

Володимир ГЛОТОВ¹, Мирослава БЯЛА², Євгеній ШИЛО³

^{1,2} Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: volodymyr.m.hlotov@lpnu.ua, myroslava.s.biala@lpnu.ua,

¹ <https://orcid.org/0000-0002-1779-763X>, ² <https://orcid.org/0000-0002-0345-8354>

³ Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: yevhenii.o.shylo@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2998-2813>

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.056>

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВОЇ ДИСТОРСІЇ ТА ЗСУВУ ЗОБРАЖЕННЯ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ МІСЦЕВОСТІ ПІД ЧАС ЗНІМАННЯ З БПЛА

Метою роботи є дослідження цифрової неметричної камери Canon EOS 5D Mark III, що встановлюється на октокоптері DJI S1000 на предмет точності визначення просторових координат за знімками. Виявлення та аналіз джерел похибок, що впливають на точність стереофотограмметричного знімання камерою Canon EOS 5D Mark III. Виконано стереофотограмметричне знімання та аерознімання з октокоптера DJI S1000 полігону маркованих точок, що слугували джерелом отримання даних для побудови стереомоделей з їх подальшим опрацюванням в програмному пакеті “Delta 2”. Сформовано каталоги просторових координат маркованих точок досліджуваних полігонів з вимірювань електронним тахеометром Trimble M3 DR і зі стереомоделей, обчислено різниці та СКП визначення просторових координат точок на знімках. Зважаючи на специфіку розміщення маркованих точок на досліджуваних полігонах, також обчислено вплив рельєфу місцевості та лінійного зсуву зображення на точність даних аерознімання. Отримані результати дослідження підтверджують наявність залишкової дисторсії оптичної системи цифрової камери Canon EOS 5D Mark III, що зумовлює необхідність проведення калібрування камери для підвищення точності отриманих знімків задля подальшого використання з метою картографування, моніторингу геоморфологічних процесів та явищ, створення ЦМР тощо. Також виявлено вплив лінійних зсувів та похибок, зумовлених перепадом висот місцевості знімання, на точність побудови стереомоделей. Авторами запропоновано конфігурацію та створено полігон маркованих контрольних точок на місцевості для проведення калібрування цифрової неметричної камери в умовах максимально наближених до умов знімання, що з огляду на проаналізовані літературні джерела є ефективнішим за калібрування в лабораторії.

Ключові слова: цифрова неметрична камера, аерознімання, безпілотний літальний апарат, зсув зображення, залишкова дисторсія.

Вступ

Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з метою картографування місцевості, моніторингу геоморфологічних процесів та явищ, створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) має ряд суттєвих переваг у порівнянні з пілотованими літальними апаратами, а саме: гнучкість, оперативність та відносна простота підготовки і виконання знімання, висока роздільна здатність, економічна доцільність [Глотов та ін., 2014; Gerke & Przybilla, 2016]. Перелічені фактори зумовили широкий спектр областей потенційного застосування БПЛА, серед яких: управління стихійними лихами (лісові пожежі, землетруси, повені); захист навколишнього середовища (моніторинг забруднення води та повітря, сміттєзвалищ, техногенно навантажених об'єктів, виявлення незаконного промислу); захист критичної інфра-

структури (нафто та газопроводи; спостереження за дорожнім рухом); агросфера (точне землеробство); тощо [Mohsan та ін., 2022; Niemeyer, 2015].

Стрімке зростання популярності застосування БПЛА підтверджується і кількістю публікацій за цією тематикою. Так на науковому порталі ResearchGate [ResearchGate, n.d.] за 2002 рік опубліковано 120 статей, у заголовку яких міститься слово «БПЛА», а починаючи від 2012 року і дотепер кількість праць сягає 1000 за рік.

У питаннях раціональності використання БПЛА для певного виду знімання ключовим моментом є точність отриманих результатів і кінцевого продукту. Адже, на противагу традиційному аерозніманню з пілотованих літальних апаратів, обмежені габарити БПЛА та їх тактико-технічні характеристики не дозволяють встановлювати високоякісну знімальну та

навігаційну апаратуру, замінюючи їх неметричними цифровими камерами масового виробництва та, зазвичай, недорогими MEMS датчиками. Як наслідок, матеріали БПЛА знімання можуть характеризуватися різномасштабністю знімків, значними кутами нахилу, відхиленням маршрутів знімання від запроєктованих [Шульц та ін., 2015; Аі та ін., 2015].

Серед чинників, які впливають на якість результатів БПЛА знімання, важливу роль відіграють технічні характеристики знімальної камери (фокусна віддаль об'єктива, планові елементи внутрішнього орієнтування (ЕВнО) x_0 , y_0 та ін.) [Bosak, 2013].

Під час використання неметричних знімальних камер ЕВнО є невідомими, присутня залишкова дисторсія оптичної системи, що в результаті унеможливує отримання точної та надійної тривимірної метричної інформації про досліджуваний об'єкт зі знімка. Тому, для визначення згаданих елементів проводять калібрування неметричних камер [Cramer та ін., 2017].

Існує низка способів калібрування знімальної камери як в лабораторних, так і в польових умовах, що мають ряд своїх переваг та недоліків [Глотов та ін., 2020; Cramer та ін., 2017; Griffiths & Burningham, 2019].

З огляду на недосконалість оптичної системи неметричних камер, точність знімання варіюватиметься залежно не лише від технічних характеристик камери, а й від умов знімання. Це зумовлює необхідність проведення дослідження кожної конкретної цифрової неметричної камери, що застосовується для аерознімання з БПЛА [Griffiths & Burningham, 2019].

Проте проаналізовані літературні джерела [Глотов та ін., 2020; Cramer та ін., 2017; Griffiths & Burningham, 2019] не надають інформації щодо універсальної методики дослідження та калібрування неметричних камер та акцентують увагу на важливості підбору оптимального методу залежно від умов та об'єкта знімання. В цьому аспекті актуальним питанням є виявлення та дослідження різниці результатів різних методів калібрування камери на складних об'єктах зі значним перепадом висот.

Мета

Основною метою представленої роботи є дослідження цифрової неметричної камери Canon EOS 5D Mark III, що встановлюється на

октокоптері DJI S1000 як в лабораторних, так і в польових умовах, на предмет точності визначення просторових координат за знінками, а також здійснення аналізу джерел похибок, що впливають на точність результатів стереофотограмметричного знімання.

Методика та результати

Основою методики дослідження цифрової камери є визначення просторових координат контрольних точок стереомоделі та їх співставлення з даними, отриманими під час знімання електронним тахеометром Trimble M3 DR.

Першим об'єктом знімання був полігон відповідних маркованих точок, розміщений у холі кафедри Фотограмметрії та геоінформатики (ФГІ) Національного університету "Львівська політехніка" (рис. 1).



Рис. 1. Полігон знімання в холі кафедри ФГІ

Полігон складається з трьох площин із загальним перевищенням 1,5 м, та налічує 31 марковану точку (рис. 2).

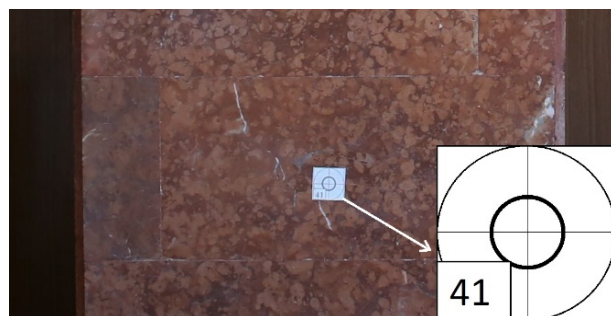


Рис. 2. Маркування точок знімання

Стереофотограмметричне знімання виконувалось цифровою неметричною камерою Canon EOS 5D Mark III. Основні технічні характеристики камери представлені у табл. 1.

**Характеристики цифрової камери
Canon EOS 5D Mark III**

| | |
|------------------------|--------------------|
| Матриця | 36x24 мм, CMOS |
| Максимальне розширення | 5760 × 3840 |
| Чутливість | Авто(100–2800) ISO |
| Швидкість знімання | 30 кадрів/с |
| Формат кадру (фото) | 3:2 |
| Фокусна віддаль | 24 мм |
| Витримка | 30 – 1/8000 с |
| Місткість акумулятора | 850 знімків |
| Розмір (без об'єктива) | 152x116,4x76,4 мм |
| Вага (без об'єктива) | 950 г |

На початковому етапі проведено апріорну оцінку точності визначення просторових коор-

динат електронним тахеометром Trimble M3 DR за формулами 1:

$$m_{x,y} = \frac{\sqrt{2}}{2} (m_d^2 + d^2 \frac{m_\alpha^2}{\rho^2})^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$m_z = \frac{\sqrt{2}}{2} (\frac{m_d^2}{d^2} + d^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2})^{\frac{1}{2}},$$

де $m_d = 2$ мм – точність визначення віддалей; $m_{\alpha,\beta} = 5''$ – точність виміру кутів; d – відстань до об'єкта знімання.

У конкретних умовах знімання за відстані до об'єкта 4 м точність визначення просторових координат $m_{x,y} = 1,4$ мм, та $m_z = 3,4$ мм, відповідно до проведеної апріорної оцінки точності за формулами 1.

Для апріорної оцінки точності визначення координат за знімками застосовано формули (2) [Вовк та ін., 2015]:

$$m_x = mx_1 \left[\left(\frac{m_{x_1}}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{m_p}{f/HB} \right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{f(f/HB)} m_{\Delta\alpha} \right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{f(f/HB)} m_{\Delta\omega} \right)^2 + \left(\frac{y_1}{f/HB} m_{\Delta\chi} \right)^2 + m_\omega^2 + \left(\frac{x_1}{f} m_\phi \right)^2 \right]^{1/2};$$

$$m_y = my_1 \left[\left(\frac{m_{y_1}}{y_1} \right)^2 + \left(\frac{m_p}{f/HB} \right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{f(f/HB)} m_{\Delta\alpha} \right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{f(f/HB)} m_{\Delta\omega} \right)^2 + \left(\frac{y_1}{f/HB} m_{\Delta\chi} \right)^2 + \left(\frac{x_1}{f} m_\phi \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$m_z = mf \left[\left(\frac{m_p}{f/HB} \right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{f(f/HB)} m_{\Delta\alpha} \right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{f(f/HB)} m_{\Delta\omega} \right)^2 + \left(\frac{y_1}{f/HB} m_{\Delta\chi} \right)^2 + \left(\frac{x_1}{f} m_\phi \right)^2 \right]^{1/2},$$

де $m = 167$ – знаменник масштабу знімання; $f = 24$ мм – фокусна віддаль об'єктива знімальної камери; $m_x = m_y = m_p = 0,005$ мм – точність вимірювання координат на знімку; $x_1; y_1$ – абсциса та ордината кадрової рамки ПЗЗ-матриці ($x_1 = 17,9$ мм; $y_1 = 12$ мм); $B = 50$ см – базис на місцевості; H – відстань до об'єкта знімання; $m_\alpha = m_\omega = m_\chi = m_\phi = 3''$ – точність визначення кутових координат на знімку.

Точність визначення просторових координат за знімками складає: $m_x = 5$ мм; $m_y = 4$ мм; $m_z = 7$ мм, під час стереофотограмметричного знімання камерою Canon EOS 5D Mark III із відстані до об'єкта знімання 4 м.

Беручи до уваги, що марки полігону розташовані на трьох різних площинах до фронтальної проєкції (рис. 3), необхідно враховувати

похибку за рельєф поверхні знімання, для цього застосуємо формулу (3).

$$\delta r_h = \frac{h}{H} r, \quad (3)$$

де H – відстань до об'єкта знімання; $h = 1$ м – перевищення; $r = 21,6$ мм – максимальна радіальна відстань на знімку від головної точки до зміщеної точки.

Згідно з формулою (3), у випадку стереофотограмметричного знімання похибка матиме максимальний вплив за мінімальної відстані до об'єкта знімання, цей випадок і розглянемо у експерименті. Розрахуємо похибку за рельєф, якщо $H = 4$ м та $h = 1$ м, тоді похибка $\delta r_h = 6$ мм.

Координати маркованих точок були визначені електронним тахеометром Trimble M3 DR та стереофотограмметричним методом під час знімання цифровою камерою Canon EOS 5D Mark III (рис. 4).



Рис. 3. Глибина об'єкта знімання відносно фронтальної проєкції ($a=105$ см; $b=50$ см)



Рис. 4. Стереофотограмметричне знімання полігону контрольних марок неметричною камерою Canon EOS 5D Mark III

Зовнішнє орієнтування знімків полігону виконане на ЦФС “Дельта-2” із використанням координат семи марок, розмішених на середній площині. За результатами орієнтування $x_0 = 0,401$ мм, а $y_0 = -0,328$ мм. Координати марок на знімках зчитувались в режимі стерео.

За даними різниць координат марок, визначених тахеометром та виміряних на цифрових знімках, обраховано СКП відхилення просторових координат контрольних точок за даними стереофотограмметричного знімання: $m_x = 29$ мм; $m_y = 36$ мм; $m_z = 38$ мм.

Проаналізувавши різниці, виявлено найбільші похибки у визначенні координат марок, що розташовані на передній площині полігону. Це зумовлено значним перепадом висот між площиною візування та передньою площиною (1 м). Якщо виключити контрольні точки, що знаходяться на передній площині полігону, тоді отримуємо $m_x = 11$ мм; $m_y = 11$ мм; $m_z = 9$ мм.

У дослідженнях цифрових камер не лише величина похибок, а й їх розподіл відіграють важливу роль у визначенні джерел, що їх викликають. На рис. 5 представлено векторну діаграму відхилень координат марок, отриманих зі стереомоделі (позначені червоними векторами) від координат, визначених електронним тахеометром (позначені чорними точками).

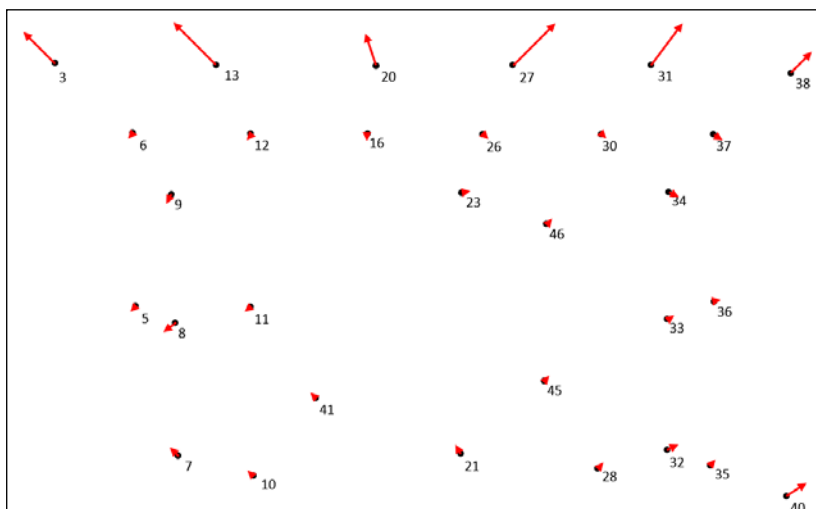


Рис. 5. Векторна діаграма розподілу відхилення координат контрольних марок за даними стереофотограмметричного знімання (червоні вектори) відносно тахеометричного знімання (чорні точки)

Для дослідження цифрової камери в умовах аерознімання створено другий полігон маркованих точок на відкритій ділянці. Для цього в навчально-геодезичній лабораторії Геотераса, розташованій на даху II-го навчального корпусу Національного університету “Львівська політехніка”, закріплено та промарковано 60 точок (рис. 6). Приклад маркування точок представлено на рис. 7.



Рис. 6. Полігон маркованих точок, створений в навчально-геодезичній лабораторії Геотераса



Рис. 7. Приклад маркування точок на створеному полігоні

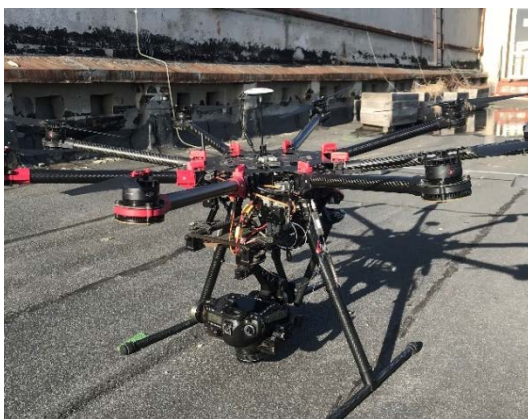


Рис. 8. Загальний вигляд октокоптера DJI S1000

Прямокутна конфігурація полігону та кількість закріплених точок дають змогу проводити калібрування камери в польових умовах, що

максимально наближені до реальних умов знімання з БПЛА.

Аерознімальні роботи виконувались октокоптером DJI S1000 (рис. 8). Технічні характеристики октокоптера представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики октокоптера DJI S1000

| Тип двигуна | Електричний |
|-------------------------------|-----------------|
| Температурний діапазон роботи | -10 °C ~ +40 °C |
| Максимальна дальність польоту | 500 м |
| Максимальний час польоту | 15 хв |
| Місткість акумулятора | 15000 мА |
| Розміри | 460×511×305 мм |
| Вага | 4,4 кг |

На етапі складання плану аерознімальних робіт за формулами (2) за мінімальної висоти польоту 12 м, що дає змогу захопити весь блок маркованих точок, обраховано апріорні оцінки точності визначення координат за знімками. Похибки склали: $m_x = 2,8$ см; $m_y = 2,1$ см; $m_z = 3,3$ см.

Для врахування висотної складової також використано 4 точки на відповідних приладних столиках, що розміщені на висоті 1,5 м відносно загальної поверхні полігону (рис. 9).

За формулою (3) обчислено величину похибки визначення координат точок місцевості за знімками, що спричинена рельєфом території знімання. Якщо $H = 12$ м та $h = 1,5$ м, похибка $\delta r_h = 2,7$ мм, що підтверджує необхідність збільшення висоти знімання за значних перепадів висот для зменшення впливу похибки за рельєф.

Опрацювання даних аерознімання виконувалось на ЦФС “Дельта-2”. Виконано взаємне орієнтування знімків за розширеною схемою за 12 точками. Зовнішнє орієнтування стереомоделі виконувалось за 9 точками полігону. За результатами орієнтування $x_0 = 0,401$ мм, а $y_0 = -0,328$ мм.

Для дослідження точності стереомоделі координати маркованих точок виміряні в режимі стерео на ЦФС “Дельта-2”. Обчислено різниці координат марок та СКП відхилення просторових координат контрольних точок за даними

аерознімання: $m_x = 19,7$ см; $m_y = 9,7$ см; $m_z = 3,9$ см.

Векторна діаграма розподілу відхилення координат маркованих точок полігону в науковій лабораторії “Геотераса” за даними аерознімання представлена на рис. 10.

Представлена діаграма підтверджує наявність залишкової дисторсії оптичної системи камери Canon EOS 5D Mark III.

Ще одним чинником, що впливає на точність результатів аерознімання, є геометричний або ж лінійний зсув цифрового зображення під час експонування знімка.

Джерелом лінійного зсуву зображення є переміщення камери вздовж осей X , Y , Z зі швидкістю V_x , V_y , V_z у напрямку польоту БПЛА, що відбувається через: поступальний рух БПЛА за маршрутною лінією (за цього швидкість зміщення камери буде рівна швид-

кості польоту БПЛА); перпендикулярне відхилення БПЛА від маршрутної лінії; зміну висоти знімання [Бурштинська, 1999].

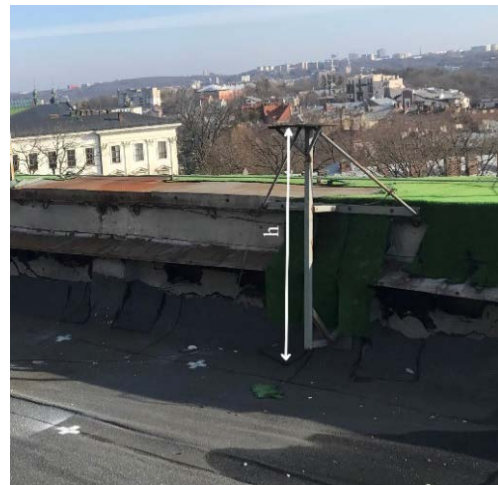


Рис. 9. Висотна складова полігону маркованих точок ($h=150$ см)

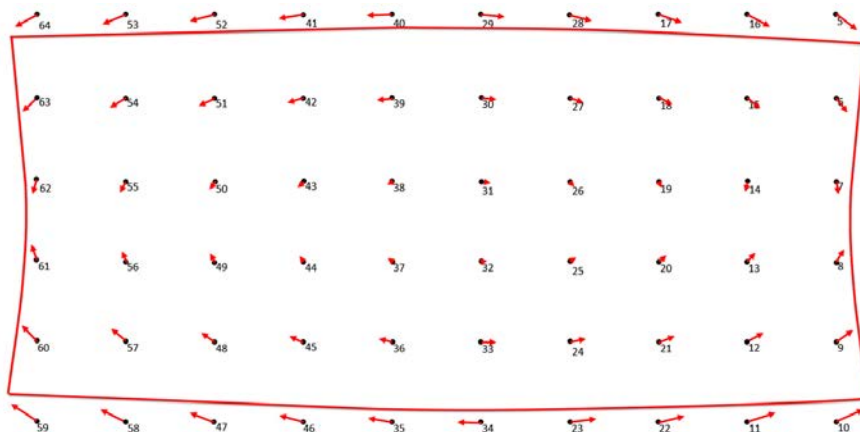


Рис. 10. Векторна діаграма розподілу відхилення координат контрольних точок за даними аерознімання

Для розуміння процесу зсуву зображення розглянемо рис. 11, де певна точка M , що у момент відкриття затвору камери фіксується на знімку P у точці m , за цього центр проєкції S протягом часу витримки t переміщується на відстань SS' , що рівна величині Vt , де V – швидкість руху камери, а t – час експонування. У цей час точка M продовжує зображуватися на знімку P , і у момент закриття затвора вона буде проєктуватися в точку m' . В результаті точка M зобразиться на знімку у вигляді відрізка $mm' = \delta$ [Іванов та ін., 2004].

Відрізок δ і є зсувом зображення у площині прикладної рамки. З подібності трикутників

MSS' та $S'mm'$ розраховується величина зсуву за формулою (4):

$$\delta V_w = Vt \frac{f}{H} \quad (4)$$

де $f = 24$ мм – фокусна віддаль; $H = 12$ м – висота знімання.

Отже, якщо швидкість польоту БПЛА – 6 м/с, витримка – 1/800 с, а висота знімання – 12 м, цифровою неметричною камерою Canon EOS 5D Mark III теоретично розрахований лінійний зсув за формулою (4) складає 0,4 мм.

Реальну величину лінійного зсуву на знімку виміряно для кожної маркованої точки (рис. 12).

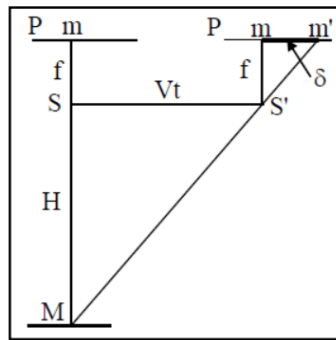


Рис. 11. Зсув зображення у площині прикладної рамки



Рис. 12. Лінійний зсув зображення під час аерознімання з октокоптера DJI S1000

Визначено, що практично вимірjana величина зсуву маркованих точок на знімку складає 4,4 мм та знижує різкість зображення, що призводить до погіршення точності результатів аерознімання.

Висновки

1. Проведений аналіз літературних джерел підтверджує необхідність калібрування цифрових неметричних камер для підвищення точності визначення координат точок місцевості за знімками. Існують різні погляди на доцільність виконання калібрування в лабораторних та польових умовах.

2. Проведено тахеометричне та стереофотограмметричне знімання маркованих точок першого полігону. Обчислено СКП визначення координат точок за стереофотограмметричним методом, що складають: $m_x = 29$ мм; $m_y = 36$ мм; $m_z = 38$ мм. Найбільші похибки зумовлені точками, які розміщені на передній площині полігону, що зумовлено рельєфом, адже присутній перепад висот в 1 м за відстані до об'єкта знімання 4 м. При виключенні точок передньої площини полігону СКП становить: $m_x = 11$ мм; $m_y = 11$ мм; $m_z = 9$ мм.

3. Створено експериментальний полігон в навчально-геодезичній лабораторії "Геотераса", що налічує 60 маркованих точок. Конфігурація полігону дозволяє досліджувати та калібрувати камеру в умовах аерознімання.

Здійснено аерознімання другого полігону, розміщеного на Геотерасі. Обраховано СКП визначення координат контрольних точок за знімками, що складають $m_x = 19,7$ см; $m_y = 9,7$ см; $m_z = 3,9$ см. Представлено векторну діаграму зміщень координат контрольних точок за даними аерознімання, що підтверджує наявність дисторсійних спотворень, а саме залишкової дисторсії оптичної системи.

4. Результати дослідження точності визначення просторових координат за знімками демонструють значну різницю СКП за різних умов знімання, що підтверджує необхідність калібрування неметричних камер в умовах аерознімання. Аналіз похибок демонструє наявність та значний вплив залишкової дисторсії оптичної системи, а також лінійного зсуву, та похибки за рельєф місцевості на точність результатів вимірів координат за цифровими знімками.

5. В перспективі опісля калібрування камери Canon EOS 5D Mark III планується аерознімання октокоптером DJI S1000 провалів на території Стебницького ГМК Полімінерал з метою вивчення сучасних геоморфологічних процесів, що зумовлені антропогенною діяльністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бурштинська, Х. В. (1999). Аерофотографія. ЛАГТ.
- Вовк, А., Глотов, В., Гуніна, А., Маліцький, А., Третьяк, К., & Церклевич, А. (2015). Аналіз результатів для створення ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу із застосуванням БПЛА TRIMBLE UX-5. *Геодезія, картографія та аерознімання*. 2015. (81), 90–103. URL: <https://doi.org/10.23939/istgcap2015.01.090>.
- Глотов, В., Церклевич, А., Збруцький, О., Колісниченко, В., Прохорчук, О., Карнаушенко, Р., & Галецький, В. (2014). Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарата. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2014. 1(27), 131–136.
- Глотов, В., Гуніна, А., & Процик, М. (2020). Комплексний спосіб визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових знімальних камер. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2020. 1, 110–117. URL: <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-39-18>.

- Іванов, В. Л., Ругайн, О. В., & Чекед, І. В. (2004). Авіаційне обладнання військових літальних апаратів. НАУ. URL: <file:///C:/Users/%D0%93%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0/Downloads/%D0%90%D0%9E%D0%92%D0%9B%D0%90-%D1%87-1.pdf>.
- Шульц, Р. В., Войтенко, С. П., Крельштейн, П. Д., & Маліна, І. А. (2015). До питання розрахунку точності визначення координат точок під час аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів. КНУБА. 2015. (62). 124–136. URL: <http://lib.osau.edu.ua/jspui/handle/123456789/2667>.
- Ai, M., Hu, Q., Li, J., Wang, M., Yuan, H., & Wang, S. (2015). A Robust Photogrammetric Processing Method of Low-Altitude UAV