

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

Андрущак Юрій Дмитрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Виконання кадастрової зйомки водних об'єктів за допомогою
фотограмметрії БПЛА на прикладі ставка у м. Коломия Івано-Франківської
області.
(назва роботи)

Землеустрій та кадастр
(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

д. т. н. проф. Приходько Микола Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

м. Івано – Франківськ
2025р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітній рівень магістр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

« ____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Андрушак Юрій Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Виконання кадастрової зйомки водних об'єктів за допомогою фотограмметрії БПЛА на прикладі ставка у м. Коломия Івано-Франківської області

Керівник роботи

д. т. н. проф. Приходько Микола Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від " __ " _____ 2025 року № __

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики, матеріали польових досліджень

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

Теоретичні основи дослідження

Зона тестування, обладнання та планування польоту

Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3	д. г. н. проф. Приходько М.М.		

7.Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи дослідження		
2	Зона тестування, обладнання та планування польоту		
3	Результати дослідження		

Ю. **Студент** _____

Андрущак

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

Приходько

М.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Анотація

На сучасному етапі управління земельними ресурсами набуває вирішального значення для забезпечення сталого поступу територій.

Необхідність чіткого закріплення прав на землю передбачає використання точного інструментарію, де ключову роль відіграє кадастр.

В Україні, при виконанні кадастрових робіт, широкого застосування знаходять традиційні методи, такі як глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) та методи полярної зйомки.

Метою роботи є дослідження можливостей застосування технологій фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів для кадастрової зйомки, зокрема для точного визначення меж землекористувань та створення високодеталізованої тривимірної моделі місцевості.

Наукова новизна: Запропоновано підхід до оцінки точності отриманих даних за допомогою контрольних точок та порівняння з даними кадастрової карти, що дозволяє обґрунтувати доцільність впровадження цієї технології у практику землевпорядкування.

Практична цінність: Отримані ортофотоплани та 3D-моделі можуть бути використані для актуалізації кадастрових карт, виявлення порушень меж, ведення земельного моніторингу та планування використання територій.

Об'єкт дослідження: Система кадастрової зйомки земельних ділянок в Україні.

Предмет дослідження: Методика виконання кадастрової зйомки із застосуванням фотограмметрії на базі БПЛА та аналіз точності результатів, отриманих за допомогою цифрової обробки зображень (SfM) у порівнянні з даними кадастрової карти.

У межах магістерської роботи проведено кадастрову зйомку рибного ставу, розташованого неподалік Коломиї (Івано-Франківська область), з використанням фотограмметрії на основі БПЛА.

Ключові слова: Цифровий кадастр, GNSS/GPS, Землеуправління, Низьковартісні технології, Фотограмметрія, Просторове планування, Безпілотний літальний апарат

Abstract

At the present stage, land management is of crucial importance for ensuring sustainable development of territories.

The need for clear consolidation of land rights involves the use of accurate tools, where the cadastre plays a key role.

In Ukraine, when performing cadastral work, traditional methods such as global navigation satellite systems (GNSS) and polar surveying methods are widely used.

The aim of the work is to study the possibilities of applying photogrammetry technologies using unmanned aerial vehicles for cadastral surveying, in particular for accurately determining the boundaries of land uses and creating a highly detailed three-dimensional model of the terrain.

Scientific novelty: An approach to assessing the accuracy of the obtained data using control points and comparison with cadastral map data is proposed, which allows us to substantiate the feasibility of introducing this technology into land management practice.

Practical value: The obtained orthophotomaps and 3D models can be used to update cadastral maps, detect boundary violations, conduct land monitoring and plan land use.

Object of research: System of cadastral survey of land plots in Ukraine.
Subject of research: Methodology for performing cadastral survey using photogrammetry based on UAVs and analysis of the accuracy of the results obtained using digital image processing (SfM) in comparison with cadastral map data.

As part of the master's thesis, a cadastral survey of a fish pond located near Kolomyia (Ivano-Frankivsk region) was conducted using photogrammetry based on UAVs.

Keywords: Digital cadastre, GNSS/GPS, Land management, Low-cost technologies, Photogrammetry, Spatial planning, Unmanned aerial vehicle

ЗМІСТ

Вступ

1. Теоретичні основи дослідження

1.1 Якість точок на кадастрових картах

2. Зона тестування, обладнання та планування польоту

2.1 Обробка даних

2.2 Програмне забезпечення Agisoft Metashape Professional

2.2.1 Багатовидова стереореко́нструкція

2.2.2 Метод зв'язкового врівноваження

2.2.3 Обробка зображень та даних

2.2.4 Генерація 3D-моделей та геопросторових даних

2.2.5 Інструменти вимірювання та аналізу

2.2.6 Попередня обробка та імпорт даних

2.2.7 Вирівнювання фотографій та сканів

2.2.8 Побудова 3D-моделі

2.2.9 Застосування Agisoft Metashape Professional

2.2.10 Точність та якість результатів

3. Результати дослідження

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

На нинішньому етапі одним з ключових елементів успішного землевпорядкування є функціонування злагодженої системи управління земельними ресурсами.

Для впровадження у практику цієї системи необхідний точний, різнобічний та структурований механізм, що гарантує достовірний облік використання земель – таким механізмом виступає кадастр.

У національному контексті діяльність кадастрової системи все ще стикається з певними труднощами: значний обсяг даних має різне джерело походження та різний рівень якості.

Особливо це відчутно у кадастрових картах, котрі нерідко мають невідповідності до сучасних вимог щодо точності.

З огляду на це, виникає нагальна необхідність в актуалізації наявних картографічних даних.

Повна та достовірна інформація про межі земельних ділянок критично важлива для забезпечення ефективного управління земельними ресурсами.

Наразі в Україні при проведенні кадастрових зйомок переважно використовують перевірені часом традиційні методи геодезії, включаючи полярний метод, ортогональні вимірювання та GNSS технології.

Однак, на тлі поступової еволюції кадастрових систем у напрямку тривимірності, потенціал таких методів все частіше стає недостатнім.

Інформація, отримана з використанням традиційних способів, вже не відповідає сучасним вимогам щодо точності, швидкості обробки та обсягу даних.

До того ж, процеси актуалізації картографічних матеріалів за допомогою звичних технологій є повільними та потребують значних фінансових вкладень.

Це акцентує на важливості впровадження сучасних технологічних підходів.

Ключовою інновацією тут є використання фотограмметричних методів, що вже давно демонструють великий потенціал у сфері кадастру.

Питання використання аерофотограмметрії у кадастрових процесах широко висвітлювалося як в іноземних, так і у вітчизняних наукових публікаціях.

В минулому переважно мова йшла про традиційні аерофотознімальні технології, які в основному використовувалися для створення топографічних карт.

Незважаючи на це, фотограмметрія продовжує бути релевантною у контексті земельного обліку.

Різноманітні дослідження були присвячені встановленню меж землевласників, використовуючи великоформатні зображення, зокрема, отримані з супутників чи аерофотознімків з високою деталізацією.[20],[4]

Деякі роботи були присвячені автоматизованому визначенню меж земельних ділянок та оцінці їхньої продуктивності у порівнянні з ручним нанесенням контурів.

В той же час, деякі дослідники дійшли висновку, що традиційні методи фотограмметрії не повністю відповідають вимогам, які висуваються кадастровими завданнями.

Останнім часом фіксуємо значне зростання застосування аерознімання, яке проводять безпілотні літальні апарати (БПЛА), для збору просторових даних в контексті кадастрових робіт.

Такий метод отримав назву — фотограмметрія БПЛА.

Він набув широкого визнання в багатьох країнах, зокрема й в Україні.

У наукових дослідженнях вивчається використання ортофотозображень, створених за допомогою БПЛА, для точного

визначення меж земельних ділянок, а також аналізується точність даної методики.

Серед додаткових перспектив, які відкриває фотограмметрія з БПЛА, особливо виділяється використання стереовізуалізації.

Завдяки їй стає можливим ефективно працювати навіть у складних міських умовах, зокрема, в зонах з щільною забудовою.

Тривають активні дослідження в напрямку автоматичного визначення меж земельних ділянок на основі інформації, зібраної з безпілотників.

Суттєвою перевагою цих технологій є їх універсальність.

Окрім визначення просторових координат меж, вони також здатні генерувати великий масив інших даних.

Ці дані можуть знайти широке застосування для поглибленого аналізу в різноманітних суміжних областях знань.

Не зважаючи на поточні зусилля в Україні щодо оновлення кадастрових даних, ці роботи на даний момент стримуються через високу складність та значні фінансові інвестиції, пов'язані з традиційними підходами.

Для отримання сучасних і достовірних відомостей про використання земель, що відповідають вимогам XXI століття, виникає необхідність впровадження нових методів знімання та збору просторових даних.

Одним з багатообіцяючих напрямів є фотограмметрія з використанням безпілотних літальних апаратів.

У минулому аерофотозйомка традиційно виконувалася з літаків, що змушувало підніматися високо в небо, що негативно впливало на деталізацію знімків.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) відкривають новий шлях, дозволяючи здійснювати зйомку з меншої висоти, а отже, отримувати зображення з набагато більшою роздільною здатністю.

Це позитивно позначається на точності та сприяє суттєвій фінансовій економії.

Сьогодні дрони оснащені найновішими сенсорами, що дозволяє їм будувати тривимірні моделі об'єктів, значно прискорюючи процес кадастрових вимірювань і оптимізуючи бюджетні витрати.

У разі, якщо точність застосованих методів відповідатиме встановленим нормам, фотограмметрія з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стане ефективним, економічним та швидким інструментом для оновлення кадастрових відомостей.

Основною метою нашої магістерської роботи є дослідження методу фотограмметричної зйомки з використанням БПЛА на прикладі кадастрового обстеження земельної ділянки рибного ставу, що розташований поблизу міста Коломия в Івано-Франківській області.

1. Теоретичні основи дослідження

1.1 Якість точок на кадастрових картах

У складі кадастрової інформації зосереджена значна кількість різнорідних відомостей, що походять з різних джерел і варіюються щодо надійності.

З огляду на це, виникає потреба у системному підході до оцінювання їхньої якості.

