури

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями
Кафедра інженерної геодезії
Освітній рівень: магістр за освітньо-професійною програмою
Спеціальність: 193 - Геодезія та землеустрій
Спеціалізація: «Геодезія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
декан факультету ГІСУТ
Нестеренко О. В.

«_____» _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

GISUT KNUCA 2023

Романюк Богдан Васильович

1. Тема роботи «Методика комбінованого використання БПЛА знімання та лазерного сканування».
   затверджена наказом ректора КНУБА № 2529/2
   від «24» жовтня 2023 року
2. Керівник роботи к.т.н., доцент Медведський Юрій Вікторович .
3. Строк подання студентом роботи до захисту до 06.11.2023 – 10%, до __.11.2023 – 60%, до __.12.2023 – 100%.
4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

   Р.1 Області застосування лазерного сканування та БПЛА знімання
   Р.2 Основи лазерного сканування та БПЛА знімання
   Р.3 Отримання даних БПЛА знімання та лазерного сканування
   Р.4 Визначення оптимальної конфігурації та кількості опорних точок для БПЛА знімання

5. Графічний матеріал за розділами

   Р.1 Аналіз задач комбінованого використання БПЛА знімання та лазерного сканування, вимоги до точності виконання робіт, перспективи та особливості об’єднання лазерного сканування та БПЛА знімання.
   Р.2 Види лазерних сканерів, основні етапи робіт, класифікація БПЛА, планування БПЛА знімання.

Р.3 Характеристика об’єкту знімання, методика БПЛА знімання, методика лазерного знімання.
Р.4 Визначення місця розташування опорних точок, оцінка точності без використання контрольних точок, визначення впливу на точність, порівняння даних лазерного сканування та БПЛА знімання .

6. Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1	до 06.11.2023
Розділ 2	до 13.11.2023
Розділ 3	до 20.11.2023
Розділ 4	до 27.11.2023
Остаточне оформлення роботи	до 29.11.2023
Направлення роботи на рецензування та плагіат	до 01.12.2023
Попередній захист роботи на кафедрі	до 07.12.2023

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

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

8. Дата видачі завдання 2 жовтня 2023 року .

Зав. Кафедри _____ Р.А.Дем’яненко .
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Ю.В. Медведський .
(підпис) (прізвище та ініціали)

Студент _____ Б.В. Романюк .
(підпис) (прізвище та ініціали)

GISUT KNUCA 2023

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА БПЛА ЗНІМАННЯ

1.1. Аналіз переваг та недоліків використання БПЛА знімання та лазерного сканування

1.2. Аналіз публікацій спільного використання лазерного сканування та БПЛА знімання

РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА БПЛА ЗНІМАННЯ

2.1. Наземні лазерні сканери, що використовуються сьогодні

2.2. Вимірювання сучасними наземними лазерними сканерами, основні етапи робіт

2.3. Класифікація БПЛА

2.4. Планування БПЛА знімання

РОЗДІЛ 3. ОТРИМАННЯ ДАНИХ БПЛА ЗНІМАННЯ ТА ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

3.1. Характеристика об’єкту знімання

3.2. Методика БПЛА знімання

3.3. Методика лазерного сканування

РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ТА КІЛЬКОСТІ ОПОРНИХ ТОЧОК ДЛЯ БПЛА ЗНІМАННЯ

4.1. Визначення місця розташування опорних точок

4.1.1. Комбінація точок на покрівлі та фасаді

4.1.2. Комбінація точок на покрівлі та землі

4.2. Оцінка точності без використання контрольних точок

4.3. Визначення впливу на точність конфігурації опорних точок та їх кількості

4.4. Порівняння даних лазерного сканування та БПЛА знімання

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

GIS&T KNUCA 2023

ВСТУП

Відомо, що аерознімання як вид ДЗЗ - це економічно і технологічно оправданий спосіб збирання просторової інформації, основа для створення топографічних планів і карт, тривимірних моделей рельєфу і місцевості. Аерознімання вже протягом століття є ефективним інструментом для виконання пошукових робіт у галузі геодезії, геологогеофізичних розвідок та проведення різного виду моніторингів. У наш час швидко зростає застосування у аерозніманні БПЛА. Це пов'язано з багатьма причинами і головним чином вартістю аерознімання, яка на кілька порядків менша від застосування пілотованих літаків. Крім високої економічної ефективності, БПЛА мають додаткові переваги над традиційним аерозніманням і космічним зніманням.

Сьогодні використання на БПЛА якісних фото і відеокамер, дозволяє на їх використання в таких напрямках:

- проведення аерознімання для складання генеральних планів міст;
- планування використання земель промислового призначення, а також планування земель сільського господарства;
- обстеження районів де стався викид шкідливих речовин небезпечних для життя людини;
- інспекція вирубок лісів та відстеження обсягу врожаю для фермерів;
- інвентаризація земель населених пунктів і сільськогосподарських угідь;
- контроль за станом лісових масивів, сільсько-господарських посівів;
- стеження за якістю і своєчасністю проведення різних заходів на цих територіях.

Наземне лазерне сканування - це знімальна система, яка вимірює відстань від сканера до точок об'єкта з досить високою швидкістю і реєструє відповідні напрями з подальшим створенням тривимірного зображення в контурі хмари точок. Цей метод зйомки застосовують для зйомки складних промислових об'єктів, відкритих гірничих виробок, а також архітектурних споруд, що являють історичну і культурну цінність.

GISUT KNUCA 2023

Актуальність роботи: отримувати надійні та вірні дані про геометрію окремих елементів будівельних конструкцій, їх розташування відносно один одного, а також про всю будівлю чи споруду завжди було важливою задачею. Сучасні методи геодезичного знімання, такі як лазерне сканування та фотограмметрія за допомогою БПЛА, дозволяють суттєво пришвидшити виконання робіт та забезпечити високу деталізацію отриманих даних. Кожен з них окремо має свої недоліки, але в поєднанні цих методів можна отримати можливість їх компенсувати. Крім того, актуальність цієї теми зумовлена необхідністю підвищення рівня освіти та кваліфікації фахівців, які здатні розробляти, впроваджувати та використовувати таку технологію в Україні, оскільки вона є новітньою та перспективною на світовому ринку. Таким чином, дослідження та розробка методики комбінованого використання БПЛА знімання та лазерного сканування є актуальними та важливими для науки та практики.

Об'єкт дослідження: методика комбінованого застосування БПЛА знімання та лазерного сканування під час виконання геодезичних робіт знімання споруди Київського іподрому.

Предмет дослідження: методи БПЛА знімання із визначеною точністю та методика об'єднання результатів .

Мета і завдання: дослідження методики комплексного знімання об'єктів та споруд методом лазерного сканування з доповненням недоступних даних за допомогою фотограмметрії з використанням БПЛА знімання.

Матеріал дослідження: дані наземного лазерного сканування та БПЛА знімання споруди Київського іподрому.

Наукова новизна полягає в розробці та апробації алгоритмів обробки та інтеграції даних з різних джерел, що забезпечують підвищення ефективності та якості геодезичних робіт.

Практичне значення полягає в можливості застосування розробленої методики для рішення різних задач, таких як моніторинг стану інженерних споруд, виявлення змін ландшафту, документування культурної спадщини.

GISUT KNUCA 2023

РОЗДІЛ 1. ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА БПЛА ЗНІМАННЯ

1.1 Аналіз переваг та недоліків використання БПЛА знімання та лазерного сканування

Для зйомки архітектурних споруд можна використовувати декілька різних підходів, серед яких: архітектурна фотографія, тахеометрична зйомка, аерофотозйомка та наземне лазерне сканування.

Архітектурна фотографія - це фотозйомка архітектурних споруд за допомогою фотоапарату з відповідним об’єктивом, освітленням і ракурсом. Цей метод дозволяє отримати документальний або художній знімок об’єкта, що передає його форму, деталі і стиль.

Тахеометрична зйомка - це зйомка архітектурних споруд за допомогою тахеометра, який вимірює відстані і кути між точками на об’єкті. Цей метод дозволяє отримати точні координати точок, з яких можна побудувати плани, профілі і розв’язки об’єкта.

Аерофотозйомка - це зйомка архітектурних споруд з повітря за допомогою літальних апаратів, таких як літаки, вертольоти, дрони тощо. Цей метод дозволяє отримати оглядові знімки об’єкта, що показують його розташування, рельєф і масштаб. Аерофотозйомка також може бути використана для створення тривимірних моделей об’єкта за допомогою фотограмметрії.

Наземне лазерне сканування - це знімальна система, яка вимірює відстань від сканера до точок об’єкта з досить високою швидкістю і реєструє відповідні напрями з подальшим створенням тривимірного зображення в контурі хмари точок. Цей метод зйомки застосовують для зйомки складних промислових об’єктів, відкритих гірничих виробок, а також архітектурних споруд, що являють історичну і культурну цінність.

Архітектурна фотографія та тахеометричне знімання вимагають великих обсягів ручної роботи на різних етапах виконання знімань, тому є менш перспективними в питанні їх подальшого розвитку у порівнянні з методами наземного лазерного сканування та БПЛА знімання, хоча останні і не позбавлені

GISUT KNUCA 2023

своїх недоліків. Саме тому комплексне використання цих двох методів може забезпечити якісне та швидке виконання геодезичних робіт.

БПЛА фотограмметрія - це метод створення тривимірних моделей об’єктів за допомогою знімання їх з БПЛА з різних точок зору та застосування алгоритмів фотограметрії для обробки зображень. Цей метод має свої переваги та недоліки, які залежать від цілей, умов та об’єктів знімання. До переваг методу можна віднести наступне:

- дозволяють отримувати високоякісні зображення та 3D-моделі об’єктів з різних ракурсів та відстаней, що поліпшує точність та деталізацію даних.
- зменшують витрати на знімання, оскільки не потребують великої кількості персоналу, палива, обладнання та часу, порівняно з традиційними методами знімання, такими як аерофотознімання, супутникове знімання, наземне знімання тощо.
- підвищують безпеку знімання, оскільки не піддають операторів та обладнання ризику пошкодження або нещасного випадку, особливо при зніманні небезпечних, важкодоступних або віддалених об’єктів.
- забезпечують гнучкість та оперативність знімання, оскільки можуть бути швидко запущені та адаптовані до різних умов та завдань, а також передавати дані в реальному часі або зберігати їх для подальшої обробки.

До недоліків методу можна віднести наступне:

- мають обмеження на час польоту, дальність дії, вантажопідйомність та стійкість до погодних умов, що може впливати на якість та кількість даних, які можуть бути отримані за один проліт.
- потребують спеціального дозволу, реєстрації та дотримання правил та норм для здійснення польотів, особливо в населених або регульованих зонах, що може ускладнити або затримати процес знімання.
- піддаються ризику втрати сигналу, збою обладнання, злому, перехоплення, зіткнення або збиття, що може призвести до пошкодження або втрати БПЛА, даних або інших об’єктів.

GISUT KNUCA 2023

Принцип роботи лазерного сканера аналогічний принципу роботи безвідбивачевого електронного тахеометра і полягає в вимірі часу проходження лазерного променя від випромінювача до поверхні, що відбиває і назад до приймача. Шляхом ділення цього часу на швидкість поширення лазерного променя визначається відстань до об'єкта. Сканер складається з лазерного далекоміра, адаптованого для роботи з високою частотою і блоку розгортки лазерного променя. Як блок розгортки в сканері виступають сервопривід і полігональне дзеркало або призма. Сервопривод відхиляє промінь на задану величину в горизонтальній площині, при цьому повертається вся верхня частина сканера. Розгортка у вертикальній площині здійснюється за рахунок обертання або коливання дзеркала.

В основу методу роботи сучасних лазерних далекомірів, використовуваних в сканерах, покладені імпульсний і фазовий безвідбивачеві методи вимірювання відстаней. У процесі сканування фіксується напрямок поширення лазерного променя і відстань до точок об'єкта. Результатом роботи сканера є масив (хмара) точок лазерних відображень від об'єктів, що знаходяться в полі зору сканера, з п'ятьма характеристиками, а саме просторовими координатами (x, y, z), інтенсивністю і реальним кольором. Зазвичай, характеристики реального кольору для кожної точки виходить за допомогою цифрової камери. Швейцарська компанія Leica Geosystems є загальновизнаним світовим лідером розробки лазерних технологій і виробництва лазерних сканерів.

Наземне лазерне сканування - це сучасний метод зйомки архітектурних, геологічних та інших об’єктів, який має багато переваг, але також і деякі недоліки. До переваг наземного лазерного сканування для знімання споруд можна віднести:

- Висока швидкість і точність вимірювань. Наземні лазерні сканери можуть вимірювати сотні тисяч точок в секунду з точністю від кількох міліметрів до 4 см.

GISUT KNUCA 2023

- Висока деталізація і інформативність. Наземне лазерне сканування дозволяє отримати тривимірну модель об’єкта, яка відображає його форму, деталі, колір, текстуру тощо.
- Безконтактність і безпека. Наземне лазерне сканування не потребує фізичного контакту з об’єктом, що зменшує ризик пошкодження або зміни його стану. Також цей метод дозволяє знімати небезпечні або важкодоступні зони без загрози для життя і здоров’я людей.
- Оперативність і гнучкість. Наземне лазерне сканування не вимагає складного підготовчого етапу, такого як встановлення реперів, вибір оптимальних ракурсів, налаштування обладнання тощо. Цей метод дозволяє проводити зйомку в будь-яких умовах освітлення і погоди, а також адаптувати параметри сканування до специфіки об’єкта.

До недоліків наземного лазерного сканування для знімання споруд можна віднести:

- Висока вартість і складність обладнання. Наземні лазерні сканери є досить дорогими і вимогливими до обслуговування приладами, які потребують кваліфікованого персоналу і спеціального програмного забезпечення.
- Вплив зовнішніх факторів на якість даних. Наземне лазерне сканування може бути зашумлене або спотворене через вплив таких факторів, як рухомі об’єкти, відблиски, тіні, пил, туман, дощ тощо.
- Великий обсяг і складність обробки даних. Наземне лазерне сканування генерує велику кількість точок, які потребують високої обчислювальної потужності і часу для обробки, фільтрації, реєстрації, моделювання тощо.

Ідея доповнення даних лазерного сканування результатами БПЛА фотограмметрії викликана тим, що під час наземного лазерного сканування існує проблема отримання «тіней» під час знімання. Це фактично пробіли в результатах знімання, які викликані тим, що ми не можемо побачити частину споруди чи об’єкту знімання в силу наявності перешкод, або великої висоти об’єкту (рис.1.1).

GISUT KNUCA 2023

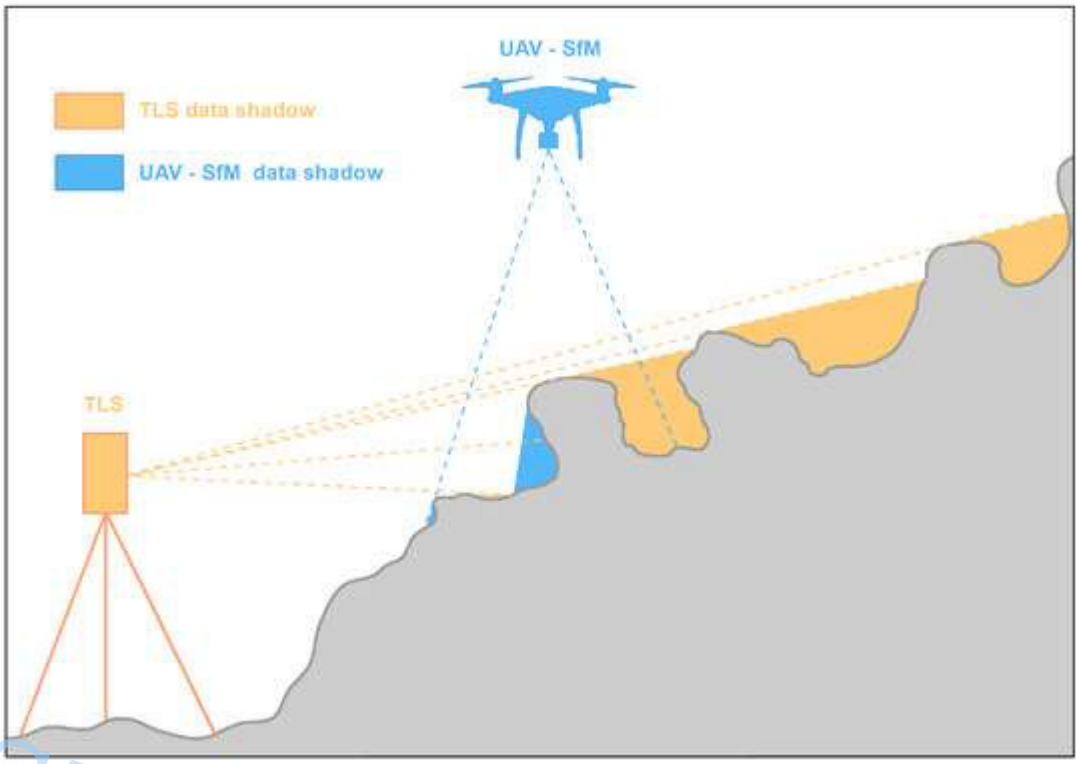


Рис.1.1. Схема «тіней» лазерного сканування та БПЛА знімання

В Японії просуванням технологій використання безпілотників в рамках концепції «розумне будівництво» SmartConstruction стала компанія Komatsu: «дрони» від компанії Skycatch (США) будуть літати над будівельним майданчиком, збирати дані і відправляти їх спецтехніці, яка обладнана системою «штучного інтелекту» Komatsu iMC. Відповідно до зібраних безпілотниками даних, суміщеними з даними від 3D-сканерів, розташованих на будмайданчику, складається програма земляних робіт, за якою працюватимуть бульдозери та екскаватори Komatsu, оснащені iMC, а літаючі «Дрони» контролюватимуть хід виконання робіт в реальному часі. Крім підвищення продуктивності якості будівельних робіт технологія SmartConstruction подібні їй допоможуть впоратися з дефіцитом 1 кваліфікованої робочої сили на будмайданчиках.

GISUT KNUCA 2023

1.2 Аналіз публікацій спільного використання лазерного сканування та БПЛА знімання

Проводячи огляд публікацій щодо використання БПЛА фотограмметрії та лазерного сканування для знімання будівель та споруд можна відмітити [1], в якій описується технологія знімання та пропонується технологічні схеми моніторингу об’єктів культурної спадщини за допомогою БПЛА.

В роботі [1] розглянуто питання оцінки точності георефернційних цифрових моделей поверхні (DTM), отриманих зображеннями, знятими мікро-БПЛА та обробленими за допомогою структури з руху (SfM) фотограмметрії. У статті розглядається критична роль кількості та розташування контрольних точок землі (GCP) під час етапу георефернції. Для оцінки точності моделі використовувалися як контрольні точки, так і незалежні точки перевірки. Аналіз показує, наскільки точність зростає зі збільшенням кількості контрольних точок GCP, а також важливість рівномірного розподілу, наскільки точність переоцінюється, коли вона оцінюється лише за допомогою контрольних точок, а не незалежних точок перевірки, та як земна відстань від проекту пов’язана з максимальною точністю, яку можна досягти

Стаття [2] присвячена порівняльному аналізу точності георефернційних цифрових моделей поверхні (DTM), отриманих зображеннями, знятими мікро-БПЛА та обробленими за допомогою структури з руху (SfM) фотограмметрії. У статті розглядається критична роль кількості та розташування контрольних точок землі (GCP) під час етапу георефернції. Для оцінки точності моделі використовувалися як контрольні точки, так і незалежні точки перевірки. Аналіз показує, наскільки точність зростає зі збільшенням кількості контрольних точок GCP, а також важливість рівномірного розподілу, наскільки точність переоцінюється, коли вона оцінюється лише за допомогою контрольних точок, а не незалежних точок перевірки, та як земна відстань від проекту пов’язана з максимальною точністю, яку можна досягти

GISOT KNUCA 2023

В роботі [3] розглядається використання сучасних методів зйомки (фотограмметрія, TLS та гібридні методи) замість традиційних методів для моніторингу споруд. Метод наземного лазерного сканування використовує лазерний промінь для вимірювання кожної точки окремо, створюючи хмару точки. Методи фотограмметрії та TLS є дуже ефективними для моніторингу конструкцій. Досягнута точність при використанні методу TLS є вищою, ніж при використанні методу фотограмметрії. Виходячи з експериментальних результатів, найкраща точність досягається при використанні гібридного методу для моніторингу споруд, які через метод TLS стикаються з деякими труднощами в отриманні прицільного сканування об'єкта через інші жорсткі об'єкти, такі як дерева, скелі, металеві перешкоди і т.п.

Авторами публікації [4] виконали огляд застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для картографування, нагляду, і моделювання 3D об’єктів. БЛА можуть бути використані як дешева альтернатива до класичної авіаційної фотограмметрії. Стаття надає огляд різних БЛА платформ, застосувань, та прикладів використання, а також останні розробки у обробці зображень.

