

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет будівництва і архітектури

**Ю. В. Медведський**

# **БПЛА В ІНЖЕНЕРНІЙ ГЕОДЕЗІЇ**

Конспект лекцій  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня  
вищої освіти спеціальності  
193 «Геодезія та землеустрій»

Київ 2025

УДК 6339.5(075.8)

М42

Рецензент О. В. Адаменко, канд. техн. наук, доцент

*Затверджено на засіданні кафедри інженерної геодезії, протокол  
№ 7 від 14 березня 2024 року.*

В авторській редакції

**Медведський Ю. В.**

М42      БПЛА в інженерній геодезії [Електронний ресурс]: конспект лекцій  
/ Ю.В. Медведський. – Київ : КНУБА, 2025. – 105 с.

Розглянуто питання вивчення теоретичних основ та практичних навичок застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сфері інженерної геодезії, що включає збір, обробку та аналіз геодезичних даних з використанням БПЛА. Включаючи вивчення методів аерофотозйомки, лазерного сканування, та інших сучасних технологій, які використовуються для точного картографування та землевпорядкування.

Призначено для здобувачів другого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»

УДК 6 339.5 (075.8)

© Ю.В. Медведський, 2025

©КНУБА, 2025

## ЗМІСТ

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВСТУП .....                                                                  | 4   |
| ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. ОСНОВИ ПРИНЦИПУ МЕТОДУ SfM.....                          | 6   |
| <i>Лекція 1.</i> Види БПЛА та можливості їх застосування в геодезії .....    | 6   |
| <i>Лекція 2.</i> Принцип методу «Структура з руху» (SfM).....                | 23  |
| <i>Лекція 3.</i> Структура з руху: особливості робочого процесу .....        | 34  |
| ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2. ВИКОНАННЯ ЗНІМАЛЬНИХ РОБІТ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА.....        | 44  |
| <i>Лекція 4.</i> Виконання зйомки за допомогою БПЛА. Підготовчі роботи.....  | 44  |
| <i>Лекція 5.</i> Виконання зйомки за допомогою БПЛА. Камеральні роботи ..... | 61  |
| <i>Лекція 6.</i> Оцінка точності БПЛА знімання.....                          | 74  |
| <i>Лекція 7.</i> Огляд програмного забезпечення та їх можливостей .....      | 90  |
| СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                           | 104 |

## ВСТУП

БПЛА в інженерній геодезії – це дисципліна охоплює вивчення теоретичних основ та практичних навичок застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сфері інженерної геодезії, що включає збір, обробку та аналіз геодезичних даних з використанням БПЛА. Це може включати вивчення методів аерофотозйомки, лазерного сканування, та інших сучасних технологій, які використовуються для точного картографування та землевпорядкування.

**Мета** освітньої компоненти – надати студентам розуміння принципів та методик збору великомасштабних аерофотографічних матеріалів за допомогою безпілотних літальних апаратів. Курс також зосереджується на особливостях обробки цих даних та їх застосуванні у сферах інженерної геодезії та картографії.

**Завдання** освітньої компоненти полягає у наданні студентам навичок проведення аерофотозйомки з використанням БПЛА від планування зйомки до обробки аерофотознімальних матеріалів для створення точних планових та картографічних матеріалів великого масштабу. Студенти також навчаються конструювати цифрові моделі рельєфу, класифікувати об'єкти на хмарі точок та визначати обсяги земляних робіт.

### Компетентності здобувачів освітньої програми, що формуються в результаті засвоєння освітньої компоненти

| Код                        | Зміст компетентності                                                                                                                                |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Інтегральна компетентність |                                                                                                                                                     |
| ІК                         | Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі геодезії та землеустрою                                                                        |
| Загальні компетентності    |                                                                                                                                                     |
| ЗК01                       | Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.                                                                                                 |
| ЗК06                       | Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.                                                                                 |
| Фахові компетентності      |                                                                                                                                                     |
| СК05                       | Здатність застосовувати сучасне інформаційне, технічне і технологічне забезпечення для вирішення складних питань геодезії та землеустрою, кадастру. |
| СК09                       | Здатність застосовувати інструменти, прилади, обладнання, устаткування при виконанні завдань геодезії та землеустрою.                               |

**Програмні результати здобувачів освітньої програми, що  
формуються в результаті засвоєння освітньої компоненти**

| Код  | Програмні результати                                                                                                                                                                                  |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| РН03 | Доносити до фахівців і нефахівців інформацію, ідеї, проблеми, рішення, власний досвід та аргументацію.                                                                                                |
| РН10 | Обирати і застосовувати інструменти, обладнання, устаткування та програмне забезпечення, які необхідні для дистанційних, наземних, польових і камеральних досліджень у сфері геодезії та землеустрою. |
| РН11 | Організовувати та виконувати дистанційні, наземні, польові і камеральні роботи в сфері геодезії та землеустрою, оформляти результати робіт, готувати відповідні звіти.                                |

# **ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. ОСНОВИ ПРИНЦИПУ МЕТОДУ SFM**

## ***Лекція 1. Види БПЛА та можливості їх застосування в геодезії***

### **План**

1. Типи конструкцій, характерні особливості.
2. Способи використання БПЛА.
3. Переваги та недоліки БПЛА методу.
4. Підводні дрони. Батиметрія.

Якщо говорити про термін БПЛА, то на це важко відповісти, адже різні організації по-різному називають БПЛА. При швидкому зростанні популярності безпілотних систем, цей термін так і не має чітких визначень. У самому базовому розумінні БПЛА - це будь -який літальний апарат, на якому можна керувати без людини на борту.

У минулому FAA називали літаки "дистанційно керованими транспортними засобами", а пізніше "літаками з дистанційним керуванням". Також БПЛА називали "літак з дистанційним керуванням" та "безпілотний літак", але ці терміни використовуються все рідше.

У технологічному плані дрон – це безпілотний літальний апарат. По суті, дрон – це літаючий робот, яким можна дистанційно керувати або літати автономно, та який заздалегідь запрограмований для виконання конкретного завдання в повітрі.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) визначається як безпілотний літальний апарат, який літає без пілота, віддалено і повністю контролюється з іншого місця (земля, інший літак, космос) або запрограмований і повністю автономний.

В основному, терміни схожі, але використання обох термінів має бути різним, виходячи з особливостей літального апарату, а також сфери застосування.

Історія безпілотних літальних апаратів є одним із циклічних подій, часто зосереджених на військових конфліктах, що сягали середини XVIII століття, коли безпілотні повітряні кулі використовувалися в Європі, а пізніше під час громадянської війни в США для скидання бомб. Лише в 1920 році був побудований перший справді дистанційно керований літак - Sperry Messenger (рис. 1.1). Але інтерес мирного часу відвернув фінансування від цього та інших літаків з дистанційним керуванням. Мало хто на той час бачив практичне використання цивільної технології цивільно.



Рис. 1.1. Sperry Messenger

Тоді, у 1930 -х роках, коли знову розпочалася війна, інтерес до БПЛА поживавися, але цього разу для практики цілей. Протягом 1930 -х років англійці розробили та виготовили понад 400 безпілотних цільових апаратів, відомих як «бджоли -королеви». США також почали створювати БПЛА для цільової практики. В кінці 1930-х років відомий актор на екрані та ентузіаст моделей дистанційного керування Реджинальд Денні переконав армію США використовувати свій літак з дистанційним управлінням для навчання зенітників. З 1939 року до Другої світової війни було виготовлено понад 15 000 таких «безпілотників Денні».

Хоча США та Великобританія випускали невеликі безпілотні системи, але німці під час Другої світової війни досягли найбільших успіхів у безпілотній авіаційній техніці з появою бомбардувальника V-1літака, здатного до автономного управління. V-1 був значним тим, що демонстрував, наскільки величезну загрозу може представляти безпілотний літак. Після війни США винесли уроки з V-1 і застосували їх до нових конструкцій БПЛА вдома.

Під час війни між Кореєю та В'єтнамом було розроблено декілька важливих технологічних досягнень у системі управління безпілотними системами. Ці досягнення завершилися розробкою БПЛА Firebee - автомобіля з реактивним двигуном, подібного за розмірами до літака малого бізнесу. Цей автомобіль був унікальним у визначенні нової ролі безпілотників: спостереження. Встановлено, що спостереження є ідеальною місією для безпілотників, яка залишається і сьогодні як основне застосування. Firebee здійснив понад 3400 рейсів до Північного В'єтнаму та

Китаю протягом своїх років служби. Також протягом 1960-х років США розгорнули висококласний автомобіль, відомий як D-21, який міг розвивати швидкість понад 3 махи і міг літати на висотах до 90 000 футів.

Хоча інвестиції США у безпілотники знизилися після В'єтнаму, інші країни почали розробляти програми безпілотників. Протягом 1970-х і 1980-х років ВПС Ізраїлю були першими у створенні кількох нових машин, які в кінці 1980-х - на початку 1990-х років були інтегровані у флот інших країн, включаючи США. Конфлікти під час першої війни в Іраку, а пізніше на Балканах, розпочалася нова ера для безпілотників, надавши їм доступ до засобів масової інформації. Цей показник був посилений під час останніх конфліктів в Афганістані та Іраку. Еволюціонували різноманітні нові військові системи та концепції використання БПЛА швидко за цей час.

Також у 1990-х роках було задумано більш мирну роль систем БПЛА. Наукові зусилля, такі як постійний моніторинг навколишнього середовища, вважалися ідеальною функцією для БПЛА. Літаки Pathfinder та Helios на сонячних батареях, розроблені НАСА та корпорацією Aero

Environment наприкінці 1990-х років, є прикладом розвитку інноваційних дослідницьких БПЛА. Інші країни також почали розробляти БПЛА для невійськових застосувань. Наприклад, у 1998 році австралійська фірма випустила 30 -кілограмовий БПЛА під назвою Aerosonde Laima, який автономно перетнув Атлантичний океан лише на 1,5 літра автомобільного бензину.

### 1.3 Різновиди безпілотних літальних апаратів та їх характеристики

Промисловість БПЛА є великою і різноманітною. У цьому розділі ми класифікували БПЛА за різними параметрами, які використовуються для порівняння БПЛА. БПЛА були класифіковані на основі ваги, висоти та дальності, крил і гвинтів, а також їх застосування. Єдиного стандарту класифікації в галузі не існує.

БПЛА також можна класифікувати за дальністю пересування (на близьку, ближню та середню дальність), їх витривалістю в повітря, за розміром (малі та великі), а також за призначенням (гоночні дрони, дрони-трикурники, дрони-вертольоти, дрони доставки, дрони для фотографування, дрони GPS та VTOL (дрони вертикального зльоту та посадки)). Завдяки своїй високій мобільності та низької вартості безпілотні літальні апарати (БПЛА) знайшли широке застосування в останні кілька десятиліть.



### На основі ваги

- Нано: БПЛА вагою менше 250 г
- Мікро: БПЛА вагою більше 250 г і менше ніж 2 кг
- Малі: БПЛА з масою більше 2 кг і менше 25 кг
- Середні: БПЛА вагою більше 25 кг і менше 150 кг
- Великі: БПЛА з масою понад 150 тис

### На основі висоти та дальності

• Ручні: БПЛА, які можуть літати на висоті менше 600 м і мають дальність дії менше 2 км.

- Близько: БПЛА з висотою менше 1500 м і дальністю дії менше 10 км.
- НАТО: БПЛА з висотою менше 3000 м і дальністю дії менше 50 км.
- Тактичні: БПЛА з висотою менше 5500 м і дальністю дії менше 160 км.

MALE (Medium Altitude Long Endurance): БПЛА з висотою менше 9100 м і дальністю дії менше 200 км.

HALE (High Altitude Long Endurance): БПЛА з висотою понад 9100 м і невизначеною дальністю

- Гіперзвукові: БПЛА з висотою близько 15200 м і дальністю понад 200 км.

### На основі крил і роторів

З фіксованим крилом: БПЛА, які нагадують конструкцію літака з нерухомими крилами.

- Одний гвинт: БПЛА, які нагадують конструкцію вертольота з одним головним гвинтом і іншим невеликим у хвостовій частині.

Багатороторні: БПЛА, які мають більше одного гвинтів. Найчастіше зустрічаються трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери та октакоптери.

Гібридний VTOL з фіксованим крилом: гібридні БПЛА з більшим часом польоту. Вони мають стійкість БПЛА, а також здатність зависати, злітати і приземлятися вертикально.

Кожен вид БПЛА зі своїми особливостями. БПЛА з фіксованим крилом, рис. 1.2 (а), мають високу швидкість і велике корисне навантаження, але вони повинні підтримувати безперервний рух вперед, щоб залишатися вгорі, тому вони не придатні для стаціонарних застосувань, таких як інспекційні роботи. Однак безпілотники з поворотним крилом, рис. 1.2 (б), незважаючи на обмежену мобільність і корисне навантаження, здатні

рухатися в будь-якому напрямку, а також залишатися нерухомими в повітрі. Отже, вибір БПЛА в основному залежить від застосування (рис. 1.3).



Рис. 1.2. Види БПЛА

| з фіксованим крилом                                                                                                                                                                                                                                        | з поворотним крилом                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                          |                                                                                         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- більший діапазон і витривалість</li> <li>- добре підходить для операцій за межами прямої видимості</li> <li>- потрібен пристрій для запуску</li> <li>- часто вимагають більшої підготовки користувачів</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- здатність зависати</li> <li>- простіше у використанні</li> <li>- точніше</li> <li>- більша витрата на джерело живлення</li> </ul> |

Рис. 1.3. Характеристики БПЛА з фіксованим та поворотним крилом

Для зручності зазвичай беруть до уваги тільки дві з вищеназваних характеристик: злітну масу і радіус дії. Характеристики всіх типів і класів безпілотних літальних апаратів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**Характеристики БПЛА**

| Тип БПЛА    | Клас БПЛА          |                           | Взлітна<br>маса, кг | Корисна<br>вага, кг | Дальність<br>дії, км | Тип двигуна  |
|-------------|--------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------|
| Літаковий   | Мікро- и міні-БПЛА |                           | до 5                | до 1                | 25–40                | електро      |
|             | Легкі<br>БПЛА      | малого радіусу<br>дії     | 5–50                | 1–10                | 10–120               | електро      |
|             |                    | середнього<br>радіусу дії | 50–100              | 5–30                | 70–250               | електро, ДВЗ |
|             | Середні БПЛА       |                           | 100–300             | 20–50               | 150–1000             | ДВС          |
|             | Середньоважкі БПЛА |                           | 300–500             | 45–150              | 70–300               | ДВС          |
|             | Важкі<br>БПЛА      | середнього<br>радіусу дії | 500–1500            | 60–250              | 70–300               | ДВЗ          |
|             |                    | дальнього<br>радіусу дії  | > 1500              | > 300               | 1500                 | ДВЗ          |
| Вертолітний |                    |                           | до 5                | до 1                | 5                    | електро      |
|             | Легкі БПЛА         |                           | 5–50                | 1–30                | 5–100                | електро      |
|             | Середні<br>БПЛА    | малого радіусу<br>дії     | 50–300              | 20–50               | 50–100               | ДВЗ          |
|             |                    | середнього<br>радіусу дії | 30–500              | 50–150              | 100–400              | ДВЗ          |
|             | Важкі<br>БПЛА      | середнього<br>радіусу дії | 500–1500            | 120–150             | 150–400              | ДВЗ          |
|             |                    | дальнього<br>радіусу дії  | > 1500              | >200                | 400–1500             | ДВЗ          |

Нині для геодезичних, землевпорядних та кадастрових робіт економічно доцільніше (з- за поєднання маси і вартості) застосування легких безпілотних літальних апаратів обох типів зі злітною масою, що не перевищує 30 кілограмів. Вибір БПЛА слід також проводити, виходячи з технічного завдання і досліджуваного об'єкта.

Запуск БПЛА НЕ можливий без наземної станції управління і спеціального програмного забезпечення.

Виконання польотів відбувається за такою схемою:

1. Проектується польотне завдання.

2. Здійснюється підготовка до польоту .

3. Виконується сам політ, що може мати на увазі запуск і скасування запуску, коригування польотного завдання під час польоту, повернення борту, посадки, політ на вимогу, дистанційне керування.

4. Виконання дій після приземлення: запис даних зйомки і проведення аналізу польоту.

То в чому ж переваги зйомки саме безпілотниками?

• **Швидкість та економічність.** Аерофотозйомка досі залишається найбільш продуктивним методом документування стану місцевості. Раніше аерофотозйомка з повітря виконувалася тільки із використанням великих літаків. Такий підхід супроводжувався певними обмеженнями. Було економічно недоцільним виконувати аерофотозйомку невеликих об'єктів, а роздільна здатність знімків дуже залежала від регламентних та технічних обмежень щодо використання літака та повітряного простору. Поява дронів все змінила. Чи це невеликий населений пункт, чи будівельний майданчик чи гідротехнічна споруда дрон зніме все.

• **Детальність та повнота.** Погляд згори завжди давав можливість оцінити ситуацію більш комплексно, побачити приховане, побачити зміни. Аерофотозйомка із використанням БПЛА дозволяє отримувати знімки із роздільною здатністю менше 1 см на піксель. Необхідна (доцільна) детальність зйомки визначається цілями проєкту або площею дослідження. Можливість розрізнити на знімках найдрібніші деталі, їх автоматизована обробка та аналіз дозволяють створювати інтелектуальні продукти геоданих, які описують місцевість та процеси, що відбуваються на ній.

• **Якість та безпека.** Досягнення очікуваних параметрів якості кінцевої продукції базується на професіоналізмі операторів, технічних можливостях БПЛА та камер, дотриманні технічних вимог та контролю якості кожного етапу виконання робіт. Проєкт починається з дуже ретельного планування маршрутів зйомки та їх перекриття, оскільки ці параметри мають критичний вплив на точність та якість кінцевого продукту. Для досягнення необхідних параметрів точності аерофотознімання розробляється проєкт планово-висотної прив'язки, що гарантує необхідну надійність даних та досягнення вимог діючої інструкції та нормативних актів щодо точності готової картографічної продукції.

Використання двочастотних GPS, технологій PPK/RTK, камер із великою матрицею та об'єтивів без дисторсії та хроматичних аберацій,

оцифрування по стереозображенням дозволяє із легкістю виконувати вимоги до створення топографічних планів масштабу 1:5000 – 1:1000 та частково 1:500. Результати аерофотознімання проходять польовий контроль точності готової продукції.

• **Гнучкість та комплексність.** Результати аерофотозйомки являють собою основу для виробництва численних похідних продуктів геоінформаційних, які можуть бути використані для різних напрямків професійної діяльності клієнта: проектування, будівництва, аудиту та документування, моніторингу змін, розробки земельної та містобудівної документації, аналізу ризиків техногенного та природного походження, імітаційного моделювання, пошуку інвесторів та багато іншого. Наш метод полягає в орієнтації на комплексність рішення та гнучкості до потреб клієнта. Для цього, окрім збору основного набору даних, ми пропонуємо експертний підхід та залучення провідних спеціалістів в необхідних галузях. [1]

### **Джерела виникнення похибок на дані аерофотозйомки з БПЛА**

Джерела помилок фотограмметричних вимірювань помилки, що діють при фотограмметричних вимірюваннях, можна об'єднати в п'ять груп залежно від їх загального джерела виникнення. Це помилки: 1) знімка; 2) вимірювального приладу; 3) впізнання точок; 4) методики обробки; 5) опорних точок.

1. Основними джерелами помилок знімка є джерела, що викликають відхилення в положеннях точок на ньому від положень, відповідних ідеальній центральній проекції.

2. У цифрових фотограмметричних систем власне комп'ютер не вносить помилок в виміри й обчислення. Помилки з'являються через нечіткі введення в нього програм. Отже, у цих систем інструментальні помилки носять методичний характер. Аналітичні фотограмметричні прилади в якості вимірювальної системи мають оптико-механічну конструкцію - стереокомпаратор, який накладає на вимірювання свої помилки. Однак ці помилки невеликі і в цілому прилади показують високу інструментальну точність.

3. Помилки, що виникають через неправильне впізнання точок і, відповідно, наведення вимірювальної марки на ці точки, можуть істотно знижувати точність фотограмметричних вимірювань. Досвід показує, що для точних фотограмметричних робіт необхідно перед аерофотозйомки

виконати маркування точок на об'єкті зйомки. При цьому найкращий ефект в пізнанні точок буде досягнутий, якщо точки будуть пофарбовані фарбою, дає максимальне відбиття світла в тій зоні спектра, для якої аберації у об'єктиву фотокамери зведені до мінімуму. У цьому випадку буде забезпечуватися найбільша чіткість зображення позначених точок.

4. Методичні помилки виникають через порушення суворої теорії обробки знімків. Чим більше введено відступів від суворої обробки, тим нижче точність кінцевого результату, але при цьому скорочується час обробки.

5. Помилки опорних точок враховуються при фотограмметричних вимірюваннях в залежності від того, з якою точністю координати цих точок були визначені. Якщо ця точність вище точності фотограмметричних вимірювань в 2-3 рази, то координати опорних точок вважають безпомилковими. Інакше остаточну точність фотограмметричних вимірювань визначають, підсумовуючи помилки опорних точок і фотограмметричних вимірювань. Наприклад, при створенні топографічних карт в масштабах 1: 10000 та дрібніше геодезичні вимірювання координат опорних точок вважаються безпомилковими. У масштабах 1: 500 і 1: 1000 точність кінцевих результатів фотограмметричних вимірювань наближається до точності геодезичних вимірювань і, отже, помилки останніх потрібно враховувати.

На завершення слід зазначити, що неможливо визначити вплив кожного джерела помилок окремо. Крім того, характер дії кожного джерела змінюється в залежності від багатьох факторів. Можливо також дію невідомого джерела. У зв'язку з цим в фотограмметрії методику обробки знімків будують таким чином, що після виключення з вимірювань основної частини систематичних помилок, внесених джерелами, дії яких досить добре описуються математичними рівняннями, решту помилок виключають як єдину помилку за допомогою спеціальної методики, званої калібруванням знімків. [3]

Крім того для БПЛА є додаткові параметри які суттєво впливають на якість отриманих матеріалів. Елементи, що характеризують геометричні умови зйомки, називаються параметрами аерофотозйомки. Одним з основних параметрів є перекриття аерофотознімків, під яким розуміють частини суміжних знімків із зображенням одного і того ж ділянки місцевості, сфотографованого з різних точок. Для отримання заданої

величини перекриття під час проведення аерофотозйомки необхідно витримати відповідний базис фотографування. Однак при польоті БПЛА зйомка здійснюється в автоматизованому режимі і безперервно. В результаті виходить безліч знімків, з яких близько 80% перекриття. Якщо говорити про маневреності БПЛА, пов'язаної з переходом з пройденого маршруту на черговий знімальний маршрут, який називається заходом і від якого залежить точність витримуванням поперечного перекриття, то тут можна сказати, що зйомка для невеликих ділянок місцевості не вигідна. При здійсненні зйомки БПЛА в великому масштабі виконується перехід з одного на інший маршрут, використовуючи заходження з відворотом, і виходить дуже істотна петля, яку продовжує знімати в автоматичному режимі камера. Отримані знімки відбраковуються.

Наступний мінус стосується основних навігаційних елементів польоту, наприклад, таких як висота і кут зносу. Під висотою польоту розуміють відстань по вертикалі від рівня, взятого на початок відліку, до літака. Є абсолютна висота польоту над рівнем моря і справжня висота польоту щодо земної поверхні, над якою знаходиться літальний апарат. Кут зносу - це кут між поздовжньою віссю літального апарату і лінією його шляху [5]. Через те що БЛА має невелику масу, кут зносу досить великий, тому відбувається коливання висоти. Маса літального апарату впливає на кути крену і тангажа, які задають орієнтацію апарату щодо нормальної системи координат. З'являється кутове відхилення і поворот від його поздовжньої осі, що також впливає на якість відзнятого матеріалу. При проведенні зйомки з невеликої висоти кут поля зору маленький, тому доводиться виконувати багато маршрутів.

Під час здійснення зйомки на БЛА встановлюється не тільки камера, але і приймач супутникових систем навігації, таких як (Global Positioning System) GPS. Такий приймач здатний обчислити широту, довготу і висоту над Землею, час і дату, визначити напрямок на пункт з відомими координатами, швидкість літака, час прибуття, визначити бічне ухилення від заданої лінії шляху. У літаках використовується кілька приймачів, встановлених в різних точках літака, можна крім його координат визначити кути нахилу літака по крену і тангажу. Через невеликі габарити БЛА використовується тільки один приймач і тому, з огляду на всі перераховані вище відхилення від заданого польоту, GPS відміряє координати з похибками.

Також зміна висоти польоту БПЛА впливає на якість зображення. При зміні висоти польоту над поверхнею за рахунок зміни висоти рельєфу виникає зміна перекриття зображення, змінюється масштаб та інше. Оскільки зазвичай висота польоту БПЛА незначна в порівнянні з легкими літальними апаратами (літаками) то вплив перепаду висот суттєво впливає на якість вихідних даних.

### **ГідроЛокація та підводні дрони**

ГідроЛокація та підводні дрони є важливими компонентами сучасних морських технологій, що знаходять застосування як у військових, так і в цивільних сферах. ГідроЛокація, яка використовує звукові хвилі для виявлення та визначення положення об'єктів під водою, є фундаментальною для підводної навігації, розвідки та мапування. В той же час, підводні дрони, здатні до самостійного виконання задач у водному середовищі, революціонізували підходи до дослідження океанів, оборонної стратегії та екологічного моніторингу. Ця стаття має на меті дослідити історію, технічні аспекти, а також сучасні застосування гідроЛокації та підводних дронів, з акцентом на їх використанні в Україні.

Історія гідроЛокації починається з ранніх спроб використання звуку для виявлення об'єктів під водою. Основоположним моментом стало використання цієї технології під час Першої світової війни, коли необхідність виявлення підводних човнів призвела до створення перших гідроЛокаційних систем. У 1912 році Льюїс Ніколсон запатентував першу практичну систему, але широке використання гідроЛокації розпочалося у 1920-х роках з розробкою більш ефективних і точних систем. Після Другої світової війни технологія гідроЛокації отримала широке розповсюдження, зокрема в наукових дослідженнях, комерційному рибальстві, та військових застосуваннях. Сучасні системи гідроЛокації використовують передові технології обробки сигналів та комп'ютерного моделювання, що дозволяє отримувати детальні зображення підводного рельєфу та об'єктів.

ГідроЛокація - це техніка, що використовує звукові хвилі для визначення положення об'єктів під водою. Цей процес включає випромінювання звукових сигналів і аналіз їх відбиття від об'єктів. Оскільки звукові хвилі поширюються у воді інакше, ніж у повітрі, гідроЛокація стає ефективним засобом визначення місцезнаходження об'єктів на значних глибинах.



Існують два основних типи гідролокаційних систем: активна та пасивна. Активна гідролокація використовує власні звукові хвилі для виявлення об'єктів, відправляючи сигнали і вимірюючи час їх повернення. Натомість, пасивна гідролокація виявляє звуки, вироблені іншими об'єктами, такими як кораблі чи морські тварини.

Головним компонентом гідролокаційної системи є гідроакустичний передавач, який генерує звукові хвилі, та приймач, який захоплює ехо-сигнали. Ця система дозволяє аналізувати характеристики об'єкта, такі як розмір, форма, відстань та рух.

Гідролокаційні системи знаходять широке застосування у різних областях. У військовій сфері вони використовуються для виявлення підводних човнів та мін. У наукових дослідженнях - для картографування морського дна, вивчення морських течій та біологічного різноманіття океанів.

Завдяки розвитку технологій, сучасні гідролокаційні системи стають все більш точними та різноманітними в своїх можливостях. Це відкриває нові перспективи для дослідження і використання підводного світу, зокрема в сфері підводних дронів.

Підводні дрони, відомі також як автономні підводні апарати (AUV), є важливим напрямком в області морських технологій. Їхній розвиток почався в середині 20-го століття, але значний прогрес був досягнутий в останні декілька десятиліть завдяки вдосконаленню комп'ютерних технологій та електроніки.

Перші підводні дрони були простими у використанні і здебільшого використовувалися для наукових досліджень та військових цілей. Вони могли здійснювати збір даних про морське дно, водну флору і фауну, а також виконувати розвідувальні завдання.

Підводний дрон CHASING M2 (рис. 1.4) став важливим інструментом для експертного огляду та дослідження підводних споруд. Його можливості глибоководності, високоякісного зображення, додаткового обладнання та зручного управління дозволяють виконувати завдання на високому рівні точності та ефективності.



Рис. 1.4. Підводний дрон CHASING M2

Сучасні підводні дрони значно розширили свої функціональні можливості. Вони обладнані складними сенсорами, камерами, гідролокаційними системами та можуть виконувати різноманітні завдання, від мапування морського дна до пошуку затонулих об'єктів та проведення ремонтних робіт на підводних спорудах.

Розвиток автономних технологій дозволив підводним дронам здійснювати тривалі місії без прямого людського втручання. Це значно розширює їхню ефективність та безпеку, оскільки дозволяє виконувати операції в екстремальних умовах, де присутність людини була б небезпечною або неможливою.

Перспективи майбутнього розвитку підводних дронів обіцяють ще більше інновацій. Зокрема, акцент робиться на покращенні автономності, збільшенні енергоефективності, розширенні сфери застосування та інтеграції з іншими морськими технологіями, такими як безпілотні надводні кораблі.

Підводні дрони, відомі також як автономні підводні апарати (AUV), мають різноманітні технічні характеристики, які дозволяють їм ефективно виконувати широкий спектр завдань. Однією з ключових особливостей цих апаратів є їхня здатність діяти на значних глибинах, що важливо для дослідження океанського дна та виконання спеціалізованих завдань.

Конструкція підводних дронів передбачає високу ступінь водонепроникності та стійкість до високого тиску водного середовища. Це досягається за допомогою спеціальних матеріалів та інженерних рішень, які забезпечують надійність апаратів у важких умовах.

Підводні дрони оснащені різноманітними сенсорами та інструментами для збору даних. Це можуть бути гідролокаційні системи,

відеокамери, зонди для вимірювання фізичних та хімічних параметрів води, а також маніпулятори для збору зразків або виконання ремонтних робіт.

Автономність підводних дронів визначається їхньою здатністю працювати без безпосереднього керування з боку оператора. Це досягається за допомогою вбудованих систем навігації та керування, які дозволяють апаратам самостійно маневрувати та виконувати завдання за заданими алгоритмами.

Окрім технічних характеристик, ефективність підводних дронів також залежить від їх енергетичних систем. Розробники намагаються збільшити тривалість місій, оптимізувавши споживання енергії та використовуючи передові джерела живлення, такі як літій-іонні акумулятори або альтернативні джерела енергії.

Україна активно розвиває використання підводних дронів, що стає важливою частиною національної оборони та дослідження морського простору. З огляду на геополітичне розташування України, особливо в контексті Чорного моря, використання підводних технологій є стратегічно важливим.

Вони ефективно використовуються для екологічного моніторингу, дослідження морської флори та фауни, а також для картографування морського дна. Це дозволяє отримувати цінну інформацію про стан морського середовища та виявляти потенційні екологічні загрози.

В області наукових досліджень підводні дрони застосовуються для збору даних про океанічні течії, вивчення морських глибин, та проведення геологічних та археологічних досліджень. Вони можуть дістатися місць, недоступних для людини, забезпечуючи дослідникам унікальну інформацію про підводний світ.

У комерційній сфері підводні дрони використовуються для інспекції та обслуговування підводних споруд, таких як нафтові та газові платформи, підводні кабелі та трубопроводи. Це забезпечує безпечне та ефективне управління цими об'єктами, мінімізуючи ризик для людського життя та навколишнього середовища.

Підводні дрони також відіграють важливу роль у пошуково-рятувальних операціях на воді. Вони здатні швидко сканувати великі акваторії на предмет пошуку зниклих людей або об'єктів. Це значно підвищує ефективність пошукових операцій та сприяє швидкому реагуванню на надзвичайні ситуації.

Враховуючи їхні можливості та гнучкість застосування, підводні дрони стають невід'ємною частиною сучасних цивільних та комерційних операцій у водному просторі. Вони не тільки підвищують безпеку та ефективність різноманітних операцій, але й відкривають нові горизонти для дослідження та використання морських ресурсів.