Згідно з поточними нормативними актами, які регулюють здійснення знімальних робіт, для оцінки якості кадастрових карт визначено тільки один офіційний параметр – якість детальної точки, що позначається символом «Т».

Оцінювання якості визначеної точки базується на дослідженні її координат та точності просторового позиціонування.

Найважливішим показником точності просторового розміщення є середньоквадратична похибка координат (m_{xy}), яку обчислюють за допомогою математичного виразу (1).[20]

$$m_{xy} = \sqrt{0.5(m_x^2 + m_y^2)} \quad (1)$$

В даному випадку, значення m_{xy} розраховується, беручи до уваги середньоквадратичні похибки положення точки на осях координат x та y .

Відповідно, їх позначають як m_x і m_y .

Ці значення слугують показниками точності визначення координат об'єкта на площині.

Вони є визначальними чинниками для оцінювання якості геопросторової інформації.[17]

Кожному рівню точності, що відповідає конкретній детальній точці, відповідає певне значення допустимого середнього відхилення координат.

Це систематизовано в Таблиця 1.

Використання цього методу забезпечує єдину класифікацію кадастрових даних на основі їхньої точності.

Це також дає змогу об'єктивно оцінювати надійність отриманої інформації.[20]

Таблиця 1: Точність положення кожної точки

Код якості точки «Т»	Середня похибка координат
1	$m_{xy} = 0.08 \text{ м}$
2	$m_{xy} = 0.08 \text{ м}$
3	$m_{xy} = 0.13 \text{ м}$
4	$m_{xy} = 0.24 \text{ м}$
5	m_{xy} безвідмінності у точності

На кадастрових планах детальні точки, позначені кодами якості від «1» до «4», було визначено за допомогою цифрових геодезичних вимірювань, тобто шляхом встановлення їхніх координат.

Найвищу точність присвоєно коду якості «1», що відповідає точкам, отриманим методом GNSS-RTK з використанням постійної базової станції FRKV, розташованої в Івано-Франківську та належить до мережі SystemSolution.

Код якості «2» демонструє такий же рівень середньої похибки координат, як і попередній, проте джерело даних відрізняється: ці координати не вимірювалися безпосередньо в полі, а були взяті з наявних геодезичних документів.

Точки з кодом якості «3» були визначені виключно за допомогою традиційних наземних методів, використовуючи при цьому наявну систему геодезичних опорних пунктів.[20]

Код якості «2» демонструє такий же рівень середньої похибки координат, як і попередній, проте джерело даних відрізняється: ці координати не вимірювалися безпосередньо в полі, а були взяті з наявних геодезичних документів.

Точки з кодом якості «3» були визначені виключно за допомогою традиційних наземних методів, використовуючи при цьому наявну систему геодезичних опорних пунктів.

Враховуючи те, що підтверджених даних про точність цих точок немає, їх класифікують як умовні, а точність приблизно оцінюється в межах від 2 до 5 метрів.

Оцінювання точності кадастрових точок під час виконання нових вимірювань може здійснюватися різними способами.

Найбільш розповсюдженим з них є позиційний контроль, в ході якого перевіряється, чи середня квадратична похибка координат m_{xy} не перевищує допустиме значення точності u_{xy} . [20]

Для цього спочатку переозначаємо місцезнаходження точки, а потім обчислюємо різницю у позиції Δp між координатами наявної точки з кадастрової карти та координатами, які отримали в результаті нових вимірювань.

Розрахунок відбувається згідно з формулою (2).

$$\Delta p = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (2)$$

Похибка позиції Δp не повинна перевищувати значення Δp_{max} , що визначається формулою (3). [20]

$$\Delta p_{\max} = 1.5 u_{xy} \quad (3)$$

Де u_{xy} – це середньоквадратична похибка координат, яка залежить від коду якості точки.

Інакше кажучи, величина позиційної невідповідності Δp має бути не більше ніж 0,24 м для точок з кодом якості «3» та 0,14 м для точок, що мають код «1».

Аналогічний метод застосовується і до нових пунктів.

Але в цьому разі вимірювання треба повторити двічі, використовуючи різні умови або методи, аби забезпечити незалежність даних.

Саме цей підхід до оцінювання точності було покладено в основу даного дослідження: кадастрова карта була взята за еталон, а різниця у положенні Δp між точками на ній та координатами, одержаними внаслідок обробки фотограмметричних даних з БПЛА, були обчислені та зіставлені з граничними значеннями.[20],[18],[14]

2. Зона тестування, обладнання та планування польоту

Для апробації ефективності використання фотограмметрії з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у контексті кадастрових вимірювань було відібрано контрольну зону.

У ролі даної ділянки було використано рибне господарство, розміщене поблизу міста Коломия, що на Івано-Франківщині (дивись Рисунок 1).

Обрана місцевість демонструє типові риси для приміської території.



Рисунок 1 Територія дослідження

Загальна площа визначеної водойми сягає орієнтовно 25 000 м².

Раніше ставок переважно використовували для розведення риби, плюс він виконував рекреаційну функцію.

На сьогодні територія перебуває в занедбаному стані через нерегульованість питання власності, бо між співвласниками немає згоди щодо подальшого використання та відбудови об'єкта.

Для врегулювання юридичного статусу потрібно провести ряд геодезичних та землепорядних заходів.

Першочергово, уточнення наявної інформації є необхідним, оскільки конфігурація водойми суттєво змінилася з часу попередніх вимірювань.

Найбільш доцільним методом здобуття оновлених просторових даних в описаних умовах є застосування фотограмметрії з використанням безпілотного літального апарату, адже це дозволяє оператору працювати на безпечній відстані, уникаючи безпосереднього контакту з водною поверхнею та потенційного забруднення.

Аерозйомка місцевості була здійснена з використанням безпілотника моделі DJI Mavic Air 2.



Рисунок 2 Дрон DJI Mavic Air 2

Цей квадрокоптер має чотири гвинти, що дають змогу протистояти вітру зі швидкістю до 10,5 метрів за секунду.

Час польоту на одній батареї може становити до 34 хвилин, отже, з трьома акумуляторами загальний час перебування у повітрі може доходити до півтори години.

Згідно з українським законодавством, цей безпілотник відноситься до класу С1, головним обмеженням якого є заборона польотів над натовпами людей.

У той самий час, у міських умовах він може застосовуватися без великих обмежень, що є значною перевагою для здійснення кадастрових зйомок.

Квадрокоптер оснащений сенсором з розміром 1/2 дюйма, який дозволяє вести зйомку в двох варіантах: 12 Мп та 48 Мп.

Об'єктив має фокусну відстань у 24 мм, з кутом огляду, що сягає 84°.

За стабілізацію картинки відповідає механічний тривісний підвіс. Також DJI Mavic Air 2 має вбудований GPS-приймач та систему для уникнення зіткнень з об'єктами.

Через порівняно низьку вартість, дрон виглядає привабливим варіантом для застосування в кадастровому картографуванні.

Для приведення фотограмметричних даних, отриманих з апарата, до єдиної системи координат УСК2000, було необхідно провести визначення комплекту наземних опорних точок.

Їх було зафіксовано за допомогою методу GNSS-RTK, маючи зв'язок із постійною мережею GNSS SystemSolution.

Як GNSS-приймач було використано пристрій Leica GS08.



Рисунок 3 GNSS приймач Leica GS08

Зазначена точність визначення положення, одержана із використанням мережі SystemSolution, коливається в межах від 2 до 3 сантиметрів.

З метою здійснення фотограмметричних робіт, що стосуються досліджуваного об'єкта – межі рибного ставу, було обрано вісім наземних контрольних пунктів (див. Рисунок 4).



Рисунок 4 Конфігурація наземних контрольних точок

Окрім пунктів контролю на землі, окреслено додаткові точки меж кадастру, за допомогою яких визначається точність кадастрового плану.

Кадастрова карта є орієнтиром для перевірки результатів фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів.

Наземні контрольні точки було зафіксовано на стабільних та легко розпізнаваних елементах місцевості, наприклад, на кутах бетонних блоків (див. Рисунок 5).



Рисунок 5 Наземні контрольні точки на характерних довгострокових елементах місцевості

Для ефективного втілення фотограмметрії з використанням БПЛА, вирішальним є ретельне та обдумане планування траєкторії польоту.

Більшість території дослідження не мала обмежень для безпечного виконання польотів, тому було вирішено використовувати традиційний метод руху дрона - зйомку смугами, зорієнтувавши камеру строго вертикально вниз.

З метою досягнення максимальної деталізації, було обрано висоту польоту 20 метрів, що забезпечувало прогнозовану точність зйомки близько 0,6 см.

Перекриття зображень вздовж смуг було передбачено на рівні близько 80%, а поперечне перекриття між смугами - приблизно 40%.

Окремим викликом постали південні й західні частини водойми, де через наявність високих дерев традиційний метод польоту був небажаним з огляду на збільшений ризик інцидентів.

У цих місцях було вирішено здійснювати польоти вздовж берегової лінії зі спрямуванням камери під кутом 45° – 50° , виконуючи аерозйомку похилих зображень з перекриттям близько 80% на тій же висоті в 20 метрів.

Під час аерофотозйомок виникла також необхідність перевірки точності зібраних даних, якщо відсутнє автоматичне управління.

Для керування дроном використовувався додаток DJI Fly на смартфоні.

Цей застосунок не мав функцій, що дозволяють планувати маршрут або виконувати автономний політ за заданими параметрами

З огляду на це, для проведення фотозйомки не використовувалося спеціалізоване програмне забезпечення для планування.

Натомість пілот керував дроном вручну, прагнучи дотримуватись запланованих параметрів польоту.

2.1 Обробка даних

Отримані дані оброблялися відповідно до стандартної методології Structure-from-Motion з використанням програмного забезпечення Agisoft Metashape Professional.

Цей комерційний пакет забезпечує комплексний процес опрацювання, включаючи калібрування камери, географічне прив'язування та створення різноманітних результатів.

Оскільки камера не пройшла попереднє калібрування, було застосовано метод самокалібрування.

На першому кроці відбувалося завантаження зображень з їх вирівнюванням, що сприяло формуванню розрідженого скупчення точок.

Далі виконувалась процедура геоприв'язки, що включала в себе ідентифікацію та нанесення на фотографії наземних реперних точок (GCP).