В роботі [5] проведено оцінку можливостей використання невеликого квадрокоптера та портативного лазерного сканера для документування 3D-моделей культурної спадщини. У роботі розглядаються питання оцінки та калібрування даних, а також процесування отриманих результатів. Зокрема, автори досліджували можливості використання комерційно доступних датчиків, орієнтації та калібрування, а також визначення якості отриманих результатів. У роботі наведено приклади використання квадрокоптера та портативного лазерного сканера для документування культурної спадщини

В роботі [6] було проведено дослідження можливостей генерації цифрових моделей рельєфу з фотограмметричних знімків, отриманих з фіксованих квадрокоптерів, та з використанням точок контролю на основі лазерного сканування. У роботі розглядаються питання оцінки точності та порівняння результатів з даними, отриманими з лазерного сканування. Автори досліджували

GISOT KNUCA 2023

можливості використання комерційно доступних датчиків, орієнтації та калібрування, а також визначення якості отриманих результатів. У роботі наведено приклади використання фіксованих квадрокоптерів для генерації цифрових моделей рельєфу

Авторами публікації [7] представлено семантичний метод виявлення змін, спрямований на моніторинг прогресу будівництва з використанням фотограмметричних хмар точок на основі БПЛА. Запропонована система складалась з двох ключових частин, які ідентифікують зміни в прогресивній манері: перша частина складалась з виявлення геометричних змін за допомогою ідентифікації просторових відмінностей на основі зайнятості, яка вказує на зміни зайнятості в 3D-просторі, що включає зміни зовнішнього вигляду або форми будівельних об'єктів. Друга частина включала зміни в семантиці, які використовуються для виявлення змін там, де виявлення змін на основі зайнятості не є достатнім для представлення змін через обмеження параметрів або брак інформації про атрибути. Для виявлення геометричних та семантичних змін застосовано теорію Демпстера-Шейфера, яка дозволяє об'єднати інформацію з даних, отриманих у різні часові епохи, для виявлення змін. Використовуючи запропоновані методи виявлення змін, можна правильно ідентифікувати зміни з різними характеристиками, включаючи геометричні та семантичні зміни.

В роботі розглянуто питання [8] порівняння точності хмар точок, отриманих фотограмметричним методом з використанням малих безпілотних літальних апаратів (sUAS), з вимірюваннями глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) та територіальним лазерним скануванням (TLS) для топографічного картографування. У дослідженні досліджується точність точкового хмари, отриманої зображеннями sUAS парковки, розташованої на Citizens Bank Arena (CBA) в Онтаріо, Каліфорнія, порівнюючи її з контрольними точками, виміряними за допомогою даних GNSS, виправлених за допомогою кінематичної реального часу (RTK), та даними з TLS-опитування. Результати свідчать про те, що зображення sUAS може створювати точкові хмари, які можна

GISUT KNUCA 2023

порівняти з традиційними методами топографічного картографування та підтримують інші дослідження, що показують, що фотограмметрія sUAS забезпечує вартісну, безпечну, ефективну та точну рішення для топографічного картографування .

В роботі [9] дослідження присвячене проблемі створення 3D-моделей з аерофотознімків, отриманих за допомогою БПЛА, в умовах обмеженої геодезичної підготовки проекту. Пропонується метод, який не потребує прив'язки аерофотознімків до місцевості та створення мережі наземних опорних точок. Ці лінійні вимірювання використовуються при обробці блоку аерофотознімків у спеціальному програмному забезпеченні як обмежувачі масштабу. Експеримент показує, що запропонований підхід на локальних ділянках дозволяє отримати прийнятну точність 3D моделювання на рівні 1.
Це робить процес зйомки та обробки фотограмметричного проекту доступним та швидким у порівнянні з використанням спеціально обладнаних дронів та створенням наземної мережі опорних точок. Також зазначено, що лінійні вимірювання можна використовувати для оцінки точності створеної 3D-моделі, якщо ці вимірювання не були використані у фотограмметричному проекті в якості обмежувачів масштабу.

Авторами публікації [10] розглядаються переваги використання аерофотознімків з нахилом для отримання покращених 3D-моделей міст. Автори аналізують якість даних, отриманих з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених похилими камерами, та порівнюють їх з даними, отриманими з традиційних повітряних платформ. Вони роблять висновок, що БПЛА, обладнані косими камерами, є економічно ефективною альтернативою традиційним повітряним платформам для отримання високоякісних даних.

В роботі розглянуто питання [11] якості підходу структури з руху (SfM) до низьколітальних повітряних знімків, зібраних безпілотним літальним апаратом (БПЛА). Підхід на основі зображень SfM був обраний під час пошуку швидкого, недорогого та високоавтоматизованого методу, здатного виробляти 3D-інформацію з неструктурованих повітряних зображень. Зокрема, він був

GISUT KNUCA 2023

використаний для генерації густої хмари точок і подальшої високороздільної цифрової моделі поверхні (DSM) дюнного пляжу в Марина-ді-Равенна (Італія). Якість набору даних елевації, отриманого з БПЛА-SfM, спочатку була оцінена порівнянням з хмарою точок, згенерованою під час територіального лазерного сканування (TLS). Таке порівняння слугувало для виділення середньої різниці у вертикальних значеннях 0,05 м (RMS = 0,19 м). Однак, хоча порівняння хмар точок є найкращим підходом для дослідження абсолютної або відносної відповідності між методами БПЛА та TLS, оцінка геоморфних особливостей зазвичай базується на аналізі багатох поверхонь у часі, де потрібен процес інтерполяції. DSM були отримані з хмар точок БПЛА та TLS, а вертикальні абсолютні точності оцінювалися порівнянням з глобальною навігаційною супутниковою системою (GNSS). Порівняння вертикальних DSM БПЛА та TLS з вимірюваннями GNSS показало середню відстань на рівні см (RMS = 0,011 м). Послідовне точкове порівняння елевацій БПЛА та TLS показує дуже малу середню відстань, 0,015 м, з RMS = 0,220 м. Автори доводять надійність DSM, отриманих з БПЛА-SfM, для дослідження кількох природних середовищ.

В роботі [12] у двох тестових проектах порівнюються хмари точок з повітряних і вуличних лідарних систем з хмарами, створеними на основі знімків. Показано, що фотограмметрична точність не поступається лідарному методу, проте щільність точок на поверхні набагато вища, ніж на знімках, а пропускна здатність співмірна з повністю автоматизованим повністю цифровим підходом.

Авторами публікації [13] виконано геометричну оцінку даних LiDAR смартфона, отриманих в приміщенні, щодо відстані зйомки, відбиття та часу. Потім проведено порівняння датчика з іншими сканерами в тестовому середовищі. Порівняння даних LiDAR смартфона з хмарою точок лазерного сканера і еталонною 3D-моделлю тестового середовища показало, що сітка LiDAR смартфона в цілому коректна. Експерименти показали, що сканування з LiDAR-сенсора смартфона має деякі обмеження, подібні до обмежень інших ручних сканерів, такі як збільшення шуму при вимірюванні даних зі збільшенням дальності та кута падіння. Аналіз геометричних фігур з LiDAR смартфона

GISUT KNUCA 2023

показав, що примітиви з кінцевими ребрами (паралелепіпеди і циліндри) генерують хмари точок зі значним шумом вимірювання, особливо на краях, і похибками точності від 1 до 2,5 см.

У статтях [14] і [15] описано фотограмметричні зображення та земні лазерні сканування, які були проведені в рамках вимірювальної кампанії для тривимірного запису кількох історичних церков в Тбілісі (Грузія). Метою було повне просторове відтворення з просторовою роздільною здатністю та точністю приблизно 1 см за частково складних зовнішніх умов, що вимагало використання різних методів вимірювання. Локальні вимірювальні дані були зібрані двома кампаніями лазерного сканування (Leica BLK360 та Faro Focus 3D X330), кількома польотами БПЛА та двома земними наборами зображень. Фотограмметричні хмари точок були розраховані з програм моделювання на основі зображень AgiSoft та RealityCapture з урахуванням контрольних точок з лазерних сканувань. Середні залишкові помилки від реєстрацій або фотограмметричних оцінок становлять 4-16 мм, залежно від вибраного програмного забезпечення, розміру та складності пам'ятника та екологічних умов. Найкращу повноту та якість отриманої 3D-моделі було досягнуто за допомогою даних лазерного сканування та зображень одночасно. У статті представлено останні результати, отримані з RealityCapture, та надано критичний аналіз точності та якості моделювання.

Технологічну схему цифрового знімання фасадів архітектурних пам'яток наведено в публікації (Глотов та ін., 2007). Перед виконанням робіт розраховують точність отримання координат точок на споруді, враховуючи експериментальні роботи. Особливість знімання полягала в тому, що не було можливості виконувати знімання більш ніж на 20м. Тому, виникла проблема знімання нормальним випадком. В роботі наголошується на необхідності під час виконання польових робіт у співпраці з архітекторами. Це значно скоротить час виконання польових робіт та підвищить їх якість. Знімання виконувалось за допомогою цифрової камери з об'єктивами з фокусною віддалю 18мм безпосередньо споруди і деталізації елементів – 55мм. Отримані знімки

GISUT KNUCA 2023

контролювались на якість зображення та на забезпеченість опорою. Для вирішення проблеми з великою висотою будівлі використали телескопічну штангу на якій встановлювалася цифрова камера. Також, виконавці акцентують увагу на доцільності виконання обміру споруди, де це можливо, за допомогою рулетки. Ці дані можуть бути використані для контролю при обробці знімків чи в деяких випадках для викреслювання на плані певної деталі споруди. Запропонований в роботі спосіб використання фототріангуляції дав можливість підвищити точність фасадних та інтер'єрних планів, а також спростив технологію приведення планів до єдиної системи координат.

Такий спосіб створення фронтальних планів потребує великого обсягу камерального опрацювання даних. Хоча автори наводять апріорну оцінку точності, проте порівняльного аналізу у висновках немає.

Технологію застосування стереофотограмметричного методу розглянуто в роботі (Шоломицький та ін., 2011). У цьому випадку будували геодезичну мережу, з точок якої створювали знімальне обґрунтування для тахеометричного знімання. На кожній станції вимірювали контурні точки для складання топографічного плану. Пізніше з них знімали характерні точки фасадів, які, своєю чергою, слугували опорними точками для фотограмметричного знімання. При цьому за попередньо отриманими цифровими знімками об'єкта створювали абрис фасаду.

Ця технологія вимагає великих затрат часу та коштів на тахеометричне знімання, а також громіздкого опрацювання результатів цифрового знімання. Чотири основні комбінації цих методів і наводить можливості при їх синтезуванні та створення 3D моделей архітектурних споруд за даними цифрового фотознімання та наземного лазерного сканування місцевості.

Проте робота має комбінаторний характер і не дає конкретної відповіді про застосування тих або інших процесів.

Аналіз технологічної схеми складання фронтальних планів архітектурних споруд наземним цифровим зніманням і лазерним скануванням описано у роботі (Глотов та ін., 2008). Експериментальнодослідницькі роботи виконувались із

GISUT KNUCA 2023

метою складання фронтального плану головного входу Палацу Потоцьких у місті Львові. Перед виконанням робіт автори обчислили апріорну оцінку точності отримання координат точок об’єкта. Ця технологія передбачала виконання наземного цифрового знімання та геодезичних робіт для порівняння цих методів. Наземне цифрове знімання виконували цифровою камерою Canon EOS 350D, а для геодезичних робіт використовували лазерний сканер “Scan Station 2”. Для планового знімання фасадів споруди, тобто для підвищення точності визначення координат точок об’єкта застосували телескопічну штангу. З отриманої множини точок за допомогою НЛС було обчислено просторові координати опорних та контрольних точок в умовній системі координат, що значно спростило оброблення зображень, адже в будь-який момент часу можна було отримати координати додаткової опорної точки. Камеральні роботи полягали у виборі опорних та контрольних точок і подальшому опрацюванні зображень на ЦФС “Дельта-2”. Виконавці робіт зазначають, що при створенні фронтального плану потрібно акцентувати увагу на понищеннях споруди. Отримана точність визначення координат споруди відповідала вимогам щодо точності обмірів архітектурних пам’яток.

Аналізуючи матеріали роботи, варто виділити недоліки кожного з методів. У результаті лазерного сканування було отримано недостатню кількість інформації про деталі споруди для створення фронтального плану об’єкта досліджень. Використання стереофотограмметричного методу зумовило ряд похибок, які потрібно визначити, дослідити та врахувати спотворення, які вони вносять у зображення. Тому необхідним є цифрове знімання як всього об’єкта, так і окремих архітектурних форм. Також множина точок, отриманих під час лазерного сканування, допоможе визначити похибки цифрового знімання.

У роботі (Núñeza et al., 2011) представлено методологію створення 3D-моделі пам'ятника королеви Elisenda Tomb, на якому показано два різні і симетричні обличчя. Їх досліджували за допомогою стереофотограмметричного методу та лазерного сканера у порівнянні, з використанням геодезичного методу. Методологія роботи така: геодезичне знімання дає змогу встановити посилання

GISUT KNUCA 2023

на певні позиції для прив'язки кінцевої моделі; стереофотограмметричний метод дозволив отримувати виправлення, ортофотозображення і 3D-модель; наземне лазерне сканування було використано для отримання моделі хмари кольорових точок високої щільності. Процес отримання моделі поділили на фотограмметричні задачі, обробку даних лазерного сканування і CAD моделювання. Лазерне сканування було проведене з використанням різних приладів. Після введення даних хмари точок були зареєстровані і зорієнтовані. Для цифрового знімання використовували неметричну дзеркальну цифрову камеру Nikon D300S з об'єктивом 20 мм 2,8 AF. Для того, щоб покрити весь об’єкт, цифрові зображення поділили на дві смуги на кожній стороні пам'ятника з 60–70 % поздовжніх і 50 % поперечним перекриттям. Кольори (RGB значення) були призначені автоматично відсканованим точкам.

Варто зазначити наявні в роботі неточності, викликані тим, що отвори в зонах збігалися з темно-червоним кольором на стіні. За результатами порівняння моделей можна зробити висновок, що обидва методи: стереофотограмметричний та лазерного сканування – можна використати для отримання документації з відновлення або збереження проекту. Проте вони мають недоліки, такі як «мертві зони» і велика кількість даних, що ускладнює опрацювання результатів.

Результати порівняння методів наземного лазерного сканування, цифрового та тахеометричного знімання для документації культурної спадщини наведено у роботі (Grussenmeyer et al., 2008). Об’єктом дослідження був середньовічний замок Haut-Andlau (Ельзас, Франція). Переважно дані було отримано наземним лазерним скануванням. Для доповнення цих даних було отримано цифрові зображення. Ця технологія не була оптимальною для знімання лінійних елементів, тому вирішили поєднати зазначені методи. Проте в роботі був ряд недоліків, які полягали в обмеженнях при використанні різного технічного обладнання. Для отримання недоступних частин будівлі для лазерного сканера було отримано близько 50 цифрових зображень з камери Zeiss SMK. Також було використано цифрову камеру Canon EOS 5-D для забезпечення повного покриття фасадів і остаточного відображення текстури замку.

GISUT KNUCA 2023

Тахеометричне знімання застосовували не лише для створення геодезичної мережі, а й для отримання контрольних точок на фасаді.

Застосування технології порівняння методів з подальшим їх комбінуванням має такі недоліки: складність отримання даних за допомогою лазерного сканування через складність знімання завдяки рельєфу місцевості, отримання низької щільності точок, «мертвих зон», низька якість відображення текстури об’єкта внаслідок лазерного знімання, великий обсяг робіт з тахеометричного знімання та багато матеріалів внаслідок використання стереофотограмметричного методу, що значно ускладнює процес опрацювання всіх цих даних.

Застосування наземного лазерного сканування для збереження культурних пам'яток в Yungang

Grotto представлено у роботі (Keqin et al., 2008). У статті запропоновано технологічний метод для збереження гротів за допомогою наземного лазерного сканування та цифрових зображень і представлено етапи опрацювання процесів для створення 3D-моделі грота. Важливим фактором дослідження було калібрування зразків лазерної точки, що має значний зв'язок з точністю хмари точок. Велика кількість призводить до низької точності моделі, на противагу малій кількості, яка є однією з причин великої кількості надлишкових даних. Робота полягала у встановленні відображення моделі з 2D цифрового зображення на 3D-моделі хмари точок. У роботі варто виділити проблему отримання загальної картини даних. У результаті зшивання сканів зростала похибка накопичення даних, яка призвела до відповідних неточностей результату. Для скорочення похибки було побудовано контрольну мережу на основі сканування марок з відомими просторовими координатами.

Аналізуючи результати роботи, варто зазначити, що лазерне сканування не дає змоги отримати необхідної інформації для створення 3D-моделі грота. Крім того, для знімання використовували лазерний сканер, роздільна здатність якого не задовольняє вимоги, поставлені в завданнях. Тому в цьому випадку можливе застосування цифрової камери з кращим розрізненням.

GISOT KNUCA 2023

Інноваційні методи дослідження культурної спадщини наведено у статті (Agnello et al., 2008). 3D-модель дерев'яної стелі було отримано за допомогою лазерного сканування та цифрового стереофотограмметричного методу. Тахеометричне знімання було використано для визначення розмірів стелі та огляду залу, виміру контрольних точок для фотограмметричного трансформування, реєстрації та орієнтації хмари точок. Стереофотограмметричний метод полягав у трансформуванні зображень у вертикальних і горизонтальних площинах і створенні ортофотопланів стелі. Щоб зменшити отвори в областях, не охоплених лазерним променем, численні сканування були виконані з різних точок всередині залу. У зв'язку з низькою роздільною здатністю вбудованої камери і відстані між сканером і стелею автори застосували інший сканер, який розташовували в трьох різних точках залу для того, щоб отримати хороше освітлення видимої області стелі. Перетворення координат хмари точки на геодезичну систему відліку дало змогу інтегрувати дані, отримані з двох різних сканерів.

Ця технологія є доволі складною з погляду опрацювання отриманих даних. Як видно з матеріалів роботи, застосовувалось декілька цифрових камер та лазерних сканерів, що потребує значних коштів.

Результати дослідження руйнувань розпису і ортофотоплан галереї фресок наведено в роботі

(Hu et al., 2012). Автори статті розглядають апаратне та програмне забезпечення системи для цифрового 3D-дослідження фресок храму в Тибеті. Ця система використовує лазерні тріангуляційні сканери, лазерні імпульсні сканери, цифрові камери та набір програмного забезпечення для отримання, автоматизованого моделювання матеріалів звітності щодо пошкоджень. Пропонується систематичний метод дослідження фресок інтегрувати до 3D-лазерного сканування та стереофотограмметричного методу. Отримували дані за допомогою лазерного сканера в різних масштабах. Всі відскановані дані зберігалися як ряд зображень.

GISUT KNUCA 2023

Подібний метод дослідження передбачає співпрацю з фахівцями у галузі архітектури та живопису. Це потрібно для розпізнавання і маркування пошкоджень, оскільки оператор, який не є спеціалістом у цих галузях, не зможе виявити всіх типів руйнувань фресок. Варто звернути увагу й на те, що цифрові зображення не відображають реального розміру і розташування понищень – їх потрібно визначати на 3D-моделі.

Комплексне використання лазерного сканування і цифрової камери застосоване при археологічних розкопок наведено у роботі (D'Urso et al., 2008). Технологічну схему можна підсумувати так: створення геодезичної мережі; позиціонування марок і додаткових контрольних пунктів; лазерне сканування; отримання високоточних цифрових зображень. Дослідження, яке виконували за допомогою лазерного сканера, було обумовлене складністю об'єкта для спостереження, і тому модель було реконструйовано з кількох сканів, отже, необхідно було планувати набір сканувань з різних точок спостереження. Для отримання повної 3D-моделі всі скани були зорієнтовані відповідно із загальною системою відліку. Недоліки, отримані в результаті лазерного сканування, було більшою мірою усунено внаслідок інтеграції даних з цифровими зображеннями.

У роботі (Menna et al., 2012) розглянуто використання високоякісного цифрового зображення і автоматичних стереофотограмметричних методів. Тріангуляція на основі лазерного сканування також використовується, щоб заповнити «мертві зони» в отриманих зображеннях на основі 3D-даних і для виконання геометричних порівнянь. Основні проблеми зустрічаються в 3D-текстурі. Для того, щоб перевірити якість зображення безпосередньо на місці, камеру під'єднували до ноутбука за допомогою відкаліброваного екрана і контролювали у спеціальному програмному забезпеченні.

Незважаючи на високий рівень виконання робіт, роздільна здатність зображень викликала неточності в результатах роботи, зокрема в автоматизованих відповідностях зображення, де основні труднощі виникли під час текстурування. Щоб домогтися однорідної текстури, можна виконувати цифрове знімання з постійної відстані.

GISUT KNUCA 2023

Отримання високої точності відображення текстури 3D-моделі скульптури описано в роботі (Gašparović et al., 2012). Реконструкція з високим ступенем точності 3D-моделі скульптури передбачає два аспекти: моделювання геометрії і текстур. Переважно мали на меті відновлення просторового положення камери в момент захоплення зображення – так було зареєстровано побудову їх моделей у перспективній проекції. У роботі запропоновано метод накладання текстур на моделі лазерного сканування на основі нежорсткого перетворення. Цей метод реєстрації точно вирівнює текстуру і модель глобально і локально.

Ця технологія є доволі трудомісткою за обсягом опрацювання даних. Проблема полягає у відборі контрольних точок, що відповідно передбачає необхідність висококваліфікованих спеціалістів у роботі з зображеннями та велику затрату часу.