Повністю інтегроване рішення для тривимірного батиметричного обстеження, розміщення підводних об'єктів, підводної археології та аварійного рятування. Багатопроміньовий ехолотатор скорочує час обстеження, покращує ефективність роботи та видає дані з високою роздільною здатністю, щоб завжди відповідати найвищим вимогам проєкту гідрографічних зйомок:

- Визначення глибин водойм, картографування дна річок, озер, водосховищ, прибережних ділянок моря.
- Проведення інженерно-гідрографічних вишукувань при будівництві та експлуатації будь-яких гідротехнічних споруд.
- Моніторинг поверхні дна в акваторії гідротехнічних споруд.
- Створення та оновлення навігаційних карт.
- Руслові зйомки.
- Проведення робіт для подальшого очищення і відновлення природних водних об'єктів (видалення мулу, днопоглиблювальні роботи і т.п.) (рис. 1.5).

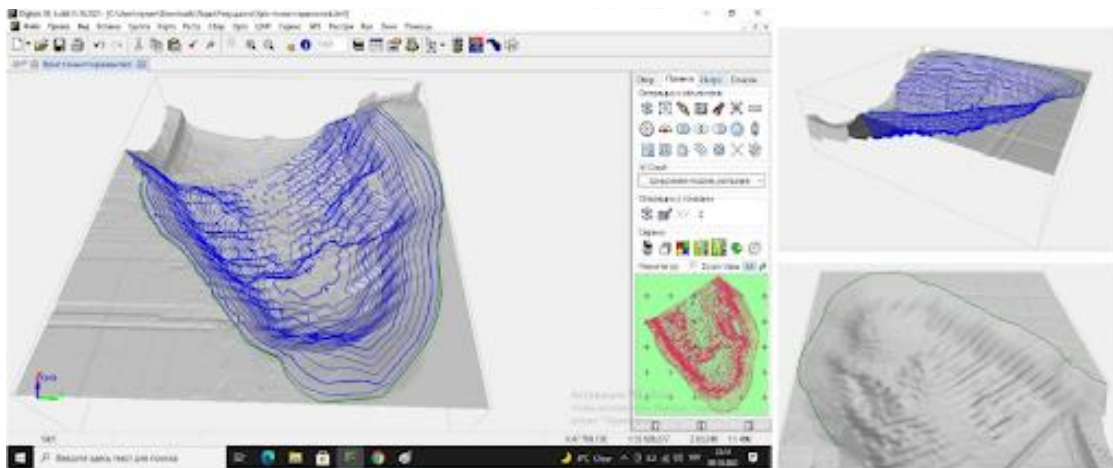


Рис. 1.5. Цифрова модель рельєфу дна в ПЗ Digital

Останніми роками спостерігається значний прогрес у розвитку гідролокаційних систем. Завдяки інтеграції сучасних технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання, здійснюється аналіз даних з вищою

точністю та швидкістю. Це дозволяє краще розуміти морські процеси, виявляти об'єкти під водою та ефективно навігувати в складних умовах.

Інновації також відбуваються у розробці нових сенсорів та гідроакустичних систем, які забезпечують вищу чутливість і точність. Розробляються системи, які можуть працювати на різних частотах, забезпечуючи більш гнучке використання для різноманітних застосувань, від військових до наукових досліджень.

Важливим напрямком є інтеграція гідролокаційних систем з іншими технологіями, такими як підводні дрони та надводні безпілотні апарати. Це створює синергію в дослідженнях та розвідці, дозволяючи проводити більш комплексний аналіз морського простору.

Етичні та правові питання використання підводних дронів стають все більш актуальними. Одним із ключових аспектів є конфіденційність інформації, зібраної за допомогою цих апаратів. Виникають питання щодо власності на дані та меж їх використання, особливо у відношенні до міжнародних вод.

Іншим важливим питанням є безпека морського простору. Підводні дрони можуть використовуватися для військових та шпигунських цілей, що викликає занепокоєння з боку міжнародної спільноти. Важливо розробити міжнародні стандарти та правила використання таких технологій для запобігання конфліктів та забезпечення мирного використання морських ресурсів.

Регуляція використання підводних дронів також важлива з точки зору екологічного впливу. Необхідно забезпечити, щоб їхнє використання не завдавало шкоди морському середовищу та його мешканцям. Розробка екологічних стандартів і правил поведінки з такими апаратами допоможе уникнути негативного впливу на морські екосистеми та забезпечить сталий розвиток морських технологій.

#### Виклики та обмеження підводних дронів

Розвиток підводних дронів супроводжується певними викликами та обмеженнями. Однією з основних проблем є обмежена тривалість батареї, що впливає на час та дальність місії. Це змушує розробників шукати нові рішення для збільшення енергоефективності та використання альтернативних джерел енергії. Іншим значним викликом є підтримка стабільного зв'язку з дроном на великих глибинах, де радіохвилі є неефективними.

Також існують технічні обмеження, пов'язані з розмірами та вагою апаратів. Більші дрони можуть нести більше обладнання та мати більшу тривалість місій, але їх складніше транспортувати та запускати. Натомість, менші моделі, хоча й більш маневрені, мають обмеження в несучій спроможності та функціональності.

Існують також виклики, пов'язані з навігацією та автономією підводних дронів. Необхідно розробляти все більш складні алгоритми для обробки інформації з сенсорів та підтримки безпечного керування в складних підводних умовах. Це включає в себе уникнення перешкод, визначення оптимального маршруту та виконання завдань з високою точністю.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Які основні типи конструкцій БПЛА використовуються в геодезії?
2. У чому полягає перевага багатороторних БПЛА над апаратами з фіксованим крилом?
3. Які типи місій можуть виконувати БПЛА в інженерній геодезії?
4. Як класифікуються БПЛА за масою та розміром?
5. У яких випадках доцільніше використовувати VTOL-дрони?
6. Які обмеження накладаються на використання БПЛА в межах населених пунктів?
7. Які геодезичні задачі найчастіше вирішуються за допомогою БПЛА?
8. Як впливає тривалість польоту на вибір БПЛА?
9. У чому полягає специфіка підводних дронів у порівнянні з повітряними?
10. Які типи навігаційних систем використовуються в сучасних БПЛА?

## Лекція 2. Принцип методу «Структура з руху» (SfM)

### План

1. Етапи роботи методу «Структура з руху».
2. Види знімальних платформ.
3. Результати обробки БПЛА даних.

Структура з руху, або SfM, — це техніка дистанційного зондування, яка використовує кілька фотографій об'єкта або об'єкта для створення тривимірного набору точок, що відповідають поверхні об'єкта (кожна з координатами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), що називається точкою. хмара з відповідним кольором RGB. Після географічної прив'язки хмари точок із наземними опорними точками, отриманими за допомогою пристрою GPS, що визначає положення розпізнаваних об'єктів, дані можна перетворити на цифрову модель рельєфу (DEM) для аналізу для наукових досліджень. SfM — це інструмент, який швидко стає популярним у науках про Землю для топографічного картографування, а також для часових і просторових геоморфологічних і тектонічних досліджень землетрусів, вулканів, зсувів, річкової геоморфології, балансу маси льодовика та вимірювання глибини снігу. SfM також використовується в дослідженнях біомаси в лісовому господарстві, аналізі середовища існування в біології та численних інженерних застосуваннях.

### Основи методології Structure for Motion

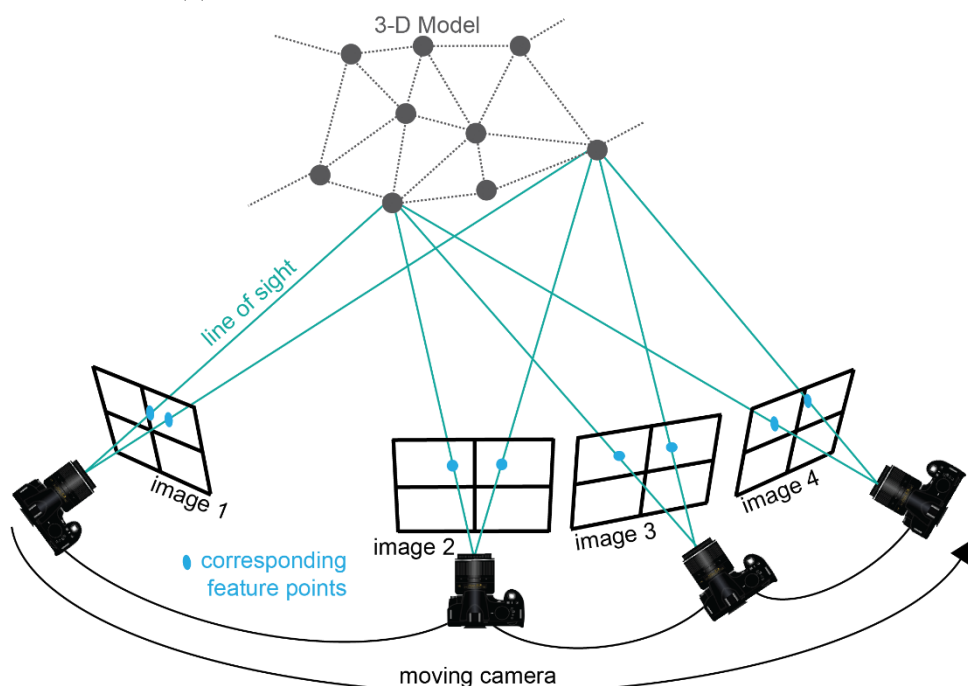


Рис. 2.1. Схема методу структури з руху (SfM)



Фотографії зроблені в різних орієнтаціях; зібрані елементи на кількох фотографіях використовуються для оцінки відносного положення камери, яке потім екстраполюється для створення хмари точок або 3D-моделі сцени. (Рисунок змінено з Кріса Суїні, UCSB).

Однак також важливо розуміти основи процесу генерації моделі для розробки оптимального опитування. Кілька фотографій об'єкта з різних ракурсів робляться та вводяться в програмне забезпечення SfM. Після того, як фотографії зроблені, «структура» (наприклад, рельєф) сцени будується з «руху» камери. Програмне забезпечення визначає елементи, присутні на кількох фотографіях, які називаються дескрипторами ключових точок (надалі іменуються ключовими точками) за допомогою алгоритму під назвою SIFT (масштабно-інваріантне перетворення ознак) (рис. 2.2).



Рис. 2.2. SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) — це алгоритм, який визначає дескриптори ключових точок, знайдені в кількох зображеннях, незалежно від їх масштабу, як показано вище. На кожній фотографії виділено один і той самий кущ, і його можна порівняти, незважаючи на варіації розміру (Ед Ніссен, Школа шахти CO).

Ключові точки використовуються для обчислення відносного розташування камер, щоб створити розріджену хмару точок «низької щільності». Потім на основі розташування розріджених точок і розташування камери створюється хмара точок високої щільності. Наземні



контрольні точки або GPS-місцезнаходження розпізнаваних об'єктів у моделі тепер можна додавати до географічної прив'язки хмари точок, щоб потім її можна було перетворити на цифрову модель рельєфу (DEM). Наземні контрольні точки також мають вирішальне значення для створення більш точної топографічної моделі.

Структура з руху або SfM — це фотограмметричний метод для створення тривимірних моделей об'єкта або топографії з двовимірних фотографій, що перекриваються, зроблених із багатьох місць і орієнтацій, для реконструкції сфотографованої сцени. Ця технологія існувала в різних формах з 1979 року (Ullman, 1979), але до початку 2000-х її застосування було рідкісним (Snavely et al., 2008). Застосування SfM є широким, від багатьох підгалузей наук про Землю (геоморфології, тектоніки, структурної геології, геодезії, гірничої справи) до археології, архітектури та сільського господарства. На додаток до орто-випрямлених зображень, SfM створює набір даних про щільну хмару точок, багато в чому схожий на той, який створює бортовий або наземний LiDAR (рис. 2.3).

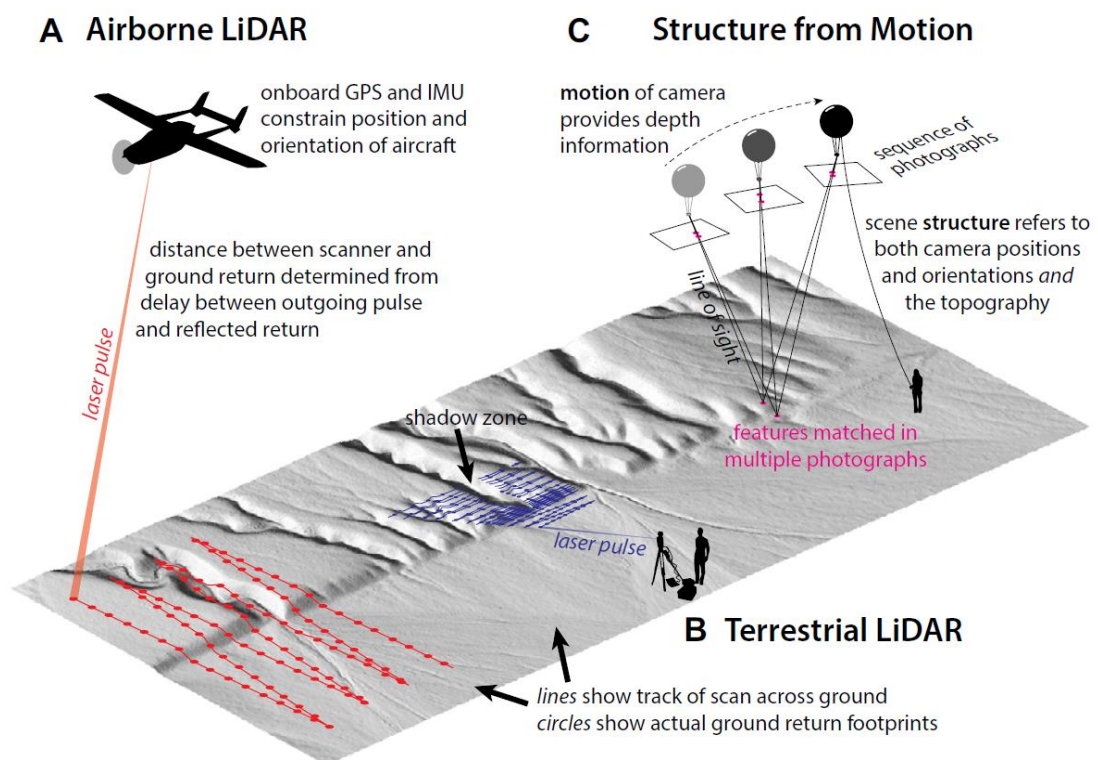


Рис. 2.3. Порівняння SfM з бортовими та наземними методами LiDAR

Перевагами SfM є менша вартість порівняно з LiDAR, а також простота використання. Єдине необхідне обладнання – це фотоапарат. Для обробки даних потрібен комп'ютер і програмне забезпечення. Крім того,

підйомна платформа, як повітряна куля або дрон, також може бути корисною для топографічних карт. Основним обмеженням є час обробки програмним забезпеченням для вирівнювання зображень для створення моделі, який коливається від десяти хвилин для кількох фотографій до днів для сотень чи тисяч фотографій. Оскільки SfM покладається на оптичні зображення, він не може генерувати топографічні продукти «голої землі», які є типовими похідними від технологій на основі LiDAR, тому SfM зазвичай найкраще підходить для територій з обмеженою рослинністю.

Залежно від застосування та мети дослідження, камеру можна встановити в численних конфігураціях для отримання зображень для обробки SfM (рис. 2.4). У цьому розділі представлено ознайомлення з різними платформами, які можна використовувати для отримання зображень (табл. 2.1).

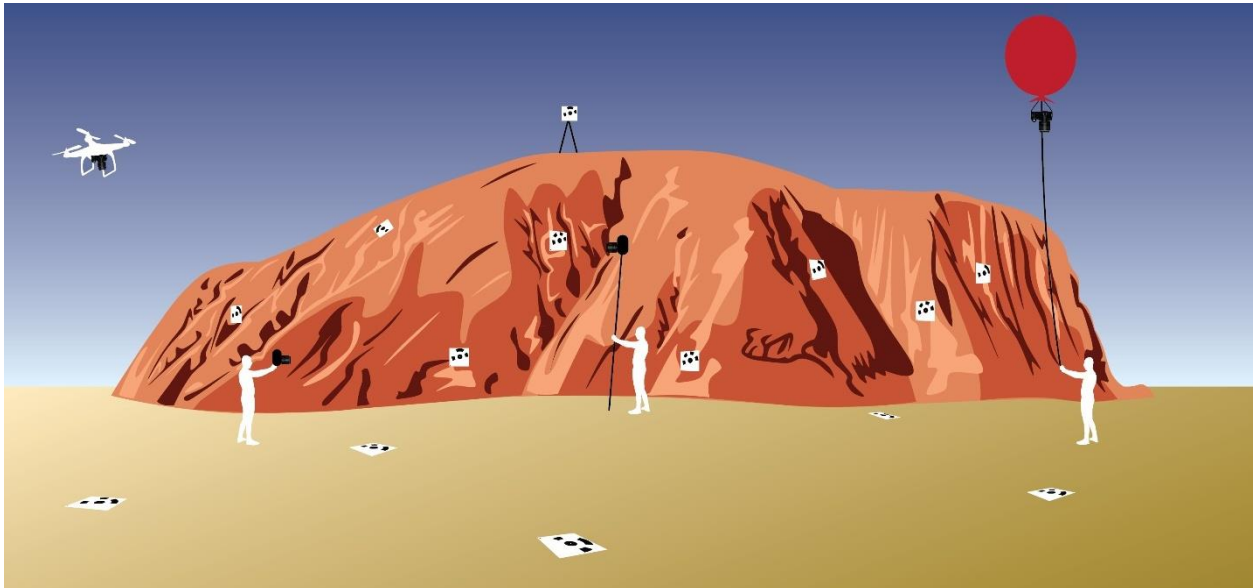


Рис. 2.4. Різні платформи для Structure from Motion (зліва направо): UAS (без екіпажа), портативна камера, стовп, повітряна куля. Білі квадрати з чорними візерунками є цілями для географічної прив’язки дослідження

Багато описів платформ містять посилання на пікавет: пікавети — це просто кріплення камери, призначене для утримання камери вертикально, навіть якщо лінія, на якій камера підвішена, не є такою. Picavets можна придбати, але в Інтернеті є посібники для тих, хто бажає побудувати свій власний.

Таблиця 2.1

**Вартість, переваги та недоліки поширених платформ SfM**

| Платформа                         | Вартість                                                                                                                                                                                                                     | Переваги                                                                                                                                                                                                                                                     | Недоліки                                                                                                                          |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Людина<br>(ручний)                | \$0                                                                                                                                                                                                                          | Вартість, хороша для детальної роботи (охарактеризуйте конкретні дрібно-масштабі особливості), потенційно більш ефективна для масштабної роботи на оголенні                                                                                                  | обмежені додатки; не підходить для площ більше 100–200 квадратних метрів                                                          |
| Полюс<br>(рис. 2.3)               | ~\$50–250, залежно від висоти стовпа.<br>Можна придбати комплекти в Інтернеті, але створити власний часто економічніше.                                                                                                      | Вартість, простота налаштування та використання, підходить для певних типів функцій (наприклад, нахил під звисом)                                                                                                                                            | Потрібне кріплення для камери, обмеження щодо максимальної висоти стовпа, неефективне порівняно з UAS                             |
| Повітряна куля<br>(рис. 2.4, 2.5) | ~\$300–5000.<br>Створення власної системи коштує недорого, але системи на ринку можуть коштувати набагато дорожче, оскільки вони можуть мати відеосистеми, щоб показати, що переглядає камера.<br>Метеорологічна куля коштує | Вартість (якщо ви не придбаєте комерційну версію), простота, орієнтація камери (можна знімати прямо вниз, на відміну від багатьох установок на стовпі), висота. Повітряні кулі є хорошим варіантом для топографічних карт. Лінія Tether line усуває юридичні | Легше з двома людьми, а не з одним, під впливом вітру, потрібен пікавет (збірка або придбання), потрібен гелій (обмежений ресурс) |

|                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                     | <p>~100 доларів США, кріплення для пікаве —</p> <p>~50 доларів США, шнур для повітряного змія</p> <p>~20 доларів США, а гелій</p> <p>~180 доларів США за резервуар відповідного розміру</p>                                                                                                                    | <p>ускладнення, пов'язані з UAS</p>                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                      |
| Повітряний змій (рис. 2.6)                          | <p>Вартість залежить від ваги системи кріплення камери. Зміїв можна використовувати з легкими камерами та коштувати близько 50 доларів; повітряні змії, зроблені для аерофотозйомки, можуть коштувати 100–400 доларів. Для обох варіантів вам потрібно буде придбати або побудувати пікавет за 50 доларів.</p> | <p>Вартість, висота, орієнтація камери (може знімати прямо вниз, на відміну від багатьох установок на стовпі), дальність, подібна до повітряної кулі, але без гелію! Добре підходить для програм топографічного картографування. Лінія Tether усуває юридичні ускладнення, пов'язані з UAS</p> | <p>Залежно від погоди, необхідно побудувати/придбати пікавет для фотоапарата, лінія повітряного змія може заважати фотографіям, повітряний змій повинен бути великим/мати хорошу «підйомну силу»</p> |
| UAS – моторизований планер, багатороторний вертоліт | <p>Вартість дуже мінлива; моторизований планер коштує близько 200–300 \$ + вартість</p>                                                                                                                                                                                                                        | <p>Можна контролювати висоту, положення камери, а також заздалегідь</p>                                                                                                                                                                                                                        | <p>Вартість, потрібен кваліфікований оператор, тривалість зйомки залежить від заряду батареї, може знадобитися легке</p>                                                                             |

|                                        |                                                                                                             |                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (квадро-, гекса- або окта-) (рис. 2.7) | пікавету; квадрокоптери можуть коливатися від 400 до 5000 доларів або більше залежно від їхніх можливостей. | спланувати та автоматизувати оглядові лінії польоту, інтеграція GNSS для ефективності | налаштування камери. Потенційно небезпечний при неправильній експлуатації. Правове середовище для використання UAS може бути складним; користувачі повинні проконсультуватися з інституційними правилами та/або юридичною консультацією перед початком роботи. |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Ці платформи легко налаштовуються. Обмежуючим фактором зазвичай є вага, але якщо у вас є повітряний змій або повітряна куля з достатньою підйомною силою, система може включати кріплення для камери з дистанційним керуванням, щоб змінювати орієнтацію фотографій під час зйомки. Інші доповнення включають радіоконтролер для регулювання часу зйомки фотографій, якщо ваша камера не має сповільненої зйомки, і теггер GPS на камері для географічної прив'язки фотографій, якщо камера не має внутрішнього GPS. UAS (аеросистеми без екіпажу) тепер можна придбати з приймачами GNSS, що прискорює процес вирівнювання фотографій у програмному забезпеченні.

Щоб здійснити пошук в Інтернеті обладнання, пов'язаного з однією з цих платформ, спробуйте знайти «<платформа> аерофотозйомка» (наприклад, аерофотозйомка змія). Це повинно призвести до обладнання для конкретної платформи, призначеного для розміщення камери.

Підйом кайта складніше визначити на простій діаграмі, оскільки він сильно залежить від кайта та вітру в будь-який момент часу.

Підйом повітряної кулі є простішим, оскільки він залежить від гелію (табл. 2.2). Використовуйте цю таблицю (без ваги повітряної кулі), щоб визначити розмір повітряної кулі, необхідної для підйому вашої камери.

Таблиця 2.2

**Залежність розміру повітряної кулі від підйомної сили у грамах**

| Діаметр (фути) | Діаметр (м) | Об'єм (літри) | Підйом (грами) |
|----------------|-------------|---------------|----------------|
| 1              | 0,3048      | 14.8          | 15.2           |
| 2              | 0,6096      | 118.6         | 121.7          |
| 3              | 0,9144      | 400.3         | 410.9          |
| 4              | 1,2192      | 949,0         | 973,9          |
| 5              | 1,524       | 1853,4        | 1902.2         |
| 6              | 1,8288      | 3202,8        | 3287,0         |
| 7              | 2,1336      | 5085,9        | 5219,7         |
| 8              | 2,4384      | 7591,7        | 7791,5         |
| 9              | 2,7432      | 10809,3       | 11094          |
| 10             | 3,048       | 14827,6       | 15218          |
| 11             | 3,353       | 19735,5       | 20255          |
| 12             | 3,6576      | 25622,1       | 26296          |
| 13             | 3,9624      | 32576,2       | 33433          |
| 14             | 4,2672      | 40686,9       | 41757          |
| 15             | 4,572       | 50043,1       | 51360          |
| 16             | 4,8768      | 60733,8       | 62332          |
| 17             | 5.1816      | 72847,9       | 74765          |
| 18             | 5,4864      | 86474,4       | 88750          |
| 19             | 5,7912      | 101702,3      | 104378         |
| 20             | 6,096       | 118620,6      | 121741         |
| 21             | 6,4008      | 137318,2      | 140931         |
| 22             | 6,7056      | 157884,0      | 162038         |
| 23             | 7,0104      | 180407,1      | 185154         |
| 24             | 7,3152      | 204976,4      | 210369         |

**Приклади можливих платформ**

Платформа для аерофотозйомки (РАР) (рис. 2.5). Для цієї платформи потрібна довга телескопічна жердина, щоб підняти вашу камеру з метою зйомки на цікавій ділянці або щоб дістатися вище на оголенні. Камера повинна буде робити фотографії через певні проміжки часу, і це можна зробити за допомогою сповільненої зйомки, безперервної зйомки або зйомки з дистанційним керуванням. Багато фотоапаратів (особливо новіші DSLR мають доступні програми, які дозволяють керувати камерою за допомогою смартфона). Ці дослідники фотографують низку невеликих розплавів, що містять розплави, в межах майже горизонтальних відхилень.





Рис. 2.5. Платформа для аерофотозйомки (РАР)

Платформа повітряної кулі (рис. 2.6). На фото зліва показано положення камери під час польоту повітряної кулі. Центральна фотографія показує положення повітряної кулі відносно пілота під час польоту; фотографія праворуч показує більш детальну настройку камери. Завдяки налаштуванню Пікаве камера орієнтована прямо на землю.



Рис. 2.6. Платформа повітряної кулі

На рис. 2.7 показано, як це працює.

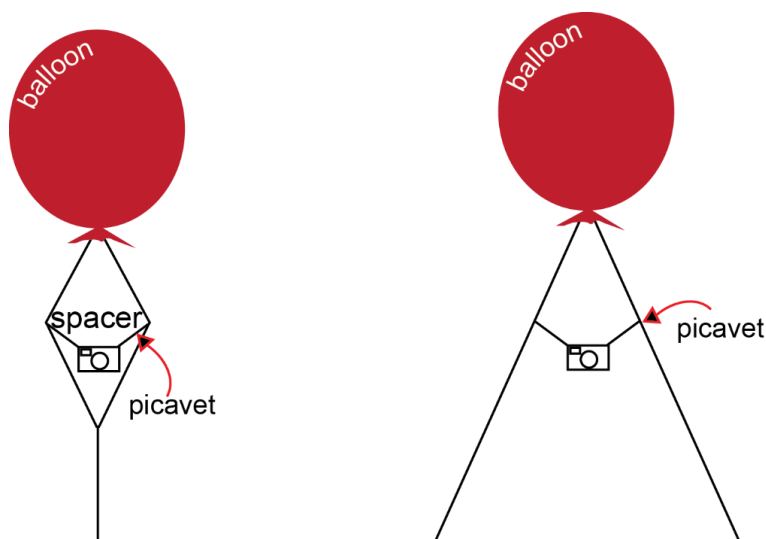


Рис. 2.7. Демонстрація системи Пікаве з використанням балонної платформи

Ліва схема демонструє ідеальне налаштування з одним оператором, тоді як права схема демонструє ідеальне налаштування з двома операторами. Ви можете встановити орієнтацію камери за допомогою Пікаве; деякі також постачаються з «сервоприводом» дистанційного керування або системою обертання, щоб ви могли змінювати орієнтацію камери, перебуваючи в повітрі.

На рис. 2.8. показано налаштування Пікаве для повітряного змія — зауважте, що це в основному таке ж, як налаштування для повітряної кулі.



Рис. 2.8. Пікаве для повітряного змія



Однак цією системою можна дистанційно керувати за допомогою камери, встановленої на підвісі, тому пілот може змінювати орієнтацію камери під час польоту повітряного змія. Праворуч показано розташування пілота відносно камери та повітряного змія під час фотографування вілли.



Рис. 2.9. Приклади БПЛА з камерами – DJI Phantom 4 і Mavic 2

### **Запитання для самоперевірки**

1. У чому полягає основна ідея методу Structure from Motion?
2. Який фізичний принцип лежить в основі SfM?
3. Які типи даних потрібні для побудови моделі методом SfM?
4. Яку роль відіграють ключові точки у SfM?
5. Що таке хмара точок і як вона формується?
6. Як SfM забезпечує масштаб моделі?
7. Які алгоритми використовуються для зіставлення ключових точок?
8. Чим SfM відрізняється від класичної фотограмметрії?
9. У чому полягає обмеження SfM у густо вкритій рослинністю місцевості?
10. Які переваги та недоліки має SfM у порівнянні з LiDAR?

### Лекція 3. Структура з руху: особливості робочого процесу

#### План

1. Параметри камери, характеристики фотографій, ракурс знімання.
2. Робочий процес.
3. Особливості застосування ГНСС даних.

Три кити експозиції: витримка, діафрагма та чутливість камери

Фотографія — це мистецтво роботи зі світлом, і експозиція є ключовим фактором у створенні якісного зображення. Три основні параметри, що визначають експозицію, — це витримка, діафрагма та чутливість ISO (рис. 3.1). Вони працюють разом, впливаючи на яскравість знімка та його художні характеристики.

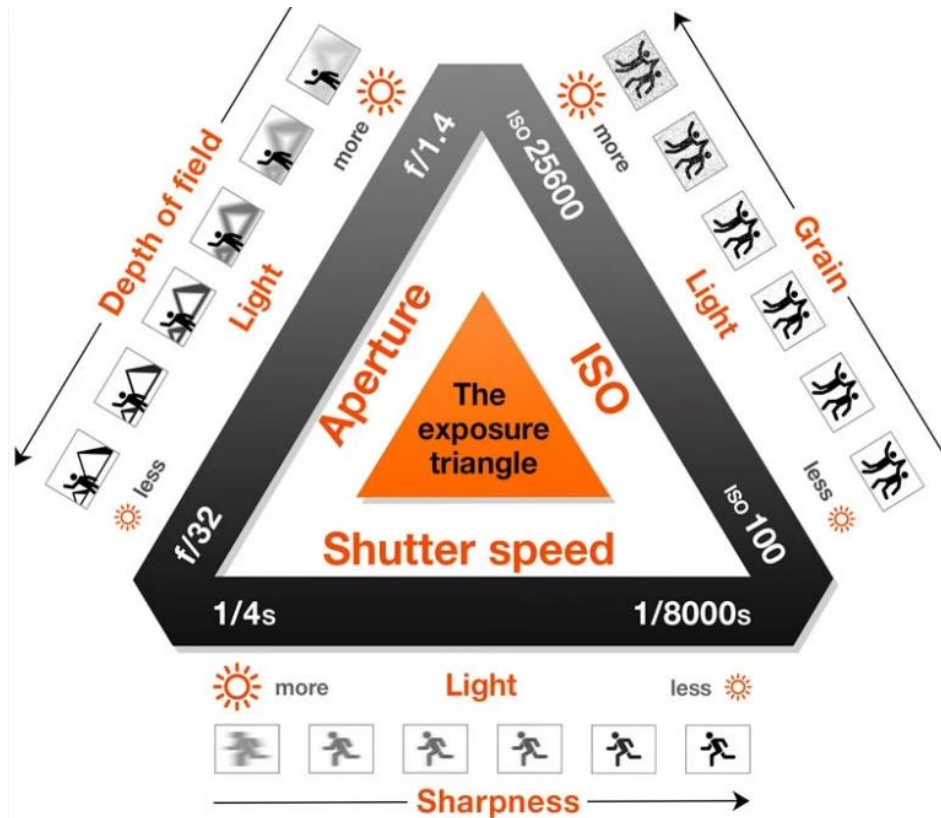


Рис. 3.1. Витримка, діафрагма та чутливість камери

#### Витримка

Витримка визначає, як довго світло потрапляє на матрицю або плівку камери. Вона вимірюється в секундах або їх частках, наприклад 1/1000, 1/250, 1/60, 1/10 або навіть 30 секунд.