Потім здійснювалась оптимізація усіх параметрів, в тому числі калібрувальних параметрів камери, разом з корекцією просторової взаємодії.

Після цього генерувалася щільна хмара точок, яка була основою для побудови тривимірної сітки (3D-моделі).

Після зведення сітки ставала доступною опція створення текстурованої поверхні або цифрової моделі рельєфу (ЦМР).

Ортофотоплан є ключовим фінальним продуктом для кадастрових вимірювань, який генерується на основі розбудованої тривимірної сітки.

Експортувавши ортофотоплан у форматах GeoTIFF або JPG, його можна інтегрувати в САD-програми для визначення координат деталізованих точок.

Координати також можливо обчислити безпосередньо в програмному забезпеченні Metashape, ідентифікуючи точки на низці фотографій, де їхні значення обчислюються на базі параметрів орієнтування зображень.

2.2 Програмне забезпечення Agisoft Metashape Professional

Agisoft Metashape Professional – один із ключових учасників на ринку програмного забезпечення для фотограмметрії, розроблений для перетворення цифрових зображень та даних лазерного сканування у деталізовані 3D-моделі та геопросторові дані.

Цей самостійний програмний продукт надає широкий набір інструментів для фотограмметричної обробки зображень, отриманих з різноманітних джерел, включно з аерофотозйомкою, зйомкою з близької відстані, супутниковими даними та мультиспектральними системами.

Програмний продукт Metashape Professional розроблено для численних цілей, зокрема у сфері ГІС, фіксації культурної спадщини, створення візуальних ефектів та для визначення параметрів об'єктів різних розмірів шляхом непрямих методів.

Завдяки великій обчислювальній силі, він легко справляється з великими обсягами даних, дозволяючи опрацьовувати більше 50 000 фотографій на локальному кластері, використовуючи розподілену обробку.

Також, проєкти можуть бути переміщені у хмарне сховище, що дає змогу зменшити витрати на придбання дорогого обладнання.

Agisoft Metashape Professional поєднує автоматизовані операції, які роблять його простим у використанні для початківців у фотограмметрії.

В той же час, програма пропонує розширені функції, на кшталт стереоскопічного режиму та повного контролю над точністю результатів, що робить її важливим інструментом для експертів.

Agisoft Metashape Professional спирається на прогресивні методи комп'ютерного зору та цифрової фотограмметрії, орієнтуючись на підходи "Структура з руху" (SfM) та "Багатовимірна стереореко́нструкція" (MVS), додатково залучаючи "Зв'язкове врівноваження" (BA).

Ці алгоритми взаємодіють, щоб трансформувати набір двовимірних зображень у високоточні тривимірні моделі та геопросторові дані.

Структура з руху (SfM) є фотограмметричним методом для визначення просторового розташування, що дозволяє обчислювати тривимірні структури, ґрунтуючись на серіях двовимірних зображень, які можуть узгоджуватись з локальними індикаторами руху.

Це центральне завдання, що розглядається у сфері комп'ютерного зору та візуального аналізу.

У застосуванні до Agisoft Metashape, SfM є фундаментом для автоматичного розпізнавання геометрії об'єкта, координат та орієнтації камер.

Це відрізняє його від класичної фотограмметрії, де ці дані часто вводились вручну.

Робочий цикл SfM в Metashape стартує з фази вирівнювання (Alignment).

На даному етапі програмний засіб відшукує ключові точки (особливості зображення) на картинках та зіставляє їх між собою, формуючи прив'язочні точки.

Для виявлення цих точок використовуються детектори, такі як SIFT (перетворення інваріантних ознак до масштабу) чи SURF (швидкі особливості).

Вони розпізнають кутові точки та інші унікальні деталі зображення.

Після знаходження відповідностей, програмне забезпечення визначає положення кожної камери та уточнює її параметри калібрування (внутрішні та зовнішні параметри орієнтації).

Результатом цього етапу є візуальне представлення у вигляді розрідженої хмари точок та даних про розташування камер.

Ця розріджена хмара точок слугує фундаментом для наступних етапів, які передбачають створення детальнішої тривимірної моделі.

SfM може бути виконаний двома основними способами: інкрементальним (коли камери додаються послідовно, одна за одною) або глобальним (коли позиції всіх камер визначаються одночасно).

У програмі Metashape, для обробки даних за методом Structure from Motion, алгоритм Align Photos використовує процедуру Bundle Adjustment.

Завдяки цьому Metashape здатний створювати хмари точок, що характеризуються щільністю та точністю, які співставні з даними, отриманими з використанням аерофотозйомки LiDAR або наземного сканування, але з істотно нижчими фінансовими витратами.

Це стає надзвичайно корисним у віддалених чи важкодоступних місцях, де застосування традиційних методів може бути ускладнене.

2.2.1 Багатовидова стереореко́нструкція

Після стадії SfM, що продукує розріджену хмару точок та калібровані положення камер, Agisoft Metashape переходить до етапу багатовидової стереореко́нструкції (MVS).

MVS – це метод, який застосовується для відновлення щільних тривимірних моделей, використовуючи множину зображень, відзнятих з різних кутів зору.

Він базується на стереовідповідності, тобто на пошуку ідентичних точок між двома зображеннями з метою визначення глибини.

Metashape використовує ці алгоритми для створення високодеталізованих щільних хмар точок.

Процес MVS в Metashape передбачає побудову щільної хмари точок.

Це досягається завдяки використанню обчислених параметрів орієнтації знімків та застосуванню щільного стереозіставлення, що дозволяє створити карти глибини.

Класичні методи MVS, зокрема PMVS (Patch-based Multi-view Stereo), працюють шляхом знаходження достовірних ключових точок.

Після цього відбувається розширення локальних планарних ділянок з метою отримання щільного покриття сцени.

Кінцевий етап – проведення перевірок на відповідність, зокрема, фотометричну та геометричну, для видалення помилкових відповідностей.

Фотометрична узгодженість оцінює схожість зовнішнього вигляду ділянки на різних знімках.

Натомість геометрична узгодженість перевіряє відповідність з епіпольярними обмеженнями.

Сучасні методи у MVS, в тому числі ті, що використовують глибоке навчання, як MVSNet, застосовують диференційовану гомографію, щоб вирівняти карти характеристик з різних зображень до загальної референтної точки огляду.

Цей процес є ключовим для формування об'єму витрат, який відіграє вирішальну роль у визначенні глибини.

Metashape включає ці передові алгоритми, що дозволяє створювати докладні та точні 3D-реконструкції, навіть працюючи з проблемними сценами, гарантуючи формування щільних хмар точок з високою якістю.

2.2.2 Метод зв'язкового врівноваження

Метод зв'язаного врівноваження (Bundle Adjustment - BA) - ключовий етап обробки фотограмметричних даних, зокрема у Agisoft Metashape Professional.

Він включає одночасне уточнення координат тривимірних об'єктів, що визначають структуру простору, а також параметрів зовнішньої та внутрішньої орієнтації камер, які використовувалися для отримання зображень.

Назва "зв'язане врівноваження" походить від геометричних пучків світла, які виходять з кожної 3D-точки та сходяться у оптичному центрі кожної камери; ці пучки коригуються оптимальним чином, згідно з критерієм оптимізації, що враховує відповідні проекції всіх точок на зображеннях.

Bundle Adjustment (BA) майже завжди є фінальним етапом в алгоритмах 3D-реконструкції, які спираються на ключові точки.

Основна ціль BA - звести до мінімуму похибку репроекції, що виникає між координатами спостережених та спроектованих на зображення точок.

Ця похибка виражається як сума квадратів значної кількості нелінійних, дійсних функцій.

Досягнення мінімізації відбувається через застосування нелінійних алгоритмів найменших квадратів, серед яких виділяється метод Левенберга-Марквардта, відомий своєю ефективністю та швидкістю збіжності.

У робочому процесі Agisoft Metashape, BBA є критичним елементом етапу вирівнювання.

Його також називають Bundle Block Adjustment, він вдосконалює початкові результати оцінки структури сцени та параметрів камери, отримані під час етапу SfM.

Він виправляє неточності, що виникли під час первинного відновлення об'єкту.

Переваги застосування BBA включають значне підвищення точності оцінки розташування камер та 3D-реконструкції, забезпечення відповідності між розташуваннями камер та 3D-точками, а також стійкість до аномалій та шумів у вихідних даних.

Це дозволяє Metashape формувати надзвичайно детальні та реалістичні 3D-моделі, що критично важливо для професійного застосування.

Agisoft Metashape Professional володіє розширеним набором інструментів та функцій, що гарантують повноцінний робочий процес для фотограмметричної обробки та отримання високоточних просторових даних.

2.2.3 Обробка зображень та даних

Програмне забезпечення відрізняється всебічною підтримкою різноманітних типів вхідних даних, що надає йому вражаючу гнучкість.

Воно без проблем обробляє зображення з RGB, тепловізійних чи мультиспектральних камер, включно з тими, що інтегровані у багатокамерні системи, а також зі сферичних і циліндричних камер.

Завдяки цьому користувачі можуть вільно працювати з даними, отриманими з найрізноманітніших джерел, таких як БПЛА, портативні камери та навіть супутники.

Крім того, Metashape Professional передбачає інтеграцію та обробку даних лазерного сканування (LiDAR), об'єднуючи інформацію з LiDAR та камер в єдиному проекті.

Підтримуються як структуровані наземні, так і неструктуровані аеролазерні скани, з повним збереженням атрибутів точок.

Для супутникових зображень передбачена обробка панхроматичних і мультиспектральних знімків з використанням даних Rational Polynomial Coefficients (RPC).

Програмне забезпечення також надає можливість вилучення кадрів з відео для подальшої 3D-реконструкції.

Критичним є автоматизоване визначення якості зображень через різкість, що дає змогу відкинути знімки з низькою якістю, звільняючи їх від подальшої обробки.

У контексті мультиспектральних даних, Metashape функціонує з багатоканальними TIFF, багат шаровими TIFF та одноканальними TIFF файлами, сумісними з камерами MicaSense, Parrot і DJI.

Це надає гнучкість вибору основного каналу та обчислення вегетаційних індексів.