Автоматичну процедура для об'єднання цифрових зображень і даних лазерних сканерів наведено в роботі (Moussa et al., 2012). Автори статті пропонують технологічну схему для об'єднання фотограмметричних зображень і хмари точок лазерних сканерів, засновану на базі даних, що зберігається в точці середовища моделі. Це дає змогу вилучити точну інформацію управління для безпосереднього орієнтування камери. У цьому дослідженні використовували лазерні сканери Leica ScanStation HDS 3000 і Faro Laser Scanner Focus3D. Експерименти в цьому дослідженні були продемонстровані з використанням різних наборів даних. Набори даних отримали камерою Leica HDS 3000 на приблизну відстань вибірки 2 см і 5 см відповідно на поверхні об'єкта. Цифрові зображення було отримано стандартною каліброваною цифровою фотокамерою NIKON D2X (12 Мрх) з об'єктивом 20 мм. Зібрані цифрові зображення вимагали таких процесів: коригування спотворень зображення, враховуючи лише зелений канал для того, щоб отримати подібні значення інтенсивності у створеному із зображення з камери і зменшити відмінності освітленості; зміни розмірів цифрових зображень якомога ближче до землі.

GISUT KNUCA 2023

Аналізуючи роботу, варто зазначити, що технологію розроблено лише для визначення точкових об’єктів, а для її використання потрібно багато програмних і апаратних засобів.

Інтеграцію даних лазерного сканера із зображеннями з цифрової камери для застосування їх в архітектурі відображено в роботі (Kochi et al., 2012). Для реєстрації всієї будівлі було встановлено марки до стіни і проведено виміри за допомогою тахеометра Topcon. Для побудови 3D-моделі було отримано цифрові зображення з областей одного і того самого об'єкта, які сканер захопити не міг. Варто зазначити, що у цьому випадку зображення повинні перекриватися. Отже, отримана нова ефективна методика створення 3D-моделі внаслідок інтегрування хмари точок, отриманих НЛС і 3D-даними за стереофотограмметричним методом. За допомогою такої технології авторам вдалося автоматизувати всі етапи отримання цифрових зображень, зокрема орієнтування, виявлення контурів і побудову 3D-моделі.

Підвищення точності та читабельності 3D-моделей за допомогою поєднання наземного цифрового знімання та лазерного сканування запропоновано у статті (Zhang et al., 2012). Слід зазначити, що отримати 3D-моделі археологічних артефактів лазерним скануванням є повністю можливим в масштабі 1:1. З іншого боку, текстура і RGB поверхні об'єкта, отриманого за допомогою лазерного сканера, мають значно нижчу роздільну здатність порівняно з текстурами, отриманими цифровою камерою. Важливо підкреслити, що оцінка апостеріорної точності глобальної реєстрації хмар точок у вигляді стандартного відхилення становила ± 0,136 мм, а середня відстань була лише ± 0,080 мм. Також дослідження показали, що якість текстур моделі прогнозовано збільшує читабельність. Запис археологічних артефактів робить 3D-моделі об’єктивно реальними, що значною мірою сприяє розвитку археології як науки, прискорює обробку та реконструкцію. Отримання віртуальної моделі також дає змогу представити результати не лише фахівцям.

У статті (Salo et al., 2008) розглянуто компоненти калібрування наземних лазерних сканерів Faro LS880 HE80. Калібрування полягає у вимірюванні

GISUT KNUCA 2023

відносних відстаней та орієнтоване на вимірювання компонент віддалі від сканера. Діапазон вимірювання 1–30 м було поділено на дві частини залежно від використовуваного інтервалу дискретизації та спостереження порівняно з результатами, отриманими з тахеометра. Відмінності було проаналізовано за допомогою перетворення Фур'є. Варто зазначити, що довжина хвилі, де виявлено періодичні похибки, часто корелює з довжиною хвилі модуляції частоти приладу або їх гармонік.

Аналізуючи результати роботи, потрібно підкреслити, що для визначення закономірностей поширення похибок та їх причин було отримано недостатньо даних.

GISUT KNUCA 2023

Висновки:

1. Проаналізувавши літературні джерела, в яких розглянуто технологічні процеси створення фронтальних планів архітектурних пам’яток, потрібно зазначити, що обрана тематика є актуальною сьогодні та існує багато методів вирішення поставленого завдання, які широко висвітлюються в сучасних публікаціях.

2. Застосування методу комбінування наземного лазерного сканування та цифрового стереофотограмметричного знімання має такі переваги: технологічну оперативність, складені фронтальні плани порівняно з іншими методами мають велику інформаційність та можливості тривимірної візуалізації створення 3D-моделей, максимально наближених до реальних об’єктів, що підлягають реставрації.

3. До недоліків методу належать отримання «мертвих зон» у лазерних хмарах точок, неякісне відображення текстури об’єкта, проблема об’єднання сканів з різних точок стояння сканера, отримання похибок внаслідок цифрового знімання (дисторсія, похибки елементів орієнтування тощо).

4. Нівелювати ці недоліки можна, використовуючи зображення, отримане цифровою камерою для заповнення «мертвих зон» у хмарах точок

лазерного сканера, телескопічної штанги для цифрового знімання та якісне виконання камеральних робіт.

5. Надалі заплановано дослідити похибки, що виникають під час лазерного сканування та цифрового знімання та розробити технологічну схему застосування лазерного сканера та цифрового стереофотограмметричного методу, яка буде оптимальною для створення фронтальних планів архітектурних пам’яток.

GISUT KNUCA 2023

РОЗДІЛ 2. Основи лазерного сканування та БПЛА знімання

2.1. Наземні лазерні сканери, що використовуються сьогодні

Перед початком роботи необхідно провести перевірку нового приладу, тому що необхідно бути впевненим у правильності, точності та достовірності даних, які ми одержуємо в ході його роботи. Серед безлічі приладів в геодезичну забезпеченні робіт варто виділити наземний лазерний сканер.

Саме тому задля точності одержуваних даних потрібно здійснити аналіз ряду НЛС, достовірності їх вимірювань і інших технічних характеристик. Варто також виокремити характеристики, які основними при виборі наземного сканера задля вирішення необхідних завдань.

Вагоме місце займає процес виявлення неточностей та помилок, що здійснюють вплив на результати дослідження, проведення аналізу та необхідних заходів відносно нівелювання їх впливу на завершальні результати. З вищеописаної обставини з'являється потреба в оцінюванні вимірювань на базі даних НЛС, які будуть одержані із робіт на інженерних об'єктах в реальному часі.

Станом на сьогодення наявні безліч видів наземних лазерних сканерів, що характеризуються різноманітною конструкцією, точністю, дальністю і швидкістю. Розглянемо базовий принцип дії наземних лазерних сканерів та їх види, які використовуються в геодезії, будівництві, моніторингу і при розв'язанні інших інженерних задач.

Принцип дії наземних лазерних сканерів зводиться до автоматизованого одержання координат точок на базі відстаней, які вимірюються у режимі без відбивача, та кутів спрямованості приймально-передавального пристрою далекоміра.

В порівнянні із лазерними сканерами повітряного базування, система координат наземних лазерних сканерів встановлюється конструкцією

GISUT KNUCA 2023

сканера, тобто передбаченим є те, що НЛС в ході процесу вимірів є нерухомим.

Головними структурними складовими НЛС виступають:

– далекомірний блок. Даний блок здійснює функцію, яка зводиться до вимірювання відстаней до перепон, які розташовані на шляху приймальнопередавального пристрою далекоміра. В якості джерела випромінювання застосовується напівпровідниковий лазер. Визначення відстані може здійснюватися за часом проходження (імпульсний метод), за зсувом фази (фазовий метод) відбитого сигналу і методом оптичної тріангуляції;

– оптико-механічний блок розгортки лазера (блок розгортки). Даний блок здійснює функцію, яка полягає у зміщенні приймально-передавального тракту далекоміра та фіксації кутів спрямованості випромінювання через оптико-механічну систему, яка формується із дзеркальних призм та сервоприводів.

– Вертикальна розгортка проводиться через плоску чи багатогранну дзеркальну призми, а горизонтальна розгортка здебільшого через розворот блоку розгортки довкола осі 2';

– канал передачі даних на керуючий комп'ютер.

Суть імпульсного методу вимірювання відстаней полягає в тому, що встановлюється час протягом якого випромінювання пройде відстань 2D. Головним чинником, який встановлює точність методу виступає точність вимірювання часу (реєстрації імпульсів). Теперішні пристрої виміру часу здійснюють реєстрацію імпульсів із точністю до 10^{-12} с, це дає змогу здійснювати вимірювання на відстані із точністю до 1 мм.

Плюсами імпульсного методу виміру відстаней виступає висока дальність дії при невеликій потужності імпульсу, тотожність одержуваного

GISUT KNUCA 2023

результату. Недоліками методу виступає невелика порівняно із фазовим методом, точність, обмеження частоти імпульсів у відстані до об'єкта.

В процесі вимірювань відстаней фазовим методом здійснюється відбувається реєстрація фазового зсуву Δφ сигналу, який подолав подвійну відстань до перепони. При відомому значенні загального числа N довжин хвиль α відстань

$$D = N\lambda + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\lambda \qquad (2.1)$$

де π – кутова міра радіан.

Головною задачею, яку розв’язує фазовий метод є встановлення цілого числа довжин хвиль N у подоланій відстані, який йменується «неоднозначності неоднозначності або багатозначності».

Плюсами фазового методу вимірювання відстаней виступає висока точність вимірів та вища результативність (за рахунок зміни закону модулювання несучого коливання в часі з'являється можливість роздільного детектування сигналів, що прийшли на приймач одночасно). Серед недоліків – лімітована дальність дій та потреба у високій потужності випромінювача.

Тріангуляційний метод базується на обчисленні відстані, що знаходиться, шляхом співвідношення трикутника із застосуванням відомих характеристик системи. Даний метод дає змогу здійснювати вимірювання в якості зміни відстані від датчика до контрольованого об'єкта, так і абсолютну його величину. У зв’язку із цим контрольована відстань може мати масштаб від кількох мікрометрів до сотень та тисяч метрів.

На базі даних методів сформована порівняльна характеристика у вигляді таблиці 2.1. Принципи дії блоку розгортки буває покрокові та безперервні.

GISUT KNUCA 2023

Покроковий режим роботи блоку розгортки. В НЛС, у яких блок розгортки діє у покроковому режимі, реєстрація кутів спрямованості приймальнопередавального пристрою виконується в момент подавання імпульсу. Властивістю даних систем виступає те, що блок розгортки знаходиться нерухомим до часу приймання імпульсу чи до завершення певного проміжку часу, протягом якого випромінювання подолає найбільш можливу для відповідної моделі сканера відстань (у випадку неповернення сигналу).

Таблиця 1. Аналіз НЛС за методом вимірювання відстаней

Метод вимірювання	Максимальна відстань, що вимірюється, м	Точність визначення відстаней, мм	Виробники лазерних сканерів даного типу
Імпульсний метод	50-300 (до 2000)	до 10 (25)	Leica, Callidus, Trimle, Optech, Riegl, Faro
Фазовий метод	до 100	до 10	IQsun, Leica, Vislmage, Z+F
Метод оптичної тріангуляції	до 5	до 1	Trimble, Minolta

GISUT KNUCA 2023

Особливою рисою НЛС з покроковою реєстрацією кутів виступає мала швидкість роботи, зумовлена лімітом кожного наступного кроку часу подолання сигналом подвійної відстані до перепони.

Безперервний режим роботи блоку розгортки. Розгортка приймально-передавального пристрою виконується шляхом безперестанного обертання блоку розгортки у горизонтальній та вертикальній площинах.

Відповідні блоки розгортки відокремлюються великою швидкістю вимірів, тому що у значній частині випадків саме кутомірна частина НЛС здійснює обмеження його швидкодії. Проте безперестанність обертання блоку розгортки стає причиною певної неоднозначності у вимірюванні відстаней, котру потрібно брати до уваги. Тому що за цей час, котрий

потрібен випромінюванню задля повернення на приймач, блок розгортки здійснює зміщення на певний кут.

Сучасний ринок геодезичного обладнання представлений значною чисельністю НЛС. Головними технічними властивостями, які дають змогу оцінити можливості НЛС, виступають:

а) дальність дії;

б) точність вимірювання відстаней;

в) швидкість виконання вимірювань;

г) мінімальний кутовий крок сканування;

ґ) кут поля зору;

д) діапазони припустимих робочих температур і зовнішніх умов;

е) клас безпеки лазера;

є) можливість геодезичного орієнтування НЛС;

ж) споживання напруги, що вливає на тривалість роботи НЛС.

Дослідимо більш детально представлені технічні характеристики наземних лазерних сканерів.

Дальність дії показує максимально можливу відстань, за якої НЛС може одержати однозначний результат із гарантованими характеристиками. Відповідна характеристика залежить від використовуваного методу виміру відстаней, потужності лазера та відбивної здатності поверхні.

Визначення точності вимірювання відстаней здійснюється за допомогою похибки одиничного виміру та залежить від методу виміру відстаней та конструкції далекоміра. Великий вплив на точність здійснює суперечливість лазерного випромінювання.

У випадку виміру відстаней до площин, не перпендикулярних осі променю, об'єктів складної форми, дуже рознесених повздовж осі променю, відбитий сигнал проходитиме від кількох складових поверхні. Внаслідок

GISUT KNUCA 2023

цього, вимірювана відстань належатиме довільній точці, яка розташована за межами об'єкта.

Чим більший розмір лазерної плями, тим більше координат виміряних точок будуть відрізнятися від свого істинного значення (рис.2.1).

Швидкість проведення встановлює число точок, які реєструються НЛС протягом певної одиниці часу. Відповідний параметр залежить від способу виміру відстаней та конструкції блоку розгортки. Згрупування фазового методу виміру відстаней та методу з неперервною реєстрацією кутів дає змогу одержати максимально можливу швидкість вимірів до 500000 точок за секунду (точок/с).

Кутовим кроком сканування є кутова величина зміщення блоку розгортки задля кожного виміру.

GISUT KNUCA 2023

Рис. 2.1. Помилки у вимірюванні відстаней, викликані високою розбіжністю лазерного випромінювання

Найменший кутовий крок сканування встановлює максимальну задля конкретної моделі НЛС щільність зйомки та залежить від конструктивних властивостей блоку розгортки. Кут поля зору НЛС знаходиться у градусній мірі (у горизонтальній та вертикальній площинах) максимальну область, що

можна захопити з однієї сканерної станції (без переміщення та розвороту НЛС).

Задля приведення результатів вимірювань НЛС до необхідної системи координат здійснюється орієнтування по точках із координатами, які нам відомі (сканерних марках). Використання відповідного способу орієнтування зумовлено відсутністю у значній частині НЛС пристроїв обліку нахилу та розвороту, щ дають змогу проводити іншими способами.

Проте протягом останнього часу спостерігається тенденція до переходу на традиційний спосіб орієнтування, який схожий на той, що використовується у електронних тахеометрах. Задля цього НЛС комплектують пристроями, які здійснюють компенсацію кутів нахилу приладу у певному діапазоні чи беруть до уваги їх. Знаючи значеннях кутів нахилу, положення центру сканера та дирекційного кута однією з осей проводиться приведення вимірів в необхідну систему координат. Майже усі моделі топографічних НЛС можуть працювати від джерел як змінної, так і постійної напруги.

Останній період з’являються більш модернізовані моделі наземних лазерних сканерів, котрі покращуються; запроваджуються новітні технології та здійснювати класифікацію даних приладів стає все важче. Тому представимо загальну класифікацію НЛС (рисунок 2.2).

GTSUT KNUCA 2023

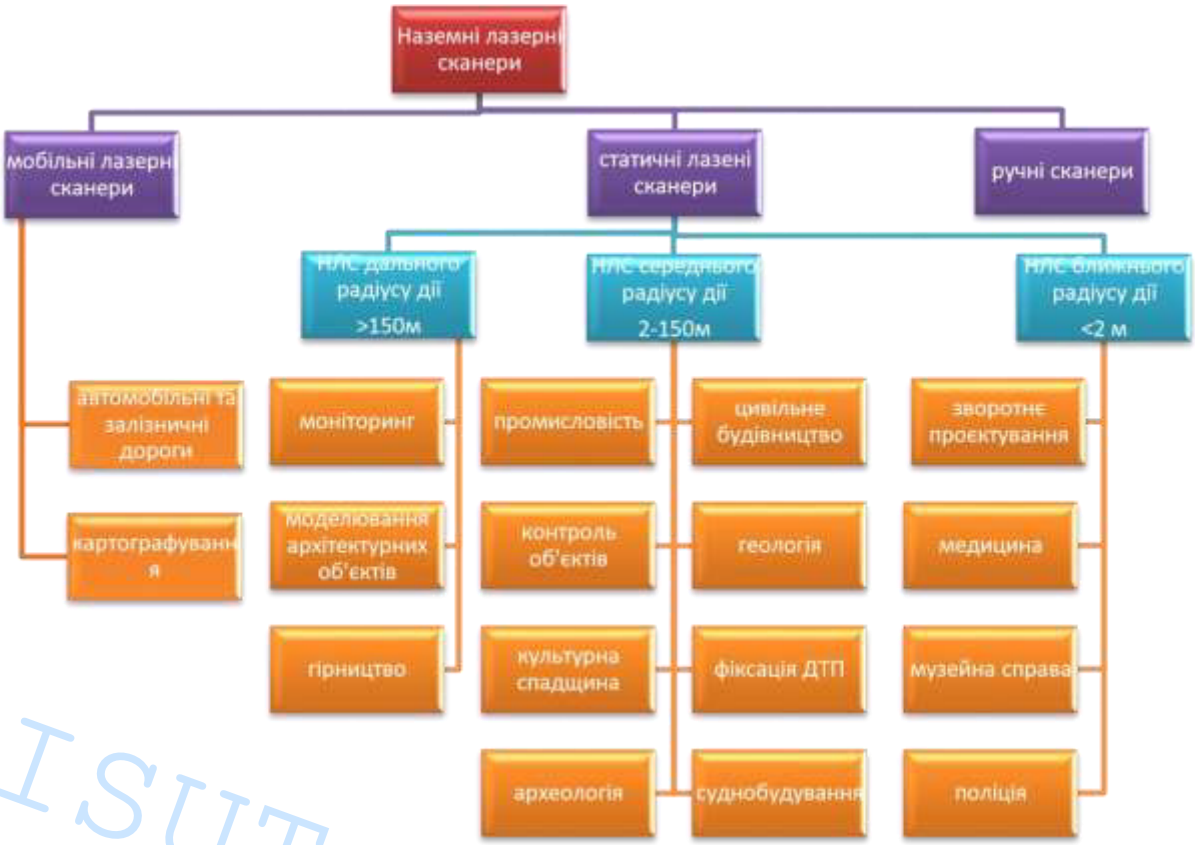


Рис. 2.2. - Класифікація НЛС.

НЛС ближнього радіусу дії, які мають високу (до сотих долей міліметра) точністю вимірювань, проте при цьому володіють лімітованою дальністю дії (до 2 м) та/або кут поля зору (в межах кута поля зору об'єктива цифрової камери). Відповідні сканери володіють досить вузькою специфікацією, безліч із них є стаціонарними;

НЛС середнього радіусу дії, дані сканери можуть проводити виміри із точністю до кількох міліметрів на відстанях до 150 м. НЛС даної групи володіють, здебільшого, досить великим кутом поля зору;

НЛС дальнього радіусу дії дають змогу здійснювати виміри на відстані від 150 м. У зв'язку із цим їх точність змінюється від 1 до 50 мм. Відповідні сканери мають близькі до панорамного кута поля зору (у горизонтальній площині) та великою швидкістю проведення вимірів (до 500 000 точок за секунду).

Відповідні сканери одержали назву «топографічні наземні лазерні сканери».

GISUT KNUCA 2023

2.2. Вимірювання сучасними наземними лазерними сканерами, основні етапи робіт

Станом на сьогодення в світі декількома фірмами розробляються наземні лазерні сканери, які володіють різноманітними функціональними можливостями. При цьому єдиної інструкції, в якій охарактеризовано стадії робіт та послідовності дій в ході проведення сканером знімання, немає. Через це здійснено огляд загальних принципів проведення робіт задля наземних лазерних сканерів і запропоновано стадії робіт та послідовність дій їх проведення в загальному.

Перед початком проведення вимірів на станції сканер потрібно встановити на штатив чи інший подібний пристрій. У процесі вибору місця розміщення станції головною вимогою виступає максимальний кут захоплення видимої ділянки знімання, що залежить від кута поля зору НЛС.

В моделях НЛС, які володіють обмеженим кутом поля зору в вертикальній площині, задля захоплення областей, близьких до зеніту, окрім вертикальної установки, у практиці використовується установка у горизонтальне положення чи із довільним кутом нахилу (рис. 2.8).