Як працює витримка?

Чим коротша витримка, тим менше світла потрапляє на сенсор, що робить зображення темнішим. Довша витримка дозволяє зібрати більше світла, що корисно при зйомці в умовах слабого освітлення.

Приклади використання:

- Коротка витримка ( $1/1000$  с і менше) — використовується для зйомки рухомих об'єктів, таких як спортивні події або дикі тварини.
- Середня витримка ( $1/60$  -  $1/250$  с) — підходить для портретів та повсякденних знімків.
- Довга витримка (1 с і більше) — корисна для зйомки нічних сцен, світлових доріжок автомобілів, зоряного неба або ефекту розмитої води.

Приклад: фотограф знімає водоспад. Використовуючи витримку  $1/1000$  с, вода буде виглядати «замороженою» у русі. А при витримці  $1/2$  с вона набуде м'якого, розмитого вигляду.

### Діафрагма

Діафрагма — це розмір отвору в об'єктиві, через який проходить світло. Вимірюється в f-числах, наприклад,  $f/1.8$ ,  $f/4$ ,  $f/11$ ,  $f/22$ .

Як працює діафрагма?

Менше число (наприклад,  $f/1.8$ ) означає більший отвір, через який проходить більше світла. Велике число (наприклад,  $f/16$ ) означає менший отвір, що зменшує кількість світла.

Приклади використання:

- Мала діафрагма ( $f/1.8$  -  $f/4$ ) — створює малу глибину різкості, що дозволяє виділити об'єкт на розмитому фоні. Ідеально підходить для портретів.
- Середня діафрагма ( $f/5.6$  -  $f/11$ ) — забезпечує баланс між розмиттям фону та різкістю зображення, що добре підходить для пейзажів.
- Велика діафрагма ( $f/16$  -  $f/22$ ) — забезпечує максимальну глибину різкості, що корисно при зйомці пейзажів або архітектури.

Приклад: при зйомці портрета на  $f/2.8$  фон буде красиво розмитий, тоді як на  $f/11$  модель і фон залишаться у фокусі.

### Чутливість ISO

ISO визначає, наскільки чутливий сенсор камери до світла. Стандартні значення: 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 і більше.

Як працює ISO?

- Низьке ISO (100-200) — використовується при яскравому освітленні для отримання зображення без шуму.
- Середнє ISO (400-800) — добре підходить для умов слабого освітлення або зйомки в приміщенні.
- Високе ISO (1600 і більше) — використовується для нічної зйомки без штатива, але може спричиняти шум на фото.

Приклад: при зйомці в сонячний день достатньо ISO 100, а для фотографування нічного міста може знадобитися ISO 1600 або вище.

### Баланс трьох параметрів

Ці три складові експозиції працюють разом, створюючи трикутник експозиції. Зміна одного параметра вимагає коригування інших для досягнення правильної експозиції.

Приклад ситуації: Фотограф хоче зняти портрет із розмитим фоном при слабкому освітленні. Він вибирає:

- Діафрагму f/2.8 (для розмитого фону)
- Витримку 1/60 с (щоб уникнути тремтіння камери)
- ISO 800 (щоб компенсувати недостатнє світло)

Якщо він вирішить зменшити ISO до 200, йому доведеться збільшити витримку або відкрити діафрагму ще більше.

### **Характеристики фото**

1. Фокусна відстань камери. Фокусна відстань визначає кут огляду об'єктива і ступінь наближення об'єктів у кадрі. Вимірюється в міліметрах (наприклад, 24 мм, 50 мм, 200 мм). Чим більше число, тим сильніше наближується об'єкт.
2. Розмір датчика камери. Чим більший сенсор камери, тим більше світла він може захопити, що покращує якість зображення. Повнокадрові сенсори (Full Frame) забезпечують ширший кут огляду та кращу деталізацію, а кропнуті сенсори (APS-C, Micro Four Thirds) мають менше поле зору.
3. Співвідношення сторін фотографії. Формат зображення визначає його пропорції, наприклад 3:2 (стандарт для дзеркальних камер), 4:3 (типовий для смартфонів) або 16:9 (широкоформатні кадри).

4. Ефективні мегапікселі камери. Кількість мегапікселів визначає деталізацію зображення. Камера з 12-20 МП достатня для більшості завдань, а моделі з 40-100 МП використовуються для професійної роботи та друку великих фотографій.
5. Відстань між камерою та ціллю. Чим ближче розташований об'єкт до камери, тим більше він займає місця в кадрі. Відстань впливає на перспективу: ближчі об'єкти здаються більшими відносно далеких.
6. Масштаб об'єкта. Масштаб визначає, якого розміру буде об'єкт у фінальному кадрі. Він залежить від фокусної відстані, відстані до об'єкта та розміру сенсора.

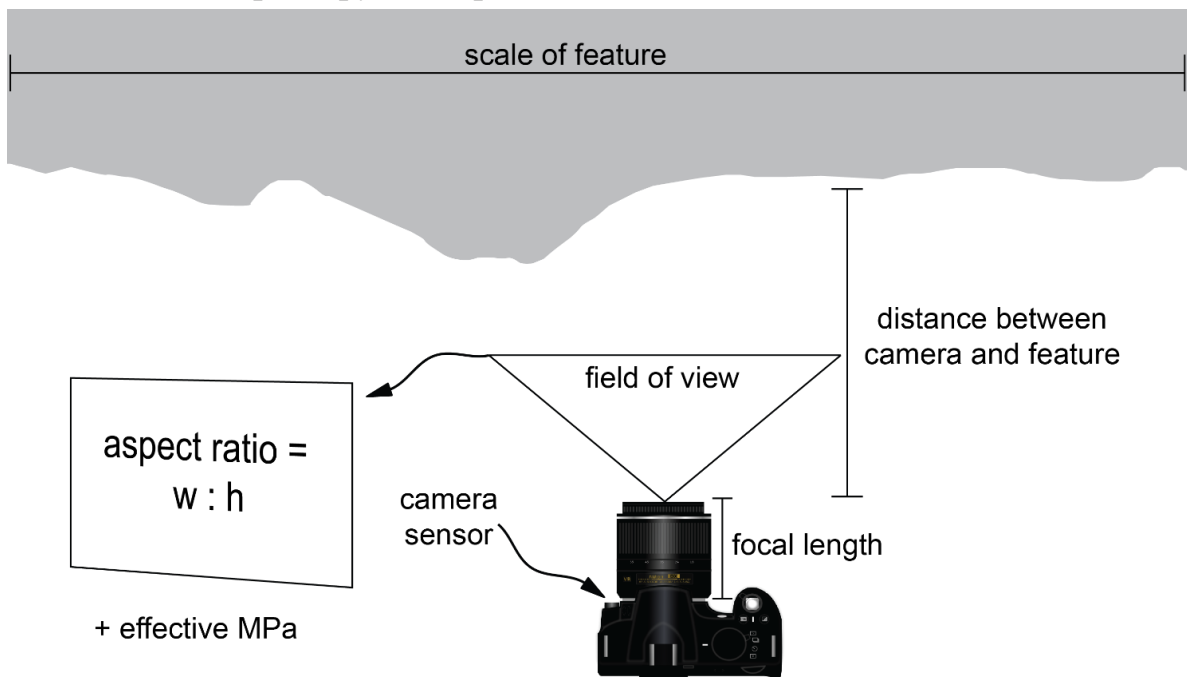


Рис. 3.2. Характеристики фото

Замість того, щоб рекомендувати конкретну камеру, тут зібрано список загальних вказівок, яких слід дотримуватися при виборі камери.

Враховуйте вагу, яку здатна витримати ваша платформа. Велика повітряна куля може нести важчу камеру, ніж, наприклад, повітряний змій.

Думки щодо корисності цифрових дзеркальних фотоапаратів порівняно з камерами прямого фокусування різняться. Більшість рекомендує використовувати DSLR (цифрову однолінзову дзеркальну камеру) або камеру «наведи і знімай», яка має вищий рівень ISO, ніж середній.

GPS: вбудований теггер GPS заощаджує вагу та спрощує процес зшивання фотографій у деяких програмах для моделювання. Він також

створює більш точні хмари точок із геоприв'язкою. Якщо обрана вами камера не має GPS, найкраще додатково придбати GPS-теггер, який допоможе в обробці даних.

Зйомка: камера повинна робити фотографії через певні проміжки часу. Це можна зробити одним із трьох способів, але рекомендується використовувати камери з уповільненою зйомкою або можливістю модифікації камери для зйомки сповільненої зйомки.

- Уповільнена зйомка: камера має можливість робити фотографії через певні проміжки часу
- Безперервна зйомка: схожа на сповільнену зйомку, але потрібно натиснути кнопку камери (це просто — використовуйте гумку!)
- Зйомка з дистанційним керуванням: цей варіант є найскладнішим, оскільки системи можуть покладатися на радіо, тому вам потрібно буде обмежити висоту камери.

Роздільна здатність: деякі рекомендують залишатися на рівні 12 мегапікселів або вище, але необхідність цього обговорюється. Камери повинні бути вище 5 мегапікселів.

Формат зображення:

- Файли зображень у форматі RAW є найбільш корисними, тому вибрати камеру, яка здатна на це, — гарна ідея. Їх можна перетворити на TIFF після повернення з поля.
- Не використовуйте JPEG, оскільки вони створюють непотрібний шум.

Якщо ви бажаєте використовувати налаштування перегляду від першої особи для перегляду відео в реальному часі з камери, переконайтеся, що на камері є опція виведення відео в реальному часі.

Ручна експозиція та фокус: це гарантує однакову експозицію зображень. Ручне фокусування допомагає камері записувати зображення, навіть якщо автофокус не працює ідеально.

- Уникайте ультрашироких об'єктивів, таких як ті, що є на GoPro! Якщо ви використовуєте GoPro, переконайтеся, що:
- програмне забезпечення, яке використовується для генерації моделі SfM, має опцію вибору іншого типу об'єктива камери (Agisoft MetaShape Pro може, наприклад, у меню Camera Calibration), або

- фотографії були оброблені за допомогою програми, яка виправляє викривлення об'єктива (знову ж таки, Agisoft має програму під назвою «Lens», яка робить це; багато компаній, що займаються виробництвом фотоапаратів [наприклад, Canon], мають для цього власні програми).
- Вимкніть «зменшення тремтіння».

Відео: використовуйте відеокамеру, лише якщо знаєте, що вона працюватиме з вашим програмним забезпеченням SfM. Не всі алгоритми SfM добре працюють із зображеннями, записаними з відео, через відмінності у роботі затвора. Інша проблема з відео полягає в тому, що кадри відео мають досить низьку роздільну здатність порівняно з фотографіями, тому результуюча модель не матиме такої високої роздільної здатності.

Куди йде камера? У деяких польових умовах можуть знадобитися водонепроникні або пилонепроникні камери для забезпечення функціональності.

Додатково: візьміть із собою додаткові батареї та карти пам'яті для кожної камери.

### **Перед виїздом на поле**

Виберіть платформу, яка найкраще підходить для даних, які ви хочете збирати. Вибираючи платформу, обов'язково враховуйте свою потребу в електроенергії (для заряджання акумуляторів) або заправці гелієм (якщо ви використовуєте повітряну кулю).

Виберіть камеру. Не забувайте використовувати розділ вище, щоб керувати своїм вибором, і переконайтеся, що камера має GPS-мітки або може інтегрувати GPS-мітки.

Виберіть, якими будуть ваші цілі. Переконайтеся, що їх буде видно з огляду на рельєф, який ви знімаєте, і матиме сенс у тому, що вас цікавить. Якщо ви наносите на карту рельєф, плоска мішень (фрісбі тощо) має більше сенсу, але якщо ви фотографуєте оголення, мішень, яка кріпиться до штатива, або мішень, яка кріпиться до оголення, має більше сенсу. Також переконайтеся, що у вас достатньо цілей; Reitman та ін. (2015) виявили, що дванадцять цілей, які використовуються як наземні контрольні точки, є ідеальною кількістю для палеосейсмічної зйомки траншеї (додаткова кількість цілей не зменшує суттєво помилки моделі).

Майте принаймні дві SD-карти для камери, на яких можна зберігати велику кількість фотографій і можливість резервного копіювання даних. Також є додатковий акумулятор (або три).

Перевірте налаштування опитування перед польовою роботою. Якщо для системи використовується покадрова зйомка або пульт дистанційного керування, переконайтеся, що вони працюють, оскільки вони є ключовими для зйомки фотографій.

Список польового обладнання: платформа, камера, кріплення для камери, додаткові зарядні пристрої, додаткові SD-карти, цілі та GPS (для зйомки в цілях).

### **На майданчику**

Яку найбільшу щільність фотографій ви хотіли б зробити?

Куди мають спрямовуватися цілі, щоб не перешкоджати цікавим об'єктам?

Чи все, що цікавить, видно? Якщо ви наносите на карту оголення, можливо, ви захочете очистити його заздалегідь. Алгоритми SfM не працюють із блискучими або однорідними поверхнями, тому переконайтеся, що ці поверхні або не включено, або були певним чином змінені, щоб бути більш зручними для алгоритму.

Якщо ви використовуєте UAS, скільки часу польоту у вас є і як це має вплинути на дизайн вашого опитування?

Який час доби дасть вам найкраще освітлення для фотографування цієї місцевості? Чи обмежує це час, який у вас є, і, як наслідок, територію для обстеження?

Встановіть і огляньте цілі як наземні контрольні точки. Переконайтеся, що цілі НЕ РУХНУТЬСЯ; якщо вони змінюють положення, вони непридатні для використання.

Фотографувати. Пам'ятайте про важливі частини фотозйомки SfM: перекриття та зміна положення. Не стояти і фотографувати навколо себе, наприклад. Щоб отримати найкращі результати, перемістіть камери. Якщо ви використовуєте автопідйомник, установіть час (5–10с), який відповідає швидкості, з якою ви пересуваєте платформу, і кількості фотографій, які ви хочете зробити, / інтервалу між цими фотографіями.

Наприкінці польового дня (особливо, якщо ви знову досліджуєте те саме місце або якщо у вас є додаткові дні для вирішення проблем) створіть



початкову модель, щоб переконатися, що на зроблених вами фотографіях зафіксовано об'єкт, який вас цікавить.

Фотографії слід робити збіжними (рис. 3.3). фотографії, зроблені в дивергентній або планарній орієнтації, спотворюють модель. Не робіть фотографії в площині або розбіжності (ліворуч і в центрі). Робіть фотографії збіжним способом.

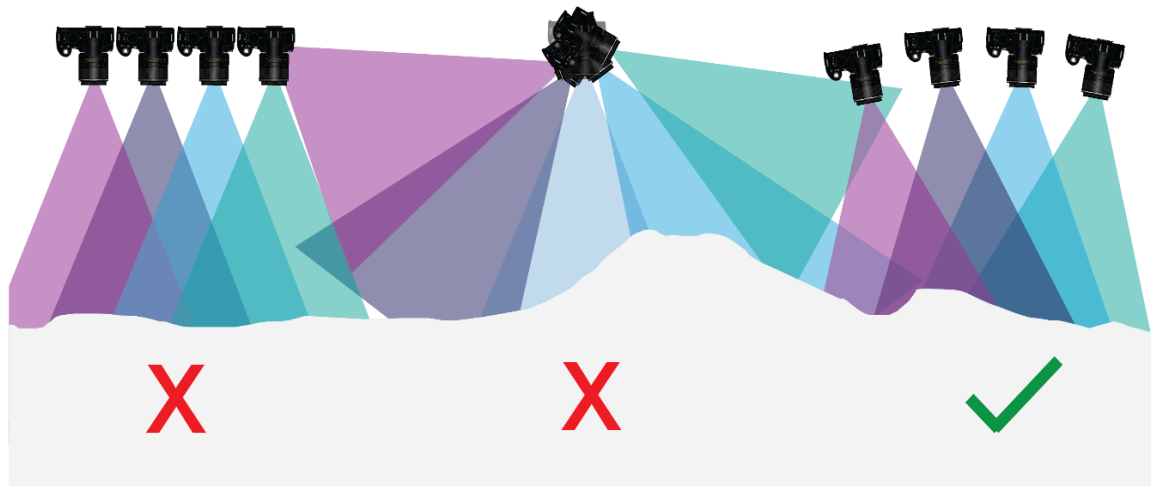


Рис. 3.3. Виконання фотографії збіжним способом

Перебуваючи в полі, подумайте про фотографування з різних відстаней і під різними кутами (рис. 3.4). Якщо ви використовуєте повітряну кулю або безпілотник, візьміть траєкторію польоту на одній висоті, а потім збільште або зменшіть висоту залежно від того, чи хочете ви більше навколишнього контексту чи більше деталей.



Рис. 3.4. Фотографії збігаються на об'єкті, під різними відстанями та кутами

Завжди фотографуйте більшу область, ніж ви очікуєте. Краї області, яку ви знімаєте, матимуть нижчу щільність фото, тому переконайтеся, що це не області, які стосуються вашого дослідження.

Зробіть фотографії, що збігаються на об'єкті, під різними відстанями та під різними кутами.

**ПЕРЕКРИТАННЯ – ЦЕ КЛЮЧОВЕ.** Перекривайте зображення якомога більше. Різні програмні програми мають різні вказівки, але важливо, щоб усі частини області інтересу були покриті кількома фотографіями. Менше ніж 70% перекриття вплине на інтерпретовану сцену, тоді як понад 90% перекриття може значно збільшити час обробки.

Розглядаючи перекриття, майте на увазі цілі вашого проєкту. Хочете дециметрову роздільну здатність? Сантиметрова роздільна здатність? Якщо вас цікавлять моделі з нижчою роздільною здатністю, високі відсотки перекриття непотрібні.

Важливо добре освітлити фотографії. Якщо він занадто темний, деталі (особливо текстура) не виділяються, але якщо він занадто яскравий, ці деталі розмиваються. В ідеалі, якщо ви працюєте з об'єктами меншого масштабу, робіть фотографії, коли об'єкт перебуває в тіні або при слабкому освітленні, але сонце ще не світить. Зазвичай це відповідає пізньому полудню або ранньому ранковому світлу.

Найкраще прив'язувати цілі, а не геологічні об'єкти. Якщо необхідно, використовуйте частини оголення як наземні контрольні точки, але деякі елементи можуть бути менш помітними в моделі, а географічна прив'язка є важливою для масштабу.

Важлива текстура поверхні. Якщо на поверхні мало варіацій, SfM складно. Проблемні матеріали: скло, дзеркало, дуже гладкий бруд, пофарбовані поверхні, поверхні, які не відрізняються за кольором або текстурою (наприклад, коробка), багато інших штучних матеріалів, сніг. Потурбуйтеся у фотографуванні подібної деталі заздалегідь, щоб переконатися, що текстура буде представлена.

Розбивайте області на блоки, якщо є велика кількість фотографій (понад 250) і обробка відбувається надзвичайно повільно. Це спосіб пришвидшити час обробки, а за допомогою геоприв'язаних даних усі блоки можна зв'язати разом пізніше.

Щоб працювати з даними в польових умовах, створіть моделі з нижчою роздільною здатністю, які вимагають менше часу обробки та

потужності комп'ютера, щоб переконатися, що модель охоплює всю сферу ваших інтересів. Крім того, якщо використовується Agisoft MetaShape Pro, генерація сітки перед створенням щільної хмари точок (після вирівнювання фотографій) буде швидшим способом з'єднання фотографій. Цей метод менш надійний — іноді створені моделі є просто чорними плямами, а не текстурованими точними представленнями, — але він корисний у польових умовах, коли ви готуєтеся до наступного робочого дня.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Які етапи включає типова SfM-обробка?
2. Що таке калібрування камери і коли його необхідно виконувати?
3. Які програмні продукти найчастіше використовують для SfM?
4. Яка мінімальна кількість перекриттів знімків забезпечує якісний результат?
5. Як відбувається геоприв'язка моделі у SfM?
6. У чому полягає важливість надмірності знімків?
7. Що таке внутрішнє та зовнішнє орієнтування фото?
8. Які основні помилки можуть виникати в процесі обробки?
9. Як автоматизується визначення положення камери в просторі?
10. Яке значення має GCP (опорні точки) в SfM?

## **ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2. ВИКОНАННЯ ЗНІМАЛЬНИХ РОБІТ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА**

### **Лекція 4. Виконання зйомки за допомогою БПЛА. Підготовчі роботи**

#### **План**

1. Визначення цілі робіт, вивчення території.
2. Вибір дати та часу.
3. Визначення потрібної роздільної здатності.
4. Розрахунок маршруту польоту.
5. Врахування безпеки та законодавство.
6. Маркування і координування опорних точок.
7. Конфігурація та кількість опорних точок.

**1. Визначення цілі топографічного плану.** Спочатку необхідно чітко визначити ціль створення топографічного плану. Це може бути вимірювання рельєфу, визначення висот, планування доріг або будівель, встановлення меж власності тощо. Чітке визначення цілей допоможе зрозуміти, які деталі та яку точність необхідно отримати.

Перед плануванням місії БПЛА необхідно детально вивчити територію, яку потрібно засняти, розібратись з особливостями рельєфу, наявністю перешкод, типами об'єктів, які необхідно включити до плану.



Рис. 4.1. Планове розташування опорних точок

Цей етап потрібен для визначення можливості доступу до об'єкту знімання, наявних під'їздів, розшуку та визначенню стану пунктів вихідної ДГМ та складання схеми розміщення майбутніх опорних точок зйомки (рис.4.1.).

Вимоги та допуски при виконанні робіт

Для успішного ортофотокартування важливо побудувати опорну мережу точок, які задані в потрібній системі координат і мають чітко визначені координати. Найбільш підходяще розташування для об'єкта - в області потрібного перекриття. Таким чином можна використати максимальну кількість знімків для отримання точок з чіткими координатами.

При створенні об'єкта важливо переконатися, що його легко розпізнати, тобто, що центр об'єкта є однозначним і легко розпізнається. Зокрема, відстань від об'єкта до краю аерофотознімка має бути не менше 1 см.

Щільність об'єктів залежить від масштабу аерофотознімального польоту, формату аерофотознімка, масштабу карти, що створюється, якості польоту, рельєфу місцевості та методу фотограмметричної обробки. Чим більший масштаб карти, що створюється, і чим складніший рельєф місцевості, тим більша кількість планових елементів на одиницю площі, що підлягає обробці.

До вибору планово-висотних розпізнавальних знаків висуваються наступні вимоги:

Виділення об'єктів з наявних матеріалів АЗ здійснюється в межах чітких контурів об'єктів, які можна розпізнати на аерофотознімках і на місцевості з точністю до 0,1 мм і вище в масштабі плану, що створюється.

При виборі об'єктів з наявних матеріалів слід враховувати наступні моменти

- Місцезнаходження вибраного об'єкта повинно бути чітко розпізнаваним на майбутньому топографічному матеріалі;
- розташування вибраних об'єктів має бути подалі від об'єктів, які заважатимуть фотограмметричному розпізнаванню через проекцію або тіні;
- і
- повинна існувати можливість повторного використання при створенні фотограмметричних продуктів в інших масштабах.

Основними об'єктами для виділення ознак є

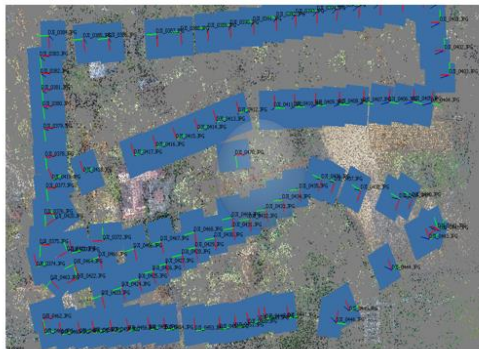
- Фундаменти, бетонні блоки
- Об'єкти дорожньої інфраструктури (мостові полотна, огорожі, люки, водовідвідні решітки, караван-сараї, дорожні знаки, бордюри тощо)
- Опори ліній електропередач та зв'язку;
- Кути парканів та огорож.
- Інші об'єкти з чіткими контурами на місцевості.

Не можна використовувати круті схили, дно каньйонів і т.д., де контури нечіткі або не існують протягом тривалого часу. Також заборонено обирати ділянки поблизу ліній електропередач, дерев або високих об'єктів, які заважають прийому супутникового сигналу і спотворюють його.

Розмір елементів опознаку 8 см - довжина одного променя, 2,5 см - ширина променя, вільний простір у центрі між протилежними променями - 2.5 см. Сторона квадрата або діаметр кола: 5 см. Якщо використовувати опознаки чорного кольору, то необхідно збільшити вищенаведені розміри на 1.5 рази.

**2. Вибір дати та часу.** Необхідно врахувати, що погодні умови можуть вплинути на якість зйомки. Вибір дати та час, коли прогнозується стабільна погода, без дощу, сильного вітру або хмарності є необхідним етапом робіт при використанні БПЛА. Це забезпечить чіткі та якісні зображення поверхні.

#### • Вітер



#### • Освітленість



Рис. 4.2. Вплив зовнішніх умов на знімки

**3. Визначення потрібної роздільної здатності.** Відповідно до мети створення топографічного плану обирається необхідна роздільна здатність зображень. Вона визначається кількістю пікселів на одиницю довжини, наприклад, кількістю пікселів на метр або на сантиметр. Більша роздільна здатність дозволяє отримати більш деталізовані зображення, але може збільшити обсяг отриманих даних.

Точність визначення планових та висотних координат, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), залежить від точності визначення координат і висот точок місцевості на основі стереопари знімків ( $m_{\phi}$ ) і точності визначення координат опорних знаків ( $m_{оп}$ ). Це можна виразити таким чином:

$$m_{БПЛА} = m_{\phi} + m_{оп}. \quad (1)$$

Спершу розрахуємо точності визначення планових координат та відміток точок місцевості на стереопарі знімків ( $m_{\phi}$ ), потім визначимо допустиму СКП вимірювання координат опорних знаків і потім перейдемо до СКП вимірювання координат опорних точок.

Вихідні дані для розрахунку СКП визначення планових координат та відміток точок місцевості на стереопарі знімків беремо з параметрів камери БПЛА DJI Phantom 4 pro та обраних параметрів знімання (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

**Параметри камери та знімання**

| Параметри камери             |                                   | Параметри знімання                                 |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|
| Розмір пікселя               | 2,61 мкм                          | Коротка сторона кадру направлена в сторону польоту |
| Фокусна відстань $f$         | 8,8 мм $\approx$ 3370 пікселів    | Повздовжнє перекриття $p = 70\%$                   |
| Формат кадру ( $l_x * l_y$ ) | 11,7х8,8мм або 4864*3648 пікселів | Висота знімання $H = 85$ м                         |

Спочатку знайдемо розмір одного пікселю на землі, так звану величину GSD (ground solution distance). Для цього використаємо величину фокусної відстані та запроєктовану висоту знімання:

$$GSD = \frac{H}{f} = \frac{85}{3370} = 0.025 \text{ м}. \quad (2)$$

За умовою рівного впливу помилок можна прийняти, що точність вимірювання координат і паралаксів однакова, тобто  $m_x = m_y = m$ , тоді точність визначення координат точок на місцевості  $m_{x\phi}$ ,  $m_{y\phi}$  можна розрахувати за наступною формулою:

$$m_{x\phi} = m_{y\phi} = GSD * m. \quad (3)$$

Прийнявши точність визначення паралаксів рівну 0,5 пікселя, отримаємо:

$$m_{x\phi} = m_{y\phi} = GSD * m = 0.025 * 0.5 = 12,5 \text{ мм}.$$

Точність визначення відмітки залежить від величини базису фотографування і обчислюється за формулою:

$$m_{H\Phi} = \frac{H}{b} m. \quad (4)$$

Визначимо базис фотографування в масштабі знімку:

$$b = \frac{100-p}{100} * l_x = \frac{100-70}{100} * 11,7 = 3,51 \text{ мм} \quad (5)$$

або в пікселях

$$b = \frac{100 - 70}{100} * 4864 = 1460 \text{ пікселів.}$$

Відповідно точність визначення координат точок на місцевості  $m_{H\Phi}$  буде наступна:

$$m_{H\Phi} = \frac{H}{b} m = \frac{85}{1460} * 0.5 = 29 \text{ мм.} \quad (6)$$

Згідно інструкції точність планових координат потрібно розраховувати вздовж радіус-вектору, знайдемо її по формулі:

$$m_{XY\Phi}^2 = m_{X\Phi}^2 + m_{Y\Phi}^2 \quad (7)$$

$$\text{При } m_{X\Phi} = m_{Y\Phi} \quad m_{XY\Phi} = m_{X\Phi} \sqrt{2}$$

$$\text{Або } m_{XY\Phi} = 12,5\sqrt{2} = 17,7 \text{ мм.} \quad (8)$$

СКП визначення координат по стереопарі для заданих параметрів така:

в плані  $m_{XY\Phi} = 0.018 \text{ м};$

по висоті  $m_{H\Phi} = 0.029 \text{ м.}$

Тепер розрахуємо СКП вимірювання координат опорних знаків.

Для цього точність визначення координат таких контурів повинна відповідати вимогам до створення карт та планів масштабу 1:1000. Згідно інструкції з топографічного знімання допустимі помилки в планових координатах  $\delta_{XY(\text{доп})}$  та відмітках  $\delta_{H(\text{доп})}$  наступні:

$$0,5M_k \leq \delta_{XY(\text{доп})} \leq 0,7M_k = 0,5 \dots 0,7 \text{ м};$$

$$\frac{1}{4} h_{\text{пер}} \leq \delta_{H(\text{доп})} \leq \frac{1}{3} h_{\text{пер}} = 0,125 \dots 0,167 \text{ м.}$$

Від допустимих помилок визначення координат перейдемо до допустимих середніх квадратичних значень.

$$m_{\text{доп}} = 1,25 * \delta_{\text{доп}}$$

$$m_{XY(\text{доп})} = 1,25 * 0,5 = 0,625 \text{ м}$$

$$m_{H(\text{доп})} = 1,25 * 0,125 = 0,156 \text{ м.}$$

Приймаючи, що допустимі СКП включає в себе помилки визначення опорних точок та фотограмметричних робіт можемо записати:

$$\frac{m_{\text{доп}}}{3} = m_{\text{БПЛА}} = m_{\Phi} + m_{\text{оп}}. \quad (9)$$



Тепер потрібно перейти від допустимих СКП визначення контурів та відміток на топографічному плані до СКП визначення координат опорних точок. Враховуючи умови взаємозв'язку між максимально допустимим значенням СКП та виміряним, можна записати таке рівняння для визначення точності вимірювання координат опорних точок:

$$m_{\text{оп}} = \frac{m_{\text{доп}}}{3} - m_{\text{ф}} \quad (10)$$

$$m_{XY(\text{оп})} = \frac{0,625}{3} - 0,018 = 0,190 \text{ м}$$

$$m_{H(\text{оп})} = \frac{0,156}{3} - 0,029 = 0,023 \text{ м.}$$

Розрахунок точності визначення опорних точок виконано за максимально жорсткими вимогами без врахування фактичної крутизни рельєфу. З урахування об'єкту знімання цей розрахунок може бути уточнено щодо висотної складової помилки по допуску  $\frac{1}{3} h_{\text{пер}}$ .

**4. Розрахунок маршруту польоту.** Використовуючи спеціальне програмне забезпечення або онлайн-сервіси для планування маршруту польоту БПЛА, потрібно вказати точки зйомки, шляхи між ними, висоту польоту та інші параметри. У сучасних умовах для побудови маршруту аерофотозйомки за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) можна використовувати спеціалізовані додатки для смартфонів. Один з таких додатків - "Pix4DCapture".