Радіометричне калібрування, що має вирішальне значення для точного аналізу мультиспектральних даних, реалізується шляхом використання калібрувальних панелей, сонячних датчиків, або їх комбінації.

Такий підхід гарантує отримання достовірних значень відбивної здатності.

2.2.4 Генерація 3D-моделей та геопросторових даних

Agisoft Metashape Professional – це надзвичайно ефективний засіб, що дозволяє формувати велику кількість тривимірних моделей і геопросторових даних:

- **Щільні хмари точок:** Програмне забезпечення дозволяє генерувати неймовірно точні щільні хмари точок, використовуючи обчислені параметри орієнтації знімків і щільне стерео-зіставлення.

Такі хмари точок можливо автоматично або ж вручну класифікувати на семантичні класи (наприклад, земля, рослинність, будівлі, лінії електропередач), також можливе їх фільтрування для підвищення якості.

- **Текстуровані полігональні моделі:** Metashape забезпечує створення фотореалістичних, деталізованих, текстурованих 3D-моделей.

Для великих проєктів, як, наприклад, моделювання міст, програма може генерувати ієрархічні тайловані моделі. Це гарантує швидку візуалізацію і плавну навігацію, зберігаючи при цьому первісну роздільну здатність знімків для текстурування.

- **Цифрові моделі місцевості (ЦММ/ЦМР):** Програма дає можливість будувати 2.5D моделі поверхні, оформлені як регулярна сітка з інформацією про висоти.

Metashape здатен формувати як цифрові моделі поверхні (DSM), куди включаються об'єкти над землею, так і цифрові моделі місцевості (DTM), які відображають лише відкриту поверхню.

Вбудовані інструменти для редагування ЦММ та генерації горизонталей.

- **Геоприв'язані ортофотоплани:** Metashape формує справжні ортофотоплани, безшовно склеюючи вихідні зображення, спроектовані на об'єктну поверхню.

Редагування ліній склеювання та функція паншарпенінгу (підсилення різкості) допомагають отримати кращі візуальні результати.

- **Підтримка систем координат і геоприв'язки:** Програма надає повний контроль над параметрами калібрування камери та реалізує геоприв'язку моделей. Використання наземних контрольних точок (GCPs), даних RTK/PPK та GPS-метаданих гарантує високу точність геоприв'язаних даних.

2.2.5 Інструменти вимірювання та аналізу

Metashape Professional надає сукупність вбудованих засобів для скрупкульозних вимірювань та глибинного аналізу просторової інформації:

- **Вимірювання:** За допомогою функціоналу програми користувачі можуть здійснювати вимірювання площ, відстаней та об'ємів безпосередньо на тривимірних моделях та цифрових моделях місцевості. Цей функціонал є особливо корисним у інженерних, будівельних та гірничодобувних проектах.
- **Обчислення вегетаційних індексів:** Для роботи з мультиспектральними даними програмне забезпечення надає можливість обчислення різноманітних індексів рослинності, таких

як NDVI (Нормалізований різницевий вегетаційний індекс). Це надзвичайно важливо для точного сільського господарства та екологічного моніторингу.

- **Ідентифікація ліній електропередач і класифікація хмар точок:** Metashape забезпечує автоматичне виявлення ліній електропередач та класифікацію щільних хмар точок, що значно спрощує аналіз інфраструктури та генерацію детальних карт.
- **Стереоскопічний режим і векторизація:** Програма підтримує стереоскопічний режим, що дозволяє експертам виконувати прецизійну векторизацію об'єктів та вимірювання з повним контролем над точністю отриманих даних.

Agisoft Metashape Professional розроблено задля оптимізації робочого процесу та надання широких можливостей:

- **Пакетна обробка та Python-скрипти:** Програма дозволяє обробляти дані партіями та забезпечує розширену автоматизацію за допомогою Python-скриптів.

Це дозволяє користувачам створювати власні алгоритми роботи та інтегрувати Metashape в більш масштабні системи ГІС і САД.

- **Розподілена та хмарна обробка:** Для опрацювання надвеликих обсягів даних (більше 50 000 фото) Metashape пропонує функцію розподіленої обробки, яка дозволяє використовувати обчислювальні ресурси кількох комп'ютерів у локальній мережі.

Також проекти можуть бути передані в хмарне сховище через Agisoft Cloud, що зменшує потребу в значних витратах на обладнання та забезпечує доступ до всіх параметрів обробки.

- **Зрозумілий інтерфейс та повний контроль:** Незважаючи на складність, Metashape має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який робить роботу простішою.

Разом з тим, він дає професіоналам повний контроль над кожним етапом обробки, дозволяючи точно налаштовувати параметри для досягнення оптимальних результатів.

- **Сумісність з ОС:** Програма є крос-платформною та підтримує операційні системи Windows, macOS та Linux.

Стандартний робочий цикл обробки даних у Agisoft Metashape Professional поділяється на три основні етапи: вирівнювання знімків, побудова 3D-моделі поверхні та формування ортофотоплану.

Кожен етап включає в себе комплекс піднастроек і опцій, які дають змогу тонко налаштувати процес під унікальні вимоги кожного окремого проекту.

2.2.6 Попередня обробка та імпорт даних

Першим кроком у Metashape є створення та збереження файлу проекту.

Після цього користувач завантажує фотографії, взяті з різних джерел: безпілотників, фотоапаратів, мультиспектральних систем або навіть з відео, розбиваючи його на окремі кадри.

Зображення об'єднуються у "чанки" (chunks), що слугують основними блоками для обробки.

Вони можуть групуватися як вручну, так і автоматично – на основі калібрувальних даних або часу зйомки.

Наступний ключовий етап - маскуванню фото.

Хоча це необов'язково, такий підхід настійно рекомендується, оскільки дозволяє виключити зайві елементи (небо, рухомі об'єкти, фон), значно прискорюючи процес обробки та підвищуючи якість фінальної моделі.

Для маскуваннн використовують рiзнi iнструменти: прямокутне видiлення, розумнi ножицi або "чарiвну паличку".

2.2.7 Вирiвнювання фотографiй та сканiв

Етап вирiвнювання фотографiй (Align Photos) вiдкриває собою першу важливу сходинку в процесi 3D-моделювання.

Вiн охоплює аеротриангуляцiю (АТ) та пов'язане збалансування (ВВА).

На цьому етапi Metashape iдентифiкує ключовi точки на фотографiях та здiйснює iхнє зiставлення, утворюючи опорнi точки (tie points).

Програма також визначає розташування кожної камери та корегує параметри її калiбрування (внутрiшнi та зовнiшнi параметри орієнтацiї). Результатом цих манiпуляцiй стає розрiджена хмара точок та набiр позицiй камер.

Користувач має можливiсть регулювати параметри вирiвнювання, наприклад, "Точнiсть" (Accuracy: Найвища, Висока, Середня, Низька, Найнижча), що впливає на деталiзацiю обробки зображень, та "Загальний попереднiй вибiр" (Generic Preselection), котрий здатний прискорити процес, але iнодi призводить до неможливостi вирiвнювання деяких фото.

Додатково доступнi розширенi параметри, зокрема лiмiти ключових точок (Key point limit) та точок прив'язки (Tie point limit), а також функцiя використання масок для прив'язочних точок.

Якщо проєкт мiстить данi LiDAR, сканування можна вирiвнювати мiж собою та з отриманими зображеннями.

Коли вирiвнювання фотографiй успiшне, вiдбувається генерацiя щiльної хмари точок (Build Dense Cloud).

Цей етап включає створення детальної хмари точок, використовуючи обчислені параметри орієнтації зображень та алгоритми щільного стерео-зіставлення для обчислення карт глибини.

Щільна хмара точок відрізняється значно більшою щільністю, ніж розріджена, що забезпечує набагато детальніше та точніше 3D-зображення об'єкта або сцени.

Користувач може вибрати джерело даних (карти глибини, модель) та налаштувати параметри якості (Quality), а також режими фільтрації глибини (Depth filtering modes: Mild, Aggressive, Moderate, Disabled), що впливають на щільність та чіткість хмари точок.

Ключовою функцією є здатність автоматичного або ручного розподілу точок на семантичні категорії, наприклад, земля, рослинність, споруди, лінії електропередач.

Завдяки цьому можна відсіювати непотрібні об'єкти та отримувати точніші моделі місцевості.

2.2.8 Побудова 3D-моделі

На основі щільної хмари точок чи карт глибини, програмне забезпечення Agisoft Metashape створює полігональну модель (сітку) об'єкта або простору (Build Model).

Отриману модель можна доповнити текстурами, що дозволяє відтворити фотореалістичну цифрову копію об'єкта.

Для створення моделі потрібно визначити джерело даних (опорні точки, хмара точок, дані лазерного сканування, карти глибини), тип поверхні (довільна, поле висот) та параметри якості та кількості граней.

Для масштабних проєктів Metashape здатний генерувати «блокові моделі» або «тайлові моделі» (Build Tiled Model).

Вони формують ієрархічні тайли, що забезпечує швидке відображення та плавне пересування по моделі, зберігаючи при цьому оригінальну роздільну здатність зображень для накладання текстур.

Такий підхід забезпечує ефективну роботу з великими територіями, наприклад, під час моделювання міських районів.

Цифрова модель рельєфу (ЦМР), або цифрова модель місцевості (ЦММ) — це зображення поверхні, що виражається в двох з половиною вимірах, представлене як регулярна сітка, де кожна точка має свою висоту.

Програма Metashape може формувати такі моделі, використовуючи хмари точок, карти глибин або ж інші джерела даних.

Суттєвою характеристикою є можливість створення як Digital Surface Model (DSM), де враховуються усі об'єкти, що є на поверхні (будинки, рослини), так і Digital Terrain Model (DTM), що відображає виключно відкриту земну поверхню.

Щоб перетворити DSM на DTM, потрібно відфільтрувати "неземні" точки. Часто це потребує ручного втручання, хоча в комерційних програмах вже є автоматизовані алгоритми фільтрації.

Софт також пропонує інструменти для редагування ЦМР та побудови горизонталей.

Третій етап – це створення ортофотоплану (Build Orthomosaic).

Ортофотоплан – це єдине зображення, отримане з'єднанням вихідних фото, спроектованих на поверхню (ЦМР чи 3D-модель) на основі відомих параметрів орієнтації, як внутрішніх, так і зовнішніх.