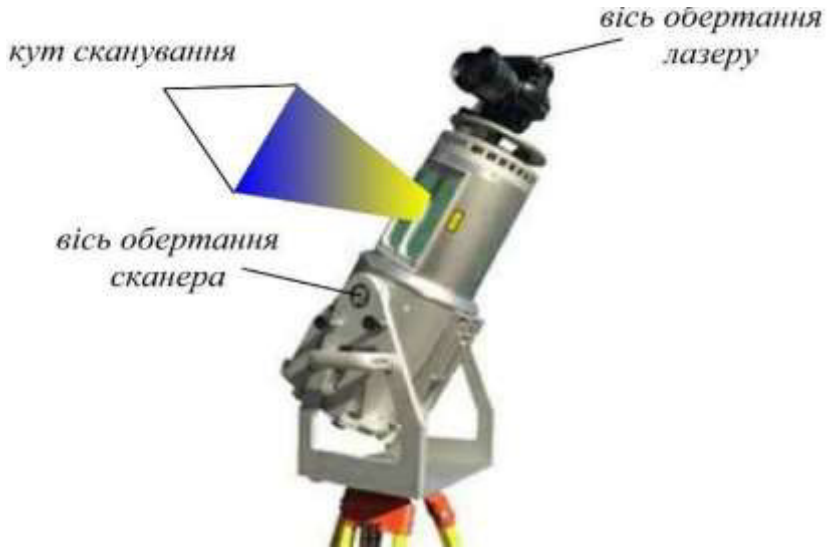


Рис.2.8. Наземний лазерний сканер з обмеженим кутом поля зору

GISUT KNUCA 2023

Такі способи установки є актуальними лише для сканерів із обмеженим вертикальним кутом поля зору, тому що панорамні сканери дають змогу проводити знімання у близьких до зеніту областях без нахилу(рис. 2.9).

Рис. 2.9. Наземний лазерний сканер з панорамним кутом поля зору

Задля проведення вимірів у необхідній системі координат в процесі роботи із наземними лазерними сканерами формується планово-висотне аргументування (ПВО). Формування планово-висотного аргументування проводиться у дві стадії: формування головного планово-висотного аргументування; формування робочого планово-висотного аргументування сканера.

Головне ПВО формується від пунктів державної геодезичної мережі (ДГМ)чи мереж згущення так, щоб здійснити забезпечення на ділянці робіт потрубне число точок робочого ПВО. При формуванні головного ПВО супутниковими методами пункти раціонально розміщувати на об'єкті під виглядом базисів, від яких виконується їх згущення в подальшому за допомогою прокладання висячих теодолітних ходів. Прив’язка до пунктів ДГМ потрібна у разі порівняння результатів в подальшому за деякий проміжок часу в єдиній системі координат.

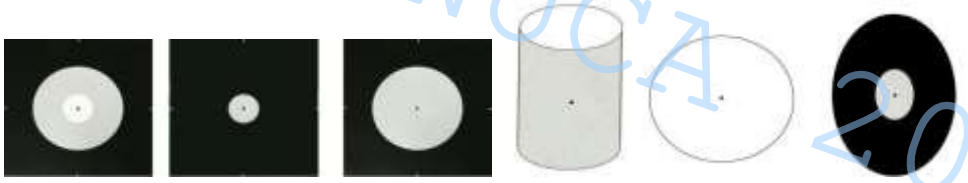
GISUT KNUCA 2023

Робоче планово-висотне аргументування представляє собою точки із відомими координатами, що можуть бути однозначно розпізнані на точковій моделі, та за котрими в подальшому обраховуються властивості орієнтування НЛС. Як робоче ПВО застосовують сканерні марки.

В базі дешифрування сканерних марок за відомостями наземного лазерного сканування лежать два принципи – знаходження геометричного центру плоскої фігури, яка знаходиться на контрасті у порівнянні із навколишніми поверхнями (плоскі сканерні марки, представлені на рисунку 2.10 а, б, в), чи знаходження центру геометричної фігури відомої форми і/або розмірів (об'ємні сканерні марки, представлені на рисунку 2.10 г, д, е), до прикладу, сфери, півсфери чи циліндра.

Задля зручності установки сканерних марок на різноманітні поверхні, їх нахилу чи розвороту можна застосовувати спеціальні підставки різноманітної конструкції.

GISUT KNUCA 2023



а) б) в) г) д) е)

- поверхня з низьким коефіцієнтом відбиття;

- світловідбиваюча поверхня;

- поверхня білого кольору; - геометричний центр марки.

Рис. 2.10. Типи сканерних марок

Конфігурація розташування точок робочого ПВО відносно НЛС має бути рівномірною, а зростання їх числа додає додаткові виміри, що підвищує точність та надійність встановлення показників орієнтування сканера. У певних випадках точки робочого ПВО виступають у ролі основного. Така обставина можлива тоді, коли мережа розвивається

методом прокладання сканерних ходів, тобто частина точок робочого ПВО (зелені) попередньої сканерної станції є точками робочого ПВО наступної (рисунок 2.11).

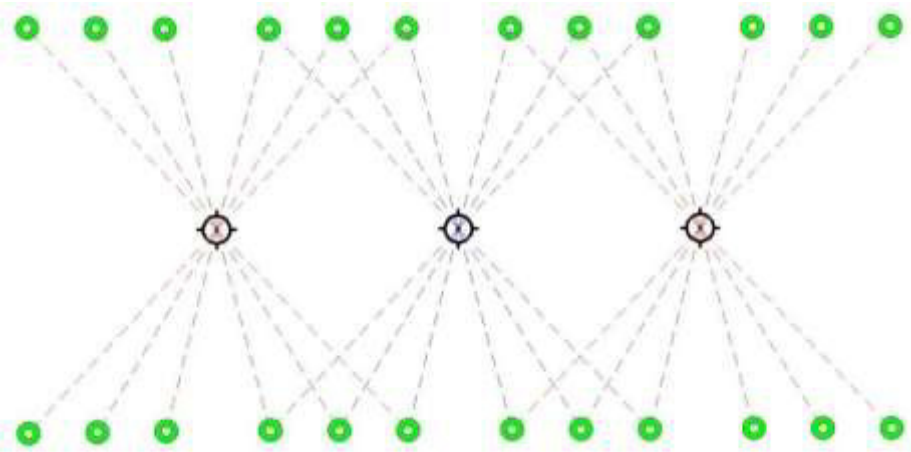


Рис. 2.11. Схема створення ПВО прокладанням ходу за допомогою сканера

GISUT KNUCA 2023

Дані ходи можуть бути замкнутими чи витягнутими. Беручи до уваги те, що точність встановлення координат марок НЛС часто більше точності одиничного виміру сканера та за рівнем відповідає чи перевершує точність більшої частини електронних тахеометрів, даний спосіб розвитку робочого ПВО є досить ефективний та дає змогу отримати високу точність орієнтування НЛС. Прокладання сканерних ходів правильним є у разі, коли навколишня ситуація дає змогу розміщати сканерні марки у потрібній конфігурації.

Орієнтування точкових моделей, одержаних із різних сканерних станцій в зовнішній системі координат, виконується через ПЗ. Воно, застосовуючи алгоритм пошуку спільних сканерних марок в обох системах координат (зовнішньої та системи координат сканера), встановлює зв'язки поміж марками, опісля чого здійснюється орієнтування. Задля оцінки точності та якості орієнтування застосовується значення помилок

визначення лінійних та кутових складових орієнтування чи помилки пози марок в зовнішній системі координат.

Процес проведення вимірів на сканерній станції однаковий для усіх моделей НЛС та включає такі стадії:

а) встановлення зв'язку НЛС із керуючим ПЗ. Задля управління процесами сканування і обміну відомостями між сканером та керуючим комп'ютером застосовується керуюче ПЗ. У поодиноких випадках, НЛС може мати вбудований комп'ютер із монітором. Теж має місце запис вимірів не на зовнішній комп'ютер, а на знімні карти пам'яті. Опісля запущення керуючого

ПЗ і встановлення зв'язку із НЛС проводяться виміри;

б) завдання області сканування. Керуюче ПЗ для різноманітних моделей наземних сканерів має аналогічні функції завдання режимів сканування і обміну даними. Завдання області сканування виконується за допомогою зображення поля зору сканера. Задля створення даних зображень застосовується пряме відео чи панорамний знімок, одержаний через вбудовану відеокамеру.

Недоліком даного знімка виступає те, що реальна область сканування буде трішки відрізнятися від заданої через розбіжності положення відеокамери із приймально-передавальним пристроєм далекоміра.

Інший спосіб створення зображення поля зору НЛС зводиться до формування зображення за даними сканування. У цьому випадку перед проведенням головних вимірювань здійснюється сканування у межах поля зору сканера із великим кутовим кроком. Це дає змогу задавати область сканування, що буде точно така як реальна;

в) завдання кроку сканування. Більша частина НЛС має можливість завдання; довільних значень кроку сканування як у кутовій, так і у лінійній мірі. У другому випадку у керуючому ПЗ зазначається потрібна відстань між

GISUT KNUCA 2023

знімальними точками на деякій відстані, на основі чого встановлюється відповідний кутовий крок;

г) завдання режиму сканування. Безліч моделей НЛС володіють функціями завдання режимів сканування, напрямлені на зростання точності вимірів, що одержується декількома способами. Першим виступає фокусування лазерного променя, яке виконується вручну на фіксовану відстань, чи у автоматичному режимі для кожного виміру. Другим способом виступає зростання числа прийомів проведення кожного виміру задля їх усереднення в подальшому.

GISUT KNUCA 2023

2.3. Класифікація БПЛА

Безпілотні літальними апаратами можна керувати з легкістю, але зазвичай тільки в межах видимості пілота. Це обмежує територію, яку можна охопити за одну місію (від хвилин до однієї години). З іншого боку, їх можна доставити в зону обстеження на автомобілі або вантажівці, і ними керує багато людей. Ці системи дуже привабливі для дослідницьких груп, які займаються проектуванням приладів і тематичними дослідженнями, оскільки вони пропонують недорогий і гнучкий спосіб отримання даних.

Прив'язана повітряна куля або дирижабль, ймовірно, є найпростішим БПЛА, який можна уявити. Він легко керується (особливо його висота), але, звичайно, досить нестійкий, якщо швидкість вітру зростає. Повітряну кулю можна адаптувати до розміру та маси інструментів, які необхідно носити. [16]

GISUT KNUCA 2023

Рис. 2.12 Вільнолітаючий дирижабль на малій висоті

Вільно літаючі дирижаблі пропонують користувачам як платформу для моніторингу та огляду

Мікро- літальний апарат (мікро-БПЛА, MAV) це клас літальних апаратів, який відрізняється своїм малим розміром і автономним управлінням. Розміри таких апаратів можуть сягати 15 сантиметрів. Розробка відбувається в комерційних, дослідницьких, державних і військових цілях; які передбачають появу апаратів розміром з комаху. Такі апарати дозволяють проводити дистанційне спостереження у небезпечних або важко доступних умовах, які не

доступні наземним засобам. Мікро-БПЛА також створювались любителями,в таких галузях як проведення чемпіонатів серед роботів і аерофотозйомка.

Рис. 2.13 Мікро- літальний апарат (мікро-БПЛА, MAV) , призначений для перенесення систем відео- та фотозйомки

Більші маловисотні літаки з фіксованим крилом використовуються в сільському господарстві та багатоцільовому моніторингу Ці системи здатні літати автономно (наприклад, Aerosonde був першим БПЛА, який здійснив переліт через Атлантичний океан у 1998 році).

Однак зараз це не дозволено в більшості країн. [17]

Рис. 2.14 Аерозонд (© Jon Becker, Aerosonde Pty Ltd)

GISUT KNUCA 2023

Безпілотні вертольоти бувають різних типів і розмірів. У Японії, наприклад, сотні використовуються в сільському господарстві, використовуються як платформи для оранки, сівби, обприскування тощо. Цей бізнес коштує 100 мільйонів доларів США щороку. [18]

Рис. 2.15 Yamaha R-MAX

Ці вертольоти також були оснащені інструментами для контролю росту врожаю, виявлення хвороб і стресу рослинності через нестачу води. На рис. 2.15 зображено Yamaha R-MAX.

Параплани з двигуном цікаві тим, що вони потребують дуже мало опори на землі, використовують перевірені технології, переносять значні навантаження і є недорогими в порівнянні з іншими маловисотними системами. Вони успішно літали у віддалених районах, які не можуть бути економічно врегульовані за допомогою звичайного геодезичного обладнання.

Рис. 2.16 Моторний параплан

GISUT KNUCA 2023

Середньовисотні системи мало корисні для цивільної чи наукової спільноти загалом: вони розроблені для роботи в тому ж повітряному просторі, що й повітряний рух. Деякі військові системи, розроблені для таких висот, мають виняткову витривалість, що було б цікаво для масштабних досліджень. Однак у Бельгії є плани використовувати військові системи БПЛА (BHunters) для покращення постійного моніторингу (відносно невеликих) територіальних вод. [19]

Рис. 2.17 B-Hunter (© Том Брінкман,www.aerobel.be)

Запропоновані висотні системи є або дирижаблями, або літаками з фіксованим крилом. Щоб мати будь-яку користь, вони також повинні мати дуже тривалу витривалість, яка вимірюється днями і тижнями, а не годинами. Таким чином, їм необхідно використовувати сонце як джерело енергії (ядерна енергія може бути можливою, але вона не вважається достатньо безпечною). Дирижаблі повинні бути дуже об'ємними, щоб переносити значне корисне навантаження (оскільки їхня здатність підйому безпосередньо пов'язана з тиском повітря навколо них), але вони також потребують значної потужності, щоб дозволити їм протистояти вітрам на великій висоті, що забезпечується сонячна батарея на обкладинці дирижабля вдень і від акумуляторних батарей або регенеративних паливних елементів вночі. Було розпочато кілька програм, але до цього часу вони не привели до створення літальної системи. [20]

GISUT KNUCA 2023

Для літаків з фіксованим крилом обмежуючим фактором є доступна сонячна енергія (1360 Вт/м2, перетворена з ефективністю менше 20%). Підйомна сила для літаків з нерухомим крилом залежить від щільності повітря, поверхні крила та швидкості повітря. У нижній стратосфері щільність повітря дуже низька (10-15 % щільності на рівні землі), тому дуже важливо спроектувати систему надзвичайно малої маси. Це було реалізовано QinetiQ (Великобританія) у своїй програмі Zephyr, кульмінацією якої був 54-годинний політ, який досяг висоти понад 17,5 км на ракетному полігоні Уайт-Сендс, Нью-Мексико, США, у серпні 2007 року. Альтернативний дизайн, розроблений AeroVironment (США) — літаюче крило з розмахом крил понад 75 м, яке досягло висоти понад 30 км у 2001 році.

GISUT KNUCA 2023

Рис. 2.18 Запуск Zephyr (© QinetiQ)

У VITO проект Pegasus був запропонований ще в 2000 році з метою використання БПЛА на великій висоті для дистанційного зондування. БПЛА, який називається Mercator, пов’язаний із системами QinetiQ Zephyr (Fransaer, 2004).

Рис. 2.19 Безпілотний літак Пікард, котрий працює на сонячній енергії

Європейське космічне агентство (ЄКА) надала в розпорядження Solar Impulse космічні технології, доступні в Європі через Transfer Technology Program. Швейцарський федеральний технологічний інститут у Лозанні є офіційним науковим консультантом проекту. Намір Solar Impulse полягає в тому, щоб сприяти використанню альтернативної енергії в авіації, у даному випадку сонячної, нескінченної та чистої порівняно з забруднювачами та обмеженими викопними видами палива, які використовуються сьогодні. [21]

Хоча дизайн літака ніколи не міг перевозити пасажирів, Solar Impulse має на меті, перш за все, викликати інтерес громадськості до технологій, здатних зробити стійкий розвиток.

Сонце є основним джерелом енергії для супутників, як і для літака Пікард. Європейська космічна промисловість розробила одні з найефективніших інтелектуальних систем управління енергією, сонячні батареї та системи зберігання енергії, які дозволять цьому апарату літати без проблем і без будьякої традиційної формули палива. [22]

GHSUT. KNUCA 2023

2.4. Планування БПЛА знімання

Найважливішими параметрами планування польоту є час польоту, висота польоту, лінії польоту, шаблон і зображення, відсоток перекриття збоку та вперед. Наприклад, для 3D-моделювання зображення, які класифікуються як бічні та прямі, повинні мати достатнє перекриття. Бічне перекриття — це перекриття між двома сусідніми лініями траєкторії польоту, тоді як перекриття між двома послідовними зображеннями на одному шляху називається прямим або кінцевим перекриттям. Відсоток перекриття визначатиме кількість ліній польоту, кількість знятих зображень і інтервал часу між зйомкою зображення. У будь-якому фотограмметричному проекті, Відсоток перекриття збоку та вперед вздовж швидкості польоту визначає зйомку сцени на кількох зображеннях під різними кутами огляду. Таким чином, накладання зображень визначає якість фотограмметричної продукції БПЛА, оскільки впливає на щільність точок як функцію кута огляду. Поряд із відсотком накладання зображень, шаблон ліній польоту також впливає на кількість зображень, які фіксують окрему сцену. На основі розмірів досліджуваної території та вимог до даних можна розробити ряд моделей ліній польоту. Однак у спільноті наук про Землю схема польоту, як правило, є або планом польоту газонокосарки (площина рухається вперед і назад паралельними лініями польоту), або перпендикулярним планом польоту (площина рухається вперед і назад за двома ортогональними перпендикулярними схемами).

Ряд дослідників у галузі геонауки вивчали вплив накладання зображень БПЛА на якість картографічних продуктів, але вони мало згадують план траєкторії польоту як ключовий фактор, що впливає на якість фотограмметричних продуктів, у поєднанні з відсотком накладання зображень. Деякі вчені використали лише два зображення для експериментального дослідження ефектів перекриття зображень на продуктивність алгоритму масштабно-інваріантного перетворення ознак,

GISUT KNUCA 2023

змінюючи перекриття від 10% до більш ніж 90% і запропонували поріг ступеня перекриття 55% для напряму маршруту та 30% для бічного напрямку. Інші проаналізували дані БПЛА для вимірювання висоти дерева з двома варіаціями прямого перекриття (96%, 60%) і чотирма варіантами бічного перекриття (20%, 40%, 60% і 80%). Вони дійшли висновку, що максимізація фотографічного перекриття, особливо переднє перекриття, має вирішальне значення для мінімізації похибки висоти крону та для загального відбору проб лісового пологу. Проте велике перекриття призводить до збільшення кількості фотографій і збільшення часу обчислень, незалежно від обчислювального обладнання, підкреслюючи важливі компроміси між якістю даних і можливістю швидкого отримання високоякісних результатів. [23]

Загальний алгоритм виконання зйомки за допомогою БПЛА зображено на рис.2.19.

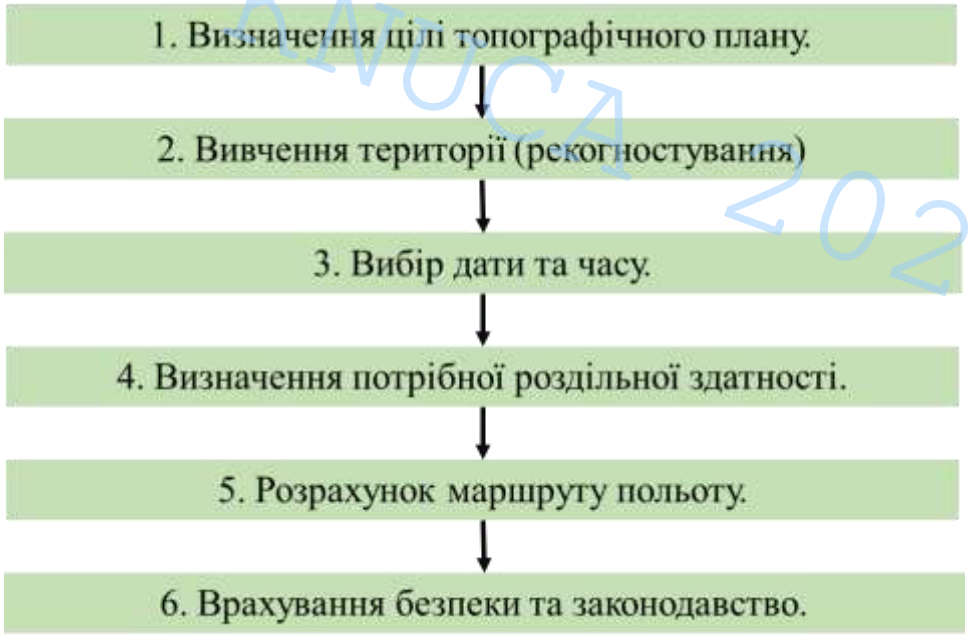


Рис.2.19. Загальна схема виконання БПЛА знімання

GIS SUT KNUCA 2023

РОЗДІЛ 3. ОТРИМАННЯ ДАНИХ БПЛА ЗНІМАННЯ ТА ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

3.1 Характеристика об’єкту знімання

Київський іподром — іподром у Києві, розташований у місцевості Теремки. Збудований у 1962—1969 роках інженерами В. В. Кобкіним і Г. П. Абросимовим за проєктом архітекторів В. Н. Шермана, Г. П. Маркитян, Ю. Н. Піскуненка та І. С. Телюка. Це один з останніх в Україні іподромів, завдяки існуванню якого в Україні зберіглась та розвивається галузь рисистого конярства.

Рис. 3.1. Розташування споруди іподрому на космічному знімку

Об’єктом БПЛА знімання виступає покрівля трибун іподрому, наземного лазерного сканування фасади споруди та трибуни.

Рис. 3.2. Фасад іподрому

GISUT KNUCA 2023

3.2 Методика БПЛА знімання

Планування маршрутів знімання виконано в програмі DJI Terra, у якості БПЛА використано DJI Phantom 4 pro v2.