ПЗ "Pix4DCapture" надає можливість вказати площу, на яку необхідно здійснити аерофотозйомку. Після вказання площі програма автоматично розраховує та створює маршрути, які покривають задану територію. Важливими параметрами при цьому є повздовжнє та поперечне перекриття (рис. 4.3).

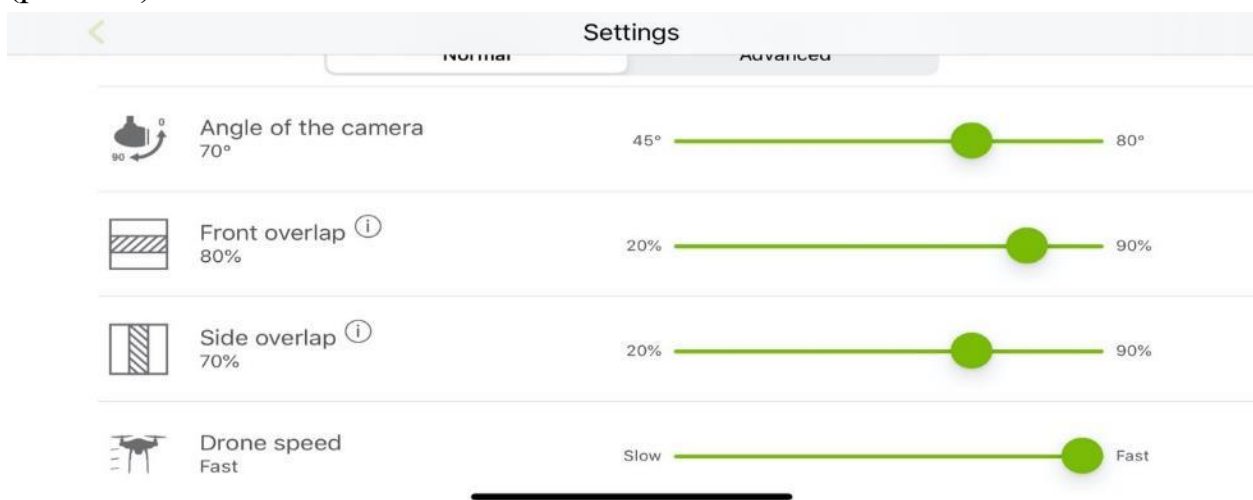


Рис. 4.3. Налаштування параметрів перекриття

Повздовжнє перекриття визначає, наскільки перекриваються фотографії, зроблені під час зйомки по маршруту. Чим більше повздовжнє перекриття, тим більша кількість перекриваючихся знімків буде доступна для обробки і створення точного 3D-моделювання території.

Поперечне перекриття вказує на перекриття знімків між сусідніми маршрутами. Це також впливає на якість і точність створення 3D-моделі. Більше поперечне перекриття дозволяє отримати більш деталізовану модель і забезпечує більшу точність визначення координат.

У ПЗ "Pix4DCapture" також є можливість регулювати висоту зальоту БПЛА та область виконання знімання (рис. 4.4.).



Рис. 4.4. Планування області польоту та висоти знімання

Застосування програми "Pix4DCapture" дозволяє автоматизувати процес планування маршруту аерофотозйомки та забезпечити точність та якість отриманих фотографій для подальшої обробки та аналізу.

**5. Врахування безпеки та законодавство.** Перед здійсненням місії потрібно переконатись в дотриманні вимог безпеки та місцевого законодавства стосовно використання БПЛА. Ознайомитись з обмеженнями польотів у певних зонах, розміром зони безпеки, дозволами, які можуть знадобитися тощо.

В нашому випадку додаткових дозволів у невійськовий час для виконання робіт за допомогою БПЛА такого класу отримувати не потрібно, в зони заборони чи обмежень польотів об'єкт знімання не потрапляє.



Рис. 4.5. Область виконання робіт та обмеження польотів

## 6. Маркування та координування опорних точок

Координати наземних контрольних точок (GCP) (рис. 4.6) потрібно буде виміряти в полі, щоб зв'язати згенеровану модель із глобальною системою координат. Наземні контрольні точки можуть бути записані на конкретних точках відмінних ознак або цілей, які фотографуються в полі. Потім ці точки можуть бути геоприв'язані після створення моделі.

Приклади наземних контрольних точок:

- Впізнавані природні особливості
- Просте фризбі з X
- Закодовані мішені, надруковані за допомогою Agisoft (Інструменти—Маркери—Маркери друку) на картках або інших матеріалах.
- Кодовані маркери Agisoft на обох кінцях масштабної шкали (формальні чи неофіційні).

Цілі повинні легко розпізнаватися на фотографіях, відрізнятися від навколишнього матеріалу, бути видимими на кількох фотографіях, не закривати об'єкт інтересу та мати одну точку, яку можна використовувати як диференціальну точку GPS-зйомки. Мішені не повинні рухатися протягом дослідження, інакше вони будуть непридатні для використання як опорні точки.



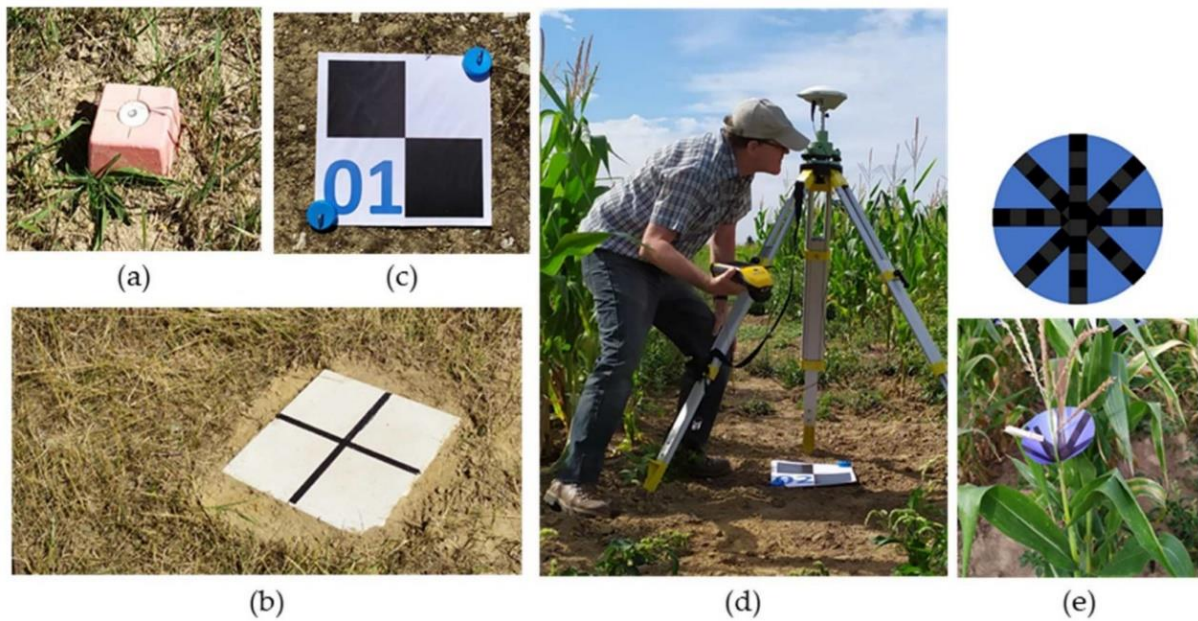


Рис. 4.6. Види контрольних точок

Прив'язка поділяється на дві категорії: сувора та менш сувора. У ретельному дослідженні ви будете використовувати GPS для визначення координат чітких цілей, а потім інтегрувати ці відомі точки в модель. У менш ретельному дослідженні ви можете використати масштабні шкали для масштабування моделі.

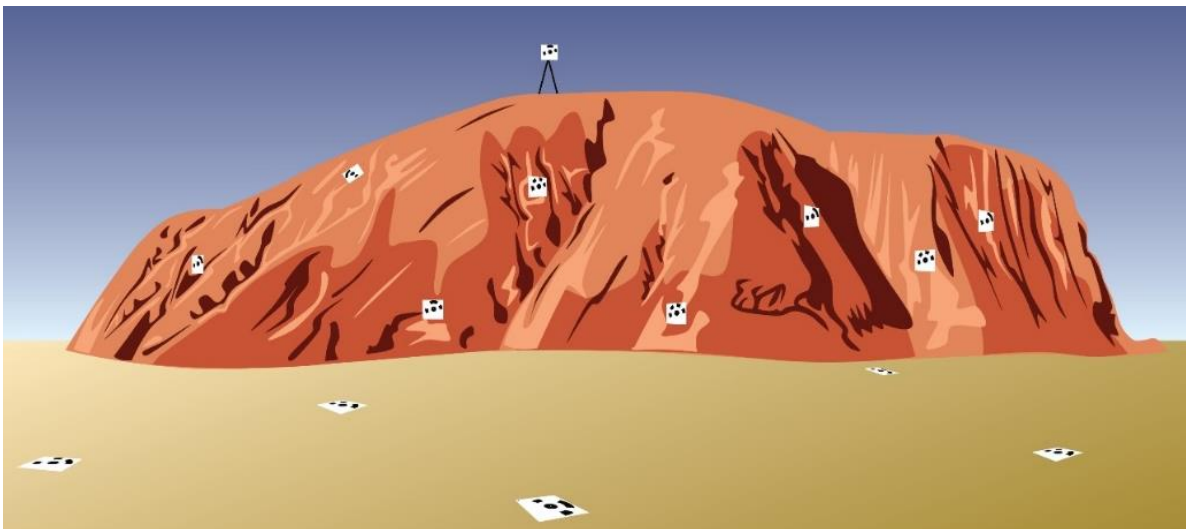


Рис. 4.7. Пропоноване розміщення цілей для обстеження ґрунту та оголення

Мішені повинні бути різними за своїм горизонтальним і вертикальним розташуванням, щоб вони не виглядали згрупованими або вишикуваними в лінію.

Впізнавані природні об'єкти можна використовувати як цілі з GPS або без нього. Якщо існує обстеження ALS місця (або обстеження TLS), і ви

можете припустити, що відбулися незначні зміни, розпізнавані об'єкти можна вибрати в хмарі точок ALS, а розташування використовувати як розташування GCP у хмарі точок SfM. Вони також можуть використовуватися як цілі для GPS, якщо роздільна здатність моделі достатньо висока, щоб розпізнати певну частину природного об'єкта, який використовується як точка огляду.

Agisoft рекомендує використовувати надані закодовані цілі (рис. 4.8), оскільки вони можуть автоматично розпізнаватися програмним забезпеченням і вводитися в модель; однак автоматичне розпізнавання часто не вдається, тому очікуйте ручного введення цільових місць в Agisoft.

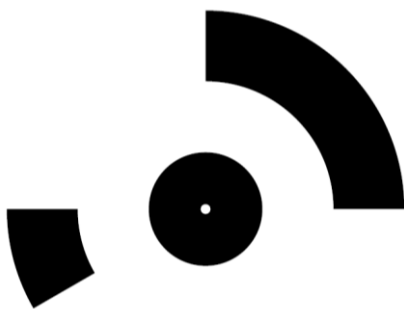


Рис. 4.8. Приклад закодованої цілі Agisoft

Якщо високоточна система GPS недоступна для використання, цілі можна використовувати. Вимірюйте між конкретними цілями та записуйте відстані; їх можна ввести в Agisoft MetaShape Pro для приблизного масштабування моделі. Більше вимірювань відстані підвищить точність моделі.

Масштабні шкали також можуть використовуватися в моделі для її масштабування. Розмістіть масштабні смуги відповідного розміру для масштабу зйомки навколо зони зйомки, не закриваючи цікавий об'єкт. Масштабні панелі повинні мати певну текстуру або колір; алгоритми SfM мають труднощі з елементами, які блискучі, плоскі або мають однорідну текстуру/колір. Один із способів уникнути цього — розмістити закодовані цілі від Agisoft на масштабних шкалах, щоб додати складності.

Ще одна річ, яку слід враховувати при виборі цілі, полягає в тому, що програмне забезпечення SfM важко розпізнає невиразні об'єкти; ключові точки – це особливості, які можна ідентифікувати, оскільки вони мають чітку текстуру. Наприклад, використання повністю плоского шматка картону лише одного кольору може призвести до спотворення та, отже,

непридатності мішені. Масштаб цілей повинен відповідати масштабу опитування; не використовуйте малі цілі, якщо досліджуєте велику територію, оскільки розмір цілі може бути меншим, ніж роздільна здатність моделі, і тому непридатний для використання. Мішені не слід розміщувати лінійно або згруповувати, а розташовувати якомога рівномірніше по зоні дослідження — як горизонтально, так і вертикально, якщо це можливо.

## **7. Конфігурація та кількість опорних точок**

Для досягнення мети дослідження для досліджуваної території була запропонована мережа точок із визначеними координатами та різним вертикальним і горизонтальним розташуванням. У цьому районі проводилась фотозйомка БПЛА, а на етапі обробки фотознімків використовувалися різні конфігурації контрольних і реперних точок для оцінки змін і розподілу похибок у фотограмметричній моделі в залежності від кількості та розміщення опорних точок.

В експерименті була використана споруда Київського іподрому, а саме його дах та прилегла територія. Габаритні розміри будівлі 170 м в довжину, 30 м в ширину і 15 м у висоту (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Загальний вигляд будівлі та даху Київського іподрому

Координати отримані за допомогою наземного лазерного сканування (TLS) сканером FARO Focus S120 із залученням 75 станцій сканування, 33 з яких проводилися на даху. Середня відстань між точками сканування не перевищувала 20 м. Якість сканування окремих точок становила 4 мм, щільність точок не менше 3 мм на 10 м. Середня кількість контрольних точок між сусідніми скануваннями становила 7, а середньоквадратична помилка (RMSE) сканування становила 6,1 мм.

Зйомка БПЛА проводилася за допомогою DJI Phantom 4 Pro V2 протягом шести місій із відхиленням від найменшого кута камери 30 градусів. На жаль, не всі місії були виконані через наявність високих дерев біля споруди на запланованій висоті польоту 20–25 метрів (рис. 4.10).

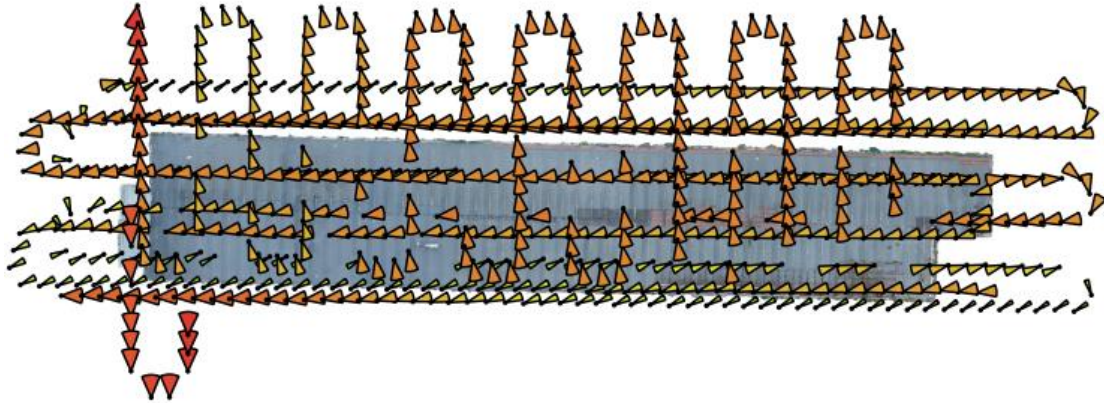


Рис. 4.10. Схема траєкторії польоту БПЛА під час фотографування даху

Вершина трикутника позначає положення зображення, а продовження трикутника показує напрямок фотографії.

GCP на даху позначили чорно-білими знаками на аркушах А4, а в основі конструкції вибрали розпізнавальні позначки. Обробку зображень проводили за допомогою Agisoft Metashape.

Перша частина дослідження була зосереджена на визначенні впливу використання опорних опор на різних висотах. Тут чергувалися групи точок на даху та навколо конструкції. Спочатку точки даху використовувалися як опорні точки, з контрольними точками (КП) навколо конструкції, позначеними чіткими контурами (рис. 4.11).

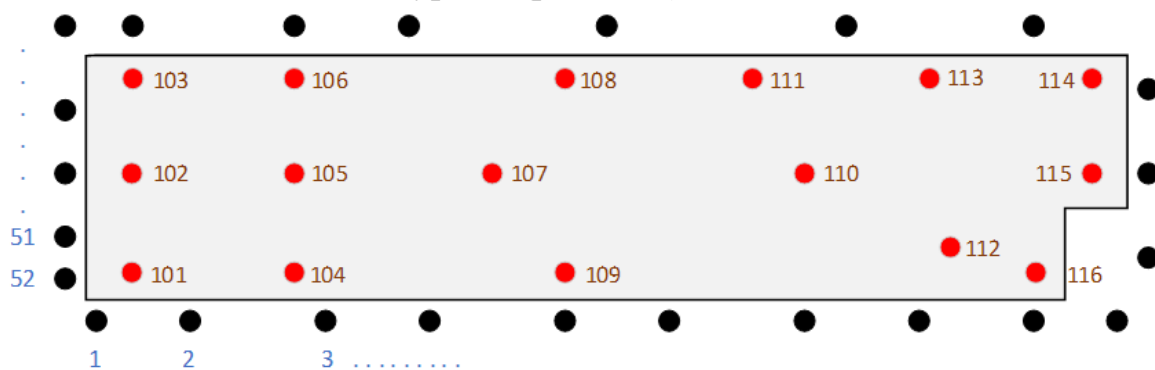


Рис. 4.11. Схематичне зображення точок СР (чорний) і опорних точок (червоний)

Наступним кроком буде поміняти опорні та контрольні точки. Оцінка точності контрольних і реперних точок за результатами зйомки БПЛА



проводилася за розбіжностями з координатами відповідних точок, отриманими за допомогою TLS.

Друга частина дослідження зосереджена на визначенні впливу конфігурації та кількості опорних точок. Вибравши лише ті точки на даху конструкції, які показали мінімальні розбіжності порівняно з координатами, отриманими за допомогою лазерного сканування, стає можливим вивчити вплив розміщення опорних точок на точність отриманої фотограмметричної моделі. Для цього було сформовано 12 груп опорних точок (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Групи GCP

| Номер групи | Назвіть GCP                                           |
|-------------|-------------------------------------------------------|
| 1           | 101, 103, 104, 106, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 115 |
| 2           | 101, 103, 105, 108, 109, 110, 114, 116                |
| 3           | 102, 104, 106, 107, 112, 113, 115                     |
| 4           | 101, 103, 107, 114, 116                               |
| 5           | 101, 103, 107, 108, 109, 114, 116                     |
| 6           | 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111                |
| 7           | 103, 106, 108, 111, 113, 114                          |
| 8           | 102, 105, 107, 108, 109, 110, 115                     |
| 9           | 102, 105, 108, 109, 110, 115                          |
| 10          | 102, 108, 109, 115                                    |
| 11          | 101, 103, 114, 116                                    |
| 12          | 103, 104, 108, 112, 114                               |

У дослідженні наведено приклад лише однієї принципової схеми розташування опорних і контрольних точок для першого варіанта (рис. 4.12).

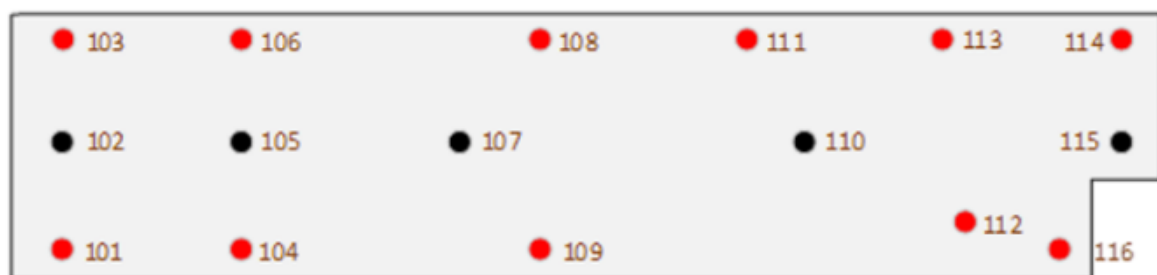


Рис. 4.12. Принципова схема розташування опорних точок (червоний) і КП (чорний) для першого варіанту з переліку

За результатами першої частини дослідження отримано результати оцінки точності для першої комбінації опорних і опорних точок на різних висотах (табл. 4.2).



Таблиця 4.2

**RMSE точки, якщо опорні точки на даху**

|     | RMSE <sub>x</sub> (м) | RMSE <sub>y</sub> (м) | RMSE <sub>z</sub> (м) |
|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| GCP | 0,005                 | 0,004                 | 0,013                 |
| КП  | 0,443                 | 0,274                 | 0,441                 |

Виходячи з результатів, можна зробити висновок про наявність великих похибок у результатах спостереження (рис. 4.13).

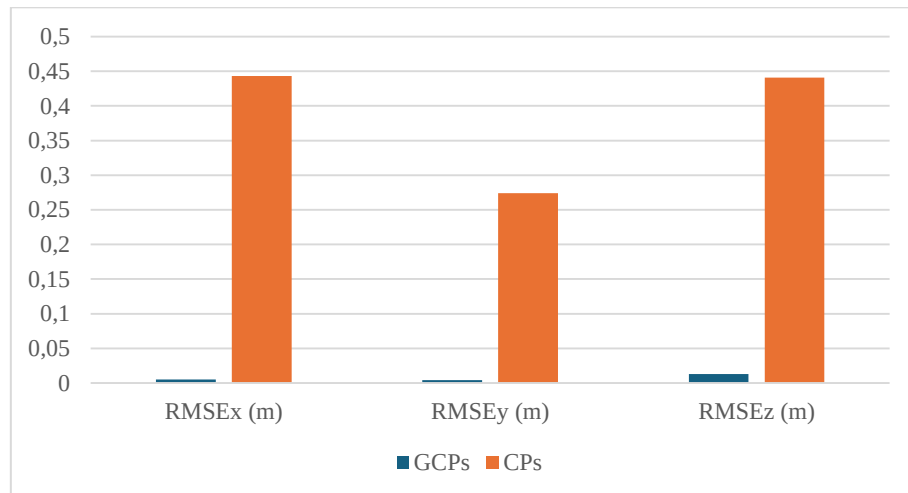


Рис. 4.13. Точки розподілу RMSE, якщо опорні точки на даху

На цьому етапі більшість помилок спостерігається в КП, розташованих на землі на більшій відстані від камери БПЛА. Спробуємо поміняти місцями GCP і CP (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

**RMSE точки, якщо опорні точки на землі**

|     | RMSE <sub>x</sub> (м) | RMSE <sub>y</sub> (м) | RMSE <sub>z</sub> (м) |
|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| GCP | 0,397                 | 0,064                 | 0,152                 |
| CP  | 0,111                 | 0,171                 | 0,328                 |

У цьому випадку подібної закономірності не спостерігалось; помилки не були зосереджені в точках на даху, які використовувалися як CP (рис. 4.14.).

Результати другої частини дослідження, зосереджені на конфігурації та кількості опорних точок, представлені в табл. 4.4.

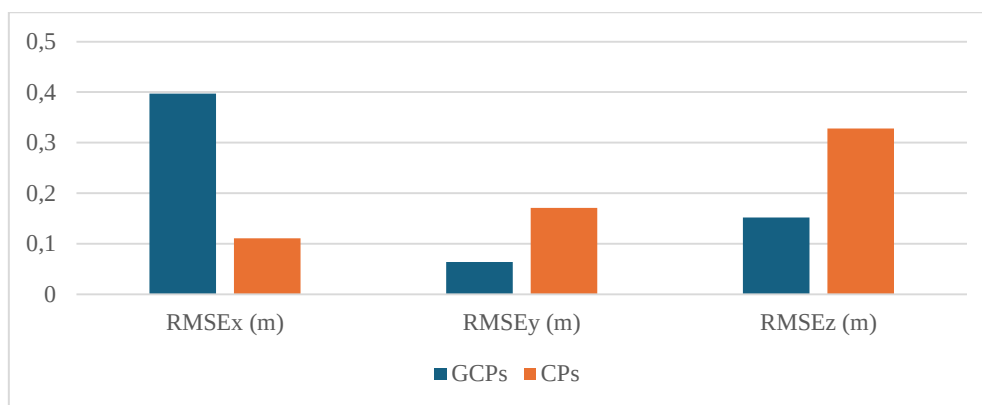


Рис. 4.14. Точки розподілу RMSE, якщо опорні точки на землі

Таблиця 4.4

**RMSE точок даху в залежності від їх комбінації**

| Номер групи | Назва пункту | RMSE <sub>x</sub> (мм) | RMSE <sub>y</sub> (мм) | RMSE <sub>z</sub> (мм) |
|-------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|             | довідка      | 5.4                    | 7.9                    | 7.9                    |
| 1           | GCP          | 6.2                    | 8.4                    | 9.8                    |
|             | КП           | 6                      | 9.8                    | 8.6                    |
| 2           | GCP          | 5.5                    | 9.1                    | 10.8                   |
|             | КП           | 6.6                    | 9.9                    | 8.9                    |
| 3           | GCP          | 6.4                    | 8                      | 9.8                    |
|             | КП           | 6.2                    | 12.3                   | 13.2                   |
| 4           | GCP          | 6.2                    | 10.4                   | 14                     |
|             | КП           | 7.8                    | 12.3                   | 18.2                   |
| 5           | GCP          | 5.2                    | 10.5                   | 11                     |
|             | КП           | 6.9                    | 6.8                    | 9.9                    |
| 6           | GCP          | 4.5                    | 5.7                    | 6.4                    |
|             | КП           | 11.5                   | 23.5                   | 22.7                   |
| 7           | GCP          | 6                      | 10.7                   | 52.1                   |
|             | КП           | 12.7                   | 58.6                   | 2325,6                 |
| 8           | GCP          | 3.6                    | 9.9                    | 7.5                    |
|             | КП           | 7.9                    | 10.1                   | 13.3                   |
| 9           | GCP          | 4                      | 9.7                    | 8.7                    |
|             | КП           | 7.6                    | 10.4                   | 13.6                   |
| 10          | GCP          | 4.6                    | 11.3                   | 10.9                   |
|             | КП           | 7.1                    | 9.8                    | 14.5                   |
| 11          | GCP          | 7.7                    | 2.3                    | 13.6                   |
|             | КП           | 10.8                   | 21.6                   | 39.6                   |
| 12          | GCP          | 6.8                    | 10.3                   | 10.6                   |
|             | КП           | 7.7                    | 11.2                   | 16.4                   |

Було запропоновано досліджувати зміни точності, використовуючи як еталон результати, отримані від обробки всіх точок даху як опорних точок, де залишкові похибки визначали після призначення координат точкам на основі результатів TLS.

Одразу можна спостерігати суттєві похибки для комбінації 7, де опорні точки були розміщені вздовж однієї сторони даху. Для подальшого аналізу результати цього експерименту були виключені із загальної серії. Усі інші дані були переведені у різниці між СКО поточного експерименту та СКО контрольних точок і представлені у відсотках (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

**RMSE точок даху в залежності від їх комбінації**

| Номер групи | Назва пункту | RMSE <sub>x</sub> (%) | RMSE <sub>y</sub> (%) | RMSE <sub>z</sub> (%) |
|-------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1           | GCP          | 15                    | 6                     | 24                    |
|             | КП           | 9                     | 23                    | 7                     |
| 2           | GCP          | 2                     | 12                    | 33                    |
|             | КП           | 22                    | 23                    | 9                     |
| 3           | GCP          | 15                    | 1                     | 21                    |
|             | КП           | 13                    | 56                    | 54                    |
| 4           | GCP          | 13                    | 21                    | 46                    |
|             | КП           | 38                    | 42                    | 74                    |
| 5           | GCP          | -3                    | 21                    | 17                    |
|             | КП           | 29                    | -10                   | 19                    |
| 6           | GCP          | -13                   | -32                   | -15                   |
|             | КП           | 136                   | 271                   | 230                   |
| 8           | GCP          | -14                   | 3                     | 0                     |
|             | КП           | 68                    | 22                    | 72                    |
| 9           | GCP          | -17                   | 18                    | 6                     |
|             | КП           | 54                    | 26                    | 65                    |
| 10          | GCP          | -11                   | 33                    | 22                    |
|             | КП           | 36                    | 17                    | 61                    |
| 11          | GCP          | 32                    | -57                   | 39                    |
|             | КП           | 70                    | 602                   | 233                   |
| 12          | GCP          | 13                    | 11                    | 7                     |
|             | КП           | 34                    | 32                    | 80                    |

Виділяючи в таблиці значення, де похибка зросла більше ніж на 50%, можна визначити групи реперних точок, розміщення та кількості яких слід уникати.

З результатів аналізу RMSE для комбінацій точок даху та землі можна зробити висновок, що точки на рівні землі демонструють значні похибки, які

можуть вплинути на кінцеві результати фотограмметрії. Точки, розташовані далі від камери БПЛА, внесли значно більше помилок порівняно з ближчими точками. Тому при виборі місць опорних точок слід віддавати перевагу точкам, розташованим ближче до камери, роблячи менший акцент на кількість точок.

З другої частини дослідження були визначені групи зі значними помилками (групи 6, 7, 8 та 11). Таким чином, бажано уникати точок, розташованих лише в центральній частині об'єкта, уздовж одного боку об'єкта або виключно на краях зйомки.

Найефективнішими були групи 1, 2 і 5, які мали найменші помилки. Ці групи включали рівномірно розподілені точки по всій території обстеження, принаймні вісім точок, що становило половину загальної кількості точок на території обстеження. У групах 3 і 9 помилки зросли майже на 50%, що могло бути пов'язано зі зниженням кількох GCP. Слід враховувати таке різке падіння точності через меншу кількість точок. Групи 4, 10 і 12 можна віднести до випадків, коли похибки висоти не є критичними для роботи, оскільки вони призводять до вираженого збільшення вертикальних похибок.

Підсумовуючи результати, рекомендується використовувати опорні точки якомога ближче до камери, рівномірно розподілені по території, не менше восьми опорних точок.

### **Запитання для самоперевірки**

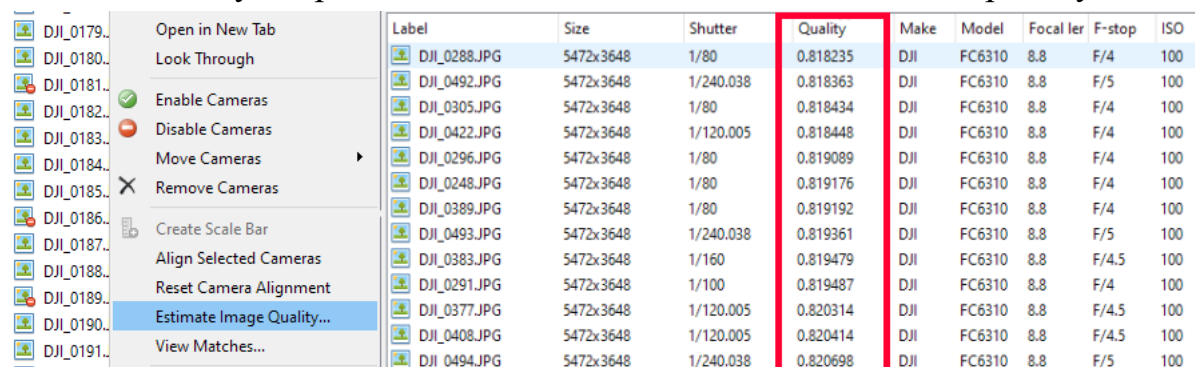
1. Які етапи передують польоту БПЛА?
2. Що враховується при плануванні маршруту польоту?
3. Які параметри камери впливають на якість зйомки?
4. Як визначити висоту польоту для потрібної точності?
5. Яким чином розміщуються опорні точки на місцевості?
6. Як вітер і погодні умови впливають на якість зйомки?
7. Які документи повинен підготувати оператор перед польотом?
8. Як обирається тип БПЛА для конкретного об'єкта зйомки?
9. Що таке зона перекриття та як її враховують при плануванні?
10. Чому важливо дотримуватись фокусної відстані під час всієї місії?