Це допомагає прибрати геометричні викривлення, які виникають через рельєф та перспективу камери.

Отже, ортофотоплан стає прив'язаним до місцевості, що робить його корисним як базовий шар для карт та подальшого аналізу.

Користувач може налаштовувати різні параметри, наприклад, тип проекції (географічна, планарна, циліндрична), поверхню для проектування, спосіб з'єднання (Mosaic, Average, Disabled), покращувати лінії склеювання та заповнювати прогалини.

Функція паншарпенінгу (Pansharpen Orthomosaic) підвищує чіткість ортофотоплану.

Для мультиспектральних зображень, ортофотоплан може відображати індекси вегетації, такі як NDVI, що є дуже корисним у сільському господарстві.

Agisoft Metashape Professional відкриває двері для експорту створених 3D-творінь, хмар точок, цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та ортофотопланів, використовуючи широку палітру загальноживаних форматів для 3D та ГІС.

Це забезпечує просту інтеграцію з різними програмами та платформами, що є ключовим аспектом для професійного застосування.

Серед підтримуваних форматів: OBJ, FBX, 3DS для 3D-моделей; LAS, LAZ, PLY, XYZ, E57, DXF для хмар точок; GeoTIFF для ортофотопланів і ЦМР, та PDF для 3D-моделей та звітів.

Це дає гнучкість у виборі формату залежно від потреб конкретного проекту.

До того ж, програма надає змогу експортувати дані калібрування камер та параметри орієнтації в різноманітних форматах, таких як Agisoft XML, Bundler, CHAN, Maya ASCII.

Це надзвичайно корисно для більш тонкого налаштування та подальшого опрацювання даних.

Додатково, користувачі можуть скористатися функцією прямого завантаження хмар точок на онлайн-платформи, як-от 4DMapper, Cesium, PointBox, PointScene і Sketchfab, що робить процес обміну та візуалізації даних ще зручнішим.

2.2.9 Застосування Agisoft Metashape Professional

Agisoft Metashape Professional – це багатофункціональний інструмент, який активно використовується в різних професійних і наукових сферах, адже він майстерно трансформує цифрові зображення у надточні 3D-моделі й геопросторові дані.

Найбільш поширене застосування Metashape – це картографування за допомогою безпілотників та аерофотозйомка.

Геодезисти застосовують дрони для збору аерофотознімків з перекриттям, які Metashape перетворює на високоякісні ортофотоплани, тривимірні моделі місцевості (ЦМР та ЦММ), лінії горизонталей та відомості про висоти.

Ці дані є надзвичайно важливими для землевпорядкування, сільського господарства, будівництва та видобутку корисних копалин, сприяючи оцінці рельєфу, розрахунку об'ємів і відслідковуванню змін у часі.

Здібність програмного забезпечення відтворювати переконливі цифрові моделі висот і прив'язані до місцевості мапи робить його незамінним помічником для професіоналів у суміжних галузях.

У царині археології та фіксації культурної спадщини, Metashape виступає інструментом для формування деталізованих 3D-моделей місць розкопок, давніх будівель та історичних артефактів.

Ця цифрова консервація полегшує збереження тендітної спадщини та дозволяє проводити аналіз на відстані, уникаючи фізичного втручання.

3D-реконструкції знаходять застосування у наукових статтях та музейних експозиціях, забезпечуючи доступ до докладних візуальних даних для дослідників та всіх охочих.

В архітектурі, інженерії та будівництві (AEC) Metashape використовують для створення моделей "як зведено" та документування перебігу будівельних проєктів.

Фахівці мають змогу вимірювати відстані та об'єми з тривимірних моделей, отримувати 3D-скани для планування реконструкцій і поєднувати ці дані з робочими процесами CAD та BIM.

Такий підхід особливо корисний для створення докладних візуальних документів, що усуває потребу в дорогому обладнанні LiDAR.

Дослідники та екологи-інженери застосовують Metashape для моніторингу різноманітних екосистем, включаючи ліси, прибережні зони та льодовики.

Завдяки опрацюванню зображень з безпілотників або даних часових рядів, програмне забезпечення дозволяє відстежувати явища, як-от ерозія, вирубування лісів, небезпека повеней та зміни місць існування з сантиметровою точністю.

У точному землеробстві Metashape інтегрується з дронами та мультиспектральними камерами для формування вегетаційних індексів, таких як NDVI.

Ці дані допомагають виявляти проблеми зі здоров'ям культур на ранніх стадіях, оптимізувати полив та внесення добрив, а також вимірювати висоту рослин і покрив крони, що, зі свого боку, підвищує урожайність і сприяє більш сталому сільському господарству.

2.2.10 Точність та якість результатів

Agisoft Metashape Professional визнаний своєю здатністю відтворювати надзвичайно точні та деталізовані моделі, що є ключовим фактором для використання у наукових дослідженнях та професійній діяльності.

Точність результатів фотограмметрії, насамперед цифрових моделей рельєфу (ЦМР), вимірюється через середньоквадратичну помилку (RMSE), відносно наземної роздільної здатності (GSD).

На рівнинних територіях характерний горизонтальний показник RMSE коливається від 1 до $3 \times \text{GSD}$, а вертикальний показник знаходиться в межах від 1 до $4.5 \times \text{GSD}$.

Якщо мова йде про складний рельєф, горизонтальний RMSE варіюється від 1 до $7 \times \text{GSD}$, тоді як вертикальний показник коливається в межах від 1.5 до $5 \times \text{GSD}$.

Представлені дані демонструють здатність Metashape забезпечувати високу точність, особливо під час оптимізації параметрів фотограмметричного процесу.

На точність та загальну якість отриманих даних впливає ціла низка факторів:

- **Особливості місцевості та довкілля:** Габарити та форма місцевості, тип рослинного покриву (наприклад, густа рослинність може зменшувати точність у вертикальній площині), рівень освітлення та контрастність об'єктів, що фіксуються.
- **Використане обладнання БПЛА для збору даних:** Тип безпілотної літака (літак або мультикоптер), характеристики камери та її калібрування (доцільно виконувати самокалібрування або попереднє калібрування для корекції спотворень об'єктива), а також наявність геодезичного GNSS/RTK приймача.
- **Налаштування зйомки:** Висота польоту (оптимально 70-150 м), перекриття зображень (бажано 70-90% фронтального та 60-80% бічного перекриття), швидкість руху БПЛА, напрямок польотних ліній та конфігурація камери (інтегрування похилих зображень сприяє покращенню точності).

- **Наземні контрольні точки (НКТ) та контрольні точки (КТ):** НКТ є критичними для географічної прив'язки та підвищення точності параметрів камери.

Їхня кількість (щонайменше 5, або 2-4 на кожні 100 зображень) та розташування (по кутах і в центрі території, що вивчається) значно впливають на остаточну точність.

КТ використовуються для оцінки якості отриманих результатів.

- **Методи та алгоритми SfM:** Вибір фотограмметричного програмного забезпечення, якість вирівнювання фотографій і побудова щільної хмари точок, а також ефективність фільтрації земної поверхні.

Порівняльні аналізи демонструють, що Agisoft Metashape Professional забезпечує значну точність, хоча певні конкуренти можуть випереджати його в окремих аспектах.

Скажімо, в дослідженні, де порівнювали з Pix4Dmapper та 3DF Zephyr Aerial, Pix4Dmapper виявився точнішим у аеротриангуляції (5.8 см проти 8.93 см у Metashape) та створенні ортофото (0.075 м проти 0.11 м).

Проте, Metashape визнали більш універсальним та комфортним у використанні, а також він показав чудові показники точності та деталізації моделей, особливо у завданнях, де потрібні висока прецизійність і контроль над складними формами.

З точки зору щільності хмар точок, 3DF Zephyr Aerial сформував найгустішу хмару (5.17 млн точок), тоді як Metashape згенерував 2.88 млн точок.

Час обробки також має велике значення: Pix4Dmapper продемонстрував найшвидший результат

Metashape витратив 6.49 год, а 3DF Zephyr Aerial – 10.30 год.

Рінок фотограмметричного ПЗ дуже конкурентний, і Agisoft Metashape Professional посідає на ньому помітне місце.

Порівнюючи його з ключовими конкурентами, як-от Pix4Dmapper та RealityCapture, можна краще зрозуміти його сильні сторони та місце на ринку.

Agisoft Metashape та Pix4Dmapper - два найпоширеніші рішення для 3D-моделювання та картографування з використанням дронів.

Відмінності між ними диктують сферу застосування кожного з програмних продуктів:

- **Сфери застосування:** Metashape вважається оптимальним рішенням для наукових досліджень, збереження культурної спадщини, а також у випадках, коли потрібна максимальна точність і опрацювання складних геометричних об'єктів.
Pix4Dmapper краще підходить для потреб будівельної галузі, гірничодобувної промисловості та сільського господарства, де важлива оперативність обробки типових проектів і оптимізація робочих процесів.
- **Зручність користування:** Pix4Dmapper має більш інтуїтивно зрозумілий та спрощений інтерфейс, який полегшує роботу початківцям завдяки наявності покрокових інструкцій.
Metashape вирізняється більшою гнучкістю, однак вимагає певного часу на освоєння, надаючи досвідченим користувачам повний контроль над кожним етапом обробки даних.
- **Швидкість обробки:** Pix4Dmapper демонструє більшу швидкість у роботі з типовими проектами, тоді як Metashape краще справляється зі складними задачами, зокрема, завдяки можливості розподіленої обробки.
- **Ліцензування та цінова політика:** Agisoft Metashape пропонує безстрокову ліцензію з одноразовою оплатою, що робить його вигідним рішенням для тривалого використання, особливо для фрілансерів, університетів та невеликих команд.

Rix4Dmapper працює на основі підписки, що зручно для короткострокових проектів, але з часом може виявитися дорожчим варіантом.

- **Налаштування та інтеграція:** Metashape підтримує розширені налаштування через Python-скриптинг і надає користувачам широкий вибір параметрів експорту.

Rix4Dmapper має кращу інтеграцію з галузевими платформами, такими як Trimble, AutoCAD та ArcGIS, за допомогою плагінів та API.