Знімання заплановано в режимі зйомки 3Д об’єкту, що передбачає 6 прольоти над спорудою з відхиленням камери від надиру на 30 градусів (рис. 3.2)

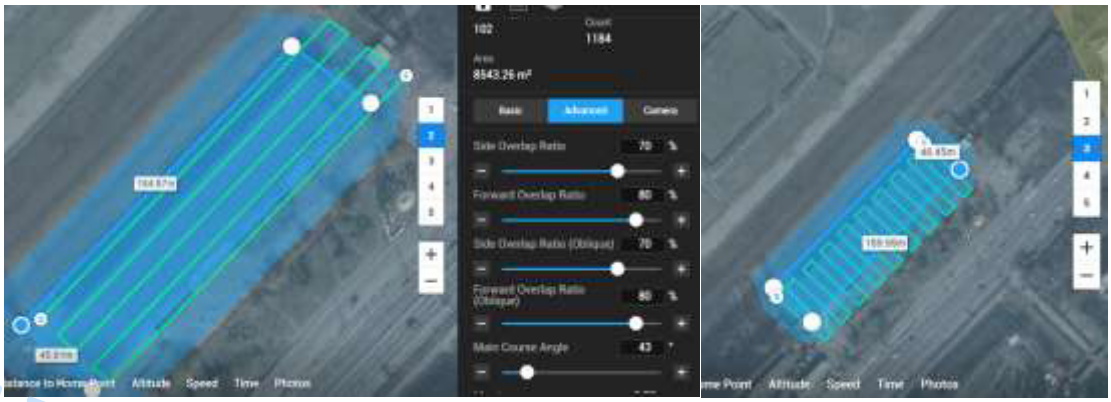


Рис. 3.2. Налаштування БПЛА знімання

Знімання заплановано на висоті 20-25 метрів, що дозволить отримати роздільну здатність знімків в межах 4-7 мм відповідно.

Схематично процес БПЛА знімання можна відобразити на рис.3.3.

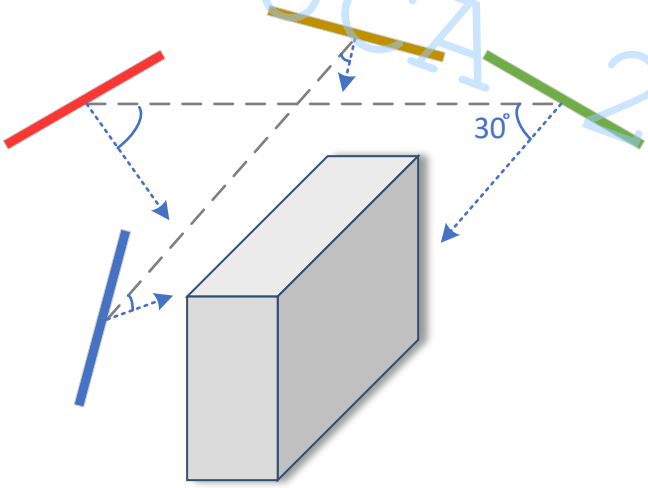


Рис. 3.3. Схематичне зображення БПЛА знімання споруди

Фактично частина даних була відбракована, частину не було змоги виконати на запланованій висоті за рахунок перешкод у вигляди дерев, тому схему знімання отримано наступного вигляду (рис.3.4)

GISUT. KNUCA 2023

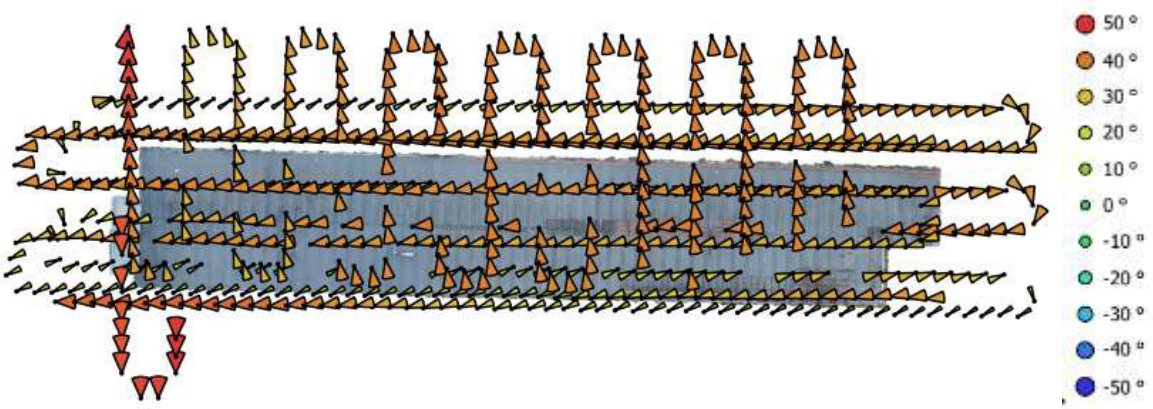


Рис. 3.4. Фактична схема знімання іподрому.

На покрівлі іподрому було розташовано марки, надруковані на листах формату А4 (рис.3.5). В подальшому координати цих марок було визначено за результатами лазерного сканування покрівлі. Також по контуру споруди на карнизі та фасаді було обрано додаткові характерні точки.

GISUT KNUCA 2023

Рис. 3.5. Марка на покрівлі

3.3 Методика лазерного знімання

Лазерне сканування виконано за допомогою лазерного сканера FARO.

На покрівлі виконано 33 станції знімання, після зшивки всіх хмар отримано спільну хмару точок покрівлі іподрому (рис.3.6.)

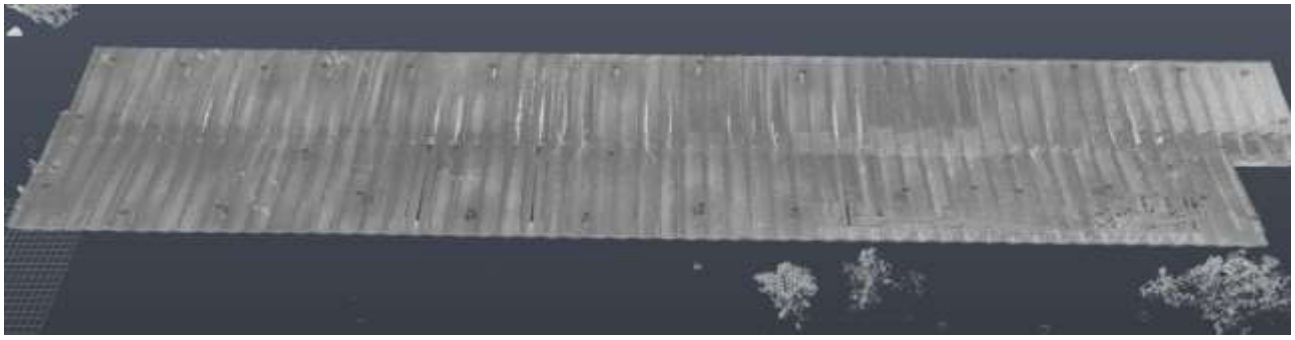
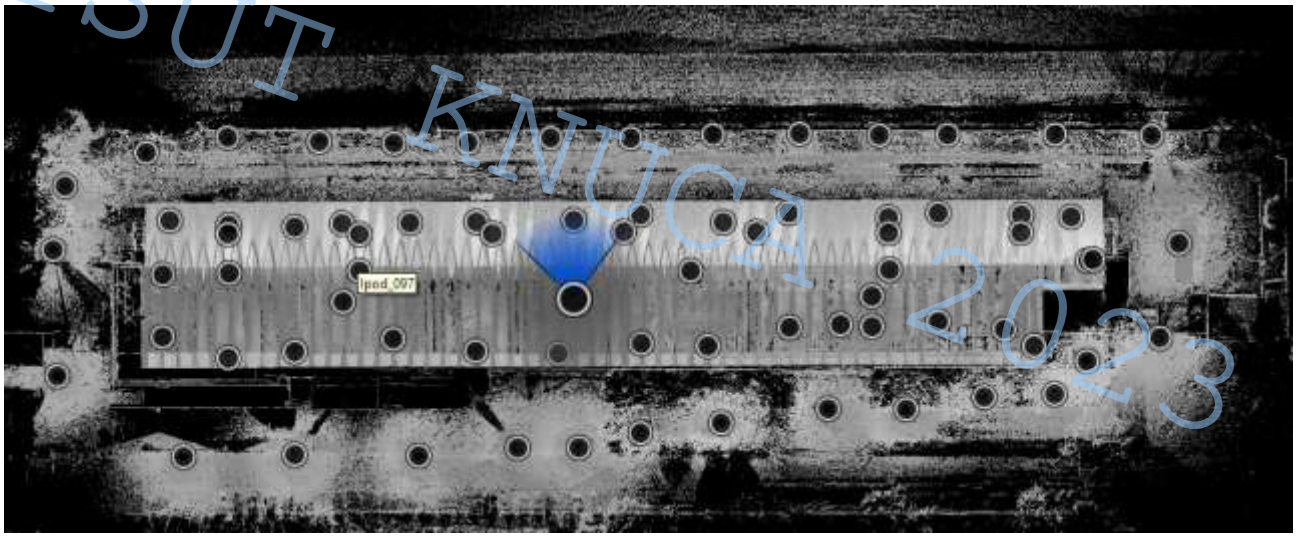


Рис. 3.6. Зшита хмара точок лазерного сканування покрівлі іподрому

Навколо споруди виконано 75 станцій сканування, та отримано спільну хмару точок фасаду, трибуни та покрівлі іподрому (рис. 3.7).



GISUT КПІСА 2023

Рис. 3.7. Зшита хмара точок лазерного сканування фасадів іподрому

З результатів лазерного сканування по хмарі точок визначено координати замаркованих точок, які будуть в подальшому використані в опрацюванні БПЛА знімання. Координати точок на покрівлі наведено в таблиці 2 та у додатку 1.

Таблиця 2. Координати маркерних точок на покрівлі

№	X	Y	H
101	5.363	6.036	5.005
102	5.64	17.767	5.08
104	40.476	3.691	4.4
105	40.507	16.924	4.08

106	44.288	30.643	5.605
107	82.429	15.727	4.06
108	98.481	28.072	5.569
109	97.832	2.142	4.526
110	136.516	14.391	4.141
111	131.618	27.945	5.616
112	156.995	5.335	4.61
113	155.604	26.741	5.489
114	176.594	27.212	5.775
115	176.904	14.577	4.979
116	167.488	-0.224	4.645

Незважаючи на достатньо велику кількість станцій знімання на покрівлі в отриманій хмарі точок все одно присутні пробіли внаслідок «тіней» (рис. 3.8)

GISUT KNUCA 2023

Рис.3.8. Дефекти хмари точок лазерного сканування

РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ТА КІЛЬКОСТІ ОПОРНИХ ТОЧОК ДЛЯ БПЛА ЗНІМАННЯ

4.1 Визначення місця розташування опорних точок

4.1.1 Комбінація точок на покрівлі та фасаді

У якості опорних точок було запропоновано використати два різні варіанти: точки на карнизі покрівлі, як найбільш близькі по роздільній здатності на знімках від БПЛА та точки на землі на характерних контурах (розмітка паркінгу, тощо). Координати опорних точок були отримані з результатів наземного лазерного сканування.

Опорні точки на покрівлі, контрольні точки по карнизу та фасаду будівлі (рис.4.1).

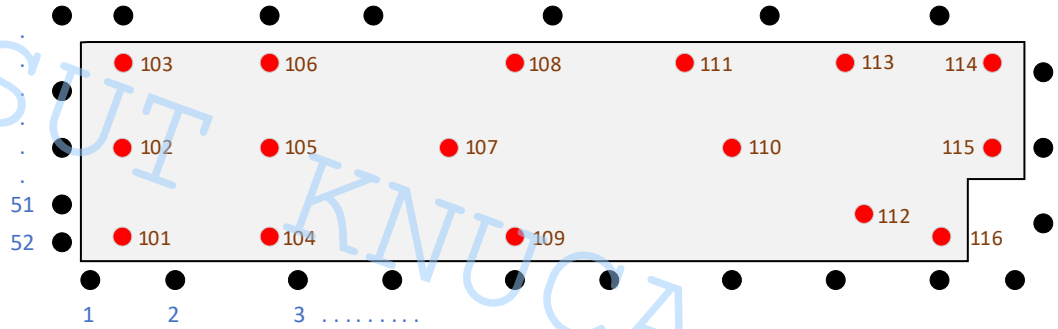


Рис. 4.1. Схематичне зображення контрольних (чорні) та опорних (червоні) точок

Таблиця. 3 СКП опорних та контрольних точок (покрівля - фасад)

	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)	m_{xy} (м)	m_{xyz} (м)
Опорні	0.005	0.006	0.009	0.008	0.012
Контрольні	0.180	0.901	0.416	0.919	1.009

Для цього експерименту додатково наведу СКП опорних та контрольних точок в розрізі кожної точки.

Таблиця 4. СКП опорних точок (покрівля)

Опорні				
№	m X (м)	m Y (м)	m Z (м)	m XYZ (м)
101	0.0023	-0.0007	-0.0161	0.0163
102	0.0050	-0.0007	-0.0084	0.0098
103	0.0007	-0.0079	-0.0006	0.0080
104	-0.0022	-0.0037	0.0019	0.0047

GISUT KNUCA 2023

105	0.0072	-0.0036	0.0181	0.0198
106	-0.0024	0.0038	0.0096	0.0106
108	0.0012	0.0096	0.0089	0.0131
107	-0.0019	0.0127	0.0111	0.0169
109	-0.0025	-0.0001	0.0007	0.0026
110	0.0045	0.0048	0.0074	0.0099
111	-0.0088	0.0130	-0.0001	0.0157
112	-0.0062	-0.0021	0.0068	0.0094
113	0.0101	-0.0020	-0.0039	0.0110
114	0.0054	-0.0026	-0.0129	0.0142
115	-0.0024	-0.0053	-0.0038	0.0070
116	-0.0037	-0.0078	0.0009	0.0087
Загальна	0.0049	0.0064	0.0088	0.0120

Таблиця 5. СКП контрольних точок (фасад)

Контрольні				
№	m X (м)	m Y (м)	m Z (м)	m XYZ (м)
2	-0.1267	1.4292	0.0637	1.4363
1	-0.1350	1.5238	0.0623	1.5310
3	-0.1451	1.3116	0.0708	1.3215
4	-0.1350	1.2601	0.0155	1.2674
6	-0.1472	1.0166	-0.0006	1.0272
8	-0.1653	1.1766	-0.6779	1.3679
9	-0.1615	0.7540	-0.0693	0.7742
10	-0.1437	0.6547	-0.0149	0.6705
11	-0.3143	0.6232	-0.0623	0.7008
12	-0.1115	0.4259	-0.0445	0.4425
14	-0.1260	0.2341	-0.0397	0.2689
15	-0.1256	0.1610	-0.0419	0.2085
16	-0.1299	0.0963	-0.0486	0.1689
17	-0.1459	0.0327	-0.0466	0.1566
18	-0.1364	-0.0348	-0.0271	0.1434
23	-0.0291	-0.1882	-0.0211	0.1916
24	-0.9251	-0.4997	-2.5400	2.7491
26	0.0689	-0.1456	-0.0292	0.1637
28	0.0621	-0.1132	-0.0259	0.1317
30	0.0613	-0.0092	-0.0297	0.0687
31	0.0588	0.1297	-0.0332	0.1462
32	0.0635	0.1417	-0.0262	0.1575
33	0.0489	0.2984	-0.0398	0.3050
34	0.0521	0.2429	-0.0293	0.2502
35	0.0459	0.3362	-0.0393	0.3416
36	0.0342	0.5835	0.0010	0.5845
37	0.0470	0.4729	-0.0595	0.4789
38	0.0368	0.5905	-0.0409	0.5931

GISUT Kafedra 2023

39	0.0166	0.6887	-0.0447	0.6903
40	0.0087	0.7962	-0.0614	0.7986
41	0.0372	0.7941	-0.0605	0.7973
42	0.0196	1.0165	-0.0722	1.0192
43	0.0322	0.8625	-0.0650	0.8656
44	-0.0002	1.2801	-0.0738	1.2822
45	0.0266	1.3070	-0.0746	1.3094
46	0.0099	1.4227	-0.0956	1.4259
47	0.1101	1.2391	-0.3972	1.3059
48	-0.0107	1.4329	-0.0687	1.4346
49	0.0750	1.3806	-0.2908	1.4129
50	-0.0652	1.4651	-0.0703	1.4682
51	-0.1262	1.4549	-0.0971	1.4636
52	-0.2387	1.4862	-0.1140	1.5095
Загальна	0.1797	0.9015	0.4161	1.0090

На графіках відобразимо розподіл похибок по координатам (рис. 4.2 та рис. 4.3)

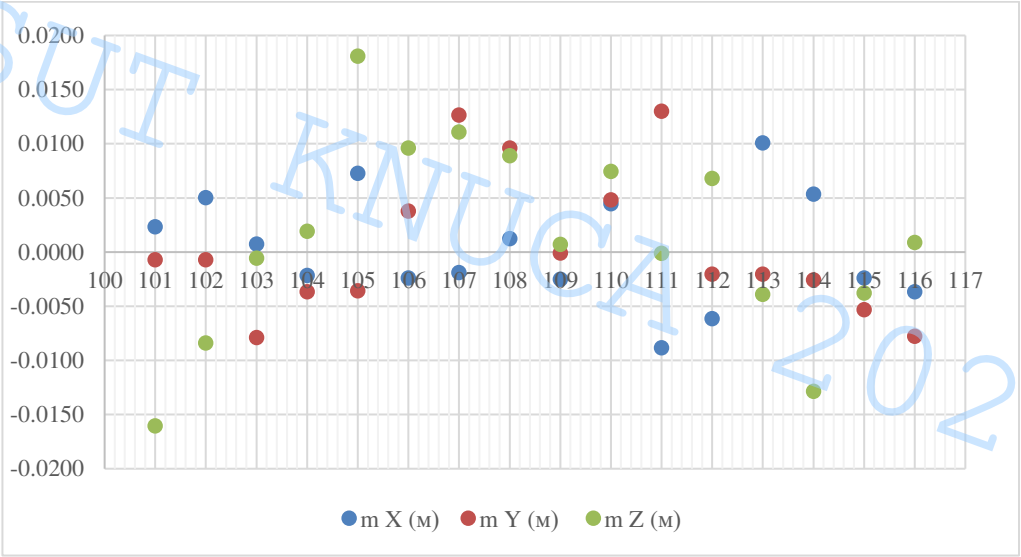


Рис. 4.2. Графік розподілу СКП опорних точок (покрівля)

GISUT KNUCA 2023

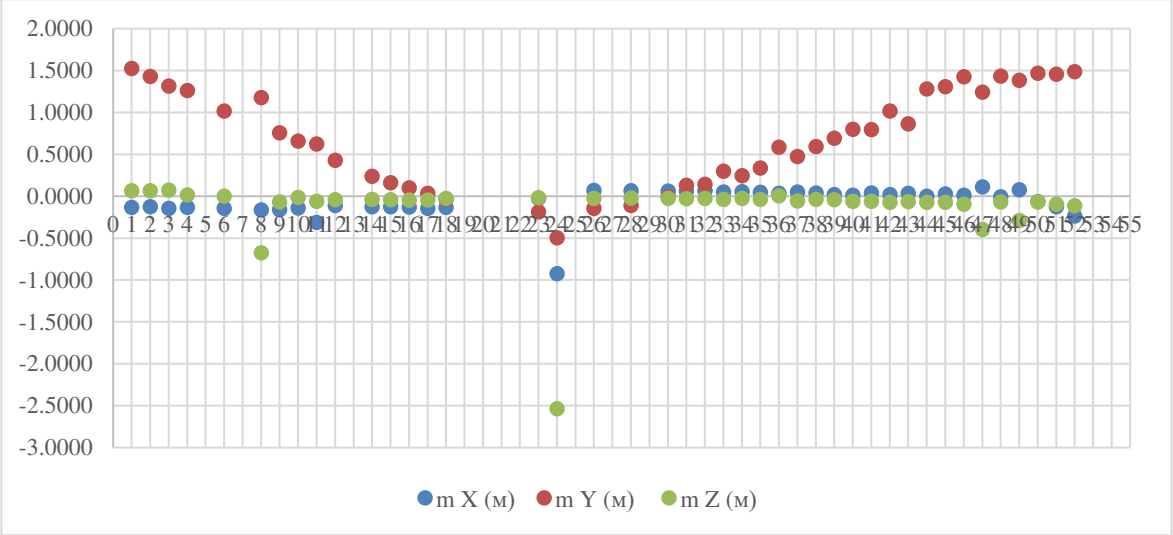


Рис. 4.3. Графік розподілу СКП контрольних точок (фасад)

З результатів аналізу СКП можна зробити висновок, що точки по фасаду споруди та карнизу покрівлі виявились з дуже великими помилками, які сконцентрувались в передній частині споруди. Враховуючи низькі значення залишкових помилок по опорним точкам після вирівнювання хмари точок БПЛА, та нерівномірний розподіл помилки на контрольних точках, можна дійти висновку про погану якість точок фасаду та карнизу в фотограметричній моделі.