## Лекція 5. Виконання зйомки за допомогою БПЛА. Камеральні роботи

### План

1. Оцінка якості зображень.
2. Вирівнювання знімків та знайти елементи внутрішнього та взаємного орієнтування.
3. Маркування опорних точок.
4. Зрівнювання параметрів орієнтування та уточнення параметрів калібрування камери.
5. Розрахунок СКП опорних та контрольних точок.
6. Створення щільної фотограмметричної хмари точок об'єкту.
7. Створення ортофотоплану.
8. Виготовлення та видання топографічного плану.

**Першим етапом** обробки зображень після імпорту їх в програму є оцінка якості зображень (рис. 5.1). За результатами аналізу уважно оператором переглядаються знімки з низьким показником якості на наявність смазу зображення і за необхідності такі знімки відбраковуються.



|             |                           | Label        | Size      | Shutter   | Quality  | Make | Model  | Focal len | F-stop | ISO |
|-------------|---------------------------|--------------|-----------|-----------|----------|------|--------|-----------|--------|-----|
| DJI_0179... | Open in New Tab           | DJI_0288.JPG | 5472x3648 | 1/80      | 0.818235 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4    | 100 |
| DJI_0180... | Look Through              | DJI_0492.JPG | 5472x3648 | 1/240.038 | 0.818363 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/5    | 100 |
| DJI_0181... | Enable Cameras            | DJI_0305.JPG | 5472x3648 | 1/80      | 0.818434 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4    | 100 |
| DJI_0182... | Disable Cameras           | DJI_0422.JPG | 5472x3648 | 1/120.005 | 0.818448 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4    | 100 |
| DJI_0183... | Move Cameras              | DJI_0296.JPG | 5472x3648 | 1/80      | 0.819089 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4    | 100 |
| DJI_0184... | Remove Cameras            | DJI_0248.JPG | 5472x3648 | 1/80      | 0.819176 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4    | 100 |
| DJI_0185... | Create Scale Bar          | DJI_0389.JPG | 5472x3648 | 1/80      | 0.819192 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4    | 100 |
| DJI_0186... | Align Selected Cameras    | DJI_0493.JPG | 5472x3648 | 1/240.038 | 0.819361 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/5    | 100 |
| DJI_0187... | Reset Camera Alignment    | DJI_0383.JPG | 5472x3648 | 1/160     | 0.819479 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4.5  | 100 |
| DJI_0188... | Estimate Image Quality... | DJI_0291.JPG | 5472x3648 | 1/100     | 0.819487 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4    | 100 |
| DJI_0189... | View Matches...           | DJI_0377.JPG | 5472x3648 | 1/120.005 | 0.820314 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4.5  | 100 |
| DJI_0190... |                           | DJI_0408.JPG | 5472x3648 | 1/120.005 | 0.820414 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/4.5  | 100 |
| DJI_0191... |                           | DJI_0494.JPG | 5472x3648 | 1/240.038 | 0.820698 | DJI  | FC6310 | 8.8       | F/5    | 100 |

Рис. 5.1. Оцінка якості зображень

Наступним етапом потрібно виконати **вирівнювання знімків** та знайти елементи внутрішнього та взаємного орієнтування. Програма визначить точні позиції центрів фотографування (на відміну від навігаційних із ГНСС приймача в дроні) використовуючи метод пошуку спільних точок у структурі з руху камер (Structure from Motion, SfM).

Один з поширених методів пошуку спільних точок в SfM - це дескрипторний підхід. У цьому методі для кожної точки на одному зображенні обчислюється унікальний дескриптор, який відображає його локальні особливості. Потім для кожної точки на іншому зображенні обчислюються дескриптори, і використовуються алгоритми порівняння,

такі як SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) або SURF (Speeded Up Robust Features), для знаходження найближчих відповідних дескрипторів. Таким чином, точки, які мають схожі дескриптори, вважаються спільними точками.

В процесі вирівнювання знімків відбувається калібрування параметрів камери. Початкові параметри обираються з Exif файлів зображень. При цьому використання підходу автоматичного калібрування камер при використанні low-cost фотограмметричних засобів, до яких відноситься DJO Phantom 4 зі своєю камерою, вважається більш надійним за метод попереднього лабораторного калібрування. Викликано це тим, що оптика таких камер та їх корпус сильно піддаються впливу температури, що призводить до суттєвих спотворень оптичної системи (рис. 5.2.)

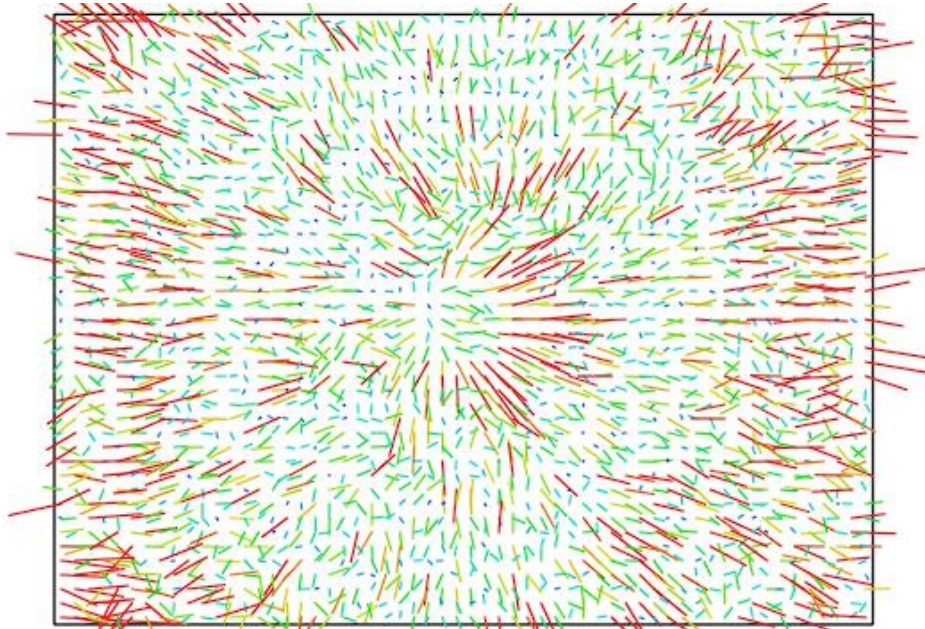


Рис. 5.2. Результати калібрування камери, нев'язки сполучних точок

Після вирівнювання знімків потрібно **розставити опорні точки** на знімках та завантажити їх координати, отримані в результаті ГНСС спостережень. Наземні контрольні точки використовуються для зовнішнього орієнтування моделі. Після встановлення маркера в опорній точці на одній фотографії, програма встановить цей маркер в тій самій точці на іншій фотографії, але все ж рекомендується встановити цю точку самостійно, зважаючи на похибку положення (в пікселях) цього маркера для більш точного налаштування (рис. 5.3.)



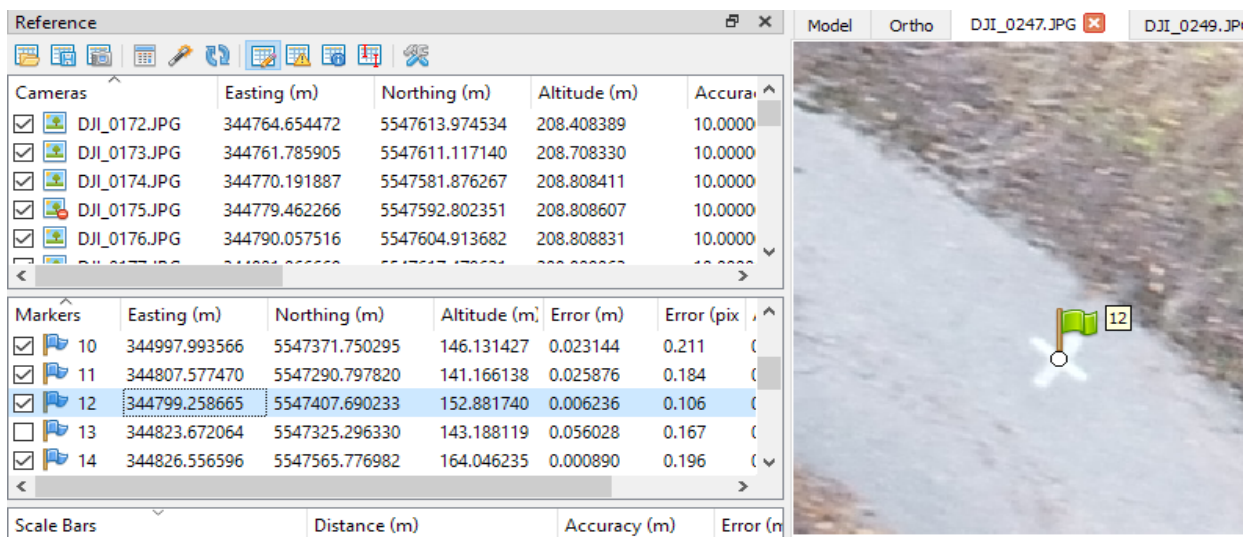


Рис. 5.3. Розташування опорних точок на знімках

Після встановлення всіх опорних точок на всіх знімках де вони присутні, можна виконувати зрівнювання параметрів орієнтування та уточнення параметрів калібрування камери. В цьому процесі бажано задіяти не всі опорні точки, щоб частина точок виступала в ролі контрольних точок, за якими буде оцінюватись помилка вимірювань. В результаті етапу прив'язки до координат опорних точок та вирівнювання параметрів орієнтування (оптимізації в програмі) було отримано СКП опорних та контрольних точок (рис. 5.4.)

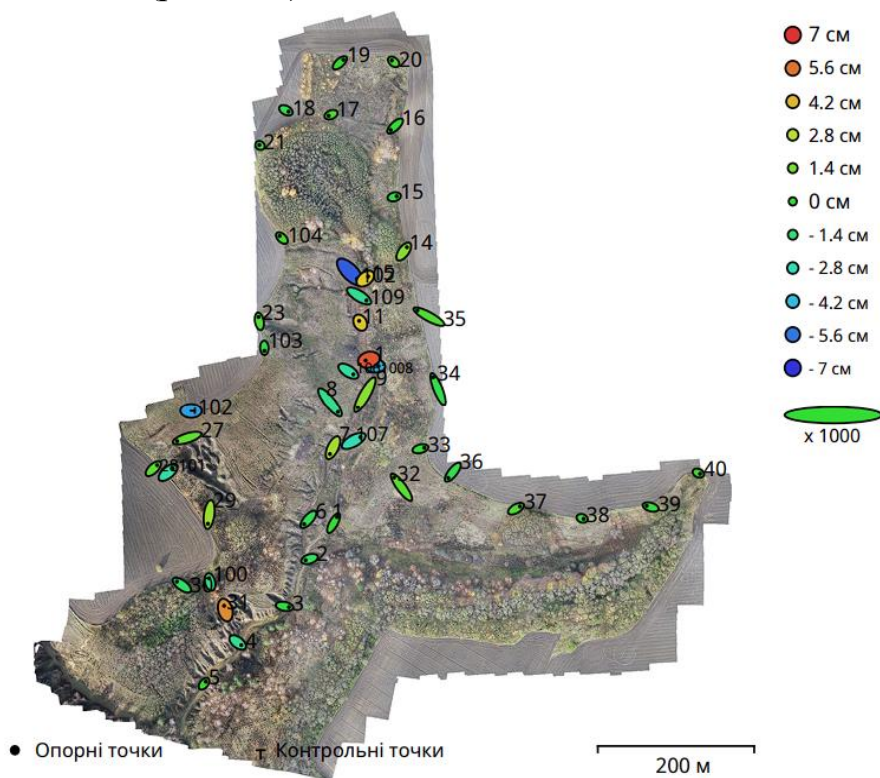


Рис. 5.4. СКП опорних та контрольних точок



На рисунку показано кольором величину помилки по висоті та формою еліпса помилки в плані. Значення СКП по кожній точці зведено в таблицю та надано в додатку А.

Розрахунок СКП та перехід до граничної помилки з достовірною ймовірністю 0,95 виконувався за такими формулами:

$$\text{СКП}_x = m_x = \sqrt{\frac{\sum (x_{\text{вих}} - x_{\text{вим}})^2}{n}} \quad (11)$$

$$\text{СКП}_r = m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = 1.4142m_x \quad (12)$$

$$\text{Accuracy}_r = M_{95xy} = 1.7308m_{xy} \quad (13)$$

$$\text{Accuracy}_z = M_{95z} = 1.96m_z. \quad (14)$$

В табл. 5.1 зведено усереднені значення середніх квадратичних помилок опорних та контрольних точок.

Таблиця 5.1

**.Усереднені значення СКП опорних та контрольних точок**

| Тип точки  | СКП, см |       |       |          | Точність , см |           |
|------------|---------|-------|-------|----------|---------------|-----------|
|            | $m_x$   | $m_y$ | $m_z$ | $m_{xy}$ | $M_{95xy}$    | $M_{95z}$ |
| опорні     | 1,17    | 1,21  | 2,20  | 1,69     | 2,92          | 4,32      |
| контрольні | 0,98    | 0,02  | 4,89  | 0,98     | 1,69          | 9,59      |

З огляду на допустимі помилки  $m_{xy(\text{доп})} = 0,5$  м при фактичній  $M_{95xy} = 0,03$  м та  $m_{H(\text{доп})} = 0.156$  м при фактичній  $M_{95z} = 0,096$  м, можна зробити висновок про відповідність отриманої фотограмметричної моделі до вимог при створенні топографічного плану масштабу 1:1000.

Наступним кроком до створення топографічного плану є створення щільної фотограмметричної хмари точок об'єкту (рис. 5.5).

На основі щільної хмари точок можна створювати ортофотоплан. Його можна було створити і на основі розрідженої хмари спільних точок, але в такому випадку втрачається значна частина деталей рельєфу і при створенні ортомозаїки проекції цих рельєфів можуть внести планові спотворення в форми контурів. На рис. 5.6. наведено зображення ортофоплану для території об'єкта.

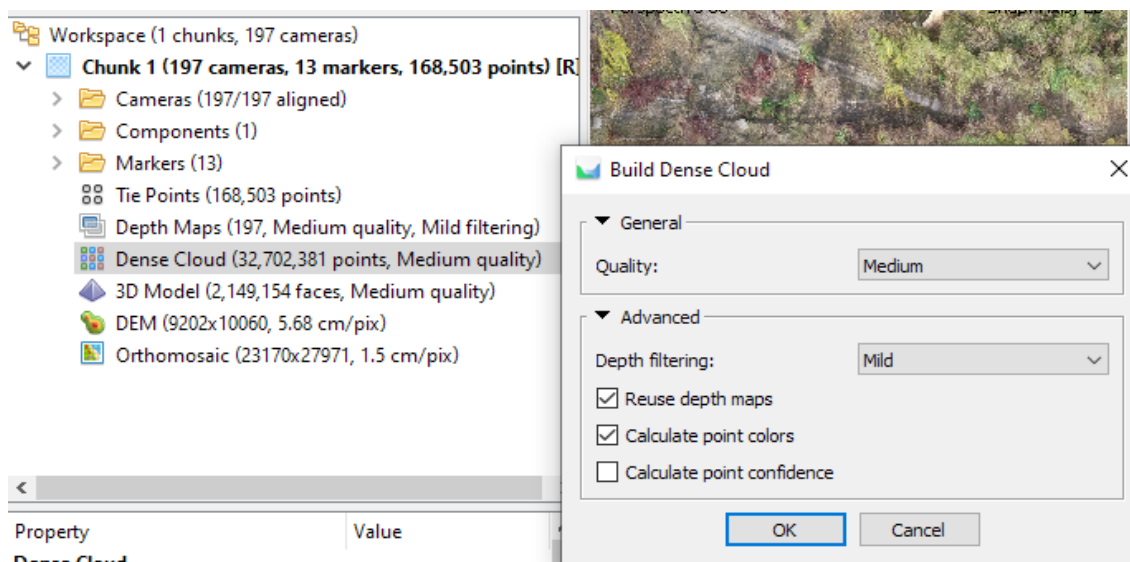


Рис. 5.5. Налаштування створення щільної хмари точок



Рис. 5.6. Ортофоплан для території об'єкта

### **Виготовлення та видання топографічного плану**

Цей ортофотоплан буде використано для креслення контурів, але для зображення горизонталей, що відображатимуть рельєф на об'єкті, потрібно отримати цифрову модель рельєфу (ЦМР).

На цьому етапі ми маємо хмару точок всіх елементів об'єкта, це рельєф разом з деревами та кущами, на основі якої можна доволі просто **отримати цифрову модель місцевості (ЦММ)**. Її відображення виконано у вигляді растрового зображення з кольоровим забарвленням, що відповідає зміні висоти пікселя на зображенні (рис. 5.7.)

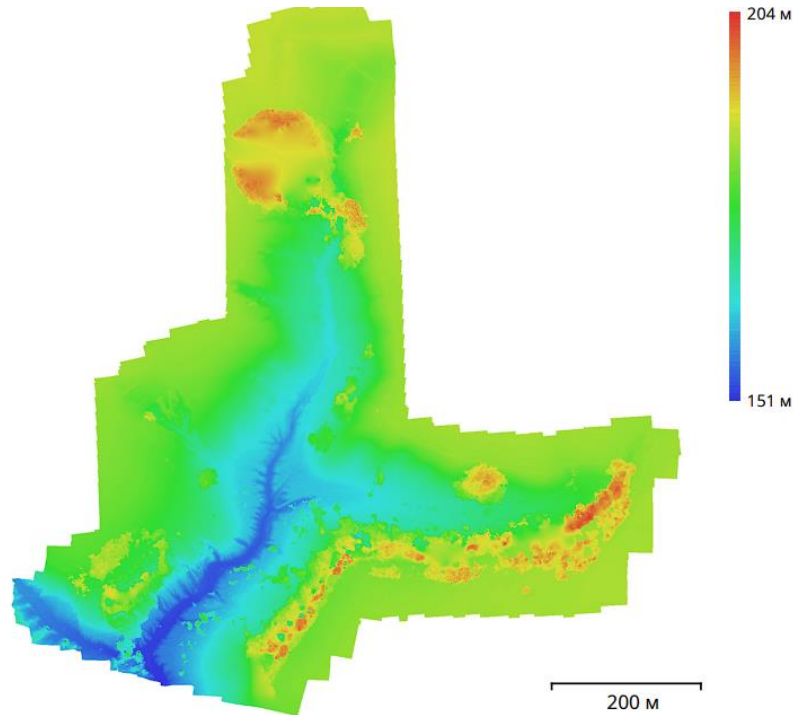


Рис. 5.7. ЦММ території об'єкта

Для отримання ЦМР було вирішено вивантажити хмару точок в інший програмний продукт CloudCompare. CloudCompare - це вільне та відкрите програмне забезпечення для обробки та аналізу облікових даних (point cloud data). Воно спеціалізується на роботі з тривимірними геопросторовими даними, такими як дані, отримані з лазерного сканування, фотограмметрії, радіолокації та інших джерел.

Основні можливості CloudCompare включають:

1. Візуалізація та рендеринг: дозволяє відображати великі облікові дані в тривимірному вигляді. Ви можете відображати точки, розмітки, вектори, поверхні та інші елементи, що допомагають вам зрозуміти геометрію та структуру даних.

2. Обробка та фільтрація: можна виконувати різні операції обробки на облікових даних, такі як фільтрація шуму, видалення артефактів, вирівнювання, реєстрація та розмітка точок.

3. Вимірювання та аналіз: CloudCompare надає інструменти для вимірювання відстаней, площ, об'ємів та інших геометричних характеристик. Ви також можете виконувати аналіз точок, знаходити найближчі точки, розраховувати нормалі, криві найкращої посадки та багато іншого.

4. Моделювання та редагування: можна створювати нові об'єкти, змінювати їх геометрію, об'єднувати та розділяти об'єкти, вирівнювати поверхні та виконувати інші операції моделювання.

5. Експорт та імпорт: CloudCompare підтримує широкий спектр форматів файлів для імпорту та експорту облікових даних, включаючи формати, такі як LAS, LAZ, E57 та інші.

Після завантаження хмари точок об'єкта в CloudCompare необхідно **отримати чистий набір точок**, який би містив в собі лише точки «грунту» (рис. 5.8.).

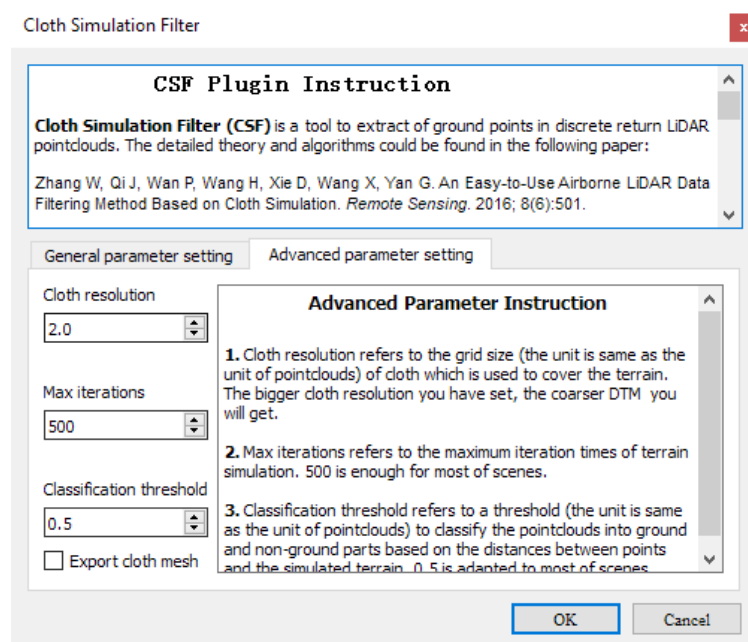


Рис. 5.8. Вікно параметрів «CSF фільтру»

Для вирішення цієї задачі використано інструмент CSF фільтр. CSF використовує процес моделювання тканини для вилучення DTM. Принцип показаний на наступному малюнку. Оригінальна хмара точок спочатку інвертується, а потім використовується жорстка тканина для покриття інвертованої поверхні. Аналізуючи взаємодію між вузлами тканини та відповідними точками LIDAR, розташування вузлів тканини визначається для отримання наближеної оцінки поверхні землі. Після цього, порівнюючи



відстань між вихідною хмарою точок і остаточною формою змодельованої тканини, хмару точок можна класифікувати на наземні та неземельні точки

В результаті класифікації отримано набір точок, які включають в себе лише точки рельєфу. На рис. 5.9 можна побачити, що були прибрані всі точки дерев та кущів. Вже на основі цієї хмари точок можна виконувати побудову горизонталей.

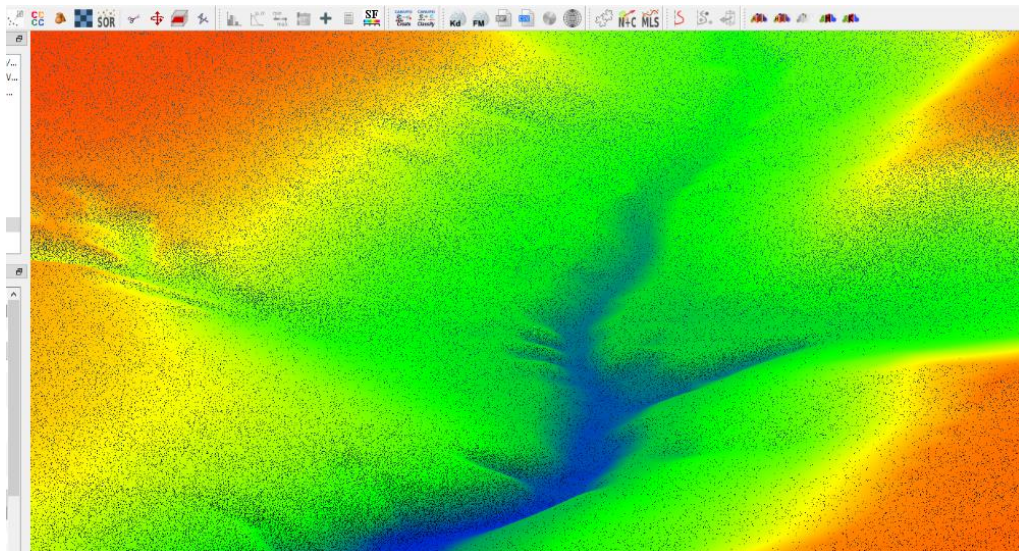


Рис. 5.9. Хмара точок без дерев та кущів

Програма CloudCompare rasterизує поверхню, тобто створює горизонталі на основі принципу інтерполяції і з'єднує точки з однаковою висотою. Тому спочатку була створена поверхня з хмари точок рельєфу (рис. 5.10).

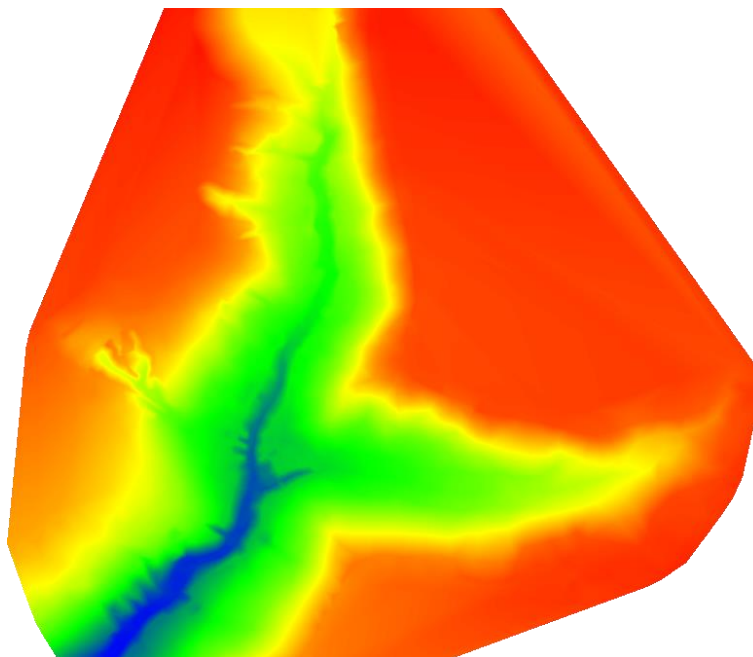


Рис. 5.10. Растрова ЦМР

Далі, використовуючи інструмент растрезації отримуємо горизонталі із заданим кроком по висоті (рис. 5.11)

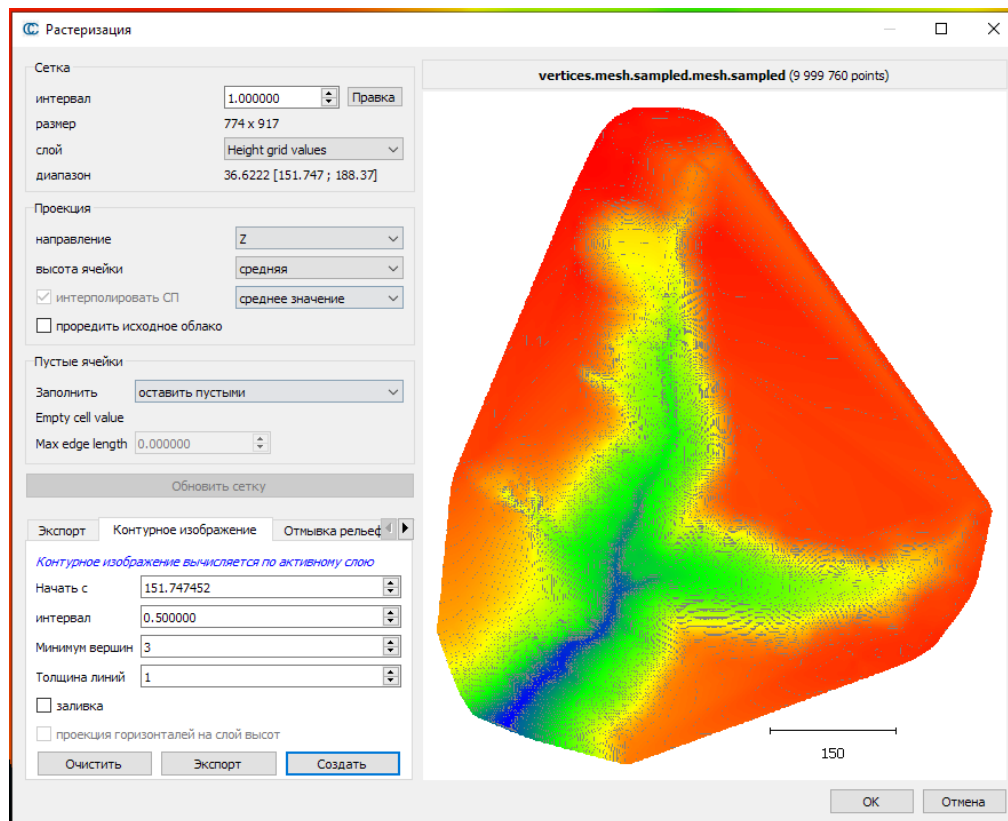


Рис. 5.11. Растрезація ЦМР

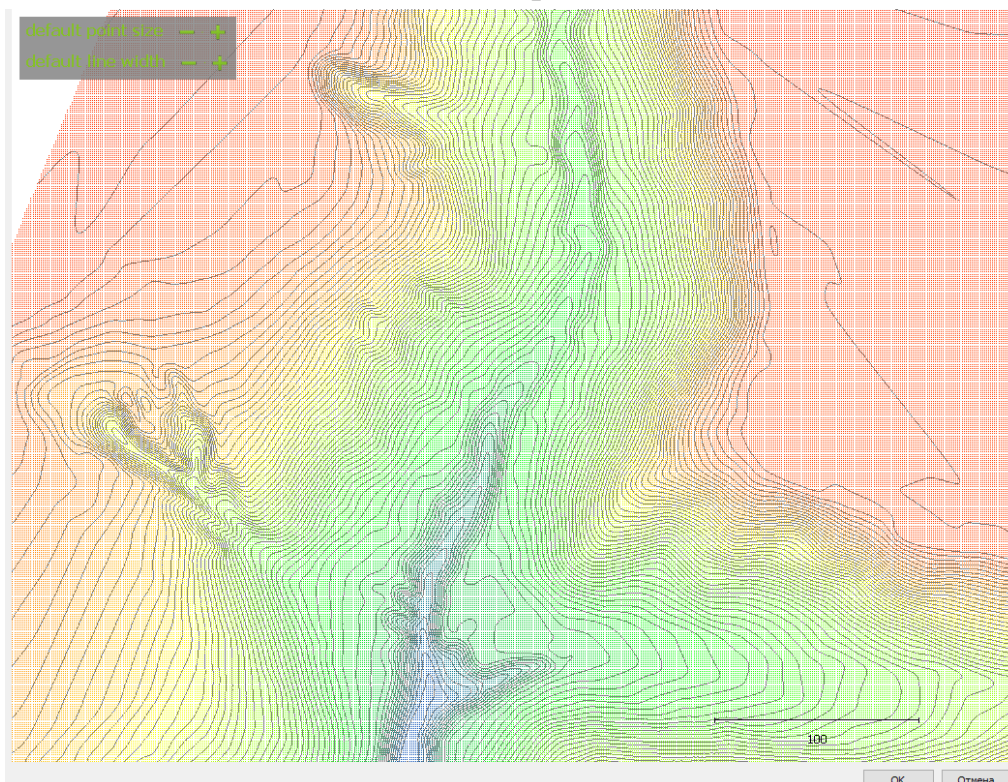


Рис. 5.12. Формування горизонталей із заданим кроком



В результаті растеризації ЦМР отримано набір ліній, що відповідають певному значенню відмітки на моделі. Окрім того самі лінії знаходяться на відповідних відмітках, а не лише мають підписи із їх значенням. Таким чином ми перевели хмару точок поверхні землі на її більш просте та зручне представлення в топографії – горизонталі (рис. 5.13).