- **Хмарна обробка:** Rix4D пропонує хмарні робочі процеси, які зручні для роботи команд і віддалених операцій. Agisoft також має хмарну платформу, але Metashape переважно працює локально, використовуючи прискорення ГП.

RealityCapture — ще один серйозний гравець на арені фотограмметрії, знаний своєю блискавичною швидкістю:

- **Швидкість та продуктивність:** RealityCapture вирізняється своєю оперативністю та ефективністю, даючи змогу користувачам миттєво формувати віртуальні сцени та тривимірні моделі.
- **Точність і деталізація:** Metashape визнаний за створення неймовірно чітких та детальних 3D-моделей, враховуючи здатність опрацьовувати знімки з різних кутів огляду для забезпечення високої точності. RealityCapture також гарантує високий рівень точності та деталізації.
- **Сумісність з даними:** RealityCapture демонструє важливу перевагу в роботі з різноманітними типами вхідних даних, серед яких фото, LiDAR-скани та дані лазерного сканування.

Metashape також підтримує інтеграцію з LiDAR, але RealityCapture зосереджує увагу саме на цій універсальності.

- **Хмарна інтеграція:** RealityCapture може інтегруватися з хмарними сервісами для розподіленої обробки великих обсягів даних, що дозволяє обробляти масштабні набори даних, які можуть бути надмірними для локальних обчислювальних систем.
- **Цінова політика:** RealityCapture пропонує систему оплати за використання (pay-per-use), що може бути економічно вигідною для невеликих або епізодичних проектів, але стає дорожчою при інтенсивному використанні.

Agisoft Metashape, зі своєю одноразовою ліцензією, виглядає привабливішим варіантом для довгострокових та частих проектів.

На ринку є також інші рішення для фотограмметрії, що конкурують з Agisoft Metashape Professional:

- **Recap, ArcGIS Drone2Map, ContextCapture:** Ці комерційні програми також пропонують засоби для 3D-моделювання та картографування, часто з фокусом на інтеграції з вже наявними ГІС або САД середовищами.
- **3DF Zephyr:** Популярний завдяки функціям 3D-реконструкції та сканування.
- **Meshroom:** Безкоштовний софт з відкритим вихідним кодом.
- **Mapware:** Хмарна платформа для потреб картографування за допомогою дронів.
- **MicMac:** Безкоштовний фотограмметричний пакет з відкритим вихідним кодом, орієнтований на професійних та академічних користувачів.
- **PhotoModeler:** Дозволяє будувати точні 2D та 3D моделі, а також виконувати вимірювання на основі фото.

Вибір між цими засобами здебільшого залежить від конкретних вимог проекту, фінансових можливостей, необхідної точності результату, легкості в роботі та бажаного рівня контролю над процесом.

Agisoft Metashape Professional безперервно вдосконалюється, впроваджуючи новітні технології та покращуючи наявні функції для відповіді на потреби користувачів, що зростають, у сфері 3D-реконструкції та геопросторового аналізу.

Останні версії Agisoft Metashape Professional, зокрема 2.2.x та старіші, вразили значними удосконаленнями й новими функціями:

- **Поглиблена підтримка систем координат:** Реалізовано підтримку широкого спектру систем координат та одиниць вимірювання, у тому числі систем координат Марса й Місяця.
Додано можливість експорту Cesium 3D Tiles в умовах позаземних систем координат.
- **Удосконалені інструменти маскування:** Впроваджено метод штучного інтелекту для автоматичного створення масок.
Також реалізовано підтримку декількох масок в панелі Workspace, що значно оптимізує та полегшує процес маскування.
- **Нові інструменти фільтрації опорних точок:** Додано опцію фільтрування опорних точок за тривалістю та кількістю груп, що є корисним для аналізу результатів вирівнювання та роботи з інформацією, отриманою з різних траєкторій польоту.
- **Підтримка нових форматів:** Розширено можливості імпорту та експорту, додано підтримку CSV для хмар точок, форматів MP4/MOV для запису відео, а також JPEG XL для роботи з мультиспектральними зображеннями.
- **Покращення користувацького інтерфейсу та навігації:** Відбулося перейменування та реорганізація деяких інструментів, зокрема, "Gradual Selection" тепер відображається як "Clean Tie Points", а "Clean Model" залишилася без змін.
Додано унікальні іконки для контрольних та перевірочних точок, що сприяє кращій візуальній відмінності.

Покращено управління клавіатурою, навігацію та масштабування фотографій у повноекранному режимі.

- **Надійність та відновлення:** Впроваджено функцію збереження поточного стану обробки локально, що дає змогу відновити роботу у випадку перебоїв з електроенергією або непередбачуваних помилок.

- **Підтримка AprilTag:** Додано підтримку кодованих цілей AprilTag, що збільшує можливості автоматизованого виявлення цілей для процесу референсування.

- **Оновлення хмарної обробки:** Проведено оновлення обчислювальних вузлів Agisoft Cloud та покращено функції хмарної обробки, включно з можливістю відновлення роботи мережевих робітників без переривання поточного процесу обробки.

- **Планування місій БПЛА:** Agisoft Metashape Professional тепер надає можливість створювати плани польотів безпілотних літальних апаратів для об'єктів складної форми.
Це передбачає уникнення перешкод, що сприяє оптимізації маршрутів для отримання високоякісних моделей.

Agisoft дотримується курсу постійних досліджень та вдосконалень, інтегруючи новітні технології у свій програмний продукт.

Завдання компанії – забезпечення користувачів ефективним інструментом для успішного вирішення задач 3D-відтворення, візуалізації, зйомки та картографування.

Стратегія розвитку Agisoft зосереджена на таких ключових напрямках:

- **Оптимізація алгоритмів:** Команда розробників прагне досягти максимальної ефективності алгоритмів, зосереджуючись на поліпшенні

якості отриманих результатів, мінімізації споживання обчислювальних ресурсів та підвищенні швидкості обробки даних.

- **Впровадження передових технологій:** Фундаментом інтелектуальної системи обробки зображень є передові алгоритми, що використовують паралельні обчислення та прискорення на графічних процесорах, що гарантує високу точність, швидкість та надійність роботи.

- **Орієнтація на потреби користувачів:** Збір та аналіз відгуків користувачів має вирішальне значення для забезпечення безперервного розвитку та покращення програмного забезпечення.

Це гарантує, що Metashape залишається зручним інструментом, здатним вирішувати різноманітні завдання, від великомасштабного картографування до оцифрування 3D-об'єктів.

Ці неупинні вдосконалення та чітко окреслена стратегія розширення зміцнюють позицію Agisoft Metashape Professional як ключового гравця на ринку фотограмметричного програмного забезпечення, демонструючи постійну відповідь на виклики сьогодення та технологічний поступ.

Agisoft Metashape Professional – це багатогранний та потужний програмний продукт для фотограмметричної обробки, котрий результативно перетворює цифрові знімки й лазерні скани на надзвичайно точні тривимірні моделі та геопросторові дані.

Його архітектурна основа ґрунтується на передових підходах комп'ютерного зору, таких як Structure from Motion (SfM), Multi-View Stereo (MVS) і Bundle Adjustment (BA), що забезпечує автоматизовану, але водночас контрольовану реконструкцію з високою деталізацією та точністю.

Програмний продукт виділяється завдяки широкому спектру підтримуваних вхідних даних, включаючи RGB, теплові та мультиспектральні зображення, а також інтеграцію даних LiDAR.

Він дозволяє генерувати різноманітні кінцеві продукти, зокрема щільні хмари точок, текстуровані полігональні моделі, цифрові моделі рельєфу (ЦМР/ЦММ) та географічно прив'язані ортофотоплани.

Розширені інструменти вимірювання, аналізу (наприклад, обчислення індексів рослинності, виявлення ліній електропередач) та редагування надають користувачам повний контроль над кінцевими результатами.

Гнучкість улаштування робочого процесу, підтримка пакетної обробки, можливість писати скрипти на Python, а також здатність до розподіленої обробки даних та роботи з хмарами – все це робить Metashape неймовірно корисним під час обробки великих обсягів інформації, зменшуючи навантаження на локальне обладнання.

Не зважаючи на потребу у значних обчислювальних ресурсах, включаючи потужні процесори та відеокарти, здатність програми забезпечувати високу точність, підтверджена результатами порівняльних досліджень, робить ці витрати виправданими.

Agisoft Metashape Professional є незамінним інструментом у різноманітних галузях: від картографії та геодезичних вимірювань, археології та збереження культурної спадщини до архітектури, будівництва, моніторингу екології, точного землеробства, криміналістики, кіноіндустрії та освіти.

Його багатофункціональність, поєднана з регулярними оновленнями та стратегією розвитку, орієнтованою на інтеграцію передових технологій та врахування побажань користувачів, гарантує відповідність вимогам сучасного світу 3D-реконструкції та ефективність у ньому.

Загалом, Agisoft Metashape Professional – це потужне, гнучке та точне рішення для фотограмметрії, що робить його найкращим вибором для наукових досліджень та професійних проєктів, яким потрібні високоякісні 3D-дані та геопросторовий аналіз.

3. Результати дослідження

Вимірювання провели поблизу Коломиї, що на Івано-Франківщині, на початку грудня 2021 року.

На той час водойма була зневоднена через зимові ремонтні роботи, що значно спростило огляд і дало змогу створити деталізовану модель дна.

Спочатку здійснили GNSS-RTK вимірювання, використовуючи постійну мережу GNSS SystemSolution через приймач Leica GS08.

Загалом було визначено координати восьми наземних контрольних пунктів та ще кількох додаткових точок, які окреслювали межі кадастрової ділянки.

Ці контрольні пункти використовували для незалежної перевірки точності кадастрової карти в межах досліджуваної місцевості.

Відхили між позиціями, обчисленими GNSS-RTK, та точками на кадастровому плані, не перевищили 0,05 м.

Це свідчить про можливість використання кадастру як еталону для перевірки точності фотограмметрії, отриманої з БПЛА.

Процедура вимірювання GNSS зайняла приблизно 15 хвилин та потребувала участі лише одного фахівця.

Після закінчення геодезичних робіт було здійснено політ дрона DJI Mavic Air 2.