Тепер змінимо ситуацію на зворотню, і в якості опорних точок візьмемо точки на фасаді та карнизі, а в якості контрольних точки на поверхні покрівлі (рис.4.4).

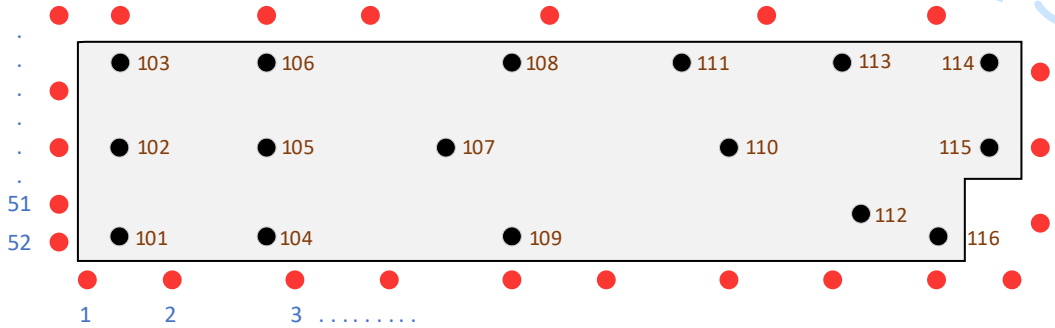


Рис. 4.4. Схематичне зображення контрольних та опорних точок

Результати зведено в таблицю 5 та відображено на рисунку 4.5.

Таблиця 5. СКП точок (фасад -покрівля)

	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)	m_{xy} (м)	m_{xyz} (м)

GISUI KNUCA 2023

Опорні	0.138	0.077	0.389	0.158	0.420
Контрольні	0.118	0.820	0.172	0.828	0.846

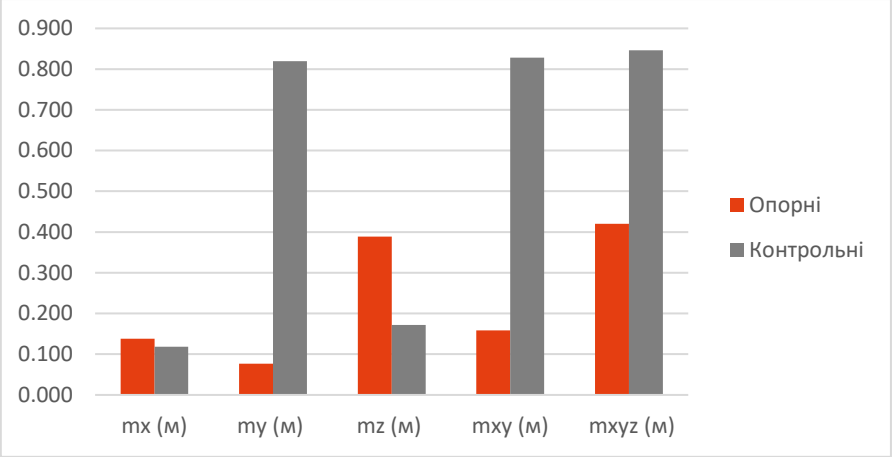


Рис. 4.5. СКП точок (фасад -покрівля)

Як видно з результатів експерименту різниця в СКП між опорними та контрольними точками більш вирівнялась, проте великі значення помилок в координату У так і залишились.

Спробуємо покращити ситуацію, прибравши опорні точки в яких наявно мало проекцій точок (2 – 3 проекції).

Таблиця 6. СКП точок (фасад -покрівля) варіант 1

	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)	m_{xy} (м)	m_{xyz} (м)
Опорні	0.046	0.040	0.076	0.061	0.097
Контрольні	0.191	0.646	0.514	0.674	0.847

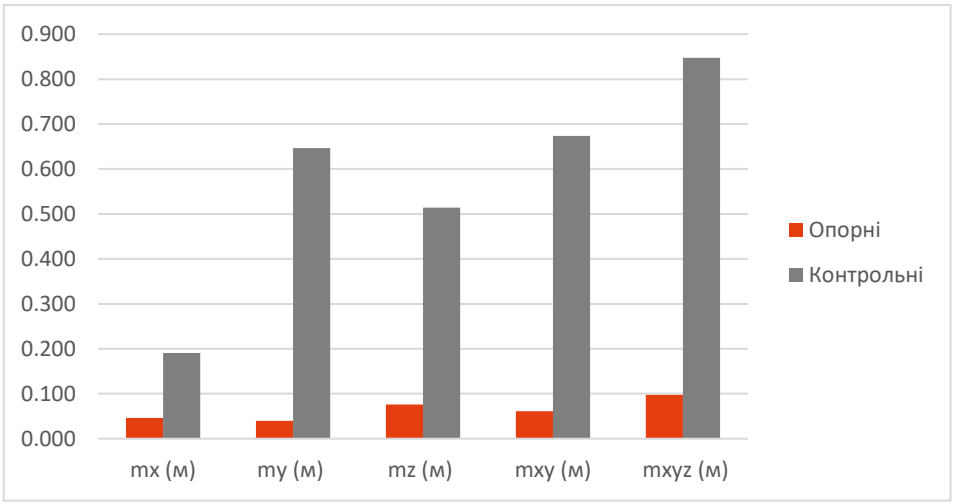


Рис. 4.6. СКП точок (фасад -покрівля) варіант 1

GISUT KNUCA 2023

Отримані результати схожі на перший варіант обробки, точність по опорним точкам досить висока, проте у контрольних точок вона дуже велика.

Спроба вжити заходів щодо зменшення помилки на контрольних точках, шляхом виключення можливих помилкових опорних точок, трохи покращили ситуацію (табл. 7), але загальна тенденція з великими помилками в значеннях координати У залишилась незмінною (рис. 4.7)

Таблиця 7. СКП точок (фасад -покрівля) варіант 2

	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)	m_{xy} (м)	m_{xyz} (м)
Опорні	0.049	0.032	0.036	0.058	0.068
Контрольні	0.156	0.518	0.410	0.540	0.678

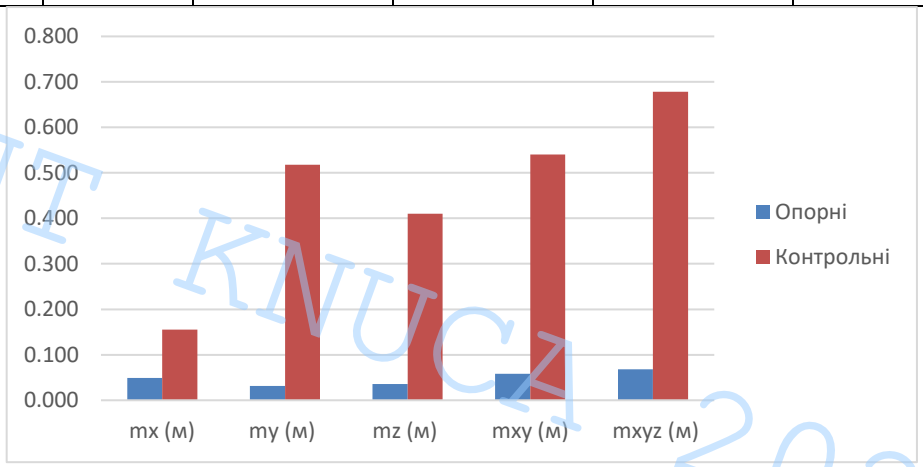


Рис. 4.7. СКП точок (фасад -покрівля) варіант 2

Як видно з результатів, точки фасаду не підійшли для отримання коректних значень помили, тому вважаються помилковими.

GISUT KNUCA 2023

4.1.2 Комбінація точок на покрівлі та землі

Тепер спробуємо використати у якості опорних точок точки на покрівлі іподрому, а в якості контрольних точки на землі.

Таблиця 8. СКП точок (покрівля-земля)

	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)	m_{xy} (м)	m_{xyz} (м)
Опорні	0.005	0.004	0.013	0.006	0.015
Контрольні	0.443	0.274	0.441	0.521	0.683

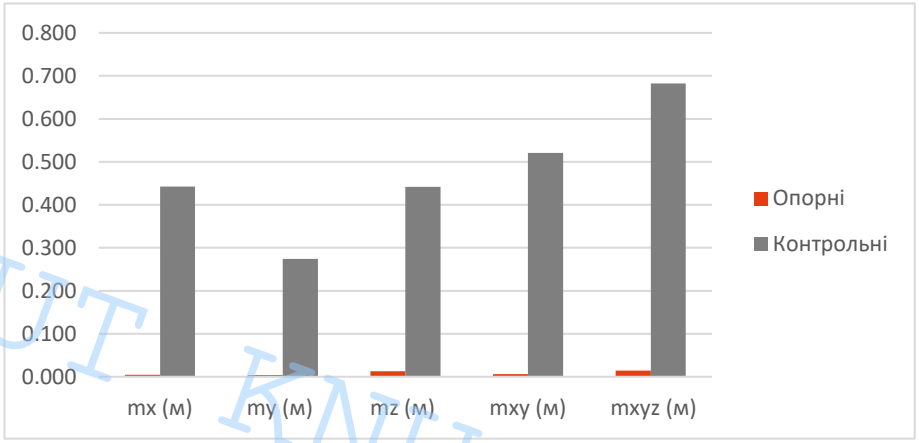


Рис. 4.8. СКП точок (покрівля-земля)

Ситуація повторюється, опорні точки визначені з міліметровою точністю, контрольні дециметровою.

Пробуємо поміняти опорні та контрольні точки місцями, опорні тепер точки на землі, а контрольні точки на покрівлі.

Таблиця 9. СКП точок (земля - покрівля)

	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)	m_{xy} (м)	m_{xyz} (м)
Опорні	0.397	0.064	0.152	0.402	0.430
Контрольні	0.111	0.171	0.328	0.204	0.386

GISUT KNUCA 2023

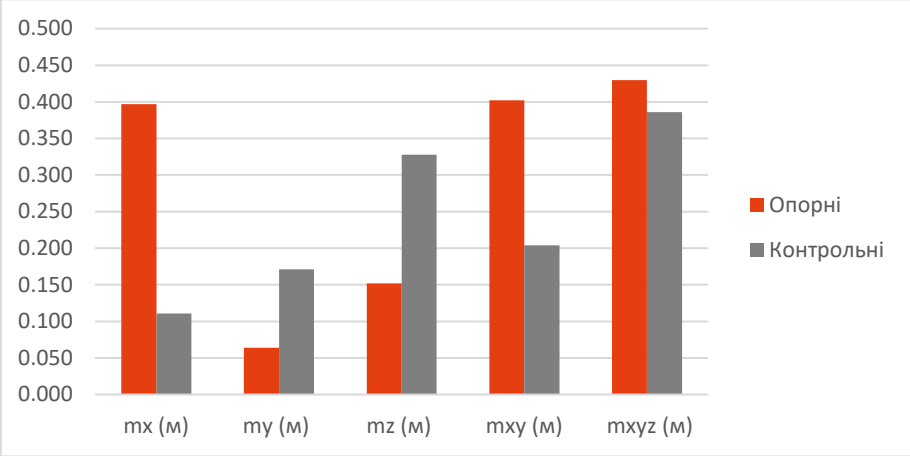


Рис. 4.9. СКП точок (земля - покрівля)

Після спроби вжити заходів щодо зменшення помилки отримали наступні результати.

Таблиця 10. СКП точок (земля - покрівля) варіант 1

	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)	m_{xy} (м)	m_{xyz} (м)
Опорні	0.024	0.059	0.039	0.063	0.074
Контрольні	0.070	0.174	0.316	0.188	0.368

GISUT KNUCA 2023

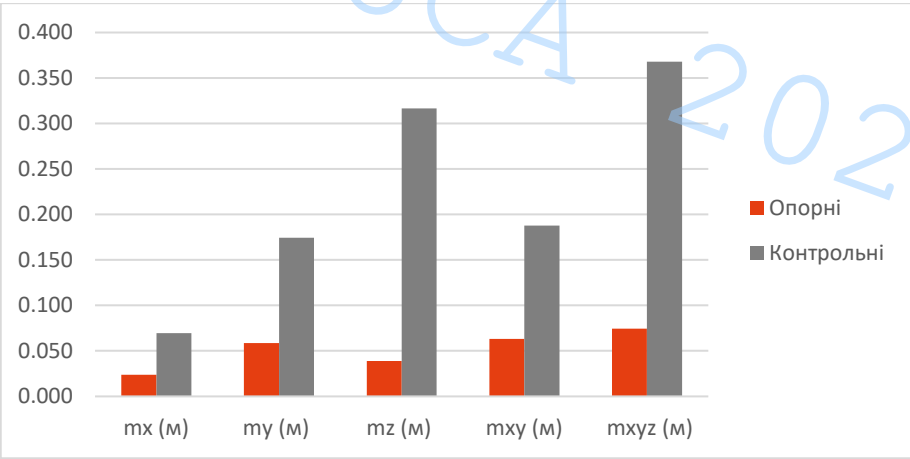


Рис. 4.10. СКП точок (земля - покрівля) варіант 1

Загалом ситуація покращилась по контрольним точкам, але погіршилась по опорним, тобто десь в наборах координат присутні помилки, які ми не можемо прибрати і вони просто перерозприділяються по точкам.

4.2 Оцінка точності без використання опорних точок

З огляду на отримані результати було вирішено зробити оцінку точності БПЛА знімання без використання опорних точок, у якості контрольних для оцінки точності виступали точки на поверхні покрівлі.

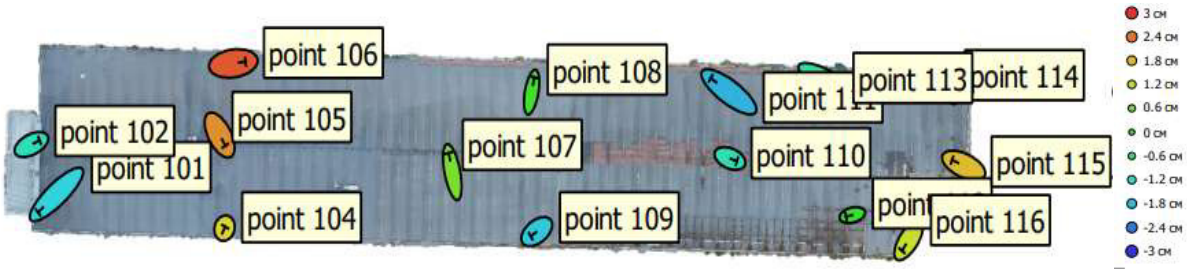


Рис. 4.11. Розподіл похибок контрольних точок (без опорних)

Таблиця 11. СКП контрольних точок (без опорних)

№	m_x (мм)	m_y (мм)	m_z (мм)	m_{xyz} (мм)
101	-8.7	-7.3	-15.9	19.6
102	3.8	1.6	-11.8	12.6
104	0.3	0.6	16.0	16.0
105	2.7	-4.3	21.7	22.3
106	5.7	0.7	26.5	27.2
107	-1.7	7.8	6.3	10.2
108	1.2	6.0	1.5	6.3
109	-2.8	-1.9	-16.8	17.1
110	3.3	-1.1	-11.0	11.5
111	-8.5	5.6	-18.8	21.4
112	-3.0	-0.6	0.6	3.1
114	-0.6	2.8	1.3	3.2
115	-5.5	2.2	18.1	19.0
116	-3.1	-4.2	13.0	14.1
113	7.6	-3.2	-9.1	12.3
Контрольні	4.7	4.1	14.6	15.9

GISUT KNUCA 2023

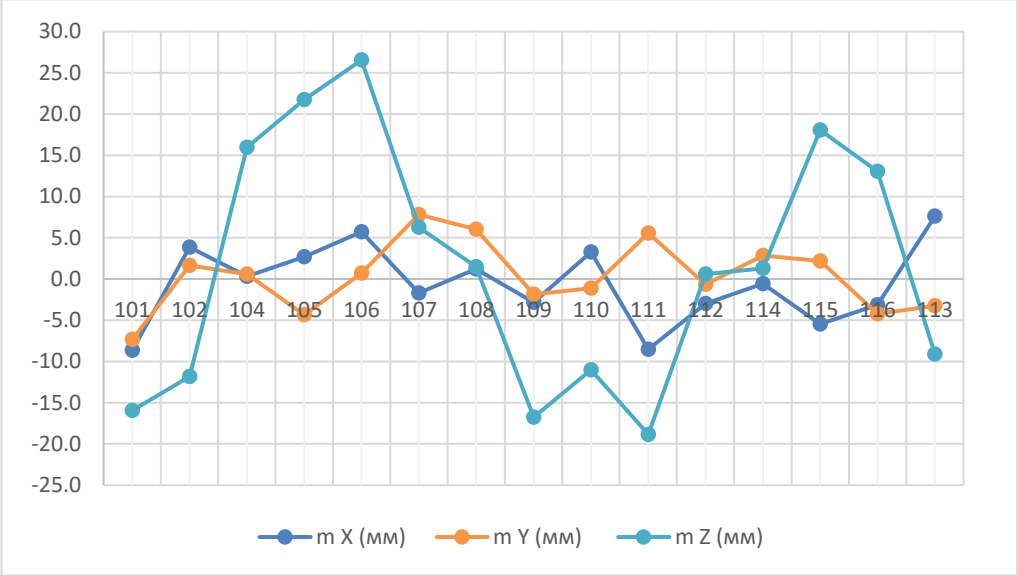


Рис. 4.12. Розподіл похибок контрольних точок (без опорних)

Як видно з результатів оцінки точності контрольних точок на покрівлі, помилки як в планових координатах так і у відмітках знаходяться в межах точності виконаних БПЛА знімань. Нагадаємо, що роздільна здатність отриманих знімків знаходиться в межах 4 – 7 мм, відповідно можливі помилки в межах до 21 мм.

Можна прийти до висновку, що отримані координати точок на фасаді споруди, карнизі та на землі містять великі значення помилок, які можуть буди викликані як відсутністю окремого надійного маркування точок, як у випадку точок на покрівлі, так і можливими помилками створення фотограмметричної моделі об’єкту за рахунок суттєвого відносного зниження роздільної здатності знімків на землі та покрівлі.

GISUT KNUCA 2023

4.3 Визначення впливу на точність конфігурації опорних точок та їх кількості

Обравши лише точки на покрівлі споруди, які показали невеликі розбіжності з координатами визначеними за результатами лазерного сканування, можна дослідити вплив розташування опорних точок на точність отриманої фотограмметричної моделі.

Запропоновано дослідити зміну точності, беручи за опору результати опрацювання всіх точок покрівлі у якості опорних, коли ми отримали залишкові помилки після надання точкам координат з результатів лазерного сканування. Далі будуть опрацьовані наступні комбінації опорних точок:

1. Опорні точки по контуру споруди, контрольні всередині.
2. Половина точок опорні, половина контрольні з опорними точками в кутах покрівлі.
3. Половина точок опорні, половина контрольні без опорних точок в кутах покрівлі.
4. Опорні точки у формі конверту (4 по краях і 1 в центрі).
5. Опорні точки у формі конверту (4 по краях і 3 в центрі).
6. Опорні в центральній частині даху (8 точок)
7. Опорні вздовж однієї сторони покрівлі.
8. Опорні вздовж середини покрівлі, плюс додатково 2 точки всередині (хрест).
9. Опорні вздовж середини покрівлі без точки в центрі, плюс додатково 2 точки всередині.
10. Опорні по середині на краях у формі ромбу (4 точки).
11. Опорні на краях покрівля (4 точки)
12. Опорні точки по синусоїді.

Схематичні зображення розташування опорних та контрольних точок для кожного з наведених варіантів, а також схематичне відображення СКП для кожної з точки, представлено в додатку 2.

GISUT KNUCA 2023

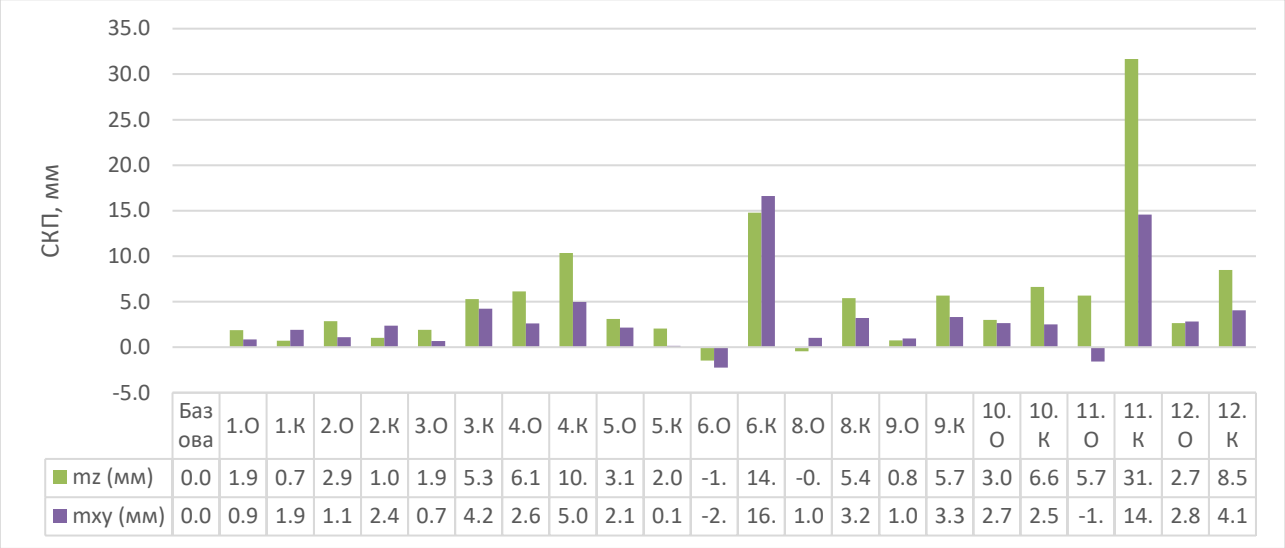
Представимо результати значень СКП для різних комбінацій розташування та кількості опорних точок на покрівлі в таблиці 12.

Таблиця 12. СКП точок покрівлі в залежності від їх комбінації

	m_x (мм)	m_y (мм)	m_z (мм)	m_{xy} (мм)	m_{xyz} (мм)
Опорні	5.4	7.9	7.9	9.6	12.4
1.О	6.2	8.4	9.8	10.4	14.3
1.К	6.0	9.8	8.6	11.5	14.3
2.О	5.5	9.1	10.8	10.6	15.1
2.К	6.6	9.9	8.9	11.9	14.9
3.О	6.4	8.0	9.8	10.2	14.2
3.К	6.2	12.3	13.2	13.8	19.1
4.О	6.2	10.4	14.0	12.2	18.6
4.К	7.8	12.3	18.2	14.5	23.3
5.О	5.2	10.5	11.0	11.7	16.0
5.К	6.9	6.8	9.9	9.7	13.9
6.О	4.5	5.7	6.4	7.3	9.7
6.К	11.5	23.5	22.7	26.2	34.6
7.О	6.0	10.7	52.1	12.3	53.5
7.К	12.7	58.6	2325.6	59.9	2326.4
8.О	3.6	9.9	7.5	10.6	12.9
8.К	7.9	10.1	13.3	12.8	18.4
9.О	4.0	9.7	8.7	10.5	13.6
9.К	7.6	10.4	13.6	12.9	18.7
10.О	4.6	11.3	10.9	12.2	16.4
10.К	7.1	9.8	14.5	12.1	18.9
11.О	7.7	2.3	13.6	8.0	15.8
11.К	10.8	21.6	39.6	24.1	46.4
12.О	6.8	10.3	10.6	12.4	16.3
12.К	7.7	11.2	16.4	13.6	21.3

GISOUT KHUCA 2023

Одразу можна побачити дуже великі помилки для комбінації 7, в якій ми розташували опорні точки по одній стороні покрівлі. Для подальшого аналізу результати цього експерименту було прибрано із загального ряду, всі інші дані переведено в різниці між СКП поточного експерименту та СКП опорних і представлено на графіку (рис.4.13).



	Базова	1.О	1.К	2.О	2.К	3.О	3.К	4.О	4.К	5.О	5.К	6.О	6.К	8.О	8.К	9.О	9.К	10.О	10.К	11.О	11.К	12.О	12.К
mz (мм)	0.0	1.9	0.7	2.9	1.0	1.9	5.3	6.1	10.	3.1	2.0	-1.	14.	-0.	5.4	0.8	5.7	3.0	6.6	5.7	31.	2.7	8.5
mxy (мм)	0.0	0.9	1.9	1.1	2.4	0.7	4.2	2.6	5.0	2.1	0.1	-2.	16.	1.0	3.2	1.0	3.3	2.7	2.5	-1.	14.	2.8	4.1

Рис.4.13. Зміна СКП точок покрівлі в залежності від їх комбінації

Також можна перейти до відносних величин у вигляді відсоткового збільшення чи зменшення величини СКП відносно опорних значень (табл.13).

Таблиця 13. Відсоткове значення СКП точок покрівлі.

	m_x (%)	m_y (%)	m_z (%)	m_{xy} (%)	m_{xyz} (%)
1.О	15	6	24	9	15
1.К	9	23	7	18	13
2.О	2	12	33	10	19
2.К	22	23	9	22	16
3.О	15	1	21	6	12
3.К	13	56	54	41	47
4.О	13	21	46	19	32
4.К	38	42	74	41	59
5.О	-3	21	17	15	16
5.К	29	-10	19	1	9
6.О	-13	-32	-15	-23	-19
6.К	136	271	230	227	229
8.О	-14	3	0	2	0
8.К	68	22	72	30	47
9.О	-17	18	6	7	7
9.К	54	26	65	31	46
10.О	-11	33	22	21	21
10.К	36	17	61	21	40
11.О	32	-57	39	-13	18
11.К	70	602	233	182	215
12.О	13	11	7	12	8
12.К	34	32	80	33	55

GISUT KNUCA 2023

Виділивши в таблиці значення, де помилка збільшилась більше ніж на 50 відсотків, можемо визначити небажані конфігурації опорних точок.

За результатами експерименту небажані конфігурації №6,7,8 та 11. Найкращими виглядають конфігурації №1,2 та 5. Варіації №3 та 9 збільшують помилки, але не суттєво більше 50 %. Конфігурації №4, 10 та 12 можна віднести до варіантів, коли висотна складова помилки не є суттєвою для виконання робіт, тому що вони призводять до вираженого збільшення помилок у відмітках.

GISUT KNUCA 2023

4.5. Порівняння даних лазерного сканування та БПЛА знімання

Отримані в результаті БПЛА знімання хмари точок поверхні покрівлі можна порівняти з результатами лазерного сканування.

Для цього було використано програмне забезпечення Claudcompare. В ньому є функція пошуку відстаней між хмарами точок та інструмент пошуку об'ємів. Використовуючи два цих інструменти можна отримати оцінку різниці між двома хмарами точок.

Для початку знайдемо відхилення між хмарою точок лазерного сканування та найкращими результатами БПЛА фотограмметрії по опорних точкам на покрівлі (рис.4.14) та представимо їх у вигляді карти відхилень (рис.4.15)

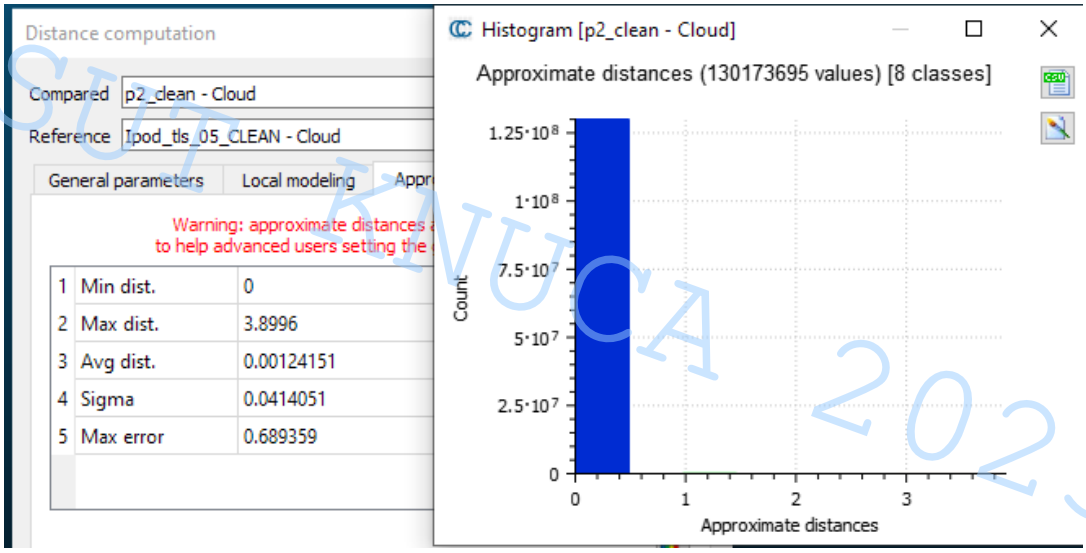


Рис. 4.14. Відхилення між хмарою БПЛА (1) та лазерного сканування

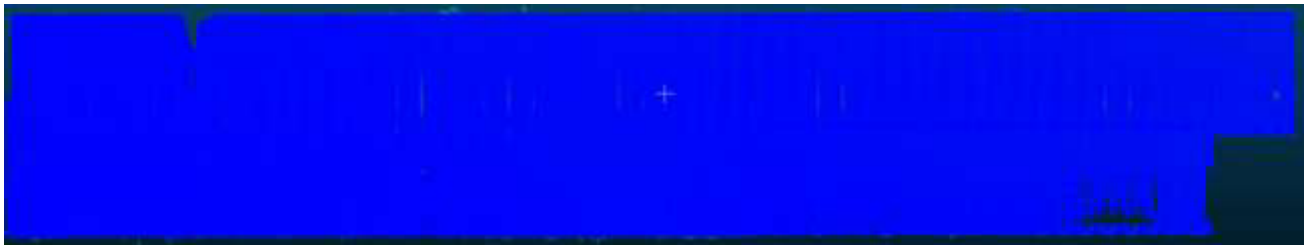


Рис.4.15. Карта відхилень між хмарою БПЛА (1) та лазерного сканування

Аналогічно зробимо для хмари точок, яка отримана без використання опорних точок в розділі 4.2. (рис.4.16.)

GISUA KNUCA 2023

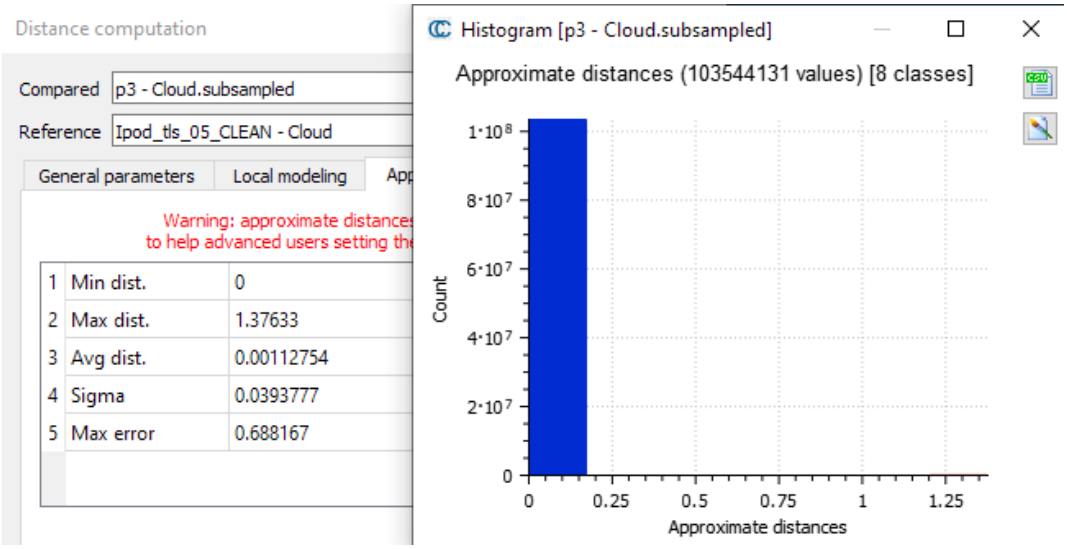


Рис. 4.16. Відхилення між хмарою БПЛА (2) та лазерного сканування

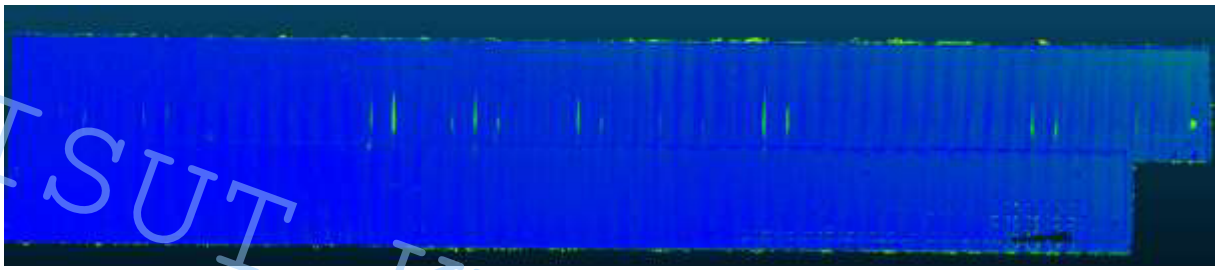


Рис. 4.17. Карта відхилень між хмарою БПЛА (2) та лазерного сканування

GISUT KNUCA 2023

ВИСНОВКИ

1. Проаналізувавши літературні джерела, в яких розглянуто технологічні процеси створення фронтальних планів архітектурних пам'яток, потрібно зазначити, що обрана тематика є актуальною сьогодні та існує багато методів вирішення поставленого завдання, які широко висвітлюються в сучасних публікаціях.

2. Застосування методу комбінування наземного лазерного сканування та цифрового стереофотограмметричного знімання має такі переваги: технологічну оперативність, складені фронтальні плани порівняно з іншими методами мають велику інформаційність та можливості тривимірної візуалізації створення 3D-моделей, максимально наближених до реальних об'єктів, що підлягають реставрації.

3. Серед недоліків методу лазерного сканування можна відмітити отримання «мертвих зон» у лазерних хмарах точок, неякісне відображення текстури об'єкта, проблема об'єднання сканів з різних точок стояння сканера. До недоліків БПЛА знімання - отримання похибок внаслідок цифрового знімання (дисторсія, похибки елементів орієнтування тощо). Нівелювати ці недоліки можна, використовуючи зображення, отримане цифровою камерою для заповнення «мертвих зон» у хмарах точок лазерного сканера.

4. З результатів аналізу СКП в комбінації точок на покрівлі та фасаді можна зробити висновок, що точки по фасаду споруди та карнизу покрівлі виявились з дуже великими помилками, які сконцентрувались в передній частині споруди. Враховуючи низькі значення залишкових помилок по опорним точкам після вирівнювання хмари точок БПЛА, та нерівномірний розподіл помилки на контрольних точках, можна дійти висновку про погану якість точок фасаду та карнизу в фотограметричній моделі. Спроба вжити заходів щодо зменшення помилки на контрольних точках, шляхом виключення можливих помилкових опорних точок, трохи покращили ситуацію, але загальна тенденція з великими

GISUA КНИГА 2023

помилками в значеннях координати У залишилась незмінною. Як видно з результатів, точки фасаду не підійшли для отримання коректних значень СКП, тому вважаються помилковими.

5. В комбінації точок на покрівлі та землі ситуація повторюється, опорні точки визначені з міліметровою точністю, контрольні дециметровою. Десь в наборах координат присутні помилки, які ми не можемо прибрати і вони просто перерозприділяються по точкам.

6. З результатів оцінки точності без використання контрольних точок помилки як в планових координатах так і у відмітках знаходяться в межах точності виконаних БПЛА знімань. Враховуючи роздільну здатність отриманих знімків, що знаходиться в межах 4 – 7 мм, відповідні можливі помилки в межах до 21 мм. Можна прийти до висновку, що отримані координати точок на фасаді споруди, карнизі та на землі містять великі значення помилок, які можуть буди викликані як відсутністю окремого надійного маркування точок, як у випадку точок на покрівлі, так і можливими помилками створення фотограмметричної моделі об’єкту за рахунок суттєвого відносного зниження роздільної здатності знімків на землі та покрівлі.

GISUT KNUCA 2023

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Son, S. W., Kim, D. W., Sung, W. G., и др. Integrating UAV and TLS Approaches for Environmental Management: A Case Study of a Waste Stockpile Area. Remote Sensing. 2020. Vol. 12, No. 10. C. 1615.

2. Polat, N., Uysal, M. An Experimental Analysis of Digital Elevation Models Generated with Lidar Data and UAV Photogrammetry. Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2018. Vol. 46, No. 7. C. 1135–1142.

3. El-Din Fawzy, H. 3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy. Alexandria Engineering Journal. 2019. Vol. 58, No. 4. C. 1191–1204.

4. Nex, F., Remondino, F. UAV for 3D mapping applications: a review. Applied Geomatics. 2014. Vol. 6, No. 1. C. 1–15.

5. Calantropio, A., Chiabrando, F., Rinaudo, F., и др. USE AND EVALUATION OF A SHORT RANGE SMALL QUADCOPTER AND A PORTABLE IMAGING LASER FOR BUILT HERITAGE 3D DOCUMENTATION. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. XLII–1, No. 1. C. 71–78.

6. Escobar Villanueva, J. R., Iglesias Martínez, L., Pérez Montiel, J. I. DEM Generation from Fixed-Wing UAV Imaging and LiDAR-Derived Ground Control Points for Flood Estimations. Sensors. 2019. Vol. 19, No. 14. C. 3205.

7. Huang, R., Xu, Y., Hoegner, L., и др. Semantics-aided 3D change detection on construction sites using UAV-based photogrammetric point clouds. Automation in Construction. 2022. Vol. 134, No. November. C. 104057.

8. Mora, O. E., Suleiman, A., Chen, J., и др. Comparing sUAS Photogrammetrically-Derived Point Clouds with GNSS Measurements and Terrestrial Laser Scanning for Topographic Mapping. Drones. 2019. Vol. 3, No. 3. C. 64.

9. Kolb, I., Vivat, A., Nazarchuk, N., и др. Methodology of 3D Modeling Based on Aerial Images from a Drone with Simplified Geodetic Reference: 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, European Association of Geoscientists & Engineers, 22. C. 1–5.

GISCIT KNUCA 2023

10. Yeh, M. L., Chou, Y. T., Yang, L. S. The Evaluation of GPS techniques for UAV-based Photogrammetry in Urban Area. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B1. C. 1079–1084.

11. Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., и др. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. Remote Sensing. 2013. Vol. 5, No. 12. C. 6880–6898.

12. Leberl, F., Irschara, A., Pock, T., и др. Point Clouds. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2010. Vol. 76, No. 10. C. 1123–1134.

13. Catharia, O., Richard, F., Vignoles, H., и др. Smartphone LiDAR Data: A Case Study for Numerisation of Indoor Buildings in Railway Stations. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 4. C. 1967.

14. Luhmann, T., Chizhova, M., Gorkovchuk, D. Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia. Drones. 2020. Vol. 4, No. 3. C. 53.

15. Luhmann, T., Chizhova, M., Gorkovchuk, D., и др. COMBINATION OF TERRESTRIAL LASERSCANNING, UAV AND CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR 3D RECONSTRUCTION OF COMPLEX CHURCHES IN GEORGIA. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W11, No. 2/W11. C. 753–761.

16. M. Room and A. Ahmad. “Mapping of river model using close range photogrammetry technique and unmanned aerial vehicle system”. 8 th International Symposium On Digital Earth, 26-29 August, 213; Kuching, Sarawak, Malaysia

17. A. Hamid and A. Ahmad. “Calibration of high resolution digital camera based on different photogrammetric methods”. 8 th International Symposium On Digital Earth, 26-29 August, 213; Kuching, Sarawak, Malaysia

18. A. Hamid, A. Ahmad, A.M. Samad, I. Ma’arof and K.A. Hashim.

GISUT KNUCA 2023

"Accuracy sssessment of calibrating high resolution digital camera". 9 th International Colloquium On Signal Processing and its application, 8-10 March, 2013; Kuala Lumpur, Malaysia

19. N. Darwin, A. Ahmad and O. Zainon. "The potential of unmanned aerial vehicle for large scale mapping of coastal area". 8 th International Symposium On Digital Earth, 26-29 August, 213; Kuching, Sarawak, Malaysia

20. Xia, G.-S.; Bai, X.; Ding, J.; Zhu, Z.; Belongie, S.; Luo, J.; Datcu, M.; Pelillo, M.; Zhang, L. DOTA: A Large-scale Dataset for Object Detection in Aerial Images. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, UT, USA, 18–22 June 2018; pp. 3974–3983.

21. Polat, N.; Uysal, M. An Experimental Analysis of Digital Elevation Models Generated with Lidar Data and UAV Photogrammetry. J. Indian Soc. Remote Sens. 2018, 46, 1135–1142.

22. K. Sidek and A. Ahmad. "Development of mapping procedures using digital imagery derived from unmanned aerial vehicle system". PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008.

23. Archer, F. et al., 2004. Introduction, overview, and status of the Microwave Autonomous Copter System (MACS). In: Proceedings of IGARSS 200, Anchorage, Alaska, USA.

GTSUT KNUCA 2023

ДОДАТКИ

Додаток 1

	№	x	y	z
point	200	-10.073	6.074	-7.534
point	201	-11.335	6.032	-7.510
point	202	-16.136	3.335	-7.655
point	203	-0.918	-2.794	-7.626
point	204	-0.980	0.965	-6.794
point	205	22.104	-9.980	-7.813
point	206	31.454	-15.068	-8.058
point	207	35.666	-10.501	-7.780
point	208	41.756	-10.430	-7.698
point	209	54.137	-10.793	-7.601
point	210	60.873	-10.918	-7.564
point	211	74.197	-12.430	-7.533
point	212	80.705	-13.219	-7.521
point	213	105.233	0.251	-6.443
point	214	131.702	-4.191	-7.045
point	215	144.571	-9.737	-7.060
point	216	169.740	-8.464	-6.940
point	217	171.977	-1.333	-6.341
point	218	177.510	-1.068	-6.358
point	219	191.984	3.393	-6.701
point	220	190.561	18.472	-7.313
point	221	193.443	24.112	-7.624
point	222	169.108	36.550	-8.239
point	223	153.310	36.819	-8.226
point	224	137.709	37.733	-8.163
point	225	122.295	37.563	-8.177
point	226	107.956	37.912	-8.101
point	227	94.338	36.631	-8.096
point	228	67.920	34.032	-7.802
point	229	49.708	35.406	-7.765
point	230	36.374	39.878	-7.854
point	231	7.173	40.128	-7.844
point	232	-6.393	25.267	-7.197

GISUT KNUCA 2023

Додаток 2

Схема 1

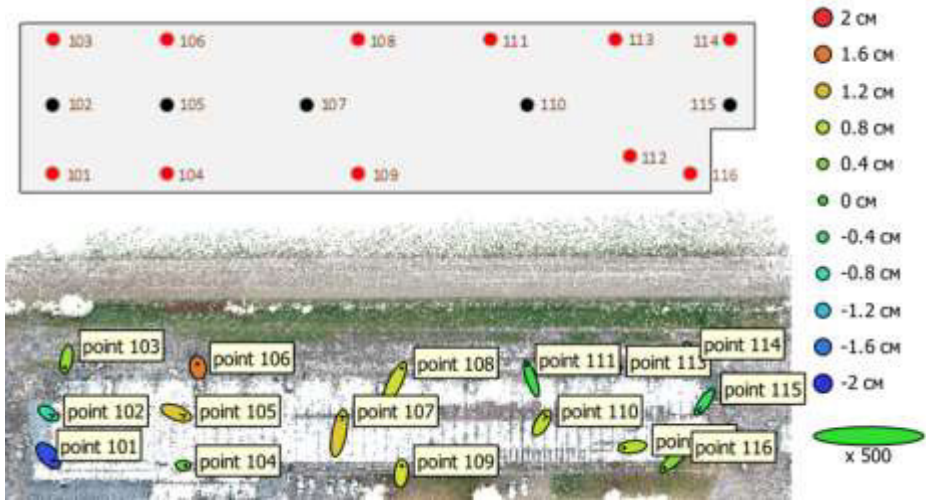
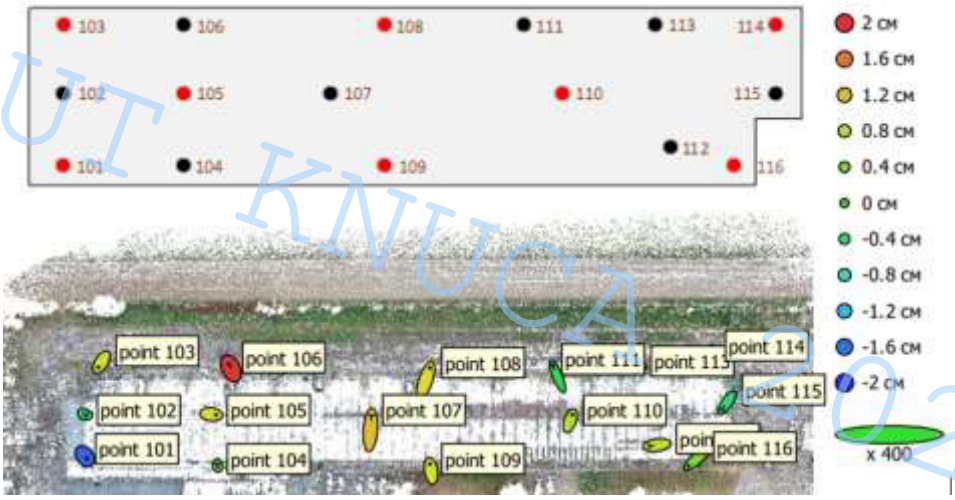


Схема 2



GISUT KNUCA 2023

Схема 3

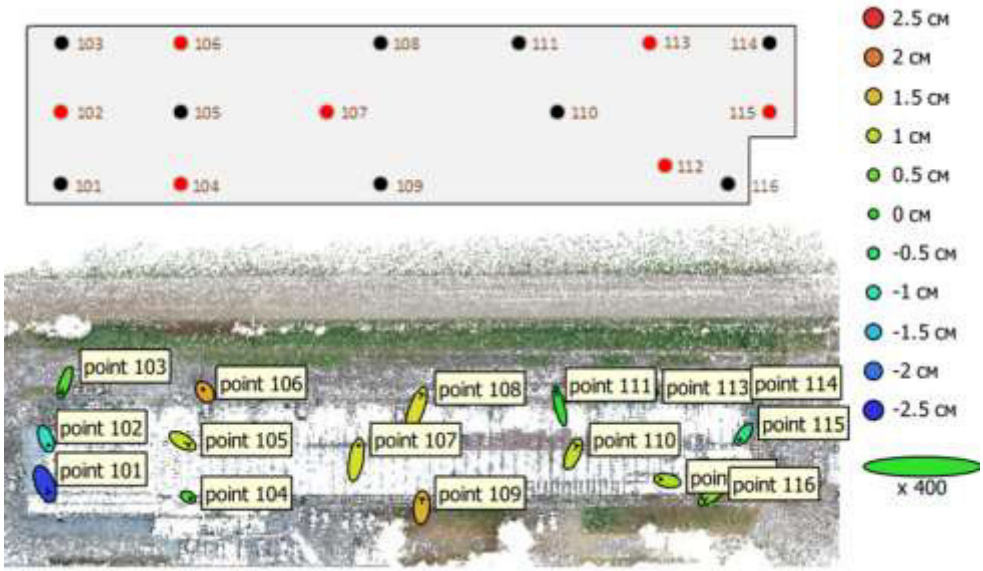


Схема 4

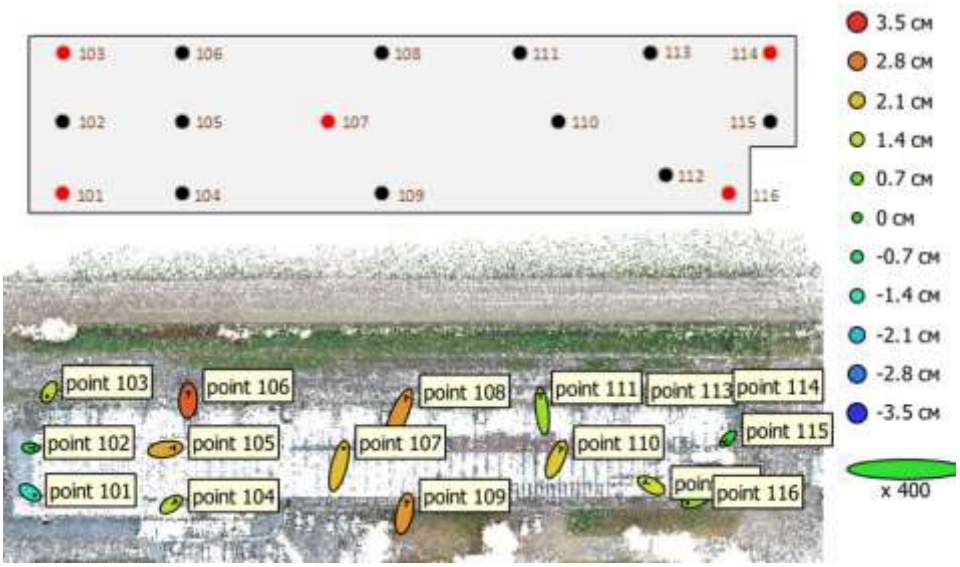


Схема 5

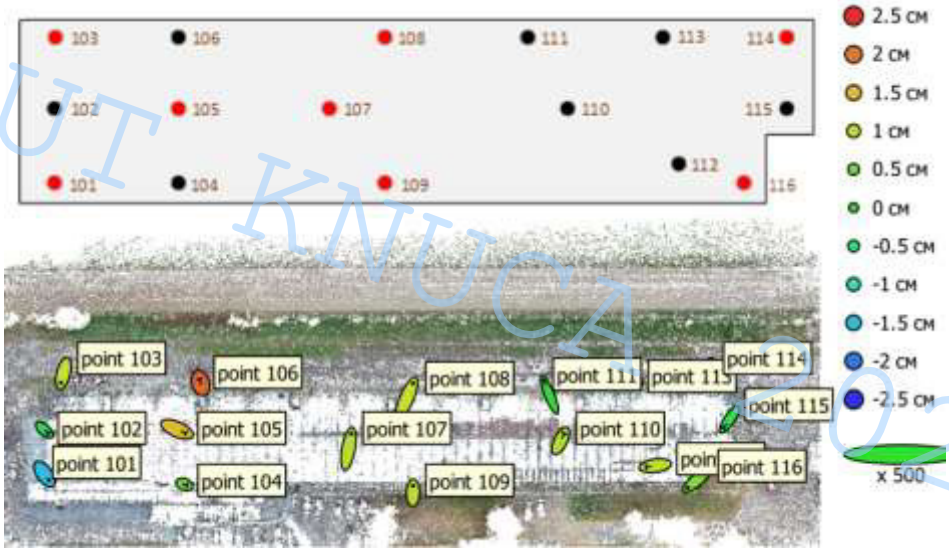
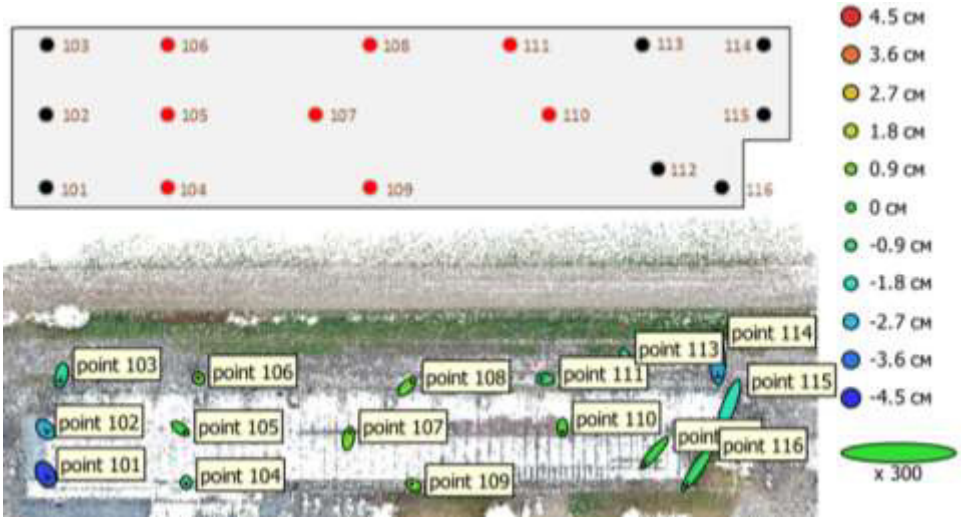


Схема 6



GISUT KNUCA 2023

Схема 7

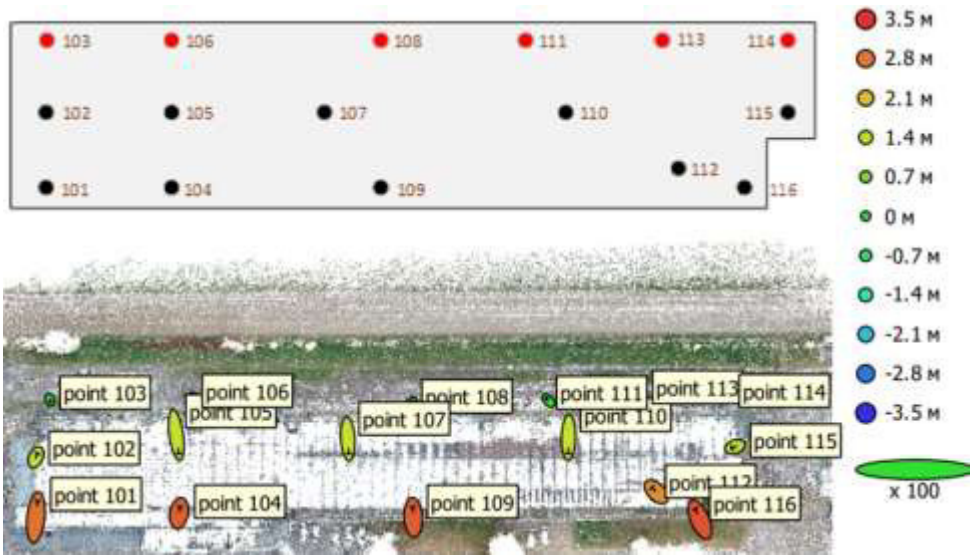


Схема 8

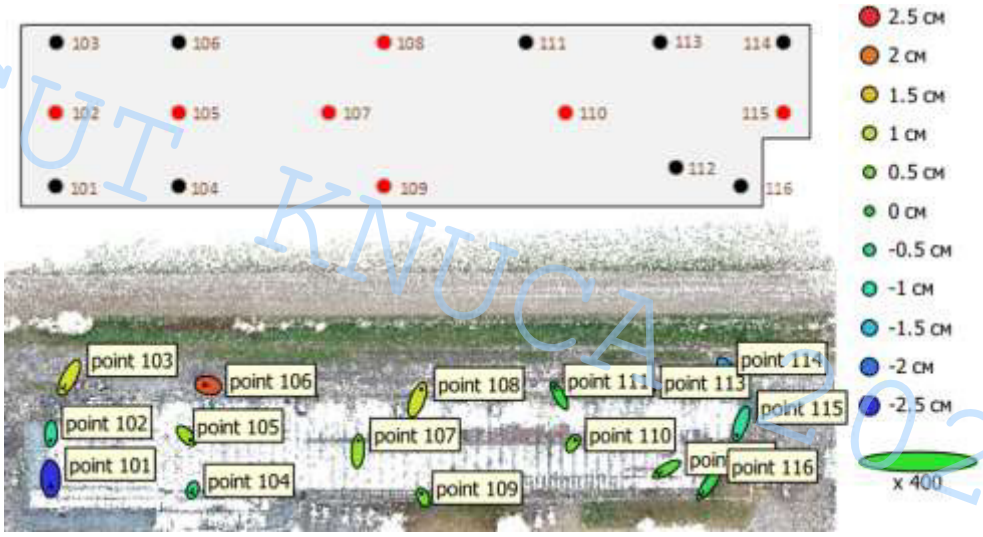
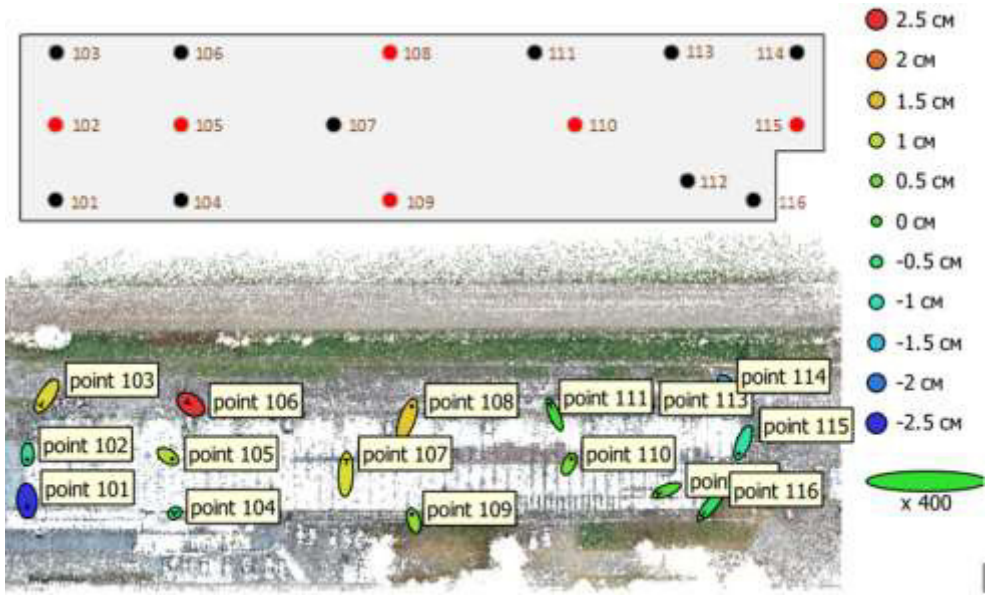


Схема 9



GISUT KNUCA 2023

Схема 10

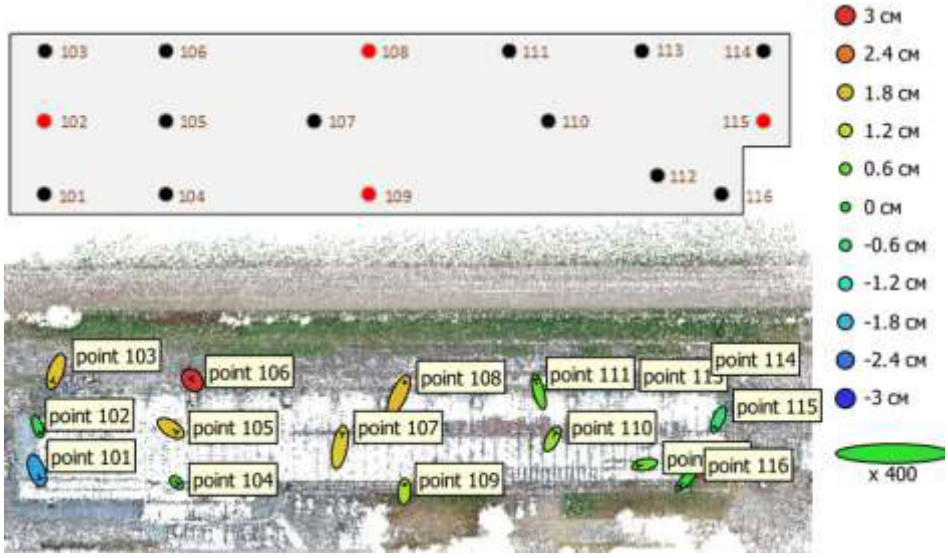
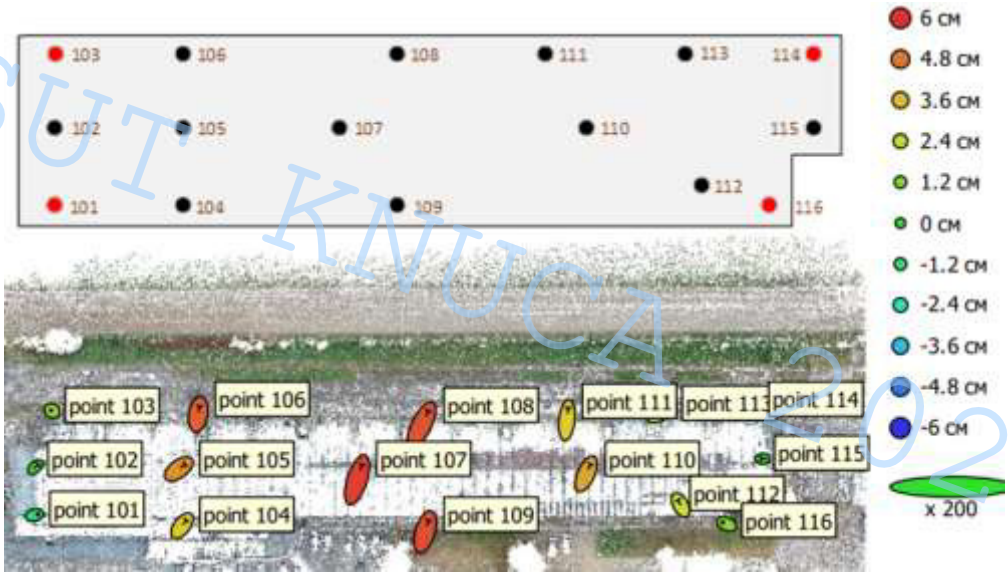


Схема 11



GISUT KNUCA 2023

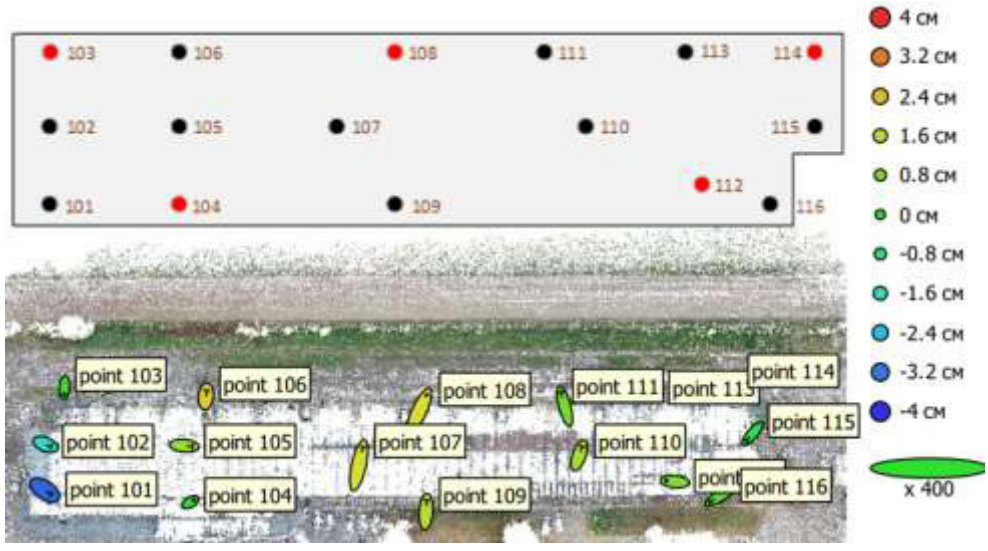



Схема 12