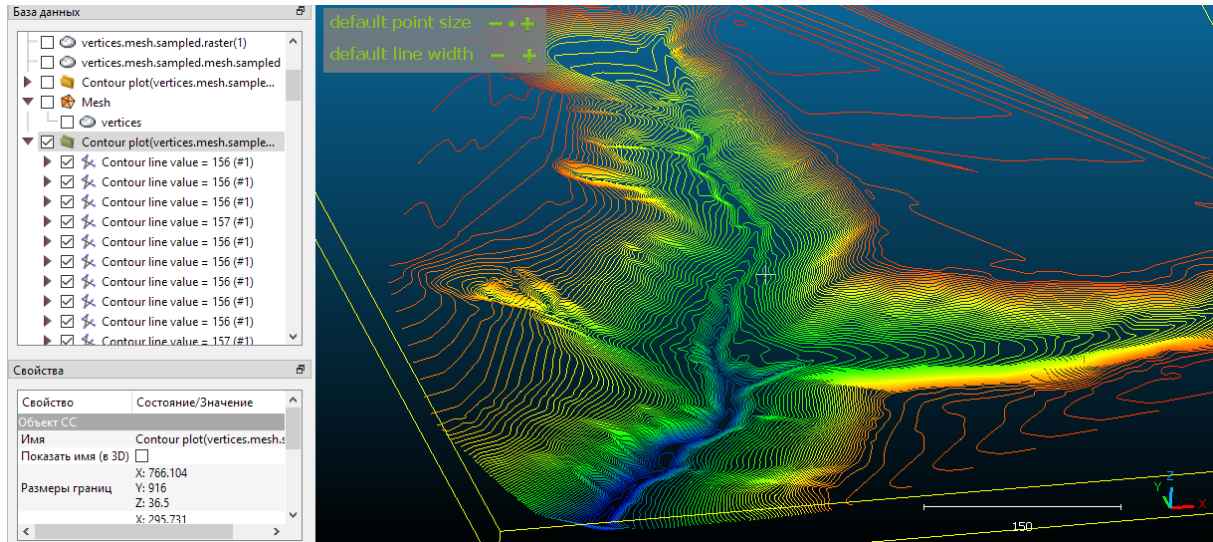


Рис. 5.13. Представлення ЦМР в горизонталях

В додатках Б та В наведено додаткові можливості відображення TIN поверхні та горизонталей ЦММ в цій програмі. Але для створення топографічного плану нам знадобиться САД система, тому отримані горизонталі експортуються в формат dxf та завантажуються в Civil 3D.

**Кінцевий етап роботи** проходить саме в програмному забезпеченні Civil 3D або іншій САД системі, в якій можна виконувати креслення та нанесення умовних масштабних знаків.

Після завантаження інформації про ЦМР у вигляді ліній заданої висоти, завантажуюмо в програму, раніше отриманий ортофотоплан. Спочатку він у нас не зорієнтований в системі координат та не відповідає масштабу, бо завантажуються як звичайне зображення. Тому потрібно обрати три точки з переліку опорних точок, які рівномірно охоплюють всю територію, та завантажити їх в проєкт або додати вручну. Основний момент, це вписати їх координати у відповідній проєкту системі із вказанням однакової відмітки, можна прийняти рівну нулю. Маючи ці точки, можна використати інструмент 3Д вирівнювання і проставити відповідні відображення цих точок на ортофотоплані (рис. 5.14).



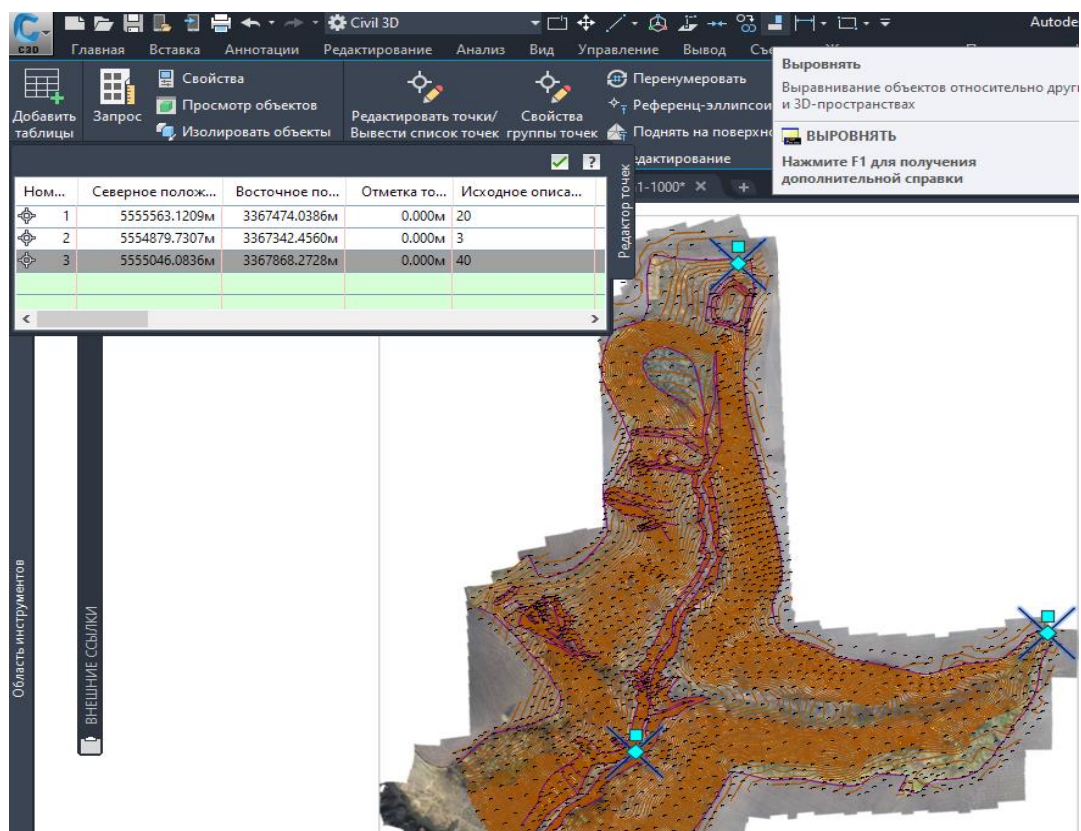


Рис. 5.14. Вирівнювання ортофотоплану

Завантажені горизонталі можна так і залишити для використання на топографічному плані, але є момент з відсутністю підписів висот горизонталей та коректним виділенням основних і допоміжних. Для коректного оформлення топографічного плану можна створити поверхню в Civil 3D на основі поточних горизонталей чи так званих структурних ліній (рис. 5.15). Тут також буде можливість задати границі поверхні та характерні лінії доріг та рельєфу, щоб при побудові TIN моделі поверхні отримати коректні положення вершин трикутників.

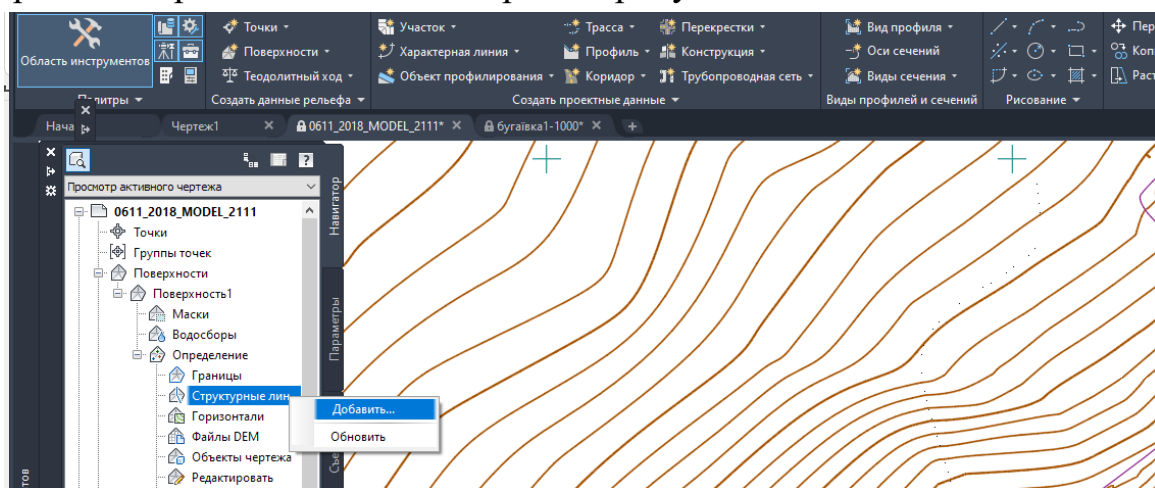


Рис. 5.15. Побудова поверхні

Після створення поверхні її можна налаштувати для коректного відображення в кольорі та типах ліній, автоматизовано проставити підписи горизонталей, додаткові відмітки (рис. 5.16).

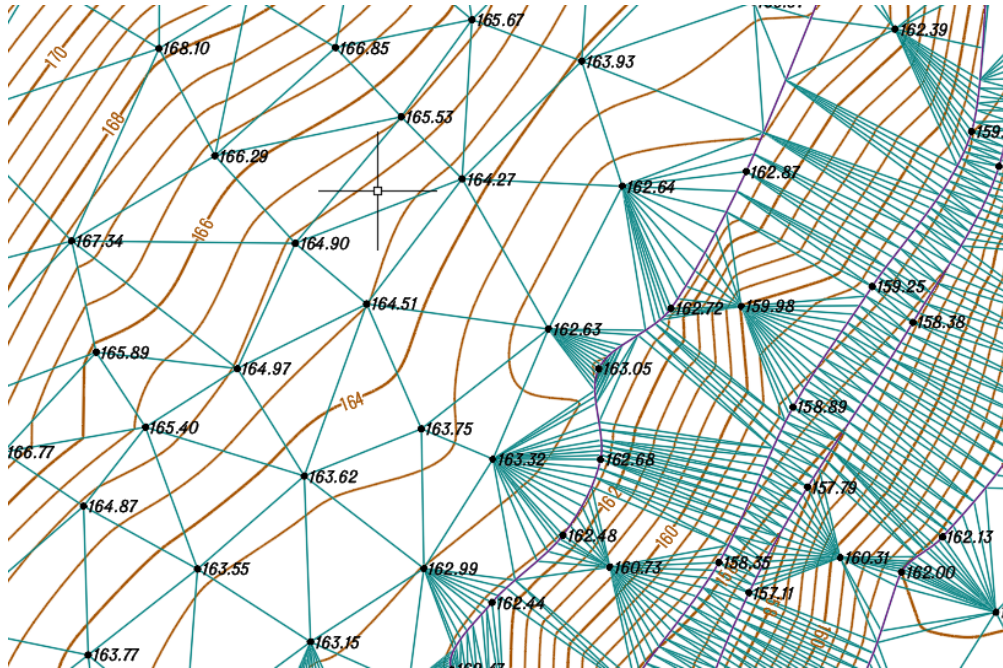


Рис. 5.16. Відображення ЦМР в горизонталях та TIN

Тепер залишається нанести потрібні топографічні знаки, промалювати дороги і тп., використовуючи ортофотоплан, як основу (рис. 5.17).

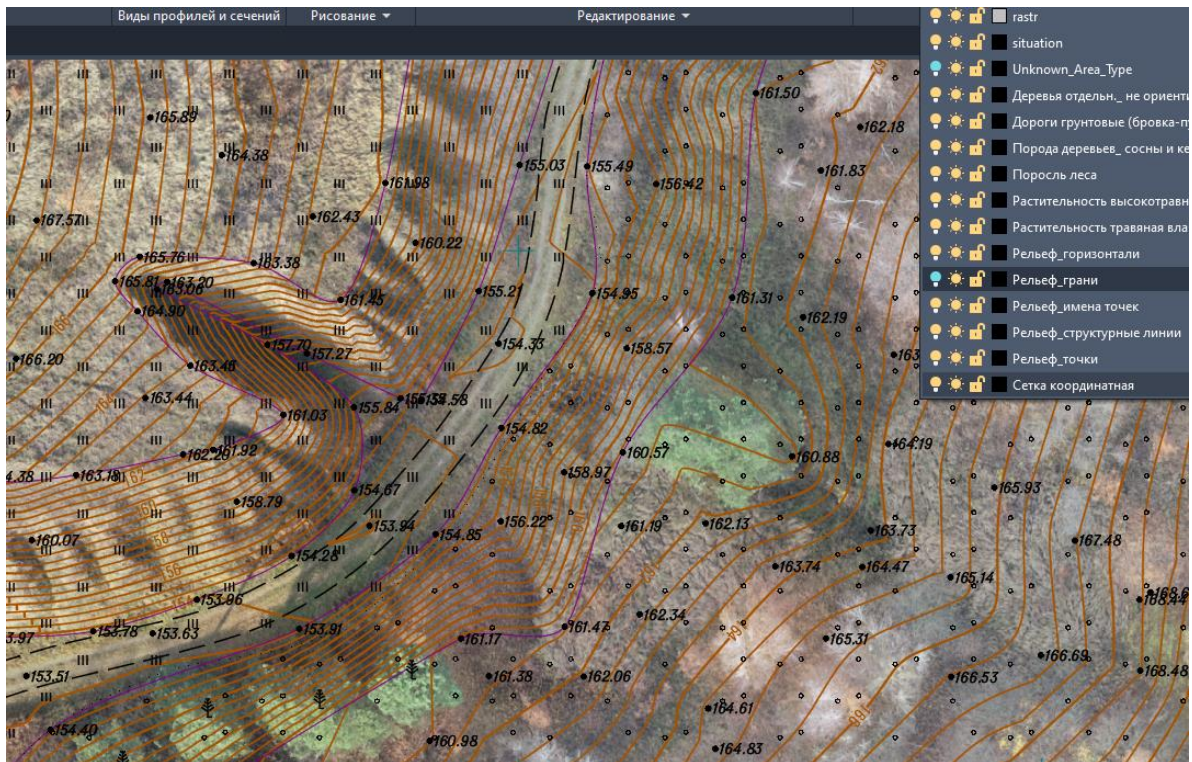


Рис. 5.18. Топографічний план з підложкою ортофото

### **Запитання для самоперевірки**

1. Які етапи включає камеральна обробка фотознімків?
2. Що таке ортофото і як його створюють?
3. Як відбувається очищення хмари точок?
4. Яка мета побудови цифрової моделі рельєфу?
5. Як визначити точність отриманої моделі?
6. Що таке фототріангуляція?
7. Як програмно визначити помилки знімків?
8. Як виконується векторизація на основі ортофото?
9. Як поєднуються GPS-дані з фотознімками?
10. Які критерії оцінки якості фінального результату?



## Лекція 6. Оцінка точності БПЛА знімання

### План

1. Порівняння БПЛА знімання та лідарної зйомки.
2. Порівняння БПЛА знімання та наземного лазерного сканування.

**Відносна точність** – це вимірювання того, як об'єкти розташовуються відносно один одного в реконструйованій моделі (ортофотоплан, цифрова модель поверхні або тривимірна хмара точок). Відносні помилки визначають шляхом порівняння геометричних параметрів об'єкта зйомки та моделі.

**Абсолютна точність** – відноситься до різниці між розташуванням об'єктів на реконструйованій моделі та їх справжнім становищем на Землі (прив'язкою до геодезичної системи координат). Абсолютні визначають знаходженням відхилень координат точок моделі від координат у геодезичній системі.

Питання точності виконання робіт нормують в стандартах та ДБН, при чому розрізняють різні поняття точності. Наведемо ці дані для американського стандарту точності геопросторових даних FGDC-STD-007.3-1998 та нашого ДБН в табл.6.1.

Таблиця 6.1

**Визначення точності в різних стандартах**

| FGDC-STD-007.3-1998                                             | ДБН                                                         | Формула                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Середня помилка (mean error)                                    | Середня похибка визначення планового та висотного положення | $mean_x = \bar{\delta}_x = \frac{\sum(x_{исх} - x_{изм})}{n}$ $mean_y = \bar{\delta}_y = \frac{\sum(y_{исх} - y_{изм})}{n}$ $mean_z = \bar{\delta}_z = \frac{\sum(z_{исх} - z_{изм})}{n}$ |
| Середньо-квадратична помилка (root-mean-square error (RSME))    | Середньо-квадратична помилка (m)                            | $RMSE_x = m_x = \sqrt{\frac{\sum(x_{исх} - x_{изм})^2}{n}}$ $RMSE_r = m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}$ $= 1.4142m_x$                                                                        |
| Точність вимірів при рівні достовірності 95%( <i>Accuracy</i> ) | Гранична похибка з довірчою ймовірністю 0,95 ( $M_{95}$ )   | $Accuracy_r = M_{95xy} = 1.7308m_{xy}$ $Accuracy_z = M_{95z} = 1.96m_z$                                                                                                                   |

### Попередній розрахунок точності

Результати досліджень вказують на можливість використання розміру пікселя (GSD - розмір одного пікселя на місцевості) для попереднього розрахунку точності (рис. 6.1).

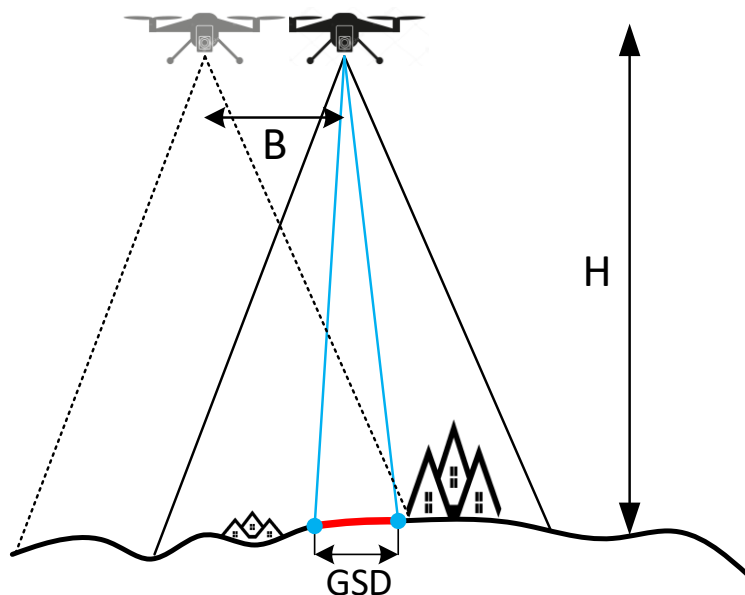


Рис.6.1. GSD - розмір одного пікселя на місцевості

Розрахунок можна виконати за формулою:

$$GSD = d \cdot \frac{H}{f},$$

де H – висота польоту або відстань від камери до об'єкту знімання, f – фокусна відстань камери, d – діагональ матриці камери. Приблизні значення СКП для різних значень GSD наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

#### Приблизні значення СКП для різних значень GSD

| Висота польоту, м | GSD, см/пикс | СКП(xyz), см |       | Рекомендований масштаб топографічного плану |
|-------------------|--------------|--------------|-------|---------------------------------------------|
|                   |              | min          | max   |                                             |
| 25                | 0,68         | 0,68         | 2,04  | від 1:200                                   |
| 50                | 1,32         | 1,32         | 3,96  | від 1:200                                   |
| 75                | 2,05         | 2,05         | 6,15  | від 1:200                                   |
| 100               | 2,74         | 2,74         | 8,22  | від 1:500                                   |
| 125               | 3,42         | 3,42         | 10,26 | від 1:500                                   |
| 150               | 4,11         | 4,11         | 12,33 | від 1:500                                   |

## Методики оцінки точності

### 1. Оцінка за опорними та контрольним точкам.

Методика передбачає прив'язку моделі до опорних точок, координати яких визначені доступними геодезичними методами, а виконання оцінки точності контрольних точок характерних контурів.

### 2. Оцінка деформації лінійних контурів та площ.

Суть підходу зводиться до вимірювання довжин характерних контурів (геометрія будівель, відстані між палями тощо) на моделі та проєктній документації чи виконавчій зйомці. Дана методика дозволяє знайти відхилення геометричних параметрів моделі від об'єкта зйомки, тим самим визначити значення відносної помилки.

### 3. Оцінка зміни обсягів поверхні.

В цьому випадку використовуються алгоритми порівняння хмар точок або поверхонь за аналогією з геодезичним завданням визначення об'єму насипу або пошуку відстані. Для такого рішення необхідно мати поверхню відносності, яку часто приймають поверхню, побудовану за результатами лідарної зйомки або наземного лазерного сканування.

**Повітряне лазерне сканування (LiDAR).** Модулі *LIDAR* також встановлюються на БПЛА з *RTK*, що дозволяє отримати хмару точок певного об'єкта з прив'язкою у потрібній системі координат. Це дуже потужний інструмент, який дозволяє виконувати практично будь-які завдання у картографії, топографії, геодезії та інших напрямках.

Інноваційне рішення від *Leica Geosystems. BLK2FLY* – перший у світі повністю інтегрований БПЛА з технологією *LiDAR*. Це самостійний літальний лазерний сканер із удосконаленою функцією обходу перешкоди для зручного охоплення реальності з висоти. Він призначений для зйомки екстер'єрів будівель, конструкцій та навколишнього середовища і створює хмару точок під час роботи.

Літальний лазерний сканер – нове рішення, максимально просте у використанні, але ефективно при виконанні знімальних робіт різної складності.

Легка у керуванні, нова система сканування чорної лінійки *BLK* не складна для застосування і базується на елементах управління на основі додатків. Для початку роботи потрібно розгорнути та увімкнути пристрій, керування ведеться дистанційно у програмі *BLK2FLY Live*. У додатку є функція планування проєктів. Квадрокоптер літає самостійно, виконуючи

свою місію. Також є можливість відслідковувати або змінювати траєкторію БПЛА в режимі реального часу. У разі потреби є опція керування пристроєм вручну, за допомогою віртуальних джойстиків. Безпілотною спроектований так, щоб бути максимально зручним у використанні. Зробивши декілька простих натискань на планшеті, користувачі можуть підняти дрон у повітря для автономного сканування зовнішньої частини будівель та важкодоступних областей даху й фасаду [5].

Програма *BLK2FLY Live* може відстежувати політ. Інші опції включають панорамний перегляд для зміни напрямку видимості, масштабування зображення в реальному часі, до того ж безпілотною відповідним чином адаптує свою точку огляду, може легко змінювати траєкторію польоту квадрокоптера для захоплення нової області, обравши область через систему крапок безпосередньо у 3D-виді в додатку на планшеті. Дрон створює траєкторію польоту для швидкого та безпечного сканування цієї зони.

Це рішення може супроводжувати хід будівництва на кожному його етапі, при цьому заощаджуючи час, підвищуючи точність зйомки радаром за допомогою самостійного робочого процесу сканування. За допомогою БПЛА легко візуалізувати вихідні умови для реконструкції фасадів. БПЛА самостійно скануватиме весь зовнішній вигляд будівлі з повітря, забезпечуючи високу точність відображення реальності навіть у важкодоступних місцях.

Можна використовувати дрон перед початком реконструкції для отримання високоякісної 3D-моделі будівлі. За заданою оператором лінійною траєкторією *BLK2FLY* самостійно здійснює захоплення реальності, адаптуючись до навколишнього середовища, у якому він літає. Уникаючи перешкод і зберігаючи оптимальну відстань для якісного сканування, він самостійно фіксує зовнішні особливості та розміри будівель. Уся отримана інформація виводиться на планшет за допомогою декількох операцій. *Leica Geosystems* поєднує всі системи безпілотною літального апарату, а також *LiDAR*, радар та *GNSS*, за допомогою яких виконує самостійне сканування території з прив'язкою до географічних координат. Це портативний і простий у використанні пристрій, за допомогою якого процес збору картографічного матеріалу відбувається набагато швидше і якісніше. Застосовувані рішення дозволять легко фіксувати потрібні точки, отримуючи їх точні координати, не припиняючи зйомку з повітря.



Під час польоту сканування здійснюється відразу вгору та вниз і в обидві сторони одночасно. Наявність 5-ти камер по всьому периметру зовні пристрою дозволяє їх використовувати для відстеження та розфарбовування хмар точок, візуалізуючи їх відразу на планшет для спрощення управління. Під час роботи, використовуються радарні давачі та *LiDAR*, щоб вчасно виявляти перешкоди та уникати їх. Особливо важлива ця функція для виявлення скляних конструкцій, як перешкод при скануванні великих сучасних будівель.

Актуальні завдання:

- швидке виконання проєкту завдяки ефективному способу зйомки;
- висока точність та надійність вимірювань;
- швидка передача інформації для обробки;
- фіксування розташування;
- захоплення навіть найважчих елементів архітектури.



Рис. 6.2. Візуалізація роботи БПЛА з модулем RTK та LiDAR

### Порівняння технологій LiDAR і фотограмметрії

LiDAR та фотограмметрія — це обидва способи картографування поверхні Землі та збору геопросторових даних, які працюють за різними принципами. LiDAR використовує лазерні імпульси для вимірювання відстаней і створення детальних хмар точок. Натомість фотограмметрія застосовує аналіз фотографій, зроблених з різних ракурсів, для побудови тривимірних моделей об'єктів.

Основна різниця між цими технологіями полягає у способах збору даних: LiDAR є активною системою, що використовує власне джерело світла (лазер), тоді як фотограмметрія є пасивною та залежить від зовнішніх умов освітлення.

LiDAR відомий своєю високою точністю в зборі даних. Технологія дозволяє досягати вертикальної точності до 5–15 см і горизонтальної точності до 10–30 см, завдяки прямому вимірюванню відстані між сенсором і об'єктами. Крім того, LiDAR здатний проникати крізь густу рослинність, що робить його ідеальним для лісистих районів або зон із щільним покривом. Приклад обробки зібраних даних LiDAR наведено на рис. 6.3.

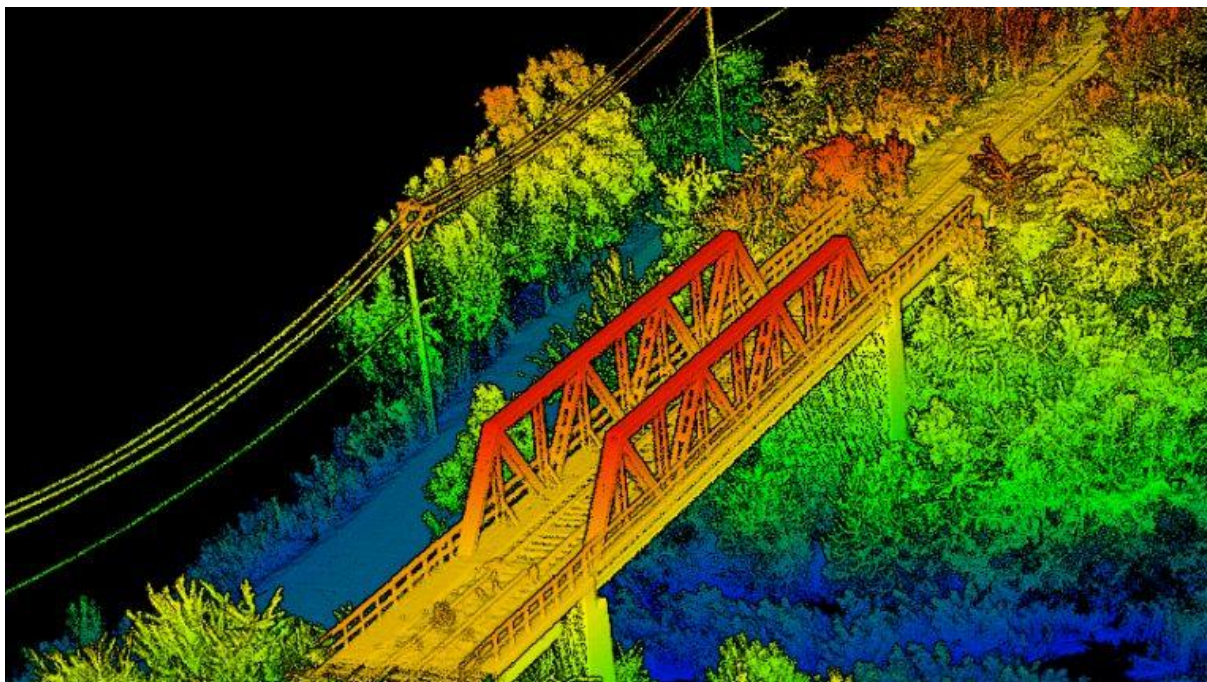


Рис. 6.3. Приклад обробки зібраних даних LiDAR

Фотограмметрія досягає точності, яка залежить від роздільної здатності фотографій, якості калібрування камери та програмного забезпечення. Горизонтальна точність може бути дуже високою, проте вертикальна точність зазвичай поступається LiDAR. Якщо використовувати достатню кількість знімків із перекриттям, фотограмметрична модель може наблизитися за точністю до LiDAR. Однак у зонах з густою рослинністю фотограмметрія має обмеження, оскільки не може «бачити» крізь листяний покрив. Порівняння LiDAR та фотограмметрії наведено і табл. 6.3

### Порівняння LiDAR та фотограмметрії

| Аспект            | LiDAR                                     | Фотограмметрія                        |
|-------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| Точність          | Висока, особливо у вертикальних вимірах.  | Залежить від якості зображень та умов |
| Вартість          | Висока через обладнання та обробку        | Дешевше для невеликих проєктів        |
| Проникнення       | Проникає через рослинність                | Обмежено прямою видимістю             |
| Швидкість збору   | Швидкий для великих територій             | Повільніший для великих площ          |
| Освітлення        | Працює вдень і вночі                      | Залежить від природного світла        |
| Обробка           | Складна                                   | Відносно простіша                     |
| Детальна текстура | Надає висоту, але без кольору та текстури | Високоякісна текстура та колір        |

#### Сфери використання LiDAR

- Лісове господарство – визначення обсягів деревини, моніторинг рослинності
- Гідрологія – моделювання водозборів і потоків
- Інфраструктурні проєкти – аналіз рельєфу для будівництва доріг і мостів
- Археологія – виявлення стародавніх руїн під густою рослинністю
- Автономний транспорт – виявлення перешкод для безпілотних автомобілів
- Сфери використання фотограмметрії
- Сільське господарство моніторинг стану посівів, аналіз ґрунту.
- Картографія – створення карт на основі високоякісних зображень.
- Архітектура – візуалізація будівель та інфраструктурних об'єктів.
- Документування культурної спадщини – 3D-моделі історичних пам'яток.
- Екологічний моніторинг – відстеження змін у ландшафті, ерозії та рослинності.

**Наземне лазерне сканування (НЛС)** – на сьогодні найбільш оперативний і продуктивний спосіб отримання точної і якнайповнішої інформації про просторові об'єкти.

Більш повну цифрову картину неможливо отримати ніяким іншим відомим способом. Процес зйомки повністю автоматизований, а участь оператора зводиться лише до підготовки сканера до робочого стану [2].

Сьогодні лазерне сканування, яке виникло в машинобудуванні, стало обов'язковою частиною топографічних зйомок. Геодезисти оцінили

можливість лазерних сканерів за лічені хвилини отримувати десятки тисяч безвідбивних вимірювань, які дозволяють, замість схематичної цифрової карти, побудувати повноцінну тривимірну фотореалістичну модель місцевості, при цьому значно скорочується час польових робіт. Особливе значення має застосування 3D-сканерів в інженерній геодезії і маркшейдерській справі, де потрібно докладно змоделювати форму складних інженерних споруд чи підземних пустот.

Існує низка завдань, які можна віднести до класики інженерної геодезії. Такими завданнями є виконання контрольно-монтажних вимірів і виконавчих зйомок під час будівництва інженерних споруд, спостереження за вертикальними і горизонтальними деформаціями та переміщеннями, вирішення завдань вертикального планування, маркшейдерські роботи під час експлуатації об'єктів гірничодобувної промисловості тощо.

За характеристиками лазерні 3D-сканери можна розділити на дві основні категорії – фасадні та інтер'єрні. Фасадні сканери мають перевагу щодо дальності і швидкості вимірювань, але обмежені в зоні сканування. Сфера застосування фасадних 3D-сканерів – зйомка відкритих ділянок місцевості і зовнішньої поверхні великомасштабних об'єктів (фасадів будівель і споруд), яка виконується зазвичай з декількох точок.

Інтер'єрні сканери мають максимально широку зону сканування, але поступаються дальністю вимірювань, тому здебільшого застосовуються для зйомки інтер'єрів або невеликих замкнутих просторів (тунелів, печер та інших порожнин).