Параметри польоту були попередньо розраховані.

Проте, керування дроном здійснювалося через додаток DJI Fly, який не передбачає автоматичного польоту за заданим маршрутом.

До того ж, через несприятливі погодні умови, з поривами вітру до 100 км/год, точність польоту було важко гарантувати.

Попри усі виклики, політ завершився успішно, внаслідок чого було здобуто майже 1000 ортогональних та нахилених світлин.

Аерозйомку було здійснено у двох режимах якості: 12 Мп та 48 Мп.

У цілому, політ тривав близько 45 хвилин, було використано два повністю заряджені акумулятори.

Для здійснення польоту було достатньо одного оператора (пілота).

Проте, для більшої безпеки, бажано мати додаткову людину, яка підтримуватиме безперервний візуальний контакт із дроном та попереджатиме про можливі загрози.

Загальний час перебування на місці склав приблизно одну годину.

Наступним етапом стало опрацювання даних у робочому офісі.

Використано програмний продукт Agisoft Metashape Professional, застосовано метод "Структура з Руху".

Після імпорту та орієнтації фотоматеріалів здійснено прив'язку до географічних координат: розпізнано контрольні точки на знімках та проведено оптимізацію параметрів.

Отриманий результат – середня похибка позиціонування контрольних точок 4,6 см, що відповідає вимогам для кадастрової діяльності.

Потім згенеровано щільну хмару точок та сформовано тривимірну модель території з накладеною текстурою (див. рисунок 6).

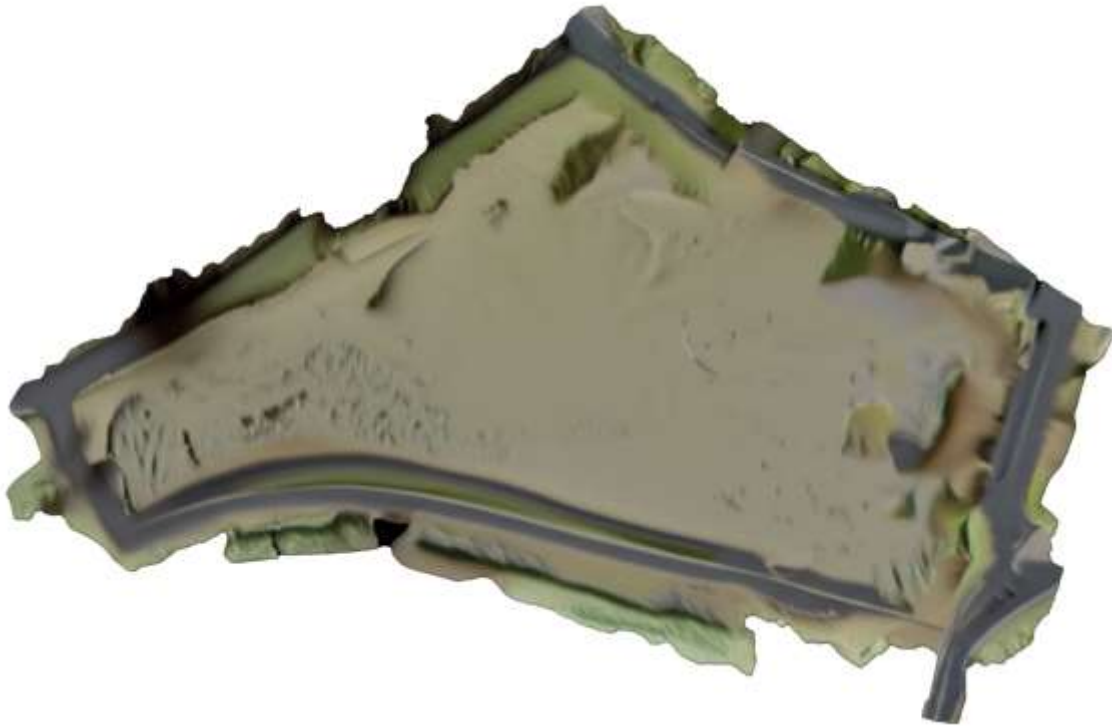


Рисунок 6 Текстурована 3D-модель

Ортофотоплан (рисунок 7), сформований на основі згенерованої 3D-моделі, являє собою ключовий результат, необхідний для кадастрових робіт.



Рисунок 7 Ортомозаїка

Обстежена територія майже не містила будівель чи огорож, що посприяло мінімальним спотворенням у створеній 3D-моделі, забезпечивши відмінну якість ортофотоплану.

Хоча просторова роздільна здатність складала приблизно 5 мм, з міркувань економії дискового простору було вирішено використати роздільну здатність ортофотоплану 1 см на піксель.

Такої роздільної здатності цілком вистачає для потреб кадастрових вимірювань.

За допомогою використаного програмного забезпечення також можна сформувати цифрову модель поверхні з високою деталізацією (див. рис. 8).

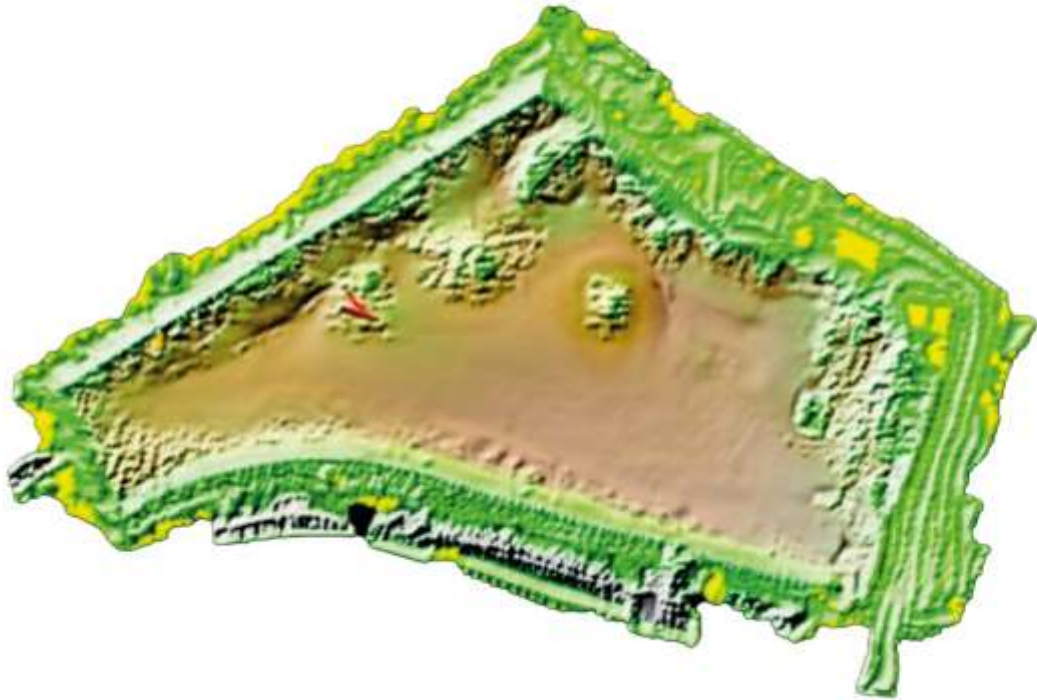


Рисунок 8 Цифрова модель поверхні

Для успішної обробки даних за методом Structure-from-Motion (SfM) необхідне продуктивне обладнання з багатоядерними процесорами та потужними графічними картами.

У цьому прикладі обробка здійснювалася на ноутбучі з шестиядерним процесором Intel Core i7 та графічним адаптером Nvidia GeForce GTX 1050.

Загальний час обробки склав приблизно півтори години.

На наступному етапі обробки планувалося визначення координат точок, необхідних для проведення кадастрової зйомки.

Для оцінки точності фотограмметричного методу було зафіксовано положення 15 контрольних точок, що визначають межі кадастрової ділянки (показано зеленим кольором на рисунку 9), та проведено порівняння цих координат з відповідними точками на кадастровій карті.



Рисунок 9 Конфігурація контрольних точок,

Здійснено розрахунок розбіжностей у координатах між точками, що отримані за допомогою фотограмметрії з дрона, та точками з кадастрової карти, з наступним визначенням середньоквадратичної похибки.

Враховуючи, що українська кадастрова система є двовимірною, оцінка точності проводилась тільки в площині X-Y.

Для визначення координат точок було використано два принципово відмінні методи.

Перший метод передбачав розпізнавання та вимірювання координат точок безпосередньо на ортофотоплані (див. рисунок 10).

Другий метод базувався на ідентифікації та відмітці точок на декількох фотографіях у програмному забезпеченні Agisoft Metashape, яке, використовуючи параметри орієнтування, обчислювало їхні просторові координати.



a



б

Рисунок 10 Вимірювання положення точки на ортофотоплані (а) та зображенні (б)

Результати можна проаналізувати у поданій таблиці 2.

Таблиця 2: Оцінка точності вимірювань фотограмметрії БПЛА

Номер точки	Позиційне відхилення (ортомозаїчне) м.	Позиційне відхилення (зображення) м.	Код якості
1400260048	0.06	0.06	3
1400260049	0.06	0.08	3
1400260161	0.09	0.05	3
1400260102	0.08	0.06	3
1400260103	0.08	0.06	3
1400260140	0.07	0.03	3
1400260139	0.09	0.09	3
1413150005	0.04	0.08	3
1413150011	0.04	0.05	3
1413150002	0.04	0.06	3
1413150001	0.02	0.05	3
1400220002	0.04	0.04	3
1400220001	0.10	0.06	3
1437960012	0.05	0.04	1
1400210003	0.01	0.06	3
СКП (м)	0.064	0.061	—

Окрім розбіжностей у встановленні місця розташування для ортовимірювань (зліва) та інформації з фотографій (справа), для кожної позначеної точки, що міститься у Таблиці 2, зазначено номер точки на кадастровій мапі та індикатор якості.

Індикатор якості конкретної точки дозволяє нам оцінити найбільше припустиме відхилення в її координатах.

Внаслідок оцінки точності об'єкт край ставка було усунено з ортофотоплану.

Місцезнаходження контрольних точок було визначено, використовуючи два різні підходи.

Першим способом було знаходження та розмітка точок прямо на геоприв'язаному ортофотоплані.

Відмінності у координатах між виміряними точками та точками на кадастровій мапі не перевищують 0,10 м, при цьому більшість значень фіксуються на рівні або нижче 0,06 м.

Величина середньоквадратичної похибки для першого способу обчислення координат дорівнювала 0,064 м.

У другому варіанті, де точки були ідентифіковані та виділені на серії знімків, а їх координати обчислювалися фотограмметричним софтом, результати були аналогічними: максимальне відхилення зафіксувалося на рівні 0,09 м, а середньоквадратична похибка склала 0,061 м.

Отримані показники є цілком прийнятними для кадастрових потреб, відповідаючи українським нормативним вимогам.

Більшість контрольних точок мали код якості «3», який регламентує максимальне відхилення між новим вимірюванням та розташуванням точки на кадастровій карті до 0,24 м.

Усі обчислені відхилення значно поступалися цьому значенню, демонструючи достатню точність фотограмметричного методу з використанням БПЛА для кадастрових робіт.

Додатково якість результатів підкреслюється низькими показниками середньої квадратичної похибки.

Разом з тим, існує гіпотеза, що точність могла б покращитися при проведенні польоту за більш сприятливих погодних умов та з використанням штучних маркерів як опорних точок, що планується вивчити в майбутніх дослідженнях.

З огляду на несуттєву різницю у перевагах другого способу визначення координат, обидва підходи можна вважати однаково точними.

Ключовим завданням було оцінювання загальної ефективності застосованої методики.

Загальний час, витрачений на увесь процес, починаючи з польоту та закінчуючи обробкою даних, склав приблизно дві з половиною години.

Хоча точні дані щодо тривалості застосування традиційних геодезичних методів відсутні, можна припустити, що лише польове вимірювання меж водойми зайняло б близько трьох годин.

З огляду на значну кількість дерев на березі ставка, метод GNSS у цій місцевості був би проблематичним, тому довелося б використовувати полярний метод із застосуванням тахеометра.

Цей підхід досить трудомісткий, адже вимагає ретельного підбору базових станцій, встановлення штатива, а також тривалих вимірювань.

Для втілення ідеї мінімально необхідний дует: один безпосередньо вимірює, інший відповідає за подачу сигналів, використовуючи відбивну призму.

Якби виникла потреба у цифровій моделі дна ставка, період польових робіт відчутно зросте, а обладнання для вимірювань страждало б від вологи та забруднень.

Натомість, польові виміри за допомогою БПЛА тривали приблизно годину, залучаючи лише одну людину.

Найбільш ресурсоємною частиною методу фотограмметрії з БПЛА є обробка зібраних даних в офісних умовах, яка може зайняти багато годин при опрацюванні значних територій.

Однак цей процес майже повністю автоматизований і може відбуватися навіть у нічний час.

Варто також зазначити, що обладнання для фотограмметрії з БПЛА, як правило, доступніше за вартістю, ніж традиційні геодезичні інструменти.

Зважаючи на вищенаведене, фотограмметрію з БПЛА можна вважати більш ефективною технологією для кадастрової зйомки з огляду на часові затрати та використувані ресурси, що призводить до економії фінансових коштів та скорочення термінів виконання робіт.

Щодо продуктивності здобування точок, точне визначення координат на ортофотоплані відчутно спрощує роботу, адже точку достатньо позначити єдиним дотиком, тоді як під час вилучення з фотографій її треба відшукати на трьох-чотирьох зображеннях.

Водночас, застосування ортофотоплану має певні обмеження в місцевостях без забудови, оскільки контури будівель, котрі найчастіше є частиною кадастрових меж, неможливо побачити крізь дахи.

У подібних обставинах задля забезпечення високої точності обирають інший підхід – вилучення координат з окремих світлин.

Питання перевірки точності так само залишаються актуальними та стануть предметом подальших досліджень.

До того ж, метод фотограмметрії з БПЛА володіє рядом переваг порівняно з традиційними геодезичними методами.

Він дає можливість здобувати не лише координати кадастрових меж, а й додаткові продукти – деталізовані текстуровані 3D-моделі, цифрові моделі поверхні з високою роздільною здатністю, а також ортофотоплани.

Ці дані здатні знайти застосування в різноманітних галузях і стануть ключовими для розробки 3D-кадастру в Україні.

Ще однією перевагою цього методу є його безконтактність. Землевпоряднику не потрібно фізично знаходитись на об'єкті чи вступати в контакт з власниками, оскільки обстеження проводиться за допомогою аерофотозйомки з БПЛА.

Висновки

Для дієвої роботи системи управління земельними ресурсами, визначальним і високоточним інструментом забезпечення землекористування є кадастр.

На сьогодні в Україні кадастр включає величезний обсяг різнорідних даних, що обумовлює потребу у всеосяжному оновленні кадастрових карт.

Проте, оновлення з використанням традиційних геодезичних методів, відбувається з недостатньою швидкістю.

Крім того, враховуючи плани впровадження 3D-кадастру, наявні методи вже не відповідають актуальним вимогам.

Відтак, необхідно впроваджувати прогресивні інтелектуальні методи вимірювань, які забезпечували б більш продуктивне виконання кадастрових робіт та надавали б тривимірну інформацію про об'єкти.

Одним з перспективних напрямків є фотограмметрія, заснована на використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Цей метод було апробовано під час кадастрового дослідження рибницького комплексу поблизу Коломиї, що на Івано-Франківщині.

Заміри виконано на початку грудня 2021 року з використанням безпілотного літального апарату DJI Mavic Air 2.

Для визначення наземних контрольних точок було застосовано метод GNSS-RTK, використовуючи приймач Leica GS08.

Обробка отриманих фотоматеріалів проводилася за стандартною процедурою Structure-from-Motion у програмному забезпеченні Agisoft Metashape Professional.

Координати контрольних пунктів було визначено двома різними способами.

Для оцінки точності було задіяно 15 контрольних точок, координати яких також були наявні з кадастрової карти.

Отримані результати продемонстрували високу точність, що відповідає вимогам кадастрової зйомки, вказуючи на перспективність широкого застосування цього методу.

Крім того, проведено оцінку загальної ефективності фотограмметрії з використанням БПЛА.

Метод виявився продуктивнішим за традиційні геодезичні техніки, оскільки потребує менше ресурсів та економічно вигідніший, зважаючи на легкість доступу до обладнання та потребу у меншому штаті.

Серед додаткових переваг цього способу — змога отримати не лише координати межових знаків, а й інші цінні дані, наприклад, тривимірну текстуровану модель та цифрову модель місцевості.

Ці дані знайдуть застосування серед широкого кола спеціалістів та є надзвичайно важливими для інтеграції 3D-кадастру в Україні.

Майбутні дослідження сфокусуються на вдосконаленні фотограмметрії з використанням БПЛА в кадастрових роботах, а зокрема — на перевірці її застосування для обстеження забудованих районів та масштабуванні на більші площі.

До того ж, планується порівняти результати, отримані за допомогою різних моделей безпілотних літальних апаратів.

Список використаної літератури

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012
2. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. – Львів, 2008.
3. Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. – Львів, 2003.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: ГКНТА, 1999.
5. Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії – Львів, 2001.
6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.
7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. "Геодезія" (частина перша). Чернігів 2002р.
8. Алі, З., Туладхар, А. М., Зевенберген, Дж. А., 2013, Комплексний підхід до оновлення кадастрових карт Пакистану з використанням даних дистанційного зондування, Міжнародний журнал прикладного спостереження за Землею та геоінформації, том 18, с. 386–398
9. Алкан, М., Солак, Ю., 2010, Дослідження фотограмметричних даних масштабу 1:5000 для кадастрового картографування: тематичне дослідження журнал сільськогосподарських досліджень, том 5(18), с. 2576–2588
10. Бендух, П., Пенска-Сівік, А., 2017, Оцінка корисності фотограмметричного методу в процесі збору даних про межі ділянок, Геодезія та картографія, том 66(1), стор. 3–22

11. Чіо, С., Чіанг, Ч., 2020, Дослідження доцільності використання аерофотограмметрії БПЛА для перевірки меж оцифрованої кадастрової ділянки в місті, Дистанційне зондування, том 12, стор. 1682

12. Кроммелінк, С. та ін., 2018, Інтерактивне визначення кадастрових меж на основі даних БПЛА, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, том IV-2, стор. 81–88

13. Фетаї, Б. та ін., 2019, Визначення видимих меж для кадастрового картографування на основі зображень БПЛА, дистанційне зондування, том 11, стор. 1510

14. Housarová, E., Šedina, J., Pavelka, K., 2016, RPAS у кадастрових додатках, 16 Міжнародна мультидисциплінарна наукова геоконференція SGEM 2016 Збірник наукових праць, книга 2 том. 2, стор. 987–994

15. Маньокі, М. та ін., 2011, Безпілотний літальний апарат у кадастрових застосуваннях, Міжнародний Архів фотограмметрії, дистанційного зондування та просторової інформації, том XXXVIII-1/C22, стор. 57–62

16. Посібник користувача Mavic Air 2, 2020, DJI

17. Ньяндві, Е., Коєва, М., Колі, Д., Беннетт, Р., 2019, Порівняння вилучення кадастрових граничних ознак за допомогою людини та машини, Дистанційне зондування, том. 11, стор. 1662

18. Рао, С. С. та ін., 2014, Оцінка корисності супутникових знімків високої роздільної здатності (HRSI) для повторного зйомки кадастрових карт, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and

19. Рейсдейк, М. та ін., 2013, Безпілотні авіаційні системи в процесі юридичної перевірки кадастрового кордону, ISPRS - Міжнародний архів фотограмметрії, дистанційного зондування та просторових інформаційних наук. Том XL-1/W2. с. 325–331

20. Kysel, Peter & Hudecova, Lubica. (2021). Cadastral Survey of a Fishpond Using UAV Photogrammetry Cadastral Survey of a Fishpond Using UAV Photogrammetry.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи:

«Виконання кадастрової зйомки водних об'єктів за допомогою фотограмметрії БПЛА на прикладі ставка у м. Коломия Івано-Франківської області»

Обсяг пояснювальної записки: 60 аркушів.

24.12.25 рік

(дата)

(підпис студента)