

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

Уриська Юлія Ігорівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оцінка точності фотограмметричної зйомки з БПЛА шляхом оптимізації
системи наземних контрольних точок

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня

Ю.І. Уриська

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Багрій Сергій Михайлович , к.г.н, доцент

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

Допущено до захисту
Завідувач кафедри
геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

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

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
Освітньо-професійна програма Геодезія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ГКЗ
Приходько М. М.

«__»_____ 2026 року

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Уруська Юлія Ігорівна

1. Тема роботи **«Оцінка точності фотограмметричної зйомки з БПЛА шляхом оптимізації системи наземних контрольних точок»**

Керівник роботи доц. Багрій С.М

Наказ ректора від «8» червня_____ 2026 року № 292/7.

2. Термін подання студентом роботи – 25 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи:

Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- 1. Система маркерів
- 2. Проведення дослідження
- 3. Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Ортофотоплан

6. Дата видачі завдання – «01» квітня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/П	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури.	01.04.26 15.04.26	
2	Складання попереднього плану та змісту бакалаврської роботи.	19.04.26 25.04.26	
3	Опрацювання системи маркерів	26.04.26 12.05.26	
4	Проведення дослідження	13.05.26 29.05.26	
5	Опис алгоритму проведення дослідження	30.05.26 15.06.26	
6	Формування пояснювальної записки	16.06.26 18.06.26	
7	Оформлення бакалаврської роботи та додатків до неї, складання висновків.	19.05.26 25.06.26	

Студент

(підпис)

Уруська Ю.І
(розшифровка підпису)

Керівник

(підпис)

Багрій С.М
(розшифровка підпису)

Анотація

У цій бакалаврській роботі здійснено аналіз точності фотограмметричних вимірювань, здобутих із застосуванням безпілотних систем, а саме через удосконалення системи маркерів контролю на місцевості.

Наріжний камінь дослідження полягає у вивченні того, як обсяг, просторовий розподіл та конфігурація маркерів впливають на якість створення ортофотозображень та цифрових моделей рельєфу.

Аби гарантувати безпомилкове знаходження маркерів на аерофотокадрах, ці наземні контрольні елементи було спроектовано як чіткі кольорові кола на світлому тлі.

Це суттєво покращує ступінь точності, з якою їх можна ідентифікувати, як автоматично, так і вручну, під час фотограмметричної обробки даних.

Визначення просторових координат маркерів було реалізовано за допомогою супутникових геодезичних технологій, що обумовлює досягнення високої точності як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах.

Матеріали фотограмметрії були зібрані завдяки проведенню аерофотознімання з використанням безпілотного літального апарату, після чого слідувала їх обробка у професійному програмному комплексі.

Перевірка точності здійснювалась шляхом зіставлення координат опорних та реперних точок і визначення середньоквадратичних відхилень.

Проведене вивчення дало змогу встановити ідеальні налаштування для системи ґрунтових контрольних маркерів, що забезпечують потрібну ступінь точності за умови найменших затрат часу і ресурсного забезпечення.

Зроблені висновки дають змогу стверджувати про дієвість застосування реперних точок, реалізованих як кольорові мітки на світлому тлі, і можуть бути впроваджені у практиці топографічних, кадастрових та інженерно-геодезичних вишукувань, що виконуються за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: БПЛА, аерофотознімання, маркери, ідентифікація орієнтирів

Abstract

This bachelor's thesis analyzes the accuracy of photogrammetric measurements obtained using unmanned systems, namely through the improvement of the system of ground control markers.

The cornerstone of the research is the study of how the volume, spatial distribution and configuration of markers affect the quality of creating orthophotos and digital terrain models.

To guarantee the unmistakable location of markers on aerial photographs, these ground control elements were designed as clear colored circles on a light background.

This significantly improves the degree of accuracy with which they can be identified, both automatically and manually, during photogrammetric data processing.

The determination of the spatial coordinates of the markers was implemented using satellite geodetic technologies, which allows achieving high accuracy in both horizontal and vertical planes.

Photogrammetry materials were collected by conducting aerial photography using an unmanned aerial vehicle, followed by their processing in a professional software package.

Accuracy was checked by comparing the coordinates of the reference and reference points and determining the root mean square deviations.

The study made it possible to establish ideal settings for the system of ground control markers, which provide the required degree of accuracy with the least time and resource requirements.

The conclusions made make it possible to state the effectiveness of the use of reference points, implemented as colored marks on a light background, and can be implemented in the practice of topographic, cadastral and engineering and geodetic surveys performed using unmanned aerial vehicles.

Keywords: UAV, aerial photography, markers, identification of landmarks

Зміст

Вступ	9
1. Система маркерів	16
1.1 Покращення маркера.....	18
1.2 Виявлення маркера.....	24
1.3 Локалізація маркерів	33
2. Проведення дослідження	36
2.1 Аналіз послідовностей зображень	38
2.2 Аналіз аероданих	42
3. Результати дослідження	52
Висновок	56
Список використаної літератури.....	59

Вступ

Стеження за змінами форми (деформаціями) рукотворних споруд та елементів інфраструктури – це одне з найважливіших завдань сучасної інженерної геодезії, особливо зважаючи на інтенсивне використання та відбудову об'єктів на території України.

Для обґрунтованого вивчення просторових зсувів критично важливо мати точні просторові координати (у трьох вимірах) тих поверхонь, які підлягають дослідженню, враховуючи при цьому як їхнє горизонтальне (планове), так і вертикальне (висотне) положення.

Зазвичай, для виконання подібних вимірювань використовують високоточні геодезичні технології, серед яких передусім виділяються супутникові технології GNSS (як у режимі реального часу RTK, так і у статичному режимі), електронні теодоліти (тахеометри), а також технологія наземного лазерного сканування (TLS).

Хоча ці методики дають змогу досягти значної точності, їх часто супроводжує висока затрата праці, значні фінансові вкладення та певна нешвидкодія (оперативність), що створює перешкоди для використання на великих площах або у важкопрохідних місцях.

Протягом останніх років в Україні спостерігається бурхливе нарощування застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) за для виконання геодезичних робіт та завдань моніторингу.

Така тенденція зумовлена їхньою порівняльною фінансовою вигодою, рухливістю, швидкістю, з якою збирається інформація, а також здатністю ефективно працювати у ситуаціях зі складним ландшафтом, густою забудовою чи обмеженим доступом до відповідної території.

Як наслідок, фотограмметричні методи на базі БПЛА перетворилися на перспективний засіб для дослідження змін (деформацій) житлових та

транспортних конструкцій, гребель, кар'єрів та інших споруд, розташованих в Україні.

Удосконалення комп'ютерно-зорових алгоритмів, насамперед тих, що стосуються апарату Structure from Motion (SfM), разом із застосуванням передових програмних рішень, як-от Agisoft Metashape або різноманітних безкоштовних фотограмметричних систем, відкриває можливості для відновлення тривимірного вигляду поверхонь виключно за аерознімками, знятими звичайними, неметрологічними камерами, доступними широкому колу користувачів.

Суттєвою перевагою тут є те, що як внутрішні характеристики камери, так і її орієнтація у просторі можуть бути з'ясовані без потреби у попередніх даних калібрування, що суттєво полегшує попередню фазу будь-якого проєкту.

Основною стадією у процесі фотограмметричної обробки матеріалів, отриманих з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), є встановлення точних параметрів зовнішнього орієнтування апарату знімання, оскільки точність цих даних напряму впливає на якість реституції тривимірних координат об'єктів.

Переважно застосовується метод, який полягає у спільному обчисленні (блоковому вирівнюванні) аерофотознімків з урахуванням наявності ґрунтових опорних точок (так званих опорних точок).

Однак формування щільної та високоточної сітки таких опорних точок вимагає великих витрат часу й коштів, що часто є непрактичним або технічно нездійсненним під час роботи у польових умовах на території України.

Як варіативний метод, можна застосувати дані безпосереднього геореференціювання, які збираються бортовими інерціально-супутниковими (GNSS/INS) комплексами, інтегрованими у склад БПЛА.

Незважаючи на те, що даний підхід дає змогу значно зменшити обсяг польових робіт, для невеликих чи недорогих конструкцій чіткість, яку забезпечують такі системи, зазвичай не відповідає вимогам для детального відстеження деформацій, і поступається даним, здобутим завдяки застосуванню повного комплексу наземних реперів.

Тому на часі стоїть завдання вдосконалення кількості й розташування наземних орієнтирів для гарантування потрібної точності при мінімальному обсязі вимірювань на місці.

У поточних наукових розробках активно залучаються методи, що базуються на використанні штучних міток, які слугують стабільними орієнтирами для зменшення прорахунків при фотограмметричній обробці.

Позаяк досвід демонструє, що дискретні показники, видобуті із застосуванням міток, володіють зрозумілим просторовим осмисленням та демонструють високу сталість ідентифікації на зображеннях, це надає їм перевагу у стабільності перед тими показниками лінійного типу, що формуються складовими забудованої території.

Особливої результативності досягають мітки з вираженою різницею у яскравості, зокрема ті, що мають вигляд кольорових планіметричних форм на світлому тлі, оскільки вони легко розпізнаються на аерофотознімках незалежно від варіацій природного освітлення.

Отже, впровадження вдосконаленого комплексу опорних точок, базованих на штучних маркерах, відкриває вагомі перспективи для покращення точності та продуктивності аерофотограмметричних робіт із використанням безпілотних літальних апаратів, особливо для завдань контролю за змінами рельєфу на території нашої держави.

Ілюстрації типових зразків таких міток можна побачити на рисунку 1.

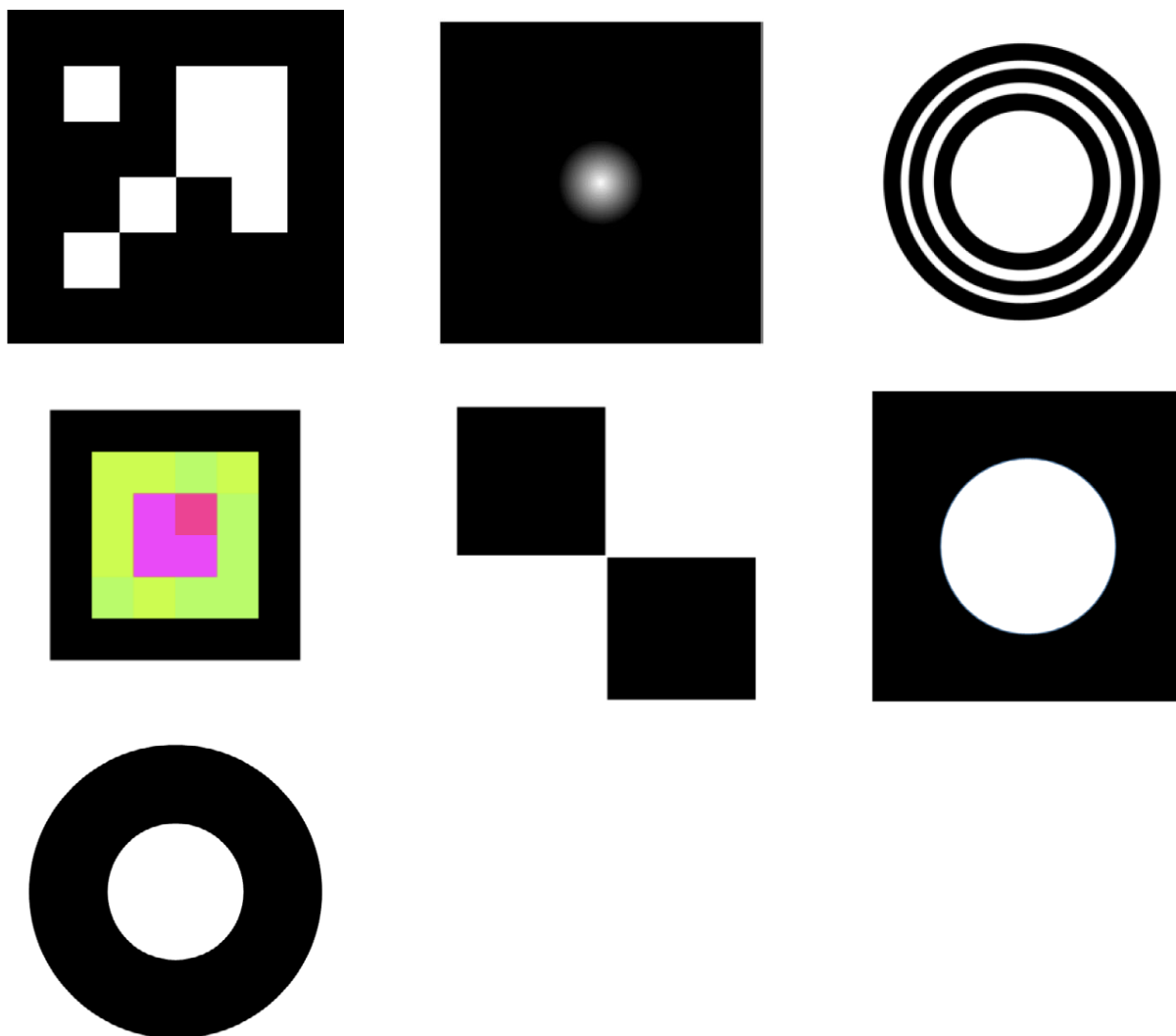


Рисунок 1 Існуючі маркери

У царині комп'ютерного зору та фотограмметрії постала потреба у створенні численних штучних орієнтирів, покликаних надійно ідентифікувати ключові пункти на цифрових знімках.

Зокрема, маркер ARTag здобув значну популярність у сферах доповненої реальності, відновлення тривимірних моделей простору, а також у методологіях спільного позиціонування та побудови карт.

Його використання стало поширеним завдяки здатності до стабільного автоматичного впізнавання навіть там, де звичайна апаратура для виділення ознак, зокрема та, що ґрунтується на стійких до зміни розміру та кута повороту алгоритмах, може давати збій.

Подальший прогрес у сфері систем орієнтирів сприяв розробці макетів, налаштованих на забезпечення найвищої чутливості приймачів ключових елементів.

Зокрема, були запроваджені орієнтири, спеціально припасовані під методики на кшталт SIFT та SURF, що дало змогу укріпити надійність виявлення проєкцій цих міток на отриманих зображеннях та мінімізувати помилкові збіги.

Виділену категорію формують маркери, сконструйовані із застосуванням послідовних геометричних фігур.

Подібні реалізації, як правило, використовують темні обідки на світлій основі й демонструють виняткову несприйнятливість до ефектів розмиття картинки та складних умов освітлення.

Завдяки своїй симетричності та чітко окресленим контурам вони легко визначаються навіть тоді, коли контрастність суттєво змінюється.

Сучасні кольорові мітки (маркери) нового гатунку інтегрують у собі лаконічність геометричних форм із перевагами кольорового кодування.

Використання розрізнених кольорових складників дає змогу суттєво мінімізувати помилкові спрацювання на тлі звичайних, природних пейзажів, а також прискорити процес усунення хибних детекцій.

Наявність додаткових монохромних (чорно-білих) складових у дизайні цих маркерів гарантує високу точність локалізації їхнього геометричного центру та визначення просторового орієнтування.

Водночас, пошук та зчитування маркерів, які містять унікальні коди для їхньої індивідуалізації, накладає певні рамки та обмеження.

Аби забезпечити стабільне розпізнавання, вимагається, щоб мітка займала значну частку піксельної площі кадру, що, у свою чергу, ставить вищі вимоги до чіткості зображення (просторової роздільної здатності) та висоти, з якої здійснюється знімання (наприклад, з безпілотного літального апарату, БПЛА).

Відтак, використання таких маркерів у спеціалізованих завданнях інженерного контролю, зокрема для відстеження змін у структурі (деформацій), нерідко стає доволі обмеженим.

Натомість, нешифровані орієнтири вирізняються простішою формою та не вимагають унікальних розпізнавальних знаків.

Найчастіше зустрічаються ті, що мають вигляд кіл із контрастними концентричними ободами, а також узори «коло» та «хрест», які активно використовуються у завданнях аерофотографування.

Їхній плюс полягає у легкості виробництва, практичності встановлення на ділянці та здатності бути автоматично ідентифікованими за допомогою усталених фотограмметричних методів.

Задля поліпшення точності визначення розташування цих орієнтирів були створені спеціальні обчислювальні підходи, зокрема ті, що базуються на нормованому взаємозв'язку з інтерполяцією на рівні, меншому за піксель.

Схожі методики знаходять своє застосування й у нинішніх комерційних програмах для роботи з фотограмметрією, завдяки чому процес ідентифікації міток стає автоматичним, а роль людського втручання суттєво мінімізується.

Дослідження показали пряму залежність: чим більше проєкцій мітки задіюється для спільного обчислення положення знімків, тим точнішими стають розраховані параметри просторового орієнтування камери.

Отже, продуктивність маркерної системи залежить не лише від улаштування (геометрії) самих міток, а й від того, наскільки надійним є програмне забезпечення для їхнього знаходження.

Класичні візерунки (шаблони) у відтінках сірого нерідко спричиняють труднощі при роботі на тлі складного оточення, типового для українських природних та міських територій.

Це, своєю чергою, викликає збільшення помилкових спрацювань та знижує загальний рівень якості фотограмметричної обробки.

Окрім того, розташування маркерів під кутом та варіації освітлення, типові для аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), суттєво позначаються на якості їхньої локалізації.

Якщо ці аспекти залишати поза увагою, наслідком може стати зменшення точності чи виникнення помилок, що мають системний характер.

З огляду на вищенаведене, у даній праці доведено необхідність впровадження модернізованої системи кольорових міток.

Такі мітки здатні генерувати значну кількість стійких штучних проєкцій, які слугуватимуть обмеженнями для визначення точкових характеристик.

Застосування цього методу дає змогу покращити точність фотограмметричних даних, отриманих з БПЛА, та гарантувати послідовність отриманих результатів у робочих умовах, типових для виконання інженерно-геодезичних завдань на території нашої держави.

1. Система маркерів

Аби досягти значної точності у фотограмметричних зніманнях, що здійснюються за допомогою безпілотних авіаційних систем, ключове значення набувають системи маркерів.

Характерними рисами таких систем є їхня надійна здатність до автоматичного розпізнавання, висока точність у визначенні просторового орієнтування та потреба в мінімальній залученості оператора до процесу.

Саме такі можливості роблять ці системи незамінними для вирішення інженерно-геодезичних та моніторингових завдань, які виконуються безпосередньо на місцевості.

Проте, незважаючи на те, що маркери забезпечують високу продуктивність в аерофотограмметрії, їхнє використання все ж таки стикається з певними обмеженнями.

Насамперед, на сирих аерофотознімках ці мітки зазвичай займають невелику частку пікселів, що унеможлиблює використання відомостей про текстуру, особливо коли безпілотний літальний апарат (БПЛА) перебуває на значній висоті.

Далі, часто спостерігається падіння контрастності маркерів через вплив погодних умов, нерівномірності освітлення та коливань кута падіння сонячного світла, що ускладнює автоматичне їхнє ідентифікування.

По-третє, неоднорідне оточення, притаманне переважно українським територіям — чи то природні, чи міські пейзажі, — створює додаткові завади, здатні спричинити хибні спрацювання.

І нарешті, навіть маючи обмежені відомості про конфігурацію мітки на знімку, критично важливо гарантувати високу точність знаходження її геометричного центру для належного аерофотограмметричного суміщення.

З огляду на чинники, озвучені у цьому розділі, ми послідовно виклали розроблену систему маркерів, яка була сфокусована на їх використанні під час здійснення аерофотозйомки за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Оскільки сам маркер займає мізерну частину площі кадру і доволі вразливий до зовнішніх умов, було вирішено застосувати модифікований кольоровий маркер у тандемі з методикою попереднього вдосконалення його візуальних властивостей.

Така стратегія дає змогу посилити контрастність маркера та нівелювати вплив навколишнього фону.

Для наступного етапу обробки отриманих зображень було залучено багатомасштабний аналіз, який реалізовано через застосування фільтра, заснованого на різниці гаусіанів (Difference of Gaussians, DoG).

Цей етап націлений на усунення фонових шумів та небажаних складових сцени, також він слугує для ідентифікації можливих міток, незалежно від їхнього розміру на кадрі.

Внаслідок цього зростає шанс правильного знаходження міток, навіть коли висота аерофотозйомки варіюється.

На фінальній стадії позицію мітки встановлюють із високою точністю, знаходячи її центр мас (центроїд), що гарантує визначення розташування з точністю до часток пікселя.

Порівняно із загальноприйнятими системами, що використовують мітки, наша методика показує більшу відмовостійкість до перешкод, типових для аерофотозображень, а також кращі результати у виявленні та просторовому позиціюванні міток.

1.1 Покращення маркера

На рисунку 2 зображено маркер, що використовувався у цьому дослідженні, який має структуру, що базується на круговій формі.

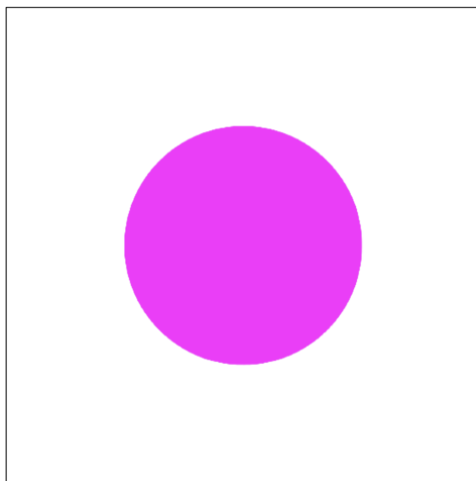


Рис. 2. Використаний маркер

Якщо порівнювати з маркерами, які мають кутову форму, наприклад, квадратні чи прямокутні еталони, то маркери, виконані у вигляді кола, пропонують низку важливих плюсів.

Коло, як форма, демонструє значну стійкість до поворотів та маніпуляцій з розміром, що дає змогу надійно фіксувати об'єкт, незалежно від того, як орієнтована мітка на кадрі.

Ба більше, така конфігурація дає змогу отримати хорошу різкість картинки навіть тоді, коли площа самої мітки невелика, що критично необхідно при зйомці з повітря з великої височини.

Додатковим позитивним моментом є те, що можна дуже точно визначити місцезнаходження мітки, використовуючи алгоритми, які є доволі простими та не вимагають великих обчислювальних ресурсів.

При цьому, коли застосовуються маркери округлої форми, важливо брати до уваги ефект спотворень перспективи, через які зображення кола на площині проекції набуває вигляду еліпса.

У подібних обставинах з'являється розбіжність між справжнім положенням центра маркера та центром сформованого еліптичного образу, що здатне погіршити точність установлення координат цього маркера.

Залежність цієї похибки зміщення від характеристик геометрії зйомки, а саме від радіуса маркера та сили прояву перспективних викривлень, була ретельно досліджена у раніших наукових роботах, де представлено формульний опис цієї кореляції.

$$E = \frac{(r \cos \theta)^2 \tan \theta}{f} \quad (1)$$

де E – ексцентриситет, r – радіус кола маркера, θ – кут між площиною камери та площиною маркера, а f – фокусна відстань.

Для виконання нашої задачі було обрано радіус кола у 7 сантиметрів.

Це зроблено задля того, щоб мінімізувати ексцентриситет, а також гарантувати, що на знімку маркера буде достатньо пікселів для його успішного визначення.

Мітки, що базуються на легко розрізняваних колірних елементах, демонструють високу ефективність та стабільність при їхньому знаходженні на аерофотознімках.

Конкретно у вже існуючих системах кольорових маркерів для первинного виявлення застосовуються комбінації кольорів, котрі чітко контрастують між собою, створюючи виражені перепади яскравості в окремих складових колірних моделей.

Це значно покращує надійність автоматизованого розпізнавання.

Подібна методика добре зарекомендувала себе у протистоянні складним умовам фону, як природного, так і міського середовища, що

типово для матеріалів, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Тим не менше, практичний імплементаційний аспект використання двоколірних орієнтирів у завданнях аерофотограмметричної зйомки стикається із певними бар'єрами.

При великій дистанції, що розділяє вимірювальну апаратуру та сам маркер, вплив атмосферних чинників спричиняє розмиття кордонів відтінків.

Це, своєю чергою, ускладнює акуратне виокремлення чітких країв та коректне визначення центральної точки цього орієнтирного знака.

Окрім того, слід зважати на хроматичні дефекти, які виникають унаслідок розсіювання світла у системі лінз апарату.

Ці дефекти викликають зсув колірних складових, що негативно позначається на точності визначення розташування маркера, що наочно демонструється на рисунку 3.

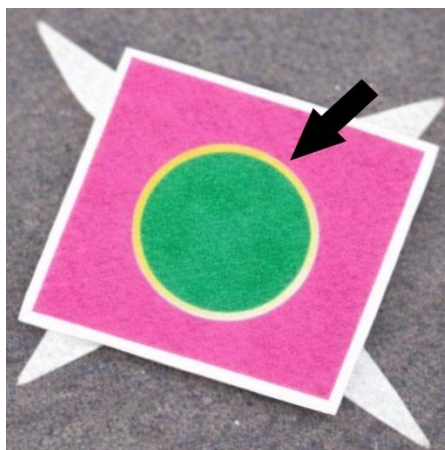


Рисунок 3 Розмиті та нерівномірно розподілені краї

Аби гарантувати високий рівень точності при фотограметрії, яку виконують за допомогою безпілотників, ключове значення мають системи орієнтирів (маркерів), що відзначаються надійною автоматичною

ідентифікацією, точним визначенням координат та потребою в мінімальній участі оператора.

Ці системи особливо цінні для завдань інженерної геодезії та моніторингу, які втілюються безпосередньо у польових умовах.

Однак, успішне виявлення цих маркерів на аерознімках стає складнішим через низку обставин.

Зазвичай маркери займають скромну частину піксельного простору зображення, що суттєво звужує можливості застосування інформації про текстуру, особливо коли апарат знаходиться на значній висоті.

Окрім того, атмосферні чинники, варіації у освітленні та заплутаний задній план, притаманні як природним, так і міським пейзажам України, є факторами, що позначаються на якості зображень.

Навіть коли маркер на знімку виглядає нечітко, критично важливою є його надзвичайно точна ідентифікація місця розташування, адже від цього залежать кінцеві результати фотограмметричної інтерпретації.

З огляду на ці аспекти, у поточному дослідженні використано маркер із базовою структурою, що складається з єдиного кола на світлому тлі (див. рисунок2).

Застосування круглої форми для маркера надає певні переваги над шаблонами квадратної чи кутової конфігурації.

Серед таких переваг варто виділити інваріантність (незмінність) відносно кутового зміщення та зміни розміру, здатність підтримувати високий рівень контрасту навіть при мінімальній площі маркера, а також можливість застосування лаконічних і стійких алгоритмів для визначення його середини.

При цьому слід мати на увазі майбутні викривлення, унаслідок яких відбиток кола на площині візуалізації набуває вигляду еліпса.

Така ситуація здатна викликати розбіжність між справжнім просторовим центром позначки й центром її проекції, що може негативно позначитися на точності визначення розташування.

Аби мінімізувати подібний ефект, у цьому дослідженні застосовано підхід центроїда.

Він демонструє меншу схильність до впливу розмитості, перешкод та оптичних аберацій, порівняно з тими техніками, що базуються на обведенні контурів.

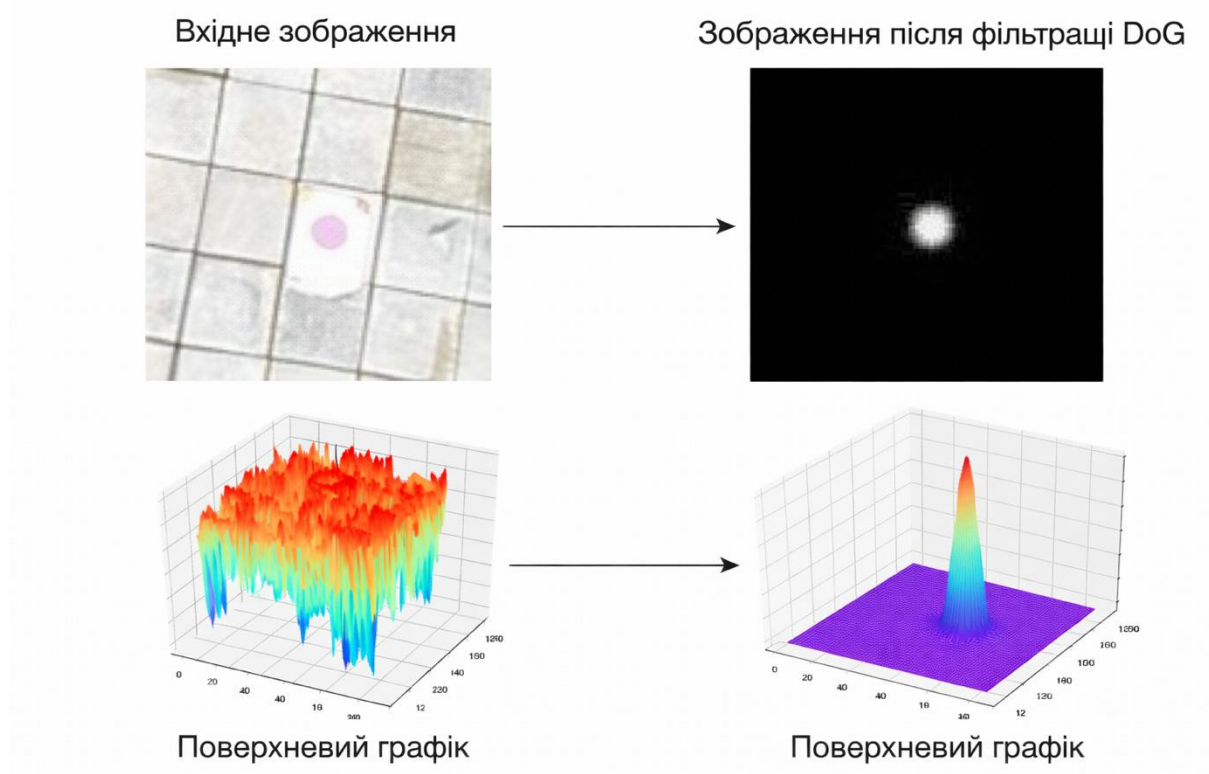


Рис. 4. Конвертоване зображення

Центр позначки визначено його координатами (x_c, y_c) , які вираховуються як середнє арифметичне координат освітлених точок (пікселів) у межах цієї зони:

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad y_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2)$$

де x_i , y_i означають позиції в пікселях точок, котрі належать до території маркера, причому N – це повна кількість цих пікселів.

Сей метод є доволі легким для втілення й гарантує адекватну точність визначення місця положення маркера для завдань фотограметрії на рівні бакалаврату.

Знайдені координати центроїдів потім застосовуються в процесі укрупненого узгодження знімків як опорні чи спільні репери.

Значну увагу спіткало підбирання відтінку для маркера.

Адже зелений, будучи вельми поширеним у природному середовищі завдяки рослинності, може спричиняти певні проблеми зі стійкістю автоматичного виявлення таких маркерів на сценах, багатих на зелені барви.

Аби зменшити цей вплив, колірне коло для маркера встановили на (R: 255, G: 0, B: 255), що дає на виході пурпуровий тон.

Цей відтінок є доволі рідкісним як серед природних пейзажів, так і в переважній більшості штучно створених середовищ.

Задля збільшення відсотка успішного розпізнавання маркерів було впроваджено методику попереднього покращення зображень, яку доповнили багатомасштабною обробкою, зокрема застосуванням фільтра Гаусової різниці.

Такий підхід дає змогу приборкати небажані шуми тла та надійно ідентифікувати цільові мітки за будь-яких умов знімання.

Наочні приклади підвищення якості демонструє рис. 4, де належним чином визначені маркери чітко виокремлюються з загального оточення сцени.

Правильне визначення положення центральної точки мітки на пряму корелюється з якістю подальшого блокового банінгу.

Похибки у визначенні місця розташування спричиняють зростання невідповідностей під час оптимізації параметрів зовнішнього орієнтування фотокамер, що проявляється у підвищенні показників середньоквадратичної помилки (RMSE) як для опорних, так і для додаткових точок.

Отже, стабільна фіксація положення центральної точки мітки є критично важливою умовою для мінімізації RMSE та покращення загальної точності ортофотопланів та цифрових моделей висот, сформованих за даними аерофотозйомки з безпілотних апаратів.

1.2 Виявлення маркера

Після того, як зображення було піддано процесу покращення, безпосередньо сам маркер починає чітко вирізнятися у межах певної локалізованої зони.

Проте, на усьому відредагованому знімкові неминуче залишаються небажані артефакти та різноманітні шуми.

Причиною цього явища є заплутаність фонові фактури, нерівномірний розподіл світла, а також присутність предметів, що можуть володіти схожими показниками яскравості.

Отже, без подальшої процедури фільтрації існує ймовірність хибного спрацювання детектора маркерів у нерелевантних частинах зображення.

З метою збільшення стійкості системи до помилок при автоматичному знаходженні маркерів, у цьому дослідженні задіяно метод фільтрації, заснований на Обчисленні Різниці Гауссових функцій (DoG).

Цей алгоритм поширений у сфері ідентифікації об'єктів, особливо в системах, що працюють в інфрачервоному діапазоні, оскільки він дозволяє ефективно оцінити локальний контрастність зображення.

Ключова перевага фільтра Різниця Гаусіанів (DoG) полягає у його гострій реакції на об'єкти певного розміру, одночасно з ефективним придушенням завад, що створює фон.

Фільтр DoG має радіально-симетричну форму з ваговими коефіцієнтами, що складаються з позитивної центральної зони та оточуючого її негативного кільця.

Ця конфігурація дає змогу посилювати яскраві, локалізовані об'єкти, що нагадують за формою цільові мітки, та згладжувати плавні градієнти яскравості, характерні для фону.

Як наслідок, круглі мітки стають добре помітними, навіть коли зображення містить заплутані природні пейзажі чи міське середовище.

Обчислювально фільтр DoG задається як різниця між двома двовимірними функціями Гаусса, кожна з яких має власне значення стандартного відхилення:

$$D_0G(x, y) = G(x, y, \sigma_1) - G(x, y, \sigma_2) \quad (3)$$

де

$G(x, y, \sigma)$ — двовимірна гаусова функція з параметром розмиття σ ; σ_1 та σ_2 — стандартні відхилення, які визначають масштаб об'єктів, що підлягають виявленню, причому $\sigma_2 > \sigma_1$.

Використання фільтра "Різниця Гаусіанів" (DoG) на обробленій світлинні дає змогу якісно усунути непотрібні шуми та окреслити ділянки з найвищим локальним контрастом, котрі відповідають місцям розташування міток.

На основі цього створюється сукупність потенційних точок, які потім слугуватимуть для точного встановлення центру мітки за методикою визначення центру мас (центроїду).

Отже, комбінація попередньої оптимізації зображення та багатомасштабного просіювання за допомогою DoG гарантує стійке й упевнене знаходження міток, що є обов'язковою передумовою для мінімізації прорахунків при вирівнюванні кадрів поблочно та зниження середньоквадратичної помилки (RMSE) у сформованій фотограмметричній моделі.

Враховуючи типову відмінність у просторових розмірах між справжніми мітками та фоновими шумами, використання фільтра з різницею Гауссових (DoG) функцій дає змогу посилити мітки, одночасно послаблюючи небажані складові, завдяки залученню двох різних параметрів розкиду (стандартного відхилення).

Однак, пряма фільтрація DoG усього зображення не завжди гарантує достатню ступінь пригнічення фону, особливо коли сцени є заплутаними або освітлення нерівномірне.

Для збільшення результативності цієї фільтруючої операції, в нашому дослідженні було впроваджено метод ковзного вікна.

Основна ідея цієї техніки полягає в тому, що фіксована квадратна область послідовно переміщується поверх зображення, рухаючись із заданим інтервалом уздовж горизонтальної (зліва направо) та вертикальної (зверху вниз) осей.

З огляду на кожне положення вікна, формується зона куди спрямовано інтерес (ROI), до якої далі прикладається фільтр "Різниця Гаусіанів" (DoG).

Зображення, що вийшло після фільтрації, піддається оцінці за попередньо визначеною умовою з метою виокремлення можливих міток від загального фону.

Завдяки такій локальній оцінці є можливість сконцентрувати увагу на обмеженому фрагменті візуальних даних, суттєво знижуючи вплив загальноприйнятих коливань освітленості.

Як демонструє зображення на рисунку 5, справжня мітка, як правило, постає як найбільш світлий елемент у межах визначеного локального простору, а контрастність відтінків сірого між цією міткою та її периметром є досить помітною.

Це дає змогу впевнено визначити мітку та передати її позиційні дані на наступний етап щодо високоточної ідентифікації місця.

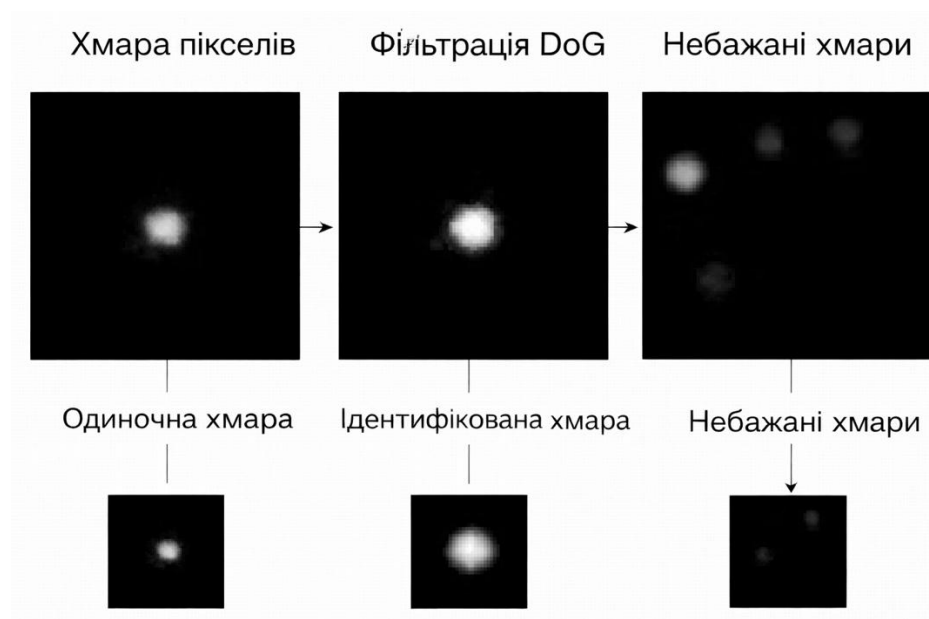


Рисунок 5 Фільтрація DoG та хмари пікселів

Таким чином, дискримінант, котрий дозволяє ідентифікувати справжній маркер, може бути виражений як відмінність між найвищим рівнем яскравості у відповідній локальній ділянці та середнім показником яскравості фону:

$$D = I_{max} - \overline{I_{bg}} \quad (4)$$

де

I_{max} являє собою найбільшу інтенсивність пікселів у межах певної локальної ділянки після застосування фільтрації DoG;

$\overline{I_{bg}}$ – це середній показник інтенсивності пікселів, що формують задній план у цій же ділянці.

Коли величина дискримінанта D сягає або перевищує встановлений поріг T , відповідна ділянка класифікується як така, що містить реальний маркер:

$$D > T$$

У протилежному ж випадку, якщо зазначена умова не задовольняється, фрагмент зображення вважається нерелевантним — або як частина загального фону, або ж як такий, що вміщує небажані скупчення точок.

Застосування цього критерію (дискримінанта) створює можливість ефективно відокремлювати справжні мітки від сторонніх завад, оскільки після проходження через фільтр DoG (Difference of Gaussians) маркер, як правило, виявляє значно більшу локальну різницю у яскравості порівняно з навколишнім середовищем.

Параметр розміру вікна, який використовується під час пошуку цих міток, зафіксовано на позначці 128 пікселів.

Це значення є більшим за габарити самого зображення маркера, виходячи з припущення, що мінімальна відстань, з якої ведеться спостереження, становить 25 метрів.

Дане встановлення розміру робить можливим гарантоване включення всього маркера в локальну зону дослідження (Region of Interest, ROI), навіть якщо присутні ефекти, спричинені перспективою.

Аби певна позначка гарантовано потрапила хоча б в одну область інтересу (ROI) цілком, крок, на який посувається вікно, встановлено таким, що дорівнює половині довжини ребра цього вікна.

Якщо трапляється ситуація, коли дві зони інтересу, що частково накладаються, одночасно відповідають критерію дискримінанта, то їхні відповідні ROI зводяться в єдину, що запобігає повторам у видачі та покращує стійкість фіксації.

Насправді ж, розмір зображень позначок у межах одного кадру може значно коливатися, оскільки кожна позначка фіксується під різним ракурсом і з різної відстані до апарату.

З огляду на це, задля забезпечення впевненого знаходження позначок, налаштування фільтра різниці згортки Гаусових функцій мусять підлаштовуватися під масштаб певної позначки.

Зокрема, параметри розкиду (стандартні відхилення) для фільтра DoG встановлюються окремо для кожного мітки, ґрунтуючись на її типовому розмірі у візуальному матеріалі.

Такий метод дає змогу синхронізувати масштаб роботи фільтра з габаритами об'єкта, що гарантує досягнення найвищої різниці у яскравості між міткою та її оточенням.

Принципове обґрунтування того, як обираються ці розсіювання для маркерів різного розміру, проілюстровано на рисунку 6.

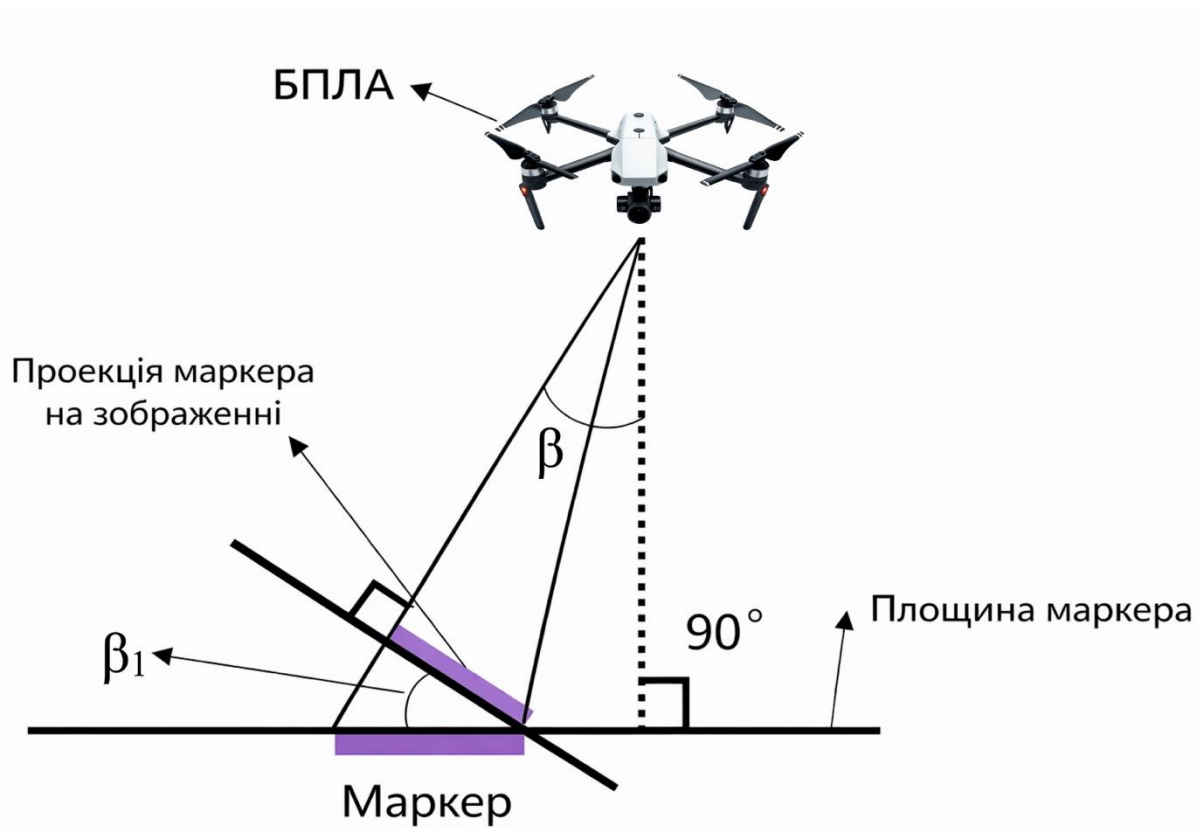


Рисунок 6 Визначення стандартних відхилень фільтра DoG

На рисунку 6, кут β являє собою промінь зору апарату (від центру мітки до центру апарату) та вектор нормалі до площини цієї мітки; його можна вирахувати, спираючись на орієнтацію камери, внутрішні характеристики апарату та розташування мітки у полі зору.

Припускається, що площина мітки орієнтована приблизно горизонтально.

На схемі кут β описує сектор огляду, що формується кутом тангажу апарату, тоді як β_1 відображає модифікацію цього сектора, спричинену кутом крену апарату.

Взаємний вплив цих кутів формує просторову конфігурацію спостереження за міткою та розмір її проекції на аерофотографічному матеріалі.

З огляду на зазначені взаємозв'язки, стандартні відхилення σ для кожної мітки можуть бути розраховані за такою формулою:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_0 \cos \alpha \\ \sigma_y &= \sigma_0 \cos \beta\end{aligned}\quad (5)$$

Нехай σ_0 — це вихідне (базове) стандартне відхилення, яке візьмемо за 4.

Це значення було виведено шляхом статистичного опрацювання розмірів маркерів на аерофотознімках, отриманих із дистанцій спостереження від 25 до 100 метрів.

Розгляд даних, представлених на рисунку 7, свідчить про те, що й точність, і достовірність виявлення покращуються тоді, коли для кожного окремого маркера стандартні відхилення добираються персонально, базуючись на розмірі цього маркера у кадрі.

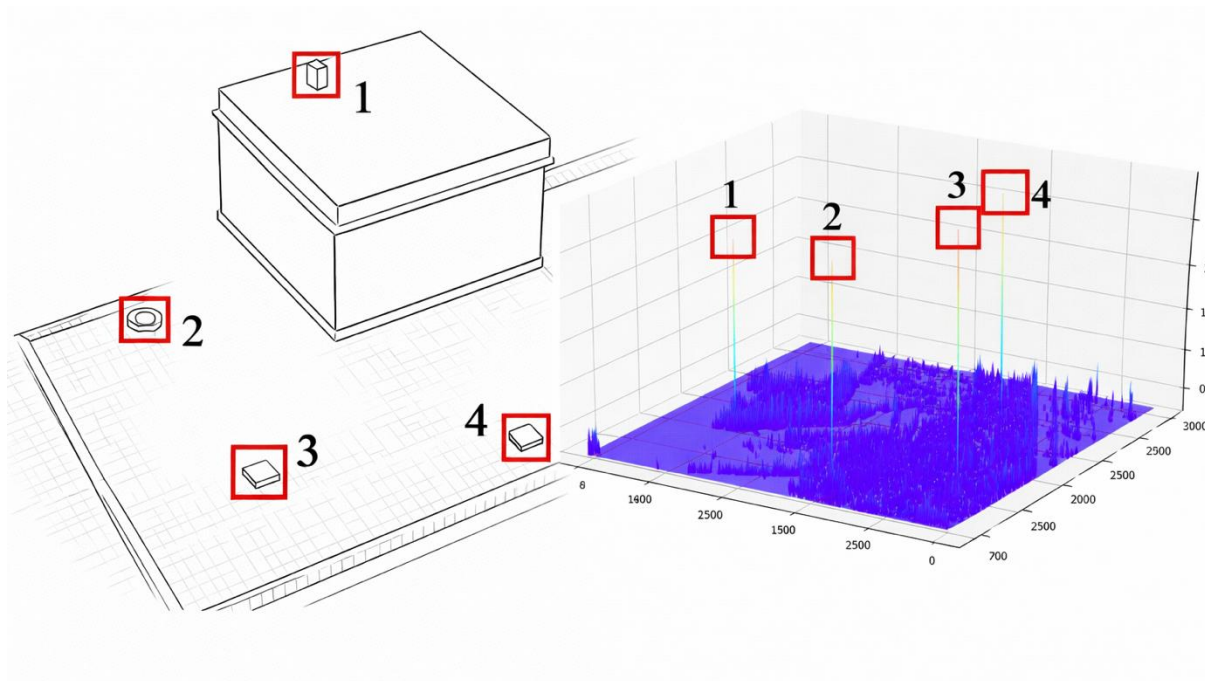


Рисунок 7 Результати виявлення маркерів із застосуванням фільтра

Під час знімання кут тангажу камери дорівнює 45° , тоді як нахил по осі крену становить 0° .

На рисунку 7 представлені підсумки аналізу тривимірних (3D) сітчастих зображень, які були оброблені за допомогою фільтра Різниці Гаусових функцій (DoG).

На даному зображенні видно 3D-сіточне представлення, оброблене фільтром DoG із заздалегідь визначеними (фіксованими) параметрами стандартних відхилень.

Зокрема, для $G1(x,y)$ вибрано $\sigma_x = \sigma_y = 4$, а для $G2(x,y)$ $\sigma_x = \sigma_y = 5$.

Цей метод не бере до уваги, як саме змінюється масштаб маркерів через нахилене положення камери.

У цьому сценарії різниця в рівнях сірого між маркерами 1 та 2 становить 86 та 194 одиниць відповідно.

Якщо ж встановити поріг дискримінанта $h=200$, то коректне виявлення маркерів 1 та 2 стає неможливим, що наочно демонструє обмежену ефективність застосованого фільтра з незмінними налаштуваннями.

Натомість, на підрисунку зображено тривимірну сітку, яка пройшла обробку за допомогою фільтра DoG, де стандартні відхилення налаштовані згідно з формулою (5).

Підгонка параметрів цього фільтра під конфігурацію зйомки сприяє посиленню локальної контрастності маркерів, уможливорюючи надійне ідентифікування всіх маркерів при єдиному пороговому значенні дискримінанта.

На рисунку 7 показано вихідне зображення, до якого було застосовано згаданий фільтр різниці Гаусіанів (DoG), відхилення якого розраховано, виходячи з геометрії знімкування.

У цьому випадку для функції $G1(x,y)$ значення σ_x встановлено як 4, а для $G2(x,y)$ σ_y як 5 для всіх маркерів, оскільки нахил камери у відповідному напрямку дорівнює 0.

Водночас показники σ_y для $G1(x,y)$ виявилися такими: 1,8; 2,7; 3,2; та 3,0 відповідно для маркерів з 1-го по 4-й, що узгоджується з нахилом у 45° .

Для другого гаусового компонента, $G_2(x,y)$, показники σ_y були отримані шляхом збільшення відповідних значень σ_y функції $G1(x,y)$ на одиницю.

Результати, які ми маємо, підтверджують, що для всіх чотирьох маркерів різниця у відтінках сірого перевищує позначку 200, завдяки чому вони чітко виокремлюються на загальному тлі, що гарантує їхнє адекватне автоматичне розпізнавання.

1.3 Локалізація маркерів

Наведені раніше кроки опрацювання аерофотозображень дають змогу впевнено знайти наявність міток та окреслити відповідні зони уваги (ROI), де вони розташовані.

Утім, лишень факт знаходження мітки не є вирішальним для фотограмметричних цілей, адже для наступного етапу спільного вирівнювання знімків потрібне високоточне встановлення просторового розташування центральної точки кожної мітки у межах зображення.

Досвід свідчить, що інтенсивність світла пікселів, з яких складається зображення мітки, зазвичай розподілена без однакової міри.

Справа тут у спотворенні перспективи, освітленні нерівномірному, дефектах оптики та частковому затемненні поверхні.

За таких обставин методи визначення позиції, що покладаються лише на контури форми, здатні викликати зміщення визначення середини мітки та погіршити сукупну точність.

Аби зробити визначення місця надійнішим, у цьому дослідженні використали метод центроїда щільності, який бере до уваги, як розподілені просторово значення відтінків сірого всередині зони, що розглядається.

На противагу звичайному геометричному центру, центроїд густини (щільності) розраховується як середнє зважене розташування окремих пікселів, причому їхні інтенсивності слугують ваговими коефіцієнтами.

Ця методика дає змогу мінімізувати вплив випадкових чинників (шумів) на межі й гарантує надійніше визначення центра навіть тоді, коли освітленість мітки не є однорідною.

З точки зору математики, значення координат даного маркера обчислюються керуючись розподілом світлосили, зафіксованої на зображенні, що, своєю чергою, дає змогу досягти рівня точності визначення розташування, вищого за розмір пікселя (субпіксельна точність).

Видобуті координати центроїдів слугують на подальшому етапі фотограмметричної проробки як вихідна інформація для блокового узгодження аерофотознімків, виступаючи там у якості реперних або контрольних маркерів.

Отже, використання методики визначення центроїда щільності є ключовим кроком у загальному циклі опрацювання аерозображень, бо він напряду позначається на вірності установлення параметрів зовнішнього позиціонування апаратури й, як наслідок, на рівні середньоквадратичних помилок (СКП) фінальної фотограмметричної побудови.

У наступному етапі координати центра позначки обчислюються за такою формулою:

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad y_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (6)$$

де

x_i, y_i — це координати i -го пікселя, що входить до окресленої зони маркера;

N — сумарна кількість пікселів, які потрапили у межі області, що нас цікавить.

Використання цієї методики дає змогу досягти стабільної оцінки розташування центральної точки маркера, навіть якщо розподіл яскравості не є однорідним.

Це відбувається тому, що процес усереднення значень координат успішно мінімізує вплив локальних перешкод (шумів) та незначних деформацій.

Обчислені координати цього центроїда потім слугують вихідними даними для наступного етапу — блокового вирівнювання знімків, що, своєю чергою, має прямий вплив на кінцеву точність фотограмметричної відбудови сцени.

2. Проведення дослідження

У цій частині представлено здобутки двох дослідів, що мали за мету з'ясувати, наскільки добре зарекомендувала себе використана система орієнтирів для фотограмметричної аерофотозйомки з використанням безпілотників.

Перший експеримент ґрунтується на вивченні трьох фактично отриманих серій аерознімків і його завдання — підтвердити стійкість та надійність знаходження цих маркерів.

Другий дослідницький етап сфокусований на чисельному вимірюванні покращення точності фотограмметричної реконструкції аерофотоматеріалів завдяки впровадженню пропонованої системи орієнтирів.

З метою накопичення вимірювальних відомостей у межах цього дослідження залучався компактний квадрокоптерний літальний апарат DJI Phantom 4 RTK, який є поширеним інструментом у сфері інженерних вимірювань та створення картографічних матеріалів.

Дана безпілотна платформа несе на борту цифрову фотокамеру, що має дюймовий КМОП-сенсор та здатна формувати зображення розміром 5472 x 3648 пікселів, гарантуючи таким чином захоплення аерофотознімків із високим ступенем деталізації.

Апарат для фіксації зображень монтовано на систему стабілізації з функцією нахилу та повороту, яка охоплює діапазон кутів нахилу від мінус дев'яноста до плюс тридцяти градусів, що дає змогу проводити фотографування як безпосередньо зверху, так і під кутом.

Фактична фокусна відстань об'єктива – 8,8 міліметрів, а питомий розмір елемента сенсора складає 2,4 мікрометра.

Цих характеристик цілком вистачає для досягнення потрібної просторової деталізації, незалежно від робочої висоти апарату.

Керівництво рухом безпілотного літального апарату (БПЛА) реалізовувалося через наземний пункт управління, який надає можливість попереднього визначення траєкторії польоту.

Як наслідок, аерофотознімання проходило у повноавтоматичному режимі, забезпечуючи неухильне виконання запланованих параметрів прольоту та необхідного ступеня накладання кадрів.

У тих серіях світлин, які залучалися до першого випробування, були присутні чотири розроблені нами кольорові мітки, а також чотири загальноприйняті чорно-білі круглі орієнтири, що їх підтримує програма Agisoft Metashape.

Останні слугували еталоном (конкурентною методикою) для зіставлення результатів протягом усієї роботи.

Зразки повітряних знімків, взяті з трьох таких послідовностей, можна побачити на рисунку 8.

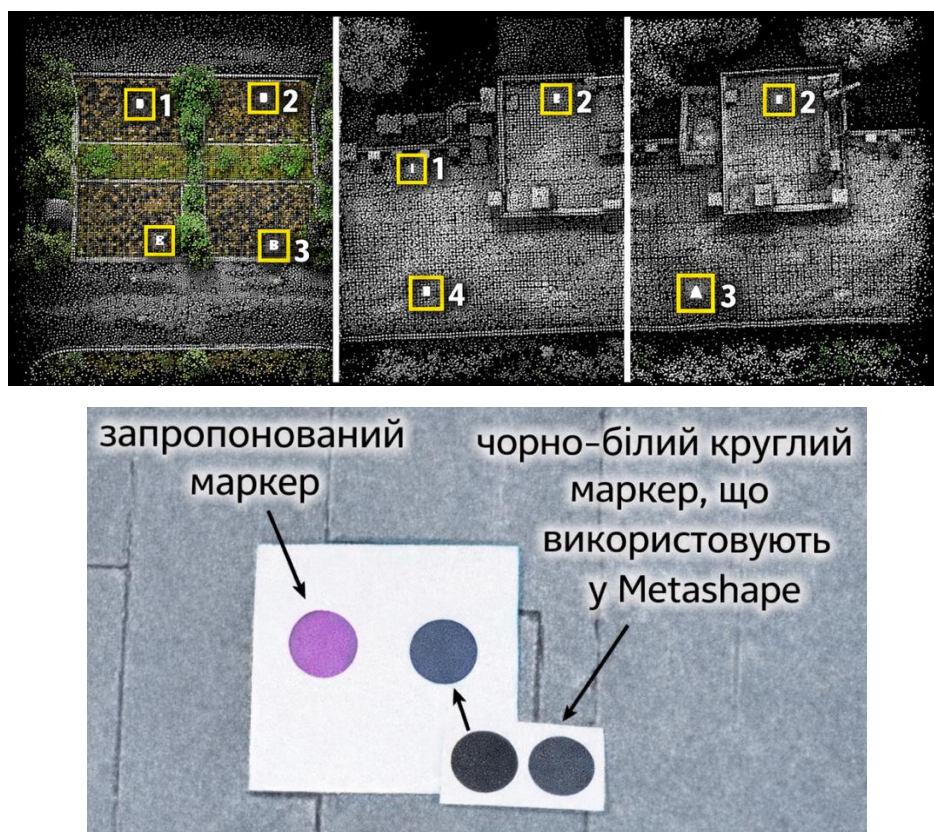


Рис. 8. Приклади аерофотознімків із трьох послідовностей

Кожен випробувальний ряд складається із п'яти повітряних оригіналів, знятих під кутами нахилу апаратури в нуль, п'ятнадцять, тридцять, сорок п'ять та шістдесят градусів відповідно.

Натомість, висота, з якої літальний пристрій здійснював візуальний захоплення, була зафіксована на позначці у 25 метрів; цей параметр гарантував, що просторова деталізація дозволить розміру ділянки під єдиний піксель на землі не перевищуватиме 7,6 міліметра.

У рамках другого наукового вивчення було проведено фотографування з повітря на визначеній ділянці, що призвело до фіксації 643 світлин, якими було покрито простір площею, орієнтовно, двісті метрів на сто метрів.

Параметри аерофотозйомки та виконання польоту, використані у цьому масиві даних, були ідентичними тим, що використовувалися у першому дослідження, отже, порівняльний аналіз отриманих результатів є цілком коректним.

Процес зйомки було організовано з використанням конфігурації "хрест-навхрест", що вимагає від безпілотних літальних апаратів (БПЛА) проходження траєкторій, орієнтованих під кутом дев'яносто градусів одна відносно одної.

Ступінь поздовжнього та бокового накладання кадрів встановили на позначці вісімдесят відсотків, цього достатньо для забезпечення стабільного фотограмметричного орієнтування та формування просторової моделі високої точності.

2.1 Аналіз послідовностей зображень

У межах цієї роботи було здійснено підрахунок результативності знаходження міток на ортофотопланах, ґрунтуючись на двох критеріях оцінки: частці правильних спрацювань та частці помилкових спрацювань.

Ці показники дають змогу незалежно визначити ступінь достовірності функціонування методики розпізнавання міток, незалежно від того, які були умови аерофотографування.

Показник правильних спрацювань розраховується як співвідношення кількості маркерів, знайдених безпомилково, до сумарної кількості усіх фактично наявних маркерів на знятих матеріалах.

Оцей параметр ілюструє, наскільки вправно алгоритм здатний виявляти усі наявні у вибірці орієнтири.

Показник помилково позитивних спрацювань, який ми називаємо FRFR, розраховується шляхом ділення числа неправильно ідентифікованих маркерів на загальну суму всіх зроблених детекцій.

Величина цього значення демонструє міру інтерференції та збоїв, що трапляються під час автоматизованої процедури розпізнавання.

Комплексний розгляд величин TRTR і FRFR дає можливість ґрунтовно виміряти результативність впровадженої системи маркування, зокрема її спроможність гарантувати високий ступінь повноти знахідок при одночасному утриманні помилкових спрацювань на найнижчому рівні.

$$TR = \frac{N_{TR}}{N_{GT}}, \quad FR = \frac{N_{FR}}{N_D} \quad (7)$$

де

N_{TR} — це число тих маркерів, що були ідентифіковані правильно;

N_{GT} — це сумарна кількість усіх дійсних маркерів, що фактично містяться на візуалізаціях;

N_{FR} — це кількість маркерів, помилково визначених як наявні;

N_D — це загальний підсумок усіх маркерів, які були виявлені.

Показники істинно позитивних спрацювань (TRTR), що прямують до одиниці, демонструють високу ефективність методу у виявленні переважної частки маркерів, присутніх на візуальних даних.

Якщо ж TRTR знижується, це сигналізує про те, що деякі мітки були проігноровані, що, у свою чергу, погіршує загальну репрезентативність отриманих даних.

Щодо коефіцієнта хибнопозитивних спрацювань (FRFR), він відображає частоту помилкових детекцій, які генерує система.

Нижчі показники FRFR свідчать про більш надійне функціонування алгоритму, оскільки це вказує на успішне відсіювання шумів та нерелевантних елементів фону.

Підвищення ж FRFR означає надмірну кількість хибних спрацювань, що потенційно може створити перешкоди на етапі подальшої обробки цих даних методами фотограмметрії.

Отже, аби система виявлення маркерів була дієвою, необхідно прагнути досягнення найвищих показників TRTR при одночасному зниженні показників FRFR до мінімуму.

Якщо рівень помилкових спрацювань (FRFR) однаковий, то система, яка демонструє більший коефіцієнт істинно позитивних спрацювань (TRTR), вважається більш досконалою.

Це впливає з того, що при ідентичній кількості хибних виявлень більш продуктивний алгоритм спроможний правильно ідентифікувати більшу частку справжніх маркерів.

У рамках цього проєкту для порівняльного зіставлення було задіяно вбудовану в Agisoft Metashape опцію автоматичного пошуку чорно-білих круглих маркерів, тоді як маркери, створені в рамках даної роботи, виявлялися за допомогою алгоритму, розробленого тут.

Варто підкреслити: для обох методів спершу необхідно здійснити процес Structure from Motion (SfM), а вже після цього як ті мітки, що вказав

користувач, так і звичайні чорно-білі маркери можна автоматично ідентифікувати на знімках.

Згідно з рисунком 8, через зміну позиції камери габарити та кольорова насиченість маркерів на фотографіях значно коливаються; деякі з них демонструють знижену контрастність.

Крім того, було виявлено, що контури чорно-білого типу, властиві стандартним маркерам, іноді можуть бути схожими на певні деталі заднього плану або сторонні об'єкти.

Якщо на зображенні присутні виразні чорно-білі межі, це тягне за собою зменшення продуктивності автоматизованого методу пошуку, який застосовується у програмному забезпеченні Metashape.

З огляду на вищевикладене, досягти уникнення хибних спрацювань, застосовуючи лише стандартну опцію автоматичного знаходження у Metashape без потреби в ручному коригуванні, є доволі проблематичним.

Натомість, концепція, представлена у даному дослідженні, дозволяє значно підсилити сигнали маркерів і водночас ефективно придушити фонові шуми, що, своєю чергою, сприяє кращій стійкості та достовірності автоматичного ідентифікування.

У Таблиці 1 представлено зіставлення результатів використаного нами методу

Таблиця 1 Результати виявлення маркерів

Набір даних	Система маркерів	Показник	Кут тангажу (0°)	Кут тангажу (15°)	Кут тангажу (30°)	Кут тангажу (45°)	Кут тангажу (60°)	Разом
Послідовність 1	Наша	TR	100.0	100.0	100.0	75.0	75.0	90.0
		FR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Metashape	TR	100.0	50.0	0.0	0.0	0.0	35.0
		FR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Послідовність 2	Наша	TR	100.0	100.0	100.0	100.0	75.0	95.0
		FR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Metashape	TR	100.0	100.0	75.0	25.0	25.0	65.0
		FR	33.3	33.3	40.0	0.0	0.0	35.3
Послідовність 3	Наша	TR	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		FR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Metashape	TR	100.0	75.0	50.0	0.0	0.0	45.0
		FR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Отримані дані вказують на те, що використана методика дає змогу досягти помітного збільшення показника правильних спрацювань (істинно позитивних детектувань) TRTR, а також демонструє стійкість до ускладнень, спричинених заплутаним і різномірним оточенням.

Фактично, це підтверджує вдалість обраної стратегії посилення сигналів маркерів та успішне мінімізування впливу шуму.

З іншого боку, програмний комплекс Agisoft Metashape автоматично ідентифікує усі можливі зони, що потенційно можуть містити маркери.

Однак, лише певна частка цих точок отримує достатньо точну просторову прив'язку.

Координати ж решти маркерів встановлюються на підставі передбачень, сформованих під час реалізації алгоритмів "Структура з руху" (SfM), що нерідко тягне за собою погіршення загальної точності визначення.

З огляду на те, що визначені позиції маркерів не задовольняють критеріям точності для автоматизованого визначення, у цьому дослідженні їх трактують як не-виявлені, і відповідно коригують під час підготовки даних для Таблиці 1.

2.2 Аналіз аероданих

У цій роботі, що має експериментальний характер, для з'ясування рівня точності, досягнутого фотограмметричною обробкою, залучили дев'ять орієнтирів.

Положення цих орієнтирів було визначено за допомогою тахеометричних та цифрових нівелювальних вимірювань.

Чотири згадані орієнтири виконували функцію наземних опорних точок (GCP), необхідних для переведення фотограмметричної моделі з початкової, нев'язки до реальної просторової системи координат.

Решта п'ять орієнтирів слугували контрольними точками (CP), що дозволило провести незалежну апробацію точності отриманих даних.

Слід зазначити, що всі без винятку орієнтири виступали як фіксовані обмеження (точкове прив'язування) під час етапу уточнення параметрів орієнтації камери.

На початковій стадії усі аерознімки було узгоджено у софті Agisoft Metashape, застосовуючи типовий алгоритм фотограмметричного вирівнювання.

Далі, розроблений у цій роботі підхід самостійно ідентифікував позиції реперних точок на знімках, а видобуті координати стали підставою для подальшого вдосконалення параметрів зовнішнього орієнтування фотоапаратів, що реалізовано через функцію "Optimize Cameras" у Metashape.

Встановлення "точності маркера" у програмному інтерфейсі було зафіксовано на позначці 0,005 м, що повністю узгоджується з похибками, притаманними геодезичним вимірюванням на місцевості.

З метою проведення порівняльного дослідження, дані, здобуті за допомогою нової методики, були зіставлені з результатами, отриманими стандартним методом автоматичного пошуку маркерів, що вбудований у програмне забезпечення Metashape.

Для цього були задіяні дев'ять маркерних міток, виконаних у чорно-білому кольорі й розташованих аналогічно до розроблених міток.

В обох тестових сценаріях будь-яке ручне втручання, що стосувалося ідентифікації чи корекції розташування маркерів, було цілком деактивовано, що гарантує неупередженість у зіставленні цих двох підходів.

Аби спростити подальший виклад, у цій роботі під "запропонованим методом" розумітимемо спосіб улаштування орієнтації камер, що спирається на розроблену систему маркерів.

Натомість, під "стандартним методом" мається на увазі вбудований у програмне забезпечення Metashape алгоритм автоматичного знаходження маркерів.

На рисунку 9 продемонстровано просторове розташування контрольній точок на місцевості, а також контрольних точок, винесених у площину ХУ.

Червоним кольором позначені ці наземні контрольні точки, а чорними трикутниками — згадані контрольні точки.

Кожна пара маркерів, що належать до різних категорій, трактується як єдина узгоджена точкова ознака, яка залучається до процедури фотограмметричного вирівнювання.

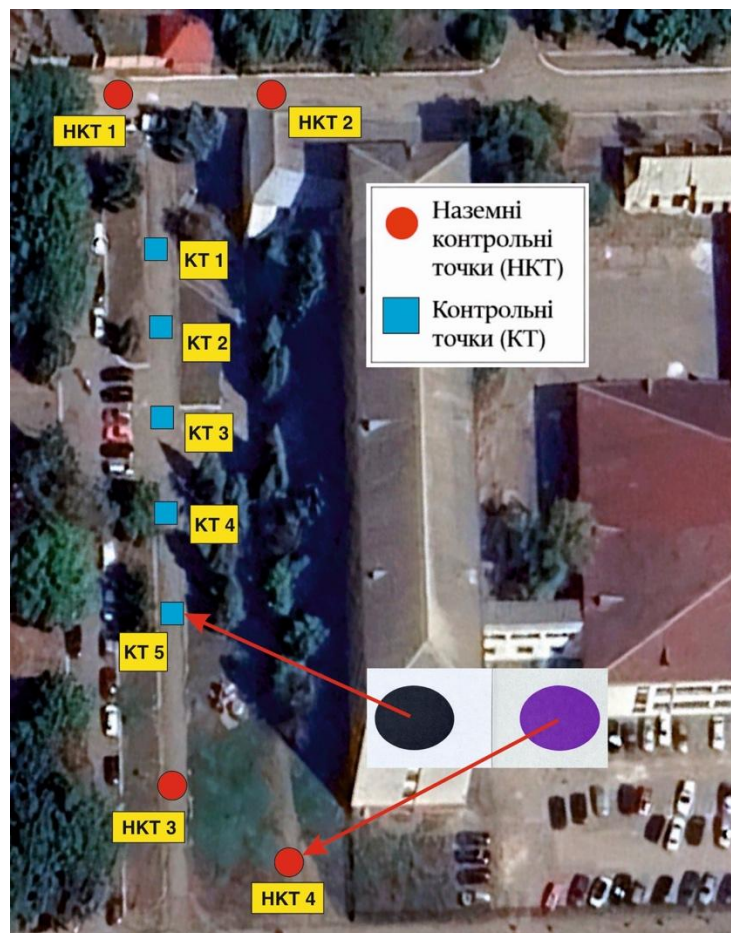


Рисунок 9 Наземні контрольні точки та контрольні точки аерофотоданих розташовані

Згідно з упровадженням як нового методу, так і загальноприйнятого Verfahren, що фігурує у програмному комплексі Agisoft Metashape, вдалося автоматично отримати 929 та 83 проєкції відповідних маркерів на аерокоп'ях.

Базуючись на цих здобутих проєкціях, було здійснено підрахунок кількості правильних знахідок та розраховано коефіцієнт достовірності позитивних спрацювань контрольних точок для маркерів.

Зведені дані кількісних досліджень представлені у Таблиці 2.

Таблиця 2 Статистика виявлення маркерів

Маркер	Загальна кількість проєкцій	Використаний метод: проєкції	Використаний метод: TR, %	Metashape: проєкції	Metashape: TR, %
КТ1	129	125	96.9	11	8.5
КТ2	131	121	92.4	12	9.2
КТ3	132	122	92.4	16	12.1
КТ4	128	121	94.5	10	7.8
КТ5	128	124	96.9	9	7.0
НКТ1	71	70	98.6	8	11.3
НКТ2	111	104	93.7	6	5.4
НКТ3	85	84	98.8	6	7.1
НКТ4	61	59	96.7	5	8.2

Виявлені дані демонструють, що використаний метод значно краще справляється з ідентифікацією маркерів, аніж стандартна функція автоматичного виявлення, вбудована у програмне забезпечення Agisoft Metashape.

При застосуванні типового алгоритму Metashape найнижчий показник коефіцієнта істинно позитивних спрацювань (TRTR) досягає лише 5,4%, а найвищий – 12,1%.

Це яскраво ілюструє, наскільки ненадійним є автоматичне визначення об'єктів, коли умови аерофотозйомки є складними.

Натомість, впровадження методики, викладеної у цій праці, уможливилює доведення показника TRTR до діапазону 92,4–98,8% для усього спектру маркерів.

Отже, сукупне збільшення результативності виявлення сягає приблизно 90%, що слугує вагомим доказом дієвості алгоритму посилення маркерів та нейтралізації фонових завад.

Наступний етап передбачав дослідження точності опорних точок (ОТ), які були згенеровані як за допомогою удосконаленої фотограмметричної схеми (УФС), так і при застосуванні стандартної фотограмметричної схеми.

Похибки визначення місця контрольних точок у горизонтальній (ХУ) та вертикальній (Z) площинах, розраховані для обох обраних методик, представлено у Таблиці 3.

Ці отримані розрахункові значення зіставляються з істинними координатами контрольних точок, котрі були встановлені за допомогою тахеометра та високоточного цифрового нівелювання.

Такий підхід дає змогу неупереджено проаналізувати, як застосування використаного методу позначається на загальній точності відновлення (реконструкції) елементів за допомогою фотограмметрії.

Таблиця 3 Похибки координат контрольних точок

КТ	Покращена PS				Стандартна PS			
	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)	Разом (мм)	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)	Разом (мм)
КТ 1	-2.2	-4.0	13.3	14.1	-4.6	-6.9	38.5	39.4
КТ 2	2.6	-8.4	8.2	12.1	-0.4	-10.5	38.0	39.4
КТ 3	-1.5	-4.2	2.8	5.2	-3.8	-7.1	38.7	39.5
КТ 4	0.6	-1.3	2.2	2.6	-1.9	-2.1	33.5	33.6
КТ 5	-2.5	-7.4	5.8	9.7	-3.3	-8.0	22.4	24.0

Згідно з отриманими даними, обидва розглянуті методики забезпечують ідентичну ступінь точності при визначенні планових координат (X, Y).

Однак, якщо говорити про вертикальну складову (Z), то вдосконалена фотограмметрична конфігурація демонструє значно кращу точність, якщо порівнювати її зі стандартним способом опрацювання даних.

Це чітко засвідчує позитивний ефект впровадження запропонованого підходу на якість реконструкції просторової структури об'єктів.

Рисунок 10 ілюструє величини середньоквадратичних відхилень (RMSE) для реперних точок, розраховані незалежно для кожного з трьох осей, що дає можливість візуально оцінити різницю в точності, досягнутій різними версіями фотограмметричної обробки.

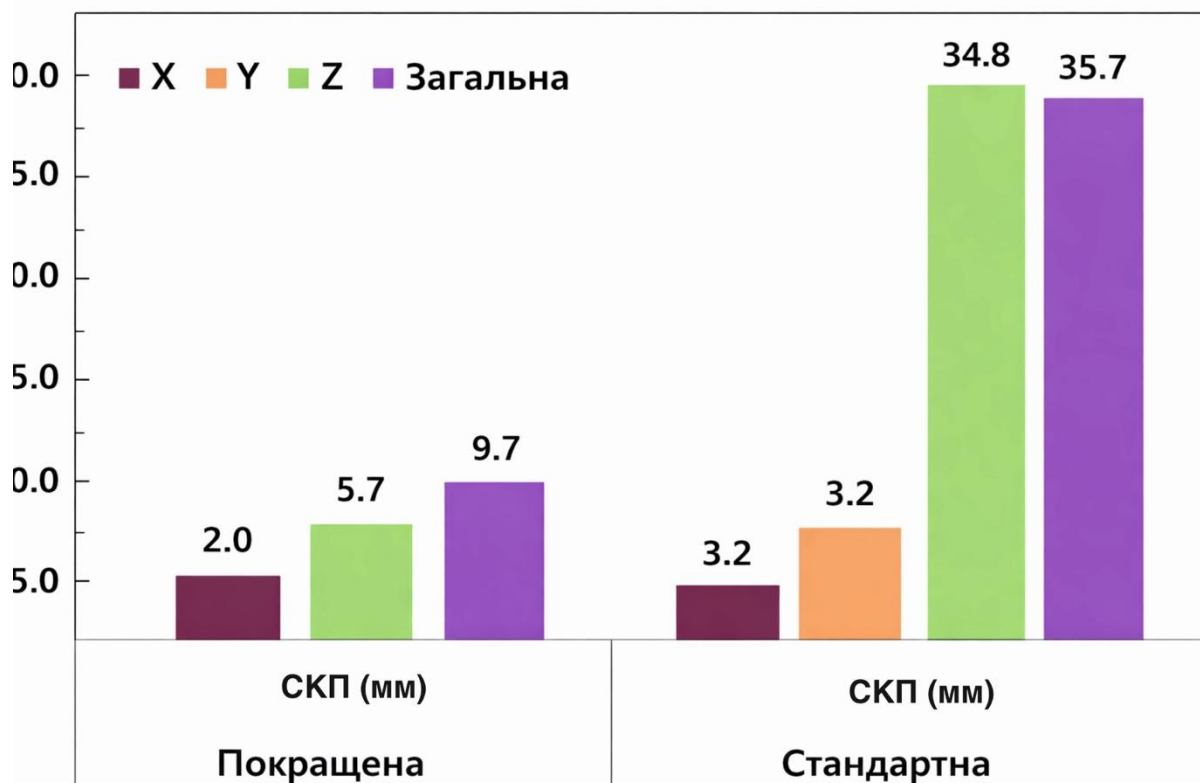


Рис. 10. Середньоквадратичні помилки контрольних точок

Щодо вдосконаленої фотограмметричної конфігурації, середньоквадратичні відхилення у точках контролю за осями X, Y та Z зафіксовані на рівнях 2,0 міліметра, 5,7 міліметра та 7,6 міліметра відповідно.

Для типової фотограмметричної розкладки аналогічні показники СКП у тих самих координаційних осях становлять 3,2 мм, 7,4 мм та 34,8 мм.

Звідси випливає, що покращення точності, досягнуте завдяки оптимізованій схемі, у напрямках X, Y та Z еквівалентне приросту близько 37,5%, 23,0% та 78,2% відповідно.

Для того, щоб візуально проілюструвати просторові розбіжності між двома отриманими тривимірними хмарами точок, на наступному зображенні (Рисунок 11) наведено графічну репрезентацію цих відмінностей у площині XY.

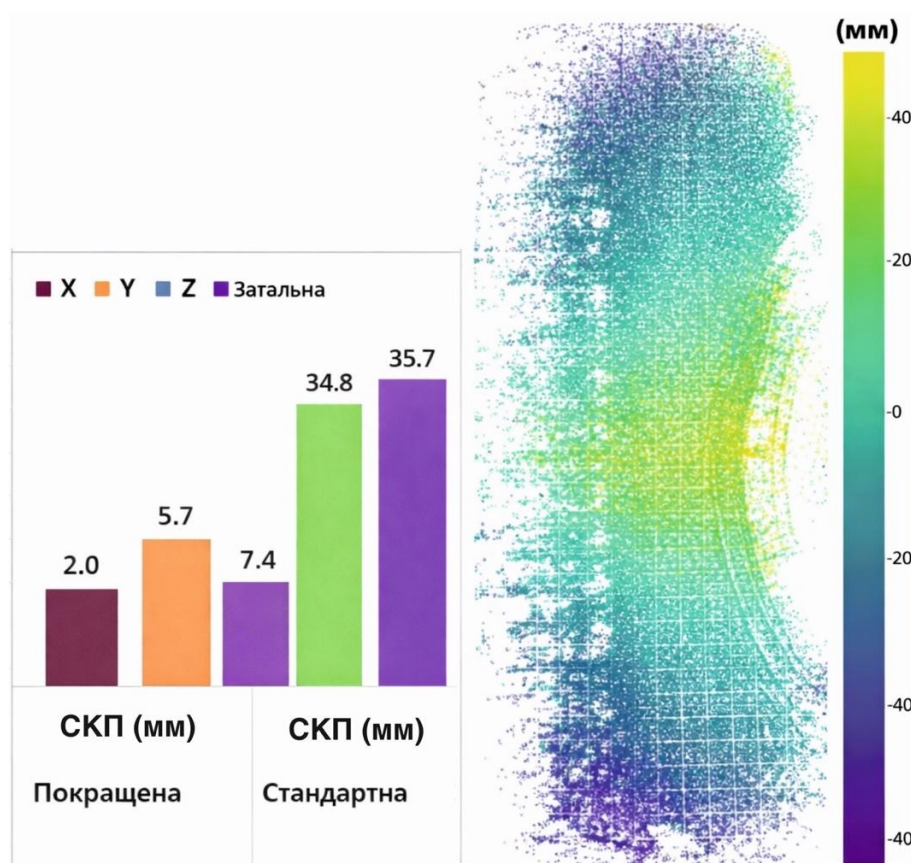


Рис. 11 Залишки між двома 3D хмарами точок

На рисунку барвисте позначення точок демонструє розбіжності у визначенні координат по осях X, Y та Z.

Виявлені дані вказують на те, що зсуви за плановою проєкцією (напрямки X та Y) є мінімальними, проте у вертикальному спрямванні Z фіксується помітне збільшення розбіжностей пропорційно віддаленню від референцних точок на місцевості.

У середньому, невідповідності між двома масивами 3D-точок, згенерованими завдяки типовій фотограмметричній методиці та використаній схемі, складають — у перерахунку на осі X, Y та Z — 2,6 міліметра, 3,4 міліметра та 26,9 міліметра відповідно.

Це доводить, що саме висотний аспект виявляється найбільш сприйнятливим до розповсюдження неточностей у збудованих фотограмметричних моделях.

Отже, нарощування числа точкових прив'язок, представлених у формі маркерів, дає змогу ефективно стримувати акумуляцію похибок і відчутно покращувати точність формування тривимірних хмар точок, особливо ж це стосується вертикальної осі.

У контексті цієї праці, обсяг проєкцій маркерів, здобутих обома шляхами, демонструє значну різницю: 929 проєкцій було ідентифіковано завдяки підходу, який ми пропонуємо, тоді як штатна функція, інтегрована у програмне забезпечення Metashape, надала лише 83 проєкції.

Аби мати можливість здійснити правильне порівняння, ми поступово скорочували кількість проєкцій маркерів, одержаних завдяки застосованому способу.

Для досягнення цієї мети, насамперед, проєкції кожного окремого маркера було впорядковано відповідно до розміру його помилки репроєкції.

Потім, на кожній стадії, ми відсіювали по 25 проєкцій, які мали найбільші показники цієї ж помилки, і цей процес повторили тричі.

Як підсумок, для кожного маркера вийшло сформувати чотири групи проєкцій, які містять різну кількість даних.

На рисунку 12 продемонстровано величини середньоквадратичних хиб контрольних точок по вертикальній осі Z, здобуті для кожної з чотирьох згрупованих проєкцій, що дає змогу зрозуміти, як зміна кількості реперних вимірів позначається на достовірності отриманих даних.

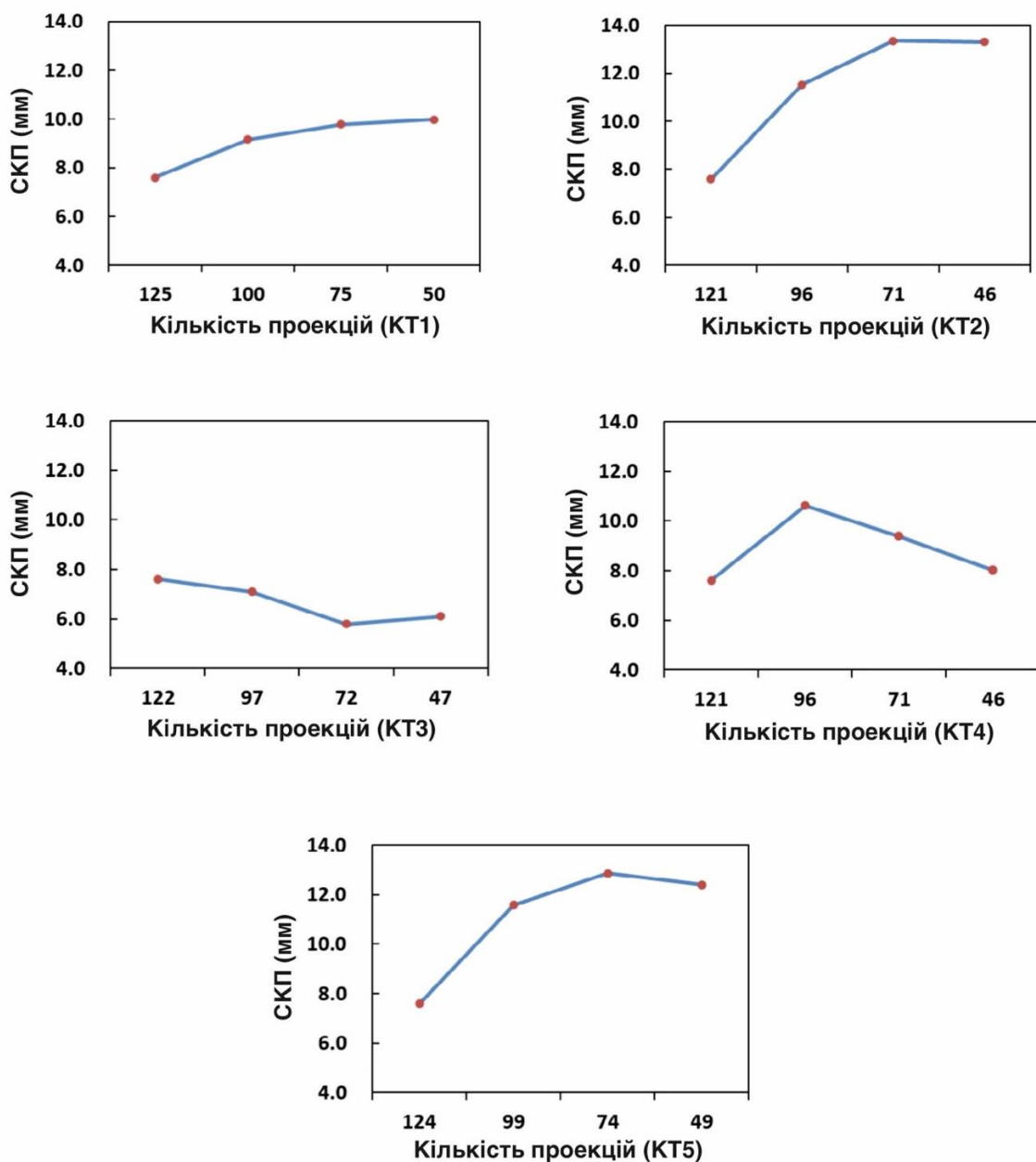


Рисунок 12 Середньоквадратичне відхилення контрольних точок

Слід мати на увазі, що зменшення кількості проєкцій здійснюється лише для одного конкретного маркера у кожній підсхемі, тоді як для решти маркерів зберігається їхня максимальна можлива кількість проєкцій.

Згідно з Рисунком 12, найвищу точність спостерігаємо тоді, коли контрольна точка КТ2 має 72 проєкції, що є меншим за максимально можливе число.

Ймовірно, це пояснюється тим, що спотворення, спричинені кутами огляду камери та флуктуаціями освітлення, негативно позначаються на точності визначення позицій окремих проєкцій маркерів.

Натомість, якщо подивитися на інші супутні малюнки, простежується послідовне покращення хибності визначення розташування реперних точок у міру того, як кількість проєкцій цих маркерів зростає.

Це вказує на те, що додатково залучені проєкції маркерів створюють більш обмежене просторове співвідношення як у площинному, так і у вертикальному вимірах.

Отже, можна дійти висновку, що застосування розширеного комплексу проєкцій маркерів суттєво мінімізує вплив значних систематичних неточностей, зводячи їх до локальних зон і тим самим гарантуючи вищу міцність та довіру до процесу формування тривимірних моделей.

3. Результати дослідження

Зібрані докази, отримані шляхом опрацювання серій зображень та аерознімків, чітко демонструють, що розроблена методика дає змогу стабільно ідентифікувати велику кількість проєкцій для кожного репера.

Застосування цих реперів у ролі фіксованих опорних пунктів значно поліпшує якість фотограмметричних моделей, створених за допомогою БПЛА, особливо тоді, коли конфігурація зйомки є заплутаною.

Незважаючи на те, що для завдань контролю за зміщеннями (деформаціями) загалом вигідно задіювати максимально можливий обсяг наземних опорних точок (GCP), їхнє високоточне визначення вимагає значних зусиль, забирає багато часу та не завжди є легко реалізованим на практиці у робочих умовах.

У ширшому розумінні, поданий спосіб здатний слугувати дієвим підтримуючим інструментом, вносячи додаткові специфічні верифікаційні рамки та мінімізуючи поширення залишкових помилок у збудованій фотограмметричній проєкції.

Отже, навіть коли кількість референційних точок на місцевості є скупкою, впровадження розробленої системи орієнтирів дає змогу суттєво покращити точність аерофотограмметричних даних, отриманих з БПЛА, і підвищити надійність отриманих даних.

У реальних застосунках палітра мітки здатна змінюватися залежно від оточення, аби мінімізувати імовірність хибного спрацьовування.

Приміром, колір, що складається з компонентів (R: 112, G: 48, B: 160), надзвичайно рідко трапляється у природних ландшафтах та міському середовищі, що значно збільшує візуальну різницю між міткою та тлом.

Таким чином, етапи оптимізації мітки можуть бути описані формально наступним чином:

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & d(x, y) \leq \tau \\ 0, & d(x, y) > \tau \end{cases} \quad T(x, y) = 255 \cdot M(x, y) \quad (8)$$

де τ — поріг (типово **0.20–0.30** у нормалізованих RGB).

Отже, ні відтінок мітки, ні способи її вдосконалення не є чимось незмінним; вони здатні трансформуватися залежно від обставин знімання та властивостей оточення.

Ключовим аспектом тут виступає здатність впевнено відокремлювати обраний колір за допомогою належних колірних моделей, що уможлиблює оперативне й безпомилкове автоматичне знаходження цих самих міток.

З огляду на вищесказане, для різноманітних ситуацій знімання резонно вносити гнучкі корективи як у вибір кольорів самих міток, так і в методи їхньої обробки, аби досягти найвищого показника успішного виявлення.

На даний момент, сталого та водночас зручного критерію для визначення найкращих кольорів виділення (маркерів) як такого відсутній.

У ракурсі цього дослідження було використано метод, базований на досвіді (емпіричний), який полягає у вивченні домінуючих барв у середовищі, що аналізується, з наступним добором таких відтінків маркерів, котрі є незвичними або ж зовсім не фігурують у сцені.

Критичний рівень для дискримінанта, позначений як T_h , у межах цього дослідження було зафіксовано на позначці 200.

Зниження ж порогової величини дає змогу фіксувати всі мітки в межах першого етапу випробувань, проте збільшення ж цього порогу значно зменшує шанс помилкових спрацювань.

У контексті завдань фотограмметрії, що виконуються з використанням безпілотних апаратів, хибні спрацювання є набагато більш

критичними, аніж пропуски, оскільки останні можуть спричинити вагомі спотворення вже у процесі фотограмметричного узгодження.

Водночас, слід брати до уваги, що гранично прийнятна величина порогу мусить бути узгоджена із загальною освітленістю зображення та контрастом самої мітки.

У майбутніх роботах намічено створення механізмів гнучкого коригування порогових значень, що базуватимуться на дослідженні освітленості сцени та властивостей об'єкта, що забезпечить кращу продуктивність та стійкість системи автоматичного розпізнавання.

Беручи до уваги складні умови, притаманні аерофотознімкам, маркер, створений у межах цього дослідження, виконано як недекодовану мітку.

З огляду на це, операцію зіставлення цих міток між різними зображеннями здійснюють, застосовуючи загальноприйняті алгоритми Structure from Motion, що спираються на природні характерні ознаки (ключові точки).

Хоча такий спосіб може виявитися не надто успішним на територіях із невеликою кількістю деталей, він демонструє прийнятні показники ефективності у міських чи штучно створених ландшафтах.

Всім відомо, що маркери, виконані лише у чорно-білих тонах, вирізняються помітнішою контрастністю, аніж кольорові, завдяки чому вони знайшли широке використання у сфері аерофотограмметрії з використанням безпілотників.

При цьому ключовою перевагою кольорових міток є їхня краща здатність виділятися на тлі природного оточення.

З огляду на це, у певних практичних випадках застосовують, приміром, маркери червоно-білого кольору.

Покращена можливість розпізнавання кольорових елементів у заплутаних сценах веде до покращення показників автоматичного

знаходження, що певною мірою нівелює втрату точності позиціонування, спричинену їх меншою контрастністю.

Висновок

Системи маркерів, що використовуються сьогодні у завданнях аерофотознімання, нерідко виявляють неповну стабільність за обтяжливих умов зйомки.

Це особливо помітно у випадку фотограмметрії, що реалізується за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), де візуальні мітки зазвичай складаються з монохромних компонентів.

Оскільки такі елементи часто трапляються як у природному ландшафті, так і в забудованій місцевості, це, своєю чергою, спричиняє велике число помилкових спрацювань на початку обробки.

З огляду на зазначене, у рамках цієї випускної кваліфікаційної роботи було використано та проаналізовано модифіковану систему маркерів для фотограмметричних робіт із залученням БПЛА, ядром якої є використання контрастних кольорових елементів замість звичних чорно-білих рішень.

Застосування різноманітних кольірних просторів дає можливість результативно нівелювати шуми на фоні та гарантувати стабільне самостійне знаходження міток.

Використана система генерує значний обсяг проєкцій штучно створених маркерів, які слугують у якості точкових утримуючих елементів, що безпосередньо веде до покращення хисту фотограмметричного оброблення.

З метою підтвердження дієвості запропонованої методики було проведено два цикли дослідницьких випробувань.

Вивчення першої когорти свідчить про те, що розроблений спосіб демонструє значну нечутливість до обтяжливих зовнішніх обставин.

Другий етап дослідження показав, що коли порівнювати з усталеним алгоритмом автоматичного розпізнавання, інтегрованим у програму Agisoft

Metashape, наша методика дає змогу покращити точність аерофотограмметрії, отриманої з використанням безпілотників, у відповідних осях X, Y і Z на 37,5 відсотків, 23,0 відсотки та 78,2 відсотки відповідно.

Окремо ми дослідили, як обсяг використаних проєкцій міток впливає на кінцеву якість фотограмметричних вимірювань.

Деталі, що були отримати, демонструють: нарощування числа референційних проєкцій дає змогу відчутно скоротити розповсюдження неточностей та зміцнити стійкість просторового моделювання, особливо це стосується вертикальної осі.

Підсумовуючи сказане, використана схема маркерів гарантує створення вражаючого обсягу детальних референційних проєкцій у сфері фотограмметрії, що базується на використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Це, у свою чергу, знижує необхідність у проведенні додаткових геодезичних зйомок опорних наземних пунктів, паралельно покращуючи загальну точність отриманих фотограмметричних даних.

Водночас, здобуті висновки окреслюють низку шляхів для майбутніх наукових пошуків.

Наприклад, варто розглянути доцільність інтеграції маркерів хрестоподібної форми, котрі доволі часто використовуються у сфері аерофотограмметрії за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), задля крос-перевірки ефективності застосування монохромних та повноколірних версій цих орієнтирів.

Ба більше, з огляду на те, що запропонована методика суттєво спирається на архітектуру Structure from Motion, у наступних етапах роботи було б слушно поширити аналіз, залучивши інші доступні програмні рішення з відкритим вихідним кодом.

Також окремого вивчення вимагає дослідження того, як впливають зони з низькою деталізацією (текстурою) на надійність та достовірність використаного алгоритму.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).
4. Третьак К. Р., Глотов В. М. Фотограмметрія та дистанційне зондування. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 436 с.
5. Перій С. С., Бalandюк А. В. Оцінка точності фотограмметричних моделей, створених за матеріалами БПЛА // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2021. – № 1(41). – С. 64–72.
6. Тревого І. С., Смірнов В. М. Аналіз впливу кількості наземних контрольних точок на точність ортофотопланів із БПЛА // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – 2022. – Вип. 95. – С. 88–96.
7. Перій С. С., Кучер О. В. Використання GNSS для створення системи наземних контрольних точок при UAV-зніманні // *Інженерна геодезія*. – 2020. – № 68. – С. 55–63.
8. Третьак К. Р., Марченко О. М. Інтеграція GNSS та фотограмметричних технологій у високоточному картографуванні територій // *Геодинаміка*. – 2023. – № 1(34). – С. 45–54.

9. Санс-Абланедо Е., Чандлер Дж. Х., Родрігес-Перес Дж. Р., Ордоньес К. Точність фотограмметричного дослідження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та SfM як функція кількості та розподілу наземних контрольних точок // Дистанційне зондування. – 2018. – Том 10(10). – С. 1606.
10. Гіндро С., Беш Р., Фарінотті Д. Оцінка точності цифрових моделей поверхні за зображеннями безпілотних літальних апаратів на льодовиках // Дистанційне зондування. – 2017. – Том 9(2). – С. 186.
11. Оніга В.-Е., Пфайфер Н., Кіріла К. Визначення оптимальної кількості наземних контрольних точок для отримання високоточних результатів на основі зображень БПЛА // Праці Румунської академії. – 2018. – Том 19(3). – С. 245–252.
12. Беміс С. П., Міклтвейт С., Тернер Д., Джеймс М. Р., Акчіз С., Тіле С., Бангаш Х. Наземна та БПЛА фотограмметрія: багатомасштабний інструмент картографування з високою роздільною здатністю для структурної геології та палеосейсмології // Журнал структурної геології. – 2014. – Том 69. – С. 163–178.
13. Луманн Т., Робсон С., Кайл С., Харлі І. Фотограмметрія зблизька та 3D-зображення. – Берлін: De Gruyter, 2019. – 944 с.
14. Вольф П. Р., Девітт Б. А., Вілкінсон Б. Е. Елементи фотограмметрії з застосуванням у ГІС. – 4-те вид. – Нью-Йорк: McGraw-Hill, 2014. – 624 с.
15. Ейзенбайс Х. БПЛА фотограмметрія. – Цюрих: ETH Zurich, 2009. – 235 с.
16. Ремондіно Ф., Фрейзер К. Методи калібрування цифрових камер: міркування та порівняння // Міжнародний архів фотограмметрії, дистанційного зондування та просторової інформаційної науки. – 2006. – Т. 36(5). – С. 266–272.

- 17.Вестобі М. Дж., Брасінгтон Дж., Глассер Н. Ф., Хамбрі М. Дж., Рейнольдс Дж. М. Фотограмметрія структури з руху: недорогий, ефективний інструмент для геологічних застосувань // Геоморфологія. – 2012. – Т. 179. – С. 300–314.
- 18.Некс Ф., Ремондіно Ф. БПЛА для 3D-картографування: огляд // Прикладна геоматика. – 2014. – Том 6(1). – С. 1–15.
- 19.Джеймс М. Р., Робсон С. Зменшення систематичних помилок у топографічних моделях, отриманих з БПЛА та наземних мереж зображень // Процеси та форми поверхні Землі. – 2014. – Том 39(10). – С. 1413–1420.
- 20.Харвін С., Люсьєр А. Оцінка точності геоприв'язаних хмар точок, отриманих за допомогою багатовидового стереоскопічного зображення з БПЛА // Дистанційне зондування. – 2012. – Том 4(6). – С. 1573–1599.
- 21.Тонкін Т. Н., Міджлі Н. Г., Грем Д. Дж., Лабадз Дж. К. Потенціал малих безпілотних авіаційних систем та структур, що генеруються з руху, для топографічних досліджень: перевірка нових інтегрованих підходів // Геоморфологія. – 2014. – Т. 226. – С. 35–43.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**«Оцінка точності фотограмметричної зйомки з БПЛА шляхом
оптимізації системи наземних контрольних точок»**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

____ рік
(дата)

(підпис студента)