Особливе місце посідають сканувальні станції (сервопривідні тахеометри з функцією сканування). Значно поступаючись 3D-сканерам щодо швидкості (десятки вимірювань за хвилину замість тисяч вимірювань за секунду), сканувальні станції мають на порядок вищу точність позиціонування точок (1–2 мм замість 1–2 см), тому сканувальні станції призначені для робіт, коли точність має вирішальне значення (наприклад для завдань моніторингу), або одночасно з 3D-сканерами, для точної прив'язки відсканованих даних.

Лазерні сканери для наземних зйомок (рис. 6.4.) – це більш складні прилади порівняно з електронними тахеометрами, хоча в них закладені ті самі принципи визначення координат точок при автоматичному вимірюванні кутів і відстаней.





Рис. 6.4. Сучасні наземні лазерні сканери

Принцип роботи лазерного сканера аналогічний до принципу роботи безвідбивного електронного тахеометра і полягає у вимірюванні часу проходження лазерного променя від випромінювача до поверхні, що відбиває, і назад до приймача. Шляхом множення цього часу на швидкість поширення лазерного променя визначається відстань до об'єкта.

Сканер складається з лазерного далекоміра, адаптованого для роботи з високою частотою, і блока розгортки лазерного променя. Блоком розгортки в сканері є сервопривід і полігональне дзеркало або призма. Сервопривід відхиляє промінь на задану величину в горизонтальній площині, при цьому повертається вся верхня частина сканера, яка називається голівкою. Розгортка у вертикальній площині здійснюється за рахунок обертання або гойдання дзеркала. Сучасні 3D-сканери складаються з двох основних компонентів: сканувальної системи і цифрової відеокамери. Сканувальна система призначена для моделювання форми вимірюваних об'єктів, а цифрова відеокамера – для точної передачі кольору об'єктів.

Наприклад, сканувальний тахеометр *Leica Nova MS60* із сучасним польовим програмним забезпеченням *Leica Captivate* перетворює складний набір просторових даних на зручні для роботи 3D-моделі. Використовуючи зрозумілі прикладні програми та сенсорні технології, усі види вимірювань і проектні дані можна переглядати в трьох площинах. Польове ПО *Leica Captivate* може застосовуватися в різних сферах і галузях незалежно від того,

з яким інструментом працюють: GNSS-приймачем, тахеометром або і тим і іншим одночасно.

Тоді як *Leica Captivate* використовується для збору даних, відтворення ліній, площ і 3D-моделювання в полі, програмне забезпечення *Leica Infinity* виконує весь комплекс обробки цих даних в офісі. Завдяки легкій процедурі передачі даних значно економиться час. *Leica Captivate* і *Leica Infinity* працюють у зв'язці для об'єднання, управління і редагування польових вимірювань і проектних даних швидше і ефективніше.

Сканери, на відміну від електронних тахеометрів, здійснюють сканування простору лазерним пучком. За один період сканування, тривалістю в соті долі секунди, автоматично здійснюється вимірювання полярних координат точок профілю і проводиться запис результатів безпосередньо у спецвизначник приладу, тобто візування спостерігач не виконує. Сканер забезпечує високу швидкість вимірювань, оскільки сервопривід, який повертає вимірювальну головку в обох (горизонтальній і вертикальній) площинах, дозволяє виконувати до 5 000 вимірів за секунду, що відповідає щільності десятків точок на 1 см<sup>2</sup> поверхні. Одночасно реєструється рівень відбитого сигналу від кожної точки.

Результати вимірювань постійно записуються в реальному часі в пам'ять приладу на зовнішній або внутрішній носій. При роботі зі сканером не потрібно проводити такі операції, як пошук цілі і візування, а також натискати на клавіші для виконання і реєстрації результатів вимірювань. Після цього сканером виконується сканування наступного рядка у полі зору приладу. Результати також фіксуються у пам'ять і виводяться на дисплей пристрою, де відображаються зняті точки місцевості. Перед початком зйомки встановлюється область сканування і щільність (вертикальна і горизонтальна відстань до сусідніх точок). Сканер самостійно може знайти і відсканувати з максимальною щільністю спеціальні візирні цілі, які слугують для визначення системи координат об'єкта, а також є геодезичною основою для порівняння окремих сканів. Таким чином, вся знімальна місцевість (і предмети місцевості) в межах поля зору сканера рівномірно вкривається точками, координати яких визначені за допомогою сканера, і одночасно реєструється рівень відбитого сигналу від кожної точки. У момент вимірювань на дисплеї приладу виникає зображення знятої на цій станції місцевості, тобто виходить ніби знімок місцевості і в цифровому вигляді.



В Україні набирає популярності і впроваджується, можливо, найбільш значуще технологічне нововведення в геодезії, архітектурі та низці інших суміжних галузей – лазерні сканувальні системи (далі – ЛСС).

Результатом роботи ЛСС є масив тривимірних координат точок лазерних відображень (далі – ТЛВ) від поверхні вимірюваних об’єктів з високою щільністю, який надалі можна відобразити в тривимірному просторі у вигляді точкової тривимірної моделі об’єкта. Такий вид відображення даних вирізняється високою візуалізацією порівняно з двовимірними кресленнями.

Для розподілення ЛНС на типи доцільно буде прийняти за основу загальні ознаки класифікації геодезичних приладів на основі. Проаналізувавши існуючі моделі сканувальних систем, залежно від класу, типу та різновиду пристрою можна запропонувати таку класифікацію (рис. 6.5).

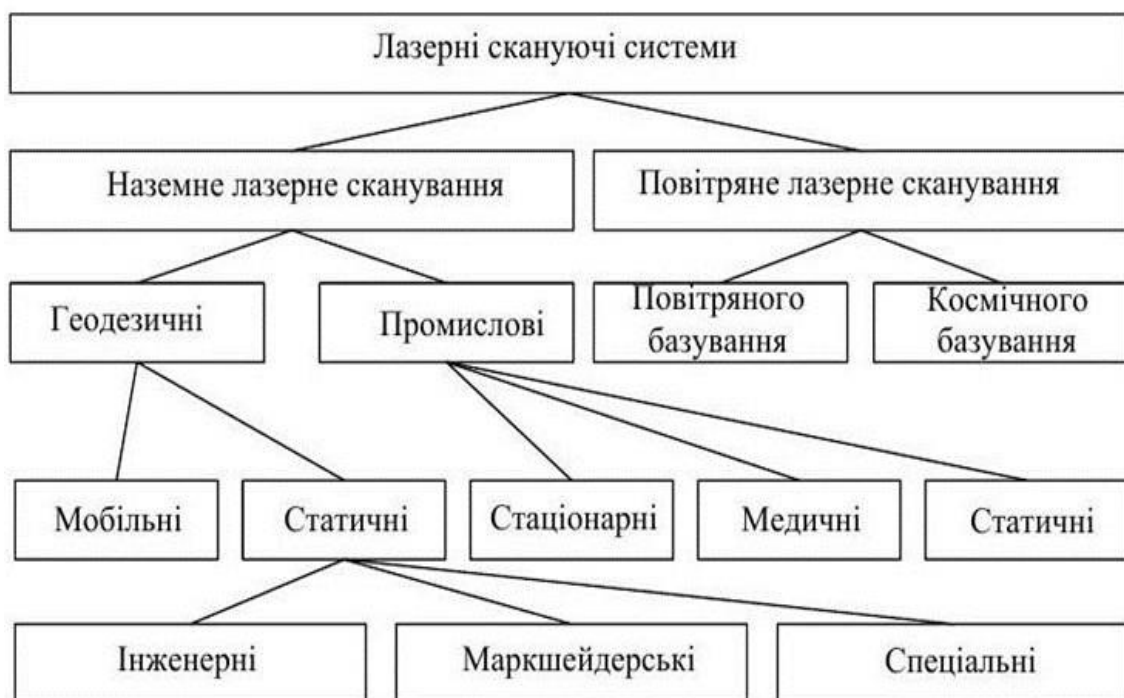


Рис. 6.5. Схематична класифікація лазерних сканувальних систем

На підставі запропонованої класифікації можна зробити висновок про те, що найбільш доцільним типом лазерної сканувальної системи для виконання геодезичного моніторингу є наземний лазерний сканер (далі – НЛС) геодезичного типу статичний інженерний.

Для визначення деформацій за межами нашої країни НЛС використовують частіше. Нижче наведені приклади використання деяких із них.

Для виявлення мінімальних зміщень об'єкта сканером *Leica Scan Station* польські вчені виконали дослідження. Метою дослідження було порівняння відхилень цілей за допомогою наземного лазерного сканера. Відхилення визначалися за трьома напрямками (осі координат X, Y, Z). Для цього використовувалася базова марка з двома мішенями, розташованими під кутом  $90^\circ$  одна до одної (рис. 6.6). Експеримент проводився п'ятьма циклами (0,001 м, 0,003 м, 0,005 м, 0,010 м, 0,020 м) і на декількох відстанях досягав максимального діапазону вимірювань сканера. Дані оброблялися за допомогою ПЗ *Cyclone* та *Matlab*. Аналіз отриманих результатів надав нові можливості для використання лазерного сканера при точних вимірюваннях для визначення невеликих деформації об'єктів.

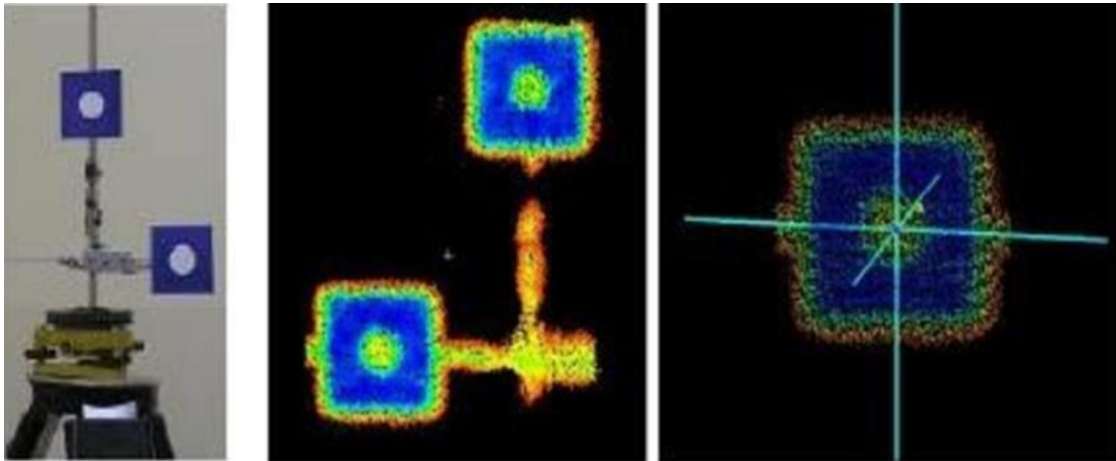


Рис. 6.6. Базова марка при скануванні

Аналіз даних доводить, що на відстані 49,982 м максимальна різниця між вимірюваними та теоретичними значеннями склала 2 мм для всіх передбачуваних циклів по трьох осях. було помічено, що помилки при вимірюванні можуть бути результатом програмного забезпечення *Cyclone*, яке автоматично призначає центр знака *HDS*. Це може підтвердити той факт, що, відповідно до результатів, на максимальній відстані під час експерименту (290,643 м) можна отримати ще кращі результати (максимальне відхилення 7 мм).

Визначення деформацій частини покрівлі проводили в Талліннському технологічному університеті. Визначались переміщення підвісного даху (ширина 73 м, довжина 37 м, висота 32 м). Проведено три серії

спостережень: спочатку без навантаження, потім під навантаженням мокрого снігу (приблизно 70 т), а через три місяці – з очікуванням повернення даху у первісне положення.

У дослідженні підкреслюється перевага методу НЛС при веденні моніторингу недоступних об'єктів. Конструкція даху представлена на рис. 6.7. Висота даху над поверхнею становить 32 м.

Сканування виконувалось сканером *Leica ScanStation C10* із закріплених точок ПВО. Обробка даних виконувалась в ПЗ *3D Cloud Processing Leica Cyclone 8.0*, аналіз результатів – у ПЗ *Autodesk AutoCAD Civil 3D*.

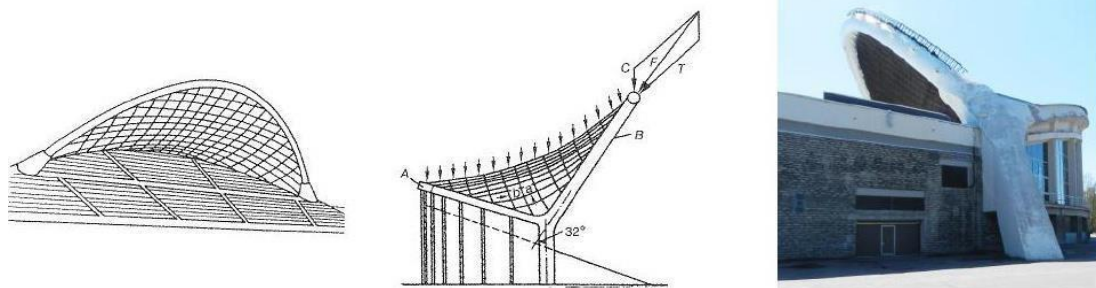


Рис. 6.7. Схема кабельної мережі даху та його фото

Порівняння результатів першого і другого циклу засвідчують, що деформації під впливом снігу сягають 11,3 см у нижній частині даху (зображені темними кольорами на рис. 6.8, а на вищому боці біля передньої арки дах піднявся вгору на +3,1 см (рис. 6.8, а). Східна сторона розташованого в центрі рисунка залишається практично незмінною.

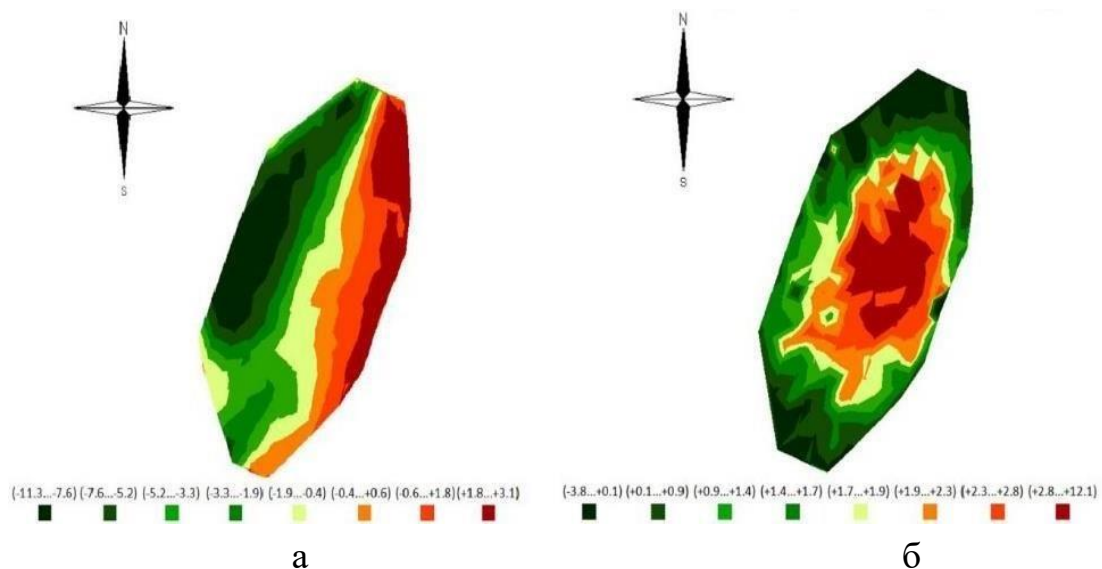


Рис. 6.8. Результати порівняння поверхонь, см:  
а – нижня частина; б – верхня частина

Порівняння даних за другий і третій цикл показує, що форма даху не повністю набула своєї оригінальної геометрії, 72 % фактично піднялося в центральній частині. Результати показують зростання до +12,1 см (рис. 6.8, б), позначено червоним кольором. Віддалені частини на краях не відновилися від снігового навантаження, що вказує на те, що 1 % поверхні був ще нижчий (до 3,8 см), лише 27 % даху повністю відновило початкову форму.

Хоча НЛС зазвичай вважаються придатними для використання при температурах вище нуля (бажано в сухих умовах), але шляхом дослідження доведено інше. На сьогоднішні НЛС здатні отримувати дані в несприятливих умовах навколишнього середовища. Загалом технологія НЛС виявилася корисною для моніторингу складного та недоступного об'єкта.

Ще один дослід проведений у залізничній галузі. Окрім визначення деформаційних процесів арки НЛС під час реконструкції над залізничною колією, виконано більш детальний аналіз порівняння методів НЛС із традиційним методом та НЛС і фотограмметрії. Зокрема, на об'єкті велося постійне спостереження за допомогою роботизованого тахеометра *Leica TS15* по марках. Аналіз методів проводився по 6-ти марках, що були встановлені на арках у різних місцях, їхні координати визначалися по черзі різними методами. Для сканування використовувався сканер *FARO Focus3D*, ПЗ для сканування – *Faro Scene*, для обробки хмарних точок *Leica Cyclone*. Для фотограмметричних робіт використовувалась камера *Nikon D3200*, для обробки зображень ПЗ – *Visual SFM*.

Після проведених робіт отримано такі результати. Розходження координат марок між координуванням тахеометром і НЛС склали 1–20 мм, але побудова автоматичних розрізів за допомогою методів *CAD* на підставі зйомок тахеометром неінформативна та неповна через малу кількість даних. Якість розрізів можна поліпшити шляхом встановлення більшої кількості контрольних марок, що, в свою чергу, призведе до збільшення часу робіт та матеріальних затрат.

Для порівняння методу НЛС та фотограмметрії обрана одна і та сама область арки. Ця область була близькою до гладкої однорідної поверхні. Оскільки поверхня не ідеально гладка, хмара точок була виправлена та зрівняна методом найменших квадратів за допомогою ПЗ *Shapes*, точки накладалися одна на одну. Відмінні ознаки між цими методами зображені на

рис. 6.9. До того ж розбіжність накладання поверхонь складала не більше 3 мм. Зростаюча різниця даних ближче до вершини арки може вважатися більш слабким зображенням у віддалених місцях.

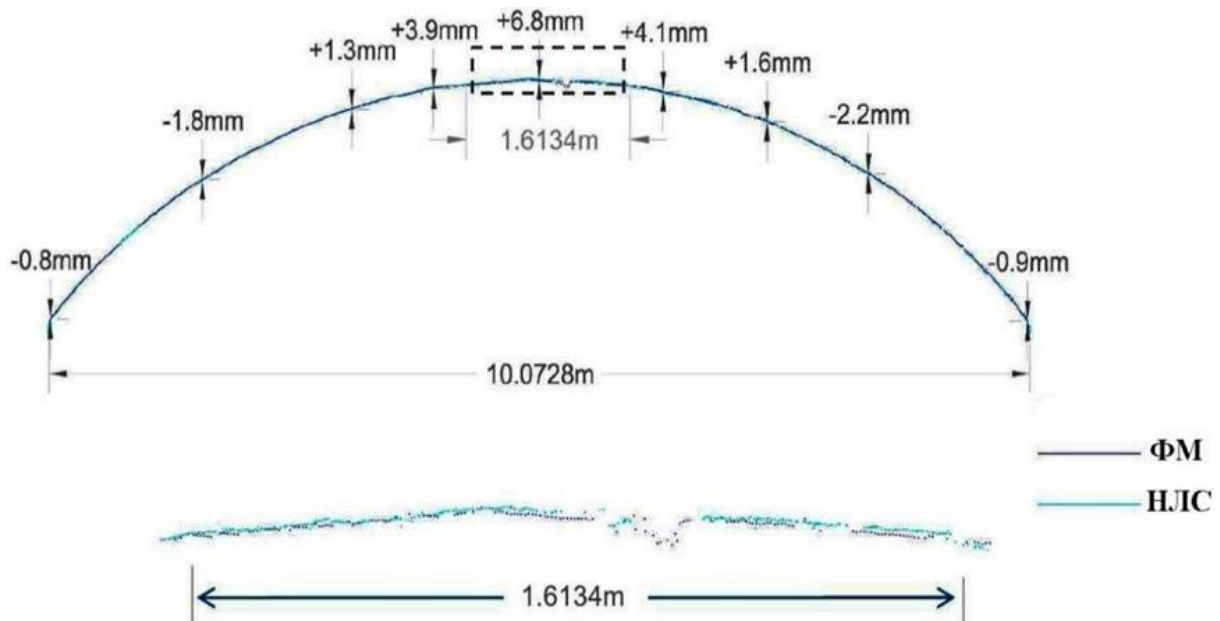


Рис. 6.9. Порівняння методу НЛС та фотограмметрії

Щодо точності наземних лазерних сканерів. Канадські та швейцарські вчені розробили новий алгоритм обробки даних, отриманих за допомогою НЛС.

Проведено контрольований експеримент у лабораторії, щоб перевірити здатність цього алгоритму для визначення дуже малих переміщень з реальними даними НЛС. Був використаний сканер *Optech ILRIS 3D LiDAR*. Сканер встановили на 4,6 м від мішені в приміщенні. Мішень складалася з твердої деревини і прикріплювалася дерев'яними тілами різної неправильної форми. Сканування твердої поверхні виконувалося 50 разів при середній відстані між точками 6 мм. Після калібрування сканувань на поверхні були розміщені випробувальні зразки з картону (поверхня 200 мм × 70 мм) у семи різних місцях (рис. 6.10, а). Кожна окрема частина становила від 0,2 мм до 3,7 мм по товщині. Щоб перевірити здатність алгоритму для виявлення переміщень у похилих напрямках до сканера, у двох місцях на півсфері були прикріплені два шматки так, щоб кут падіння лазерного променя становив приблизним 45°. Після розміщення шматочків мішень сканували ще 50 разів у тому самому місці сканера для створення хмари точок з даними (рис. 6.10, б).

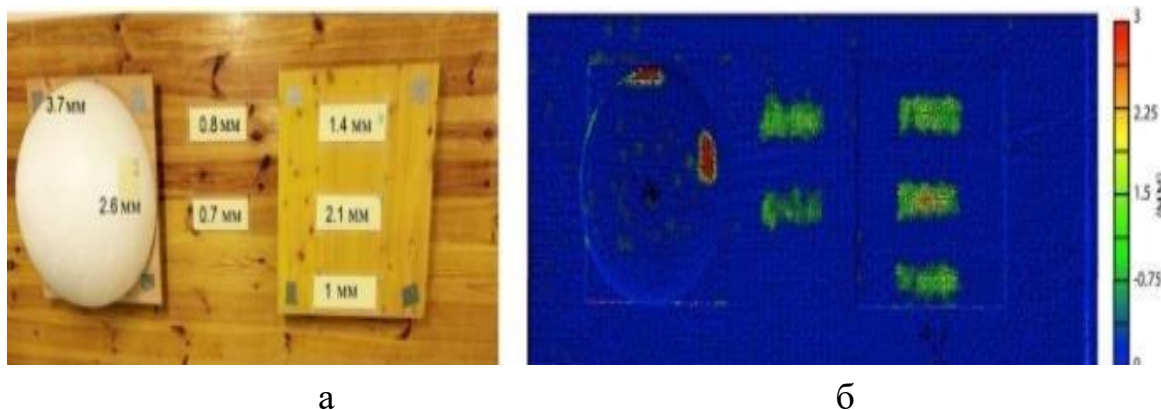


Рис. 5.13. Марки для сканування:

а – об'єкти сканування; б – відсканована поверхня

Алгоритм був використаний таким чином, що стандартне відхилення ставало систематичною помилкою в опорному скануванні і віднімання з відфільтрованих точок даних хмар здійснювалося на наступному кроці. Точність калібрування стандартного відхилення дозволяє фільтрувати дані до 1/100 мм. Після фільтрації і калібрування даних обчислене стандартне відхилення склало 0,3 мм, що відповідає 0,6 мм LD при моделюванні 3D- поверхні.

Цей метод перевірено в польових умовах. Скельний схил був відсканований 54 рази, із п'ятихвилинними інтервалами і з середньою відстанню 200 м. Кожне сканування складалося приблизно з 360 000 точок і з середнім кроком сканування між точками 25 мм. Після обробки результатів було встановлено, що стандартні відхилення склали 0,55 мм, унаслідок чого кожна точка рівня виявлення на похилій площині при 95 % довірчого інтервалу (1,96 стандартних відхилень) розміщується в межах 1,1 мм.

### Запитання для самоперевірки

1. Які показники використовуються для оцінки точності?
2. У чому різниця між RMSE і M95?
3. Яке значення має точність опорних точок?
4. Як впливає якість GCP на точність моделі?
5. Які методи використовуються для контролю точності?
6. Як визначити вплив кута зносу на точність?
7. Чому SfM може давати похибки при зйомці з однакових кутів?
8. Як порівняти точність LiDAR і SfM-моделей?
9. Що таке внутрішня точність моделі?



## Лекція 7. Огляд програмного забезпечення та їх можливостей

### План

1. Програмне забезпечення з вільним доступом (opensource).
2. Програмне забезпечення з платним доступом (proprietary).

Усе програмне забезпечення SfM виконує один або більше кроків на малюнку робочого процесу, показаному нижче (рис. 7.1).

### Structure from Motion general software workflow

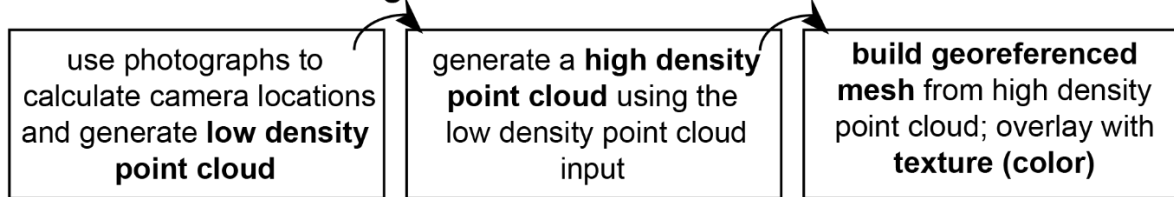


Рис. 7.1. Узагальнений робочий процес для програмного забезпечення SfM після збору даних

Програмне забезпечення SfM зазвичай відноситься до однієї з двох категорій: (1) комерційно доступне програмне забезпечення, для якого робочий процес є більш оптимізованим, але програмне забезпечення є «чорною скринькою» та (2) програмне забезпечення з відкритим кодом, для якого робочий процес є більш складним (кілька програми, можливо, потрібно використовувати послідовно, деякі можуть не мати графічного інтерфейсу користувача [GUI]).

### Комерційне програмне забезпечення

Основним комерційним програмним забезпеченням, яке використовується для досліджень у геонауці та археології, є Agisoft MetaShare. Це програмне забезпечення доступне в професійній (\$3499, \$549 академічній) і стандартній (\$179, \$59 академічній) версіях. Професійне видання найкраще підходить для геологічних цілей SfM, оскільки дозволяє використовувати наземні контрольні точки, вимірювання, експорт DEM (а не просто хмари точок) і експорт ортомозаїки з геоприв'язкою. Agisoft є «чорною скринькою», але використовує алгоритм SIFT, який використовується в програмному забезпеченні з відкритим кодом (Verhoeven, 2011).

Pix4Dmapреможна купити або взяти в оренду. Ця програма коштує 350 доларів США за місячну оренду, 3500 доларів США за рік (плаваюча ліцензія на 2 пристрої одночасно) і 5990 доларів США за одноразову покупку (плаваюча ліцензія на 1 пристрій одночасно). Більше аналізу та обробки даних можна виконати в цій програмі замість експорту хмари точок або матриці вимірів в іншу програму, таку як Cloud Compare або ArcGIS.

Іншою комерційною програмою є PhotoModeler Premium, яка є програмою PhotoModeler, оптимізованою для картографування UAS. Ця програма коштує 2995 доларів США за постійну ліцензію або 145 доларів США на місяць за місячну підписку та, здається, не має освітньої ліцензії. Ця програма рідше використовувалася для дослідницьких програм, тому має менше рецензованої документації про її можливості.

### **Програмне забезпечення з відкритим кодом**

Для SfM або частин робочого процесу SfM існує багато програм з відкритим кодом. Ці програми варіюються від GUI до програм, що запускаються з командного рядка, до програм, що запускаються через MATLAB (зауважте, що MATLAB вимагає власної, досить дорогої ліцензії: \$2350, \$550 для академічної версії, \$99 для студентської версії).

Статті Вестобі та ін. (2012), Джеймс і Робсон (2012), Фонстад та ін. (2013) і Green et al. (2014), проходять різні робочі процеси за допомогою існуючого програмного забезпечення з відкритим кодом. Грін (2012) — це магістерська робота, яка описує робочий процес для одного методу використання програмного забезпечення з відкритим кодом і стане гарним ресурсом для тих, хто віддає перевагу варіанту з відкритим кодом.

Порівняння кількох програмних платформ, як відкритих, так і комерційних, для додатків Structure from Motion наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

**Порівняння кількох програмних платформ, як відкритих,  
так і комерційних, для додатків Structure from Motion**

| Назва                    | Комерційний<br>чи<br>відкритий? | ПК<br>низький<br>щільності | ПК високої<br>щільності | Коорди-<br>нати;<br>сітка і<br>текстура | Примітки та/або<br>додаткові<br>можливості                                                                                                                      |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agisoft<br>MetaShape Pro | Комерційний                     | ✓                          | ✓                       | ✓                                       | Основне<br>комерційне<br>програмне<br>забезпечення, що<br>використовується<br>в геонауці та<br>археології.                                                      |
| Bundler                  | Відкрите<br>джерело             | ✓                          |                         |                                         | Створює вихідний<br>файл<br>розташування<br>камер і хмари<br>точок низької<br>щільності; можна<br>ввести в PMVS2 за<br>допомогою<br>сценарію<br>“Bundle2PMVS2”. |
| CloudCompare             | Відкрите<br>джерело             |                            |                         | ✓                                       | Використовуйте для<br>географічної<br>прив’язки<br>виведення з CMVS<br>+ PMVS2                                                                                  |
| CMVS+PMVS2               | Відкрите<br>джерело             |                            | ✓                       |                                         | Якщо простіше<br>запускати з<br>графічного<br>інтерфейсу,<br>скористайтеся<br>VisualSFM<br>(графічний<br>інтерфейс<br>використовує ті<br>самі алгоритми)        |
| JAG3D                    | Відкрите<br>джерело             |                            |                         | ✓                                       | Додати наземні<br>контрольні точки<br>та застосувати<br>матрицю<br>трансформації до<br>геоприв’язки;<br>працює з                                                |

|                      |                  |   |   |   |                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------|------------------|---|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                      |                  |   |   |   | результатами<br>MeshLab                                                                                                                                                                                       |
| MATLAB               | Комерційний      |   |   | ✓ | Додайте наземні опорні точки та застосуйте матрицю трансформації до геоприв'язки. Також можна створити сітку.                                                                                                 |
| MeshLab              | Відкрите джерело |   |   | ✓ | Створює та текстурує сітки; можна видалити викидні точки                                                                                                                                                      |
| MeshRoom             | Відкрите джерело | ✓ |   |   | Створює 3D-модель із сіткою та текстурою, але не запрограмовано можливості геоприв'язки.                                                                                                                      |
| MicMac               | Відкрите джерело | ✓ |   | ✓ | Може виготовляти 3D-моделі та орто-знімки.                                                                                                                                                                    |
| reality capture      | Відкрите джерело | ✓ | ✓ | ✓ | Програмне забезпечення з відкритим кодом, найбільш схоже на MetaShape. Створює хмари точок, текстури, сітки та може геоприв'язуватися. Можливість завантажувати шейп-файли на готові ортографічні зображення. |
| PhotoModeler Premium | Комерційний      | ✓ | ✓ | ✓ | Програмне забезпечення PhotoModeler, оптимізоване для методів збирання UAS                                                                                                                                    |
| Pix4Dmapper          | Комерційний      | ✓ | ✓ | ✓ | Спеціально для зібраних даних UAS                                                                                                                                                                             |

|             |                  |   |   |   |                                                                |
|-------------|------------------|---|---|---|----------------------------------------------------------------|
| Points2Grid | Відкрите джерело |   |   | ✓ | Програма OpenTopography. Вирівняна за сіткою хмара точок у DEM |
| Regard3D    | Відкрите джерело | ✓ |   |   | Створює 3D-модель із сіткою та текстурою.                      |
| SFMToolkit3 | Відкрите джерело | ✓ |   |   | Набір інструментів для Bundler і CMVS + PMVS2.                 |
| VisualSFM   | Відкрите джерело | ✓ | ✓ |   | Графічний інтерфейс для CMVS + PMVS2                           |

Розглянемо деякі рішення в області фотограмметрії.

### DroneDeploy 3D

Програма DroneDeploy є провідною компанією в галузі хмарної обробки даних із безпілотних літальних апаратів. Однією з переваг цього програмного продукту є наявність мобільної версії, яка дозволяє керувати літальним апаратом з мобільного пристрою та отримувати карти поверхні (рис. 7.2). Призначена для роботи в основному з літальними апаратами компанії DJI.

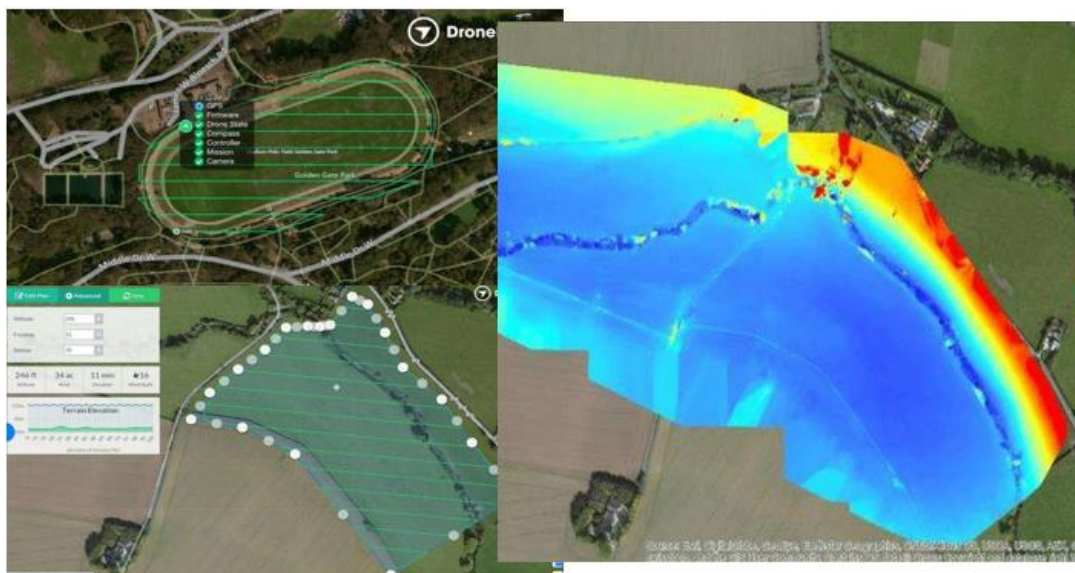


Рис. 7.2. Зображення, отримані у DroneDeploy

Можна отримати дані про дистанції, площі та обсяги. Також доступний аналіз висот та нормалізованого відносного індексу рослинності.

При використанні сайту DroneDeploy можливі:

- завантаження отриманих даних для подальшої обробки та отримання
- карток високої роздільної здатності;
- обробка заданих точок на поверхні для отримання високоточних карток поверхні, обмежених цими точками;
- експорт даних у необхідний користувачеві формат.

## Pix4D

Програма Pix4D дозволяє створювати об'ємні моделі об'єктів та карт після обробки зображень із літального апарату. Програма також дозволяє, зокрема, отримати точкову множину, цифрову модель поверхні, ландшафт, нормалізовані карти, карти з текстурованими поверхнями (рис. 7.3).

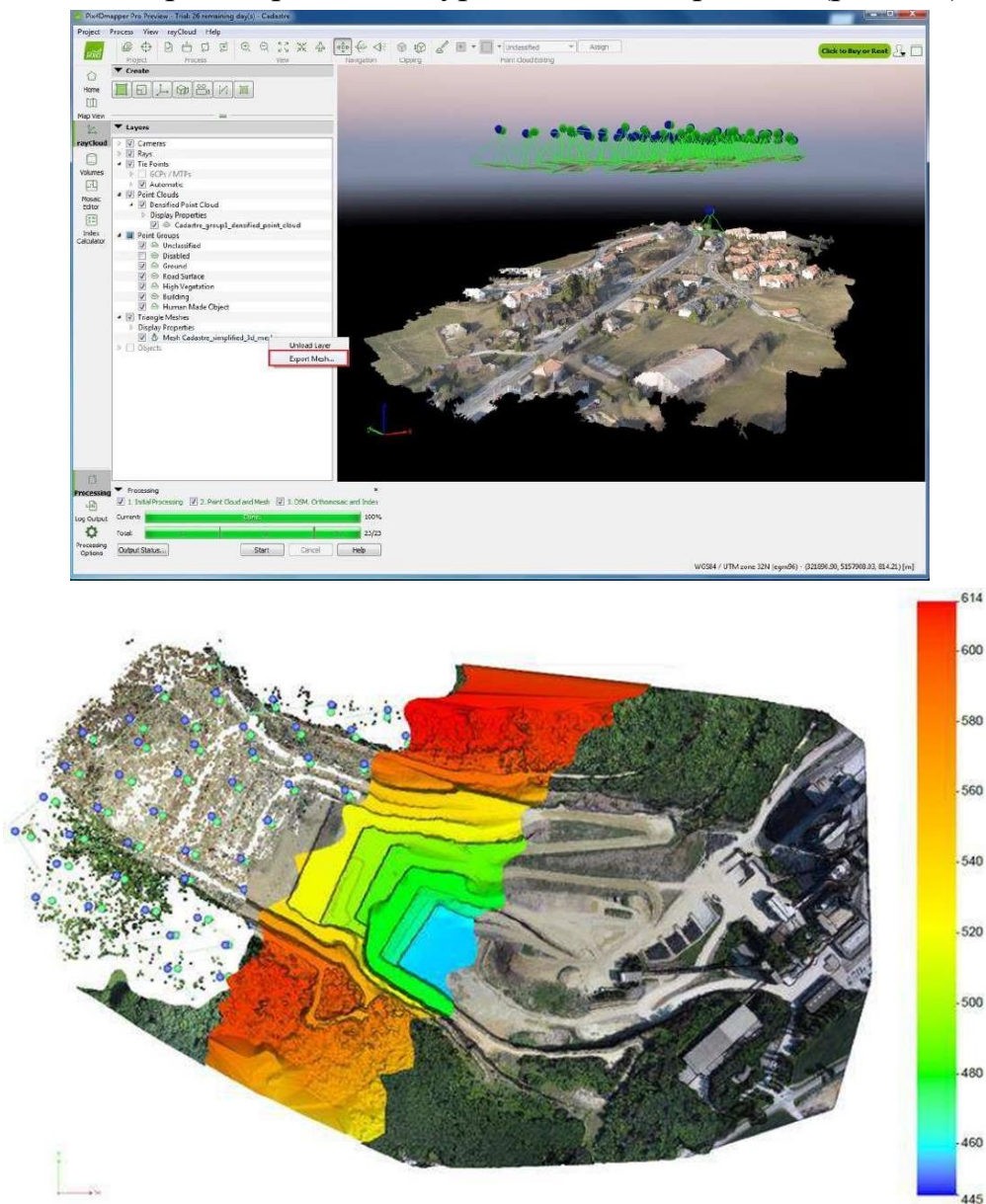


Рис. 7.3. Зображення, отримані у програмі Pix4D



Ключовими особливостями Pix4D є:

- Можливість отримання тривимірних моделей з точкового множини, де кожна точка несе як значення координат, а й колір;
- Цифрова поверхня, де можна отримати висоту кожної точки множини об'єкта, що складається з безлічі точок;
- карти високої роздільної здатності, де кожна точка спроектована на цифрову поверхню;
- Точний підрахунок обсягів поверхні, для отримання інформації, наприклад, про існуючі запаси матеріалів чи продукції;
- використання контурних ліній для позначення існуючих висот поверхні;
- генерація тривимірних об'єктів із використанням реалістичних текстурованих поверхонь;
- карта поверхні з урахуванням відбивних коефіцієнтів кожної точки поверхні;
- карта, яка враховує нормалізований відносний індекс рослинності (NDVI) та нормалізований відносний індекс активності рослинного покриву (NDRE);
- термограми, карти де кожна точка несе інформацію про температурі.

### **AutoDesk ReCap Pro**

Основна особливість цієї програми це робота з доповненою реальністю. Дозволяє створити об'ємну модель з фотографій або даних лазерного сканера. Після обробки інформації на виході виходять готові до використання у програмах автоматизованого проєктування зображення.

### **Maps Made Easy**

Програма Maps Made Easy дозволяє обробляти фотографії в об'ємні об'єкти або нормалізовані карти поверхні. Доступна хмарна обробка знімків (рис. 7.4).

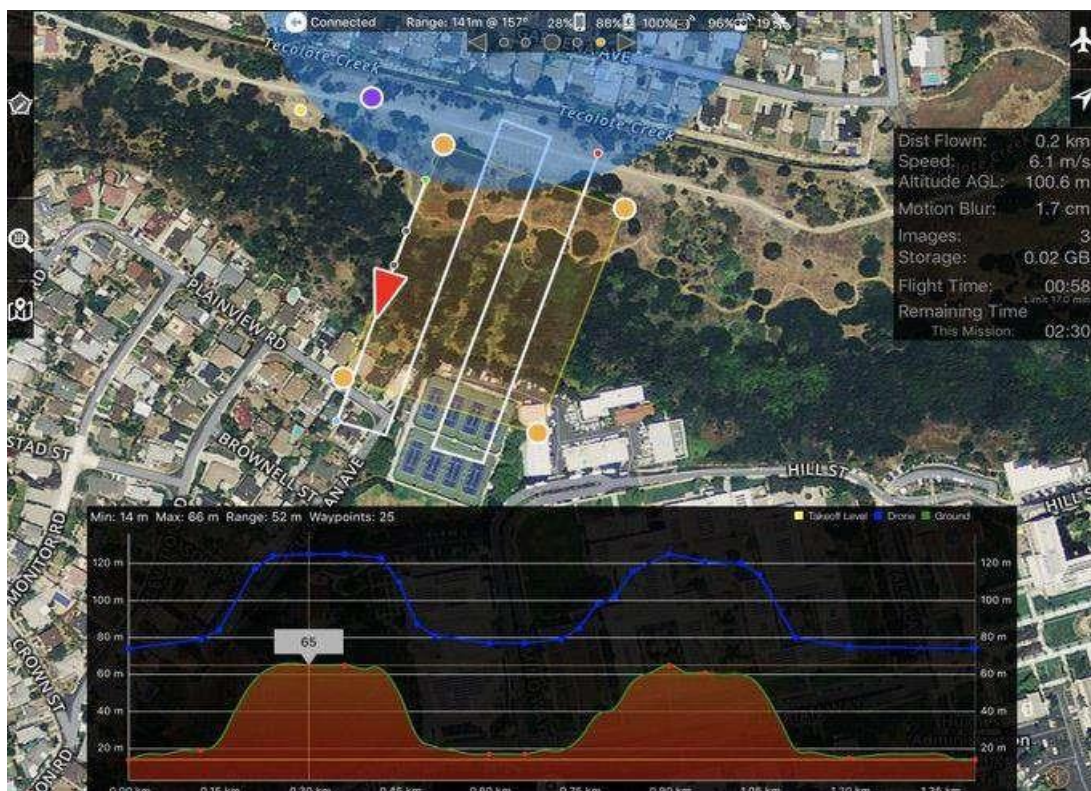


Рис. 7.4. Зображення, отримане у програмі Maps Made Easy

Для роботи з цією програмою, після отримання знімків, їх необхідно завантажити на сервер компанії, де вони будуть оброблені з використанням високопродуктивних комп'ютерів та програмного забезпечення.

Основними ключовими особливостями Maps Made Easy є:

- алгоритми програми спрямовані на створення максимально точної об'ємної моделі;
- карта, яка враховує нормалізований відносний індекс рослинності з анотаціями та каталогом;
- Ретроспектива досліджуваних об'єктів; той самий об'єкт знімається у різний час, що дозволяє оцінити динаміку контрольованого параметра на карті;
- повна обробка та генерація карт є витратним як по часу, і по споживанню ресурсів обчислювальної машини; отримані зображення можуть бути легко вбудовані в
- існуючі сторінки веб-сайтів.

### 3DF Zephyr

Програма 3DF Zephyr дозволяє відтворити об'ємну модель з наявних фотографій. Після обробки масиву даних доступний експорт до найбільш



поширених форматів даних та генерація відео. Процес реконструкції повністю автоматизовано.

### Open Drone Map

Open Drone Map – програмний комплекс, що складається з кількох програмних модулів, об'єднаних в одне ціле та службовець для обробки даних, отриманих з безпілотних літальних апаратів (рис. 7.5).

Після обробки даних можливе отримання:

- Безліч точок;
- Цифрової моделі поверхні;
- тривимірних об'єктів із використанням реалістичних
- текстурованих поверхонь;
- Нормалізованих поверхонь; – поверхонь із зазначенням висот.

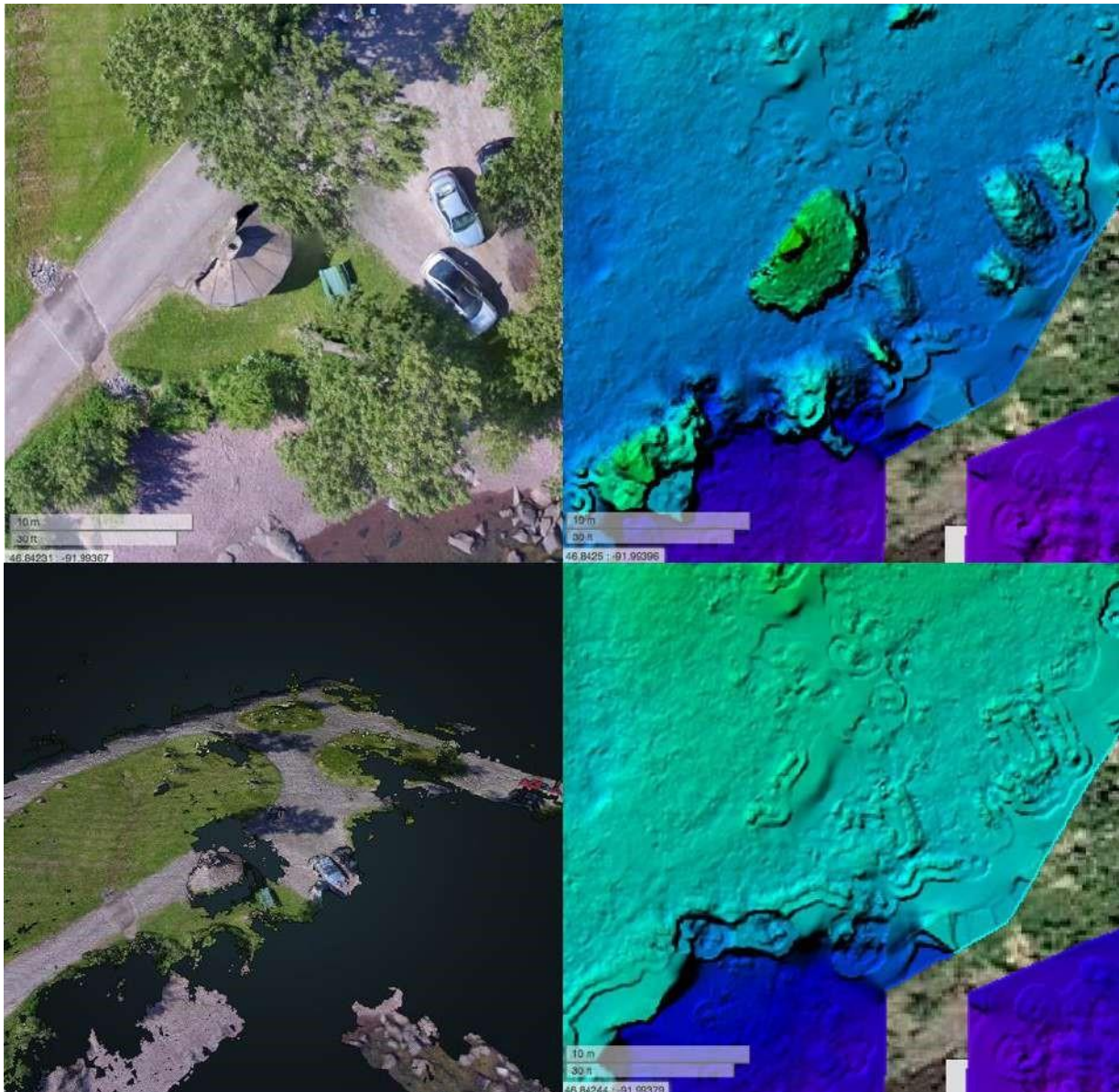


Рис. 7.5. Зображення, отримані у програмі Open Drone Map

Однією з важливих переваг даної програми є можливість встановлення у трьох варіантах:

- у режимі командного рядка, де всі обчислювальні ресурси машини йдуть безпосередньо на обробку даних, одержаних з літального апарату;
- установка, що ґрунтується на використанні інтернет-технологій;
- використання програмних інтерфейсів програми (API) для
- віддаленого доступу до необхідних функцій.

### **Autodesk 3D.**

Autodesk 3D разом складається з наступних програмних продуктів:

AutoCAD, що широко використовується для автоматизованого проєктування плоских та об'ємних об'єктів;

REVIT, що використовується для автоматизованого проєктування та реалізує принцип інформаційного моделювання будівель;

AutoCAD Civil 3D служить для проєктування об'єктів інфраструктури та призначений для проєктувальників лінійних споруд, землевпорядників;

AutoCAD Map 3D є картографічним програмним продуктом та призначений для планування та управління інфраструктурою (рис. 7.6).

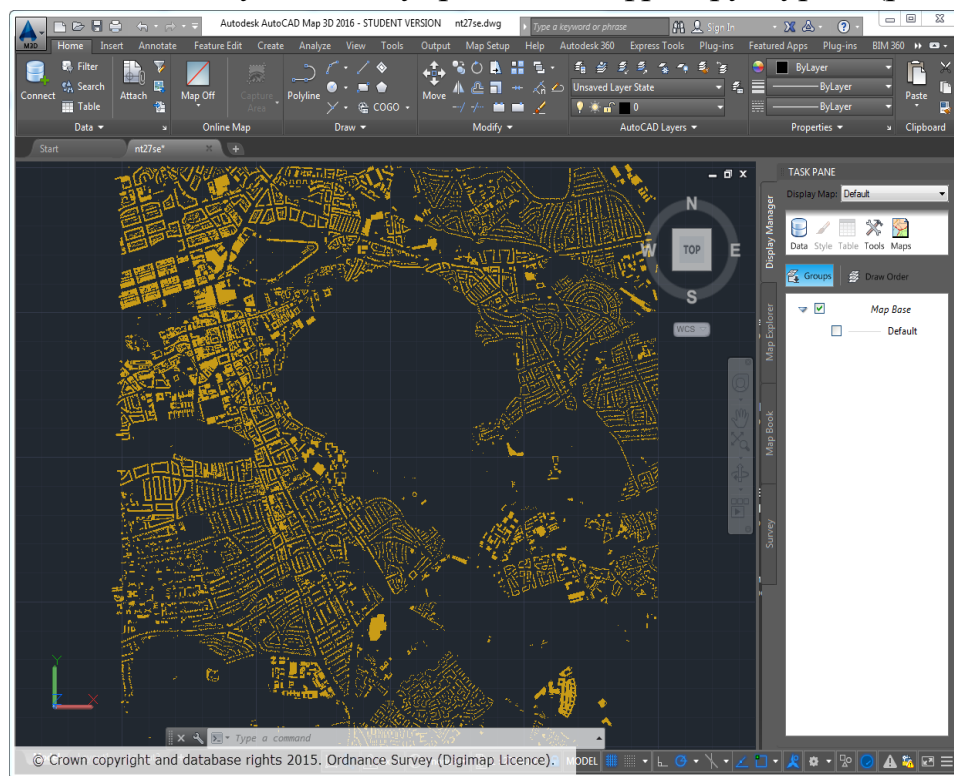
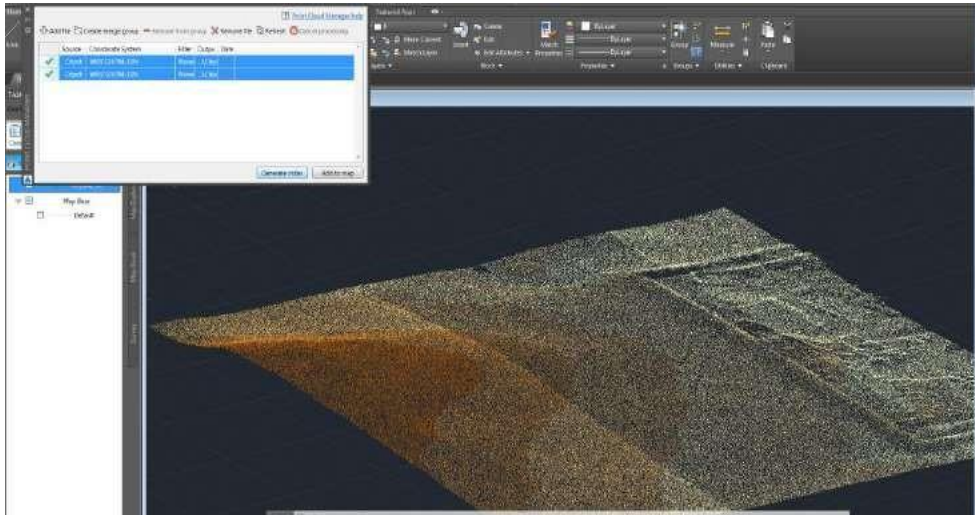


Рис. 7.6. Зображення, отримані у програмі AutoCAD Map 3D  
(див. також с. 101)



Закінчення. Рис. 7.6.

### **ESRI Drone2Map**

Дозволяє працювати з даними систем автоматизованого проєктування та геоінформаційними системами, що надходять з різних джерел. Використовуючи комплексні моделі систем газо- та електропостачання, водопроводу та каналізації, можливе впорядкування інформації про об'єкти. Інтеграція просторової інформації в базу даних уможливорює доступ до даних всім необхідним фахівцям.

ESRI Drone2Map розроблена насамперед для роботи з програмними продуктами компанії ESRI, зокрема з рішеннями у галузі ГІС – ArcGIS. Дозволяє створювати нормалізовані карти та об'ємні моделі, а також моделювати вид із різних кутів для подальшого використання в ArcGIS. Можливе накопичення даних про поверхню та їх аналіз.

Ряд літальних апаратів не дозволяють отримати точні дані про поверхню в необхідному обсязі відразу при першому прольоті. Після того як літальний апарат повернувся з завдання, починається автоматична попередня обробка знятого матеріалу і якщо з'ясується, що даних недостатньо, літальному апарату генерується польотне завдання в необхідну область для зняття даних, що відсутні. Попередня обробка дозволяє оцінити, чи достатньо даних для повної обробки.

Програма ESRI Drone2Map також використовується для технічного аудиту будівель, таких як: дамби, стільникові вежі, трубопроводи, вітрогенератори та ін. Отримані зображення нормалізуються і потім

спеціальним чином обробляються для отримання інформації на основі якої можна зробити висновок про технічний стан об'єкта, що досліджується.

**RECAP** – спеціалізований інструмент, призначений для створення тривимірної моделі за фотографіями та даними сканування.

Складається з двох модулів ReCap Studio та ReCap Photo.

**Precision Mapper & Viewer**

Precision Mapper & Viewer – хмарний програмний продукт для автоматизованої обробки даних, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів та призначений для генерації плоских та об'ємних моделей досліджуваних об'єктів.

Програма Precision Mapper & Viewer працює так:

- Збір даних за допомогою літальних апаратів;
- завантаження отриманих на сайт програми;
- управління даними;
- аналіз зображень інструментами на запит.

**Agisoft PhotoScan (Metashape).**

Agisoft PhotoScan – програмний продукт, що широко використовується для обробки даних, отриманих з безпілотних літальних апаратів і призначений для генерації плоских і об'ємних моделей досліджуваної поверхні (рис. 7.7). Agisoft PhotoScan дозволяє:

- фотограмметричну тріангуляцію;
- роботу з безліччю точок;
- Отримати карту висот;
- Нормалізувати отримані візуальні дані;
- Виконати різні геометричні вимірювання;
- працювати зі скриптами, написаними мовою Python;
- Обробку мультиспектральних зображень;
- Мережеву обробку зображень.
- Для розуміння вимог до комп'ютера на різних етапах обробки фотографій наведено табл. 7.2, 7.3 з приблизними параметрами по обсягу оперативної пам'яті



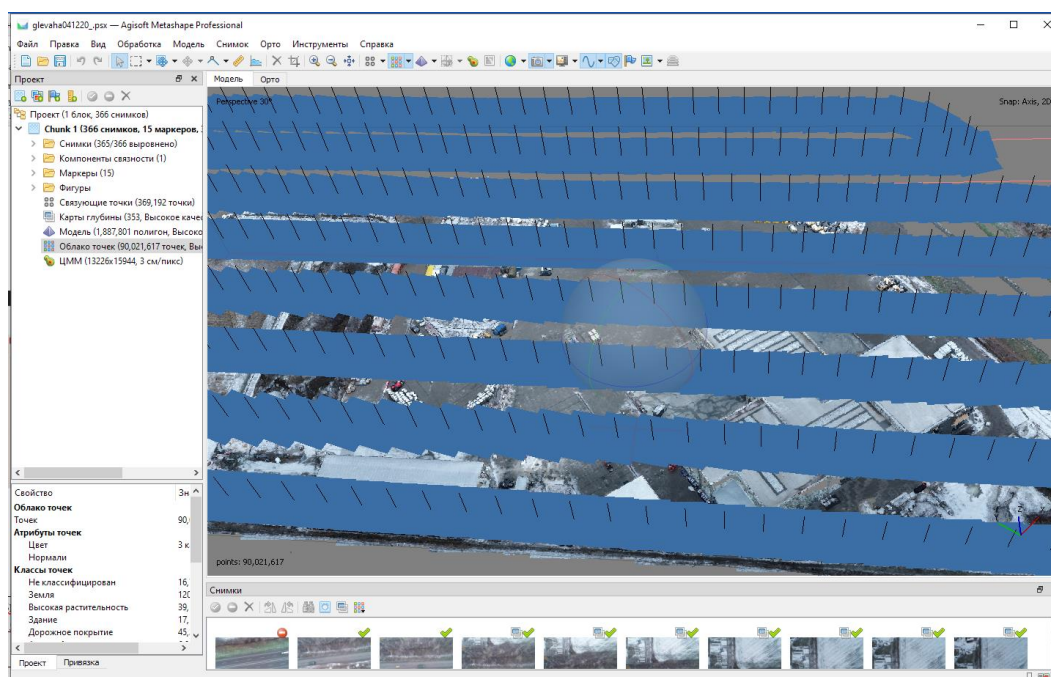


Рис. 7.7. Зображення, отримане у програмі Agisoft PhotoScan

Таблиця 7.2

**Споживання пам'яті для вирівнювання фотографій в Agisoft  
MetaShape Pro (роздільна здатність фотографії 12 мегапікселів)**

| Вирівнювання<br>фотографій | 100 фото | 200<br>фото | 500<br>фото | 1000<br>фото | 2000<br>фото | 5000<br>фото | 10000<br>фото |
|----------------------------|----------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Найнижча якість            | 25 Мб    | 50 Мб       | 125<br>Мб   | 250 Мб       | 500 Мб       | 1,25 Гб      | 2,5 Гб        |
| Низька якість              | 100 Мб   | 200 Мб      | 500<br>Мб   | 1 Гб         | 2 Гб         | 5 Гб         | 10 Гб         |
| Середня якість             | 400 Мб   | 800 Мб      | 2 Гб        | 4Гб          | 8 Гб         | 20 Гб        | 40 Гб         |
| Висока якість              | 1,6 Гб   | 3,2 Гб      | 8 Гб        | 16 Гб        | 32 Гб        | 80 Гб        | 160 Гб        |
| Надвисока якість           | 6,4 Гб   | 12,8 Гб     | 32 Гб       | 64 Гб        | 128 Гб       | 320 Гб       | 640 Гб        |

Таблиця 7.3

**Споживання пам'яті для побудови моделі в Agisoft MetaShape Pro  
(роздільна здатність фотографії 12 мегапікселів)**

| Модель побудови –<br>довільна | 20–50<br>фотографій | 100 фото         | 200 фото       | 500 фото      |
|-------------------------------|---------------------|------------------|----------------|---------------|
| Найнижча якість               | 100–300 Мб          | 150–450 Мб       | 300 Мб–1<br>Гб | 1–3 Гб        |
| Низька якість                 | 500 Мб–1,5 Гб       | 750 Мб–2,2<br>Гб | 1,5–4,5 Гб     | 4–12 Гб       |
| Середня якість                | 2–6 Гб              | 3–9 Гб           | 6–18 Гб        | 15–45 Гб      |
| Висока якість                 | 8–24 Гб             | 12–36 Гб         | 24–72 Гб       | 60–180 Гб     |
| Надвисока якість              | 32–96 Гб            | 48–144 Гб        | 96–288 Гб      | 240–720<br>Гб |

### **Запитання для самоперевірки**

1. Які найпопулярніші програми для SfM і обробки БПЛА-знімків?
2. Які функції надає Agisoft Metashape?
3. У чому особливість RealityCapture порівняно з іншими програмами?
4. Які переваги має Pix4D у польових умовах?
5. Як працює автоматичне вирівнювання знімків у різних програмах?
6. Які програми дозволяють комбінувати SfM і LiDAR?
7. Які формати експорту підтримуються більшістю програм?
8. Як здійснюється калібрування камери у Metashape?
9. Чи підтримує CloudCompare редагування хмар точок?
10. У яких випадках доцільно використовувати безкоштовне ПЗ?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Застосування БПЛА у військовій справі та аерозніманні [Текст] : монографія / В. М. Глотов [та ін.]. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2022. – 194 с.
2. James S. Aber, Irene Marzolff, Johannes B. Ries. Small-Format aerial. Photography principles, techniques and geoscience applications. - Amsterdam, The Netherlands, 2010. – 266 p.
3. Дорожинський О.Л. Основи фотограмметрії: підручник. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 214 с.
4. Сучасні безпілотні авіаційні комплекси [Текст] : навч. посіб. / Богуслаєв В. О. [та ін.]. – Запоріжжя : Мотор Січ, 2022. – 212 с.
5. Geo-MMS, платформа для роботи з фотограмметрією та лазерним скануванням [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.geo-mms.com>. – Назва з екрана.
6. DroneDeploy, інструменти для управління БПЛА та обробки аерофотоматеріалів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dronedeploy.com>. – Назва з екрана.
7. Pix4D, програмне забезпечення для обробки зображень з дронів та побудови 3D моделей. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pix4d.com>. – Назва з екрана.
8. Trimble Geospatial, геодезичні рішення та технології для роботи з БПЛА. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://geospatial.trimble.com>. – Назва з екрана.
9. Асоціація БПЛА України Інформація та підтримка щодо використання БПЛА у різних сферах, включаючи геодезію. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uav-ua.org>
10. DJI Terra, програмне забезпечення для обробки даних, зібраних за допомогою БПЛА. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dji.com/dji-terra>. – Назва з екрана.
11. Esri, платформа ГІС, що інтегрує дані з БПЛА для створення карт та аналізу територій. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.esri.com>. – Назва з екрана.

Навчальне видання

**МЕДВЕДСЬКИЙ** Юрій Вікторович

# **БПЛА В ІНЖЕНЕРНІЙ ГЕОДЕЗІЇ**

Конспект лекцій

Комп'ютерне верстання *А.П. Селівестрової*

Ум. друк. арк.6,04. Обл.-вид. арк. 6,5  
Електронний документ. Вид № 91/V-25

Виконавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури  
Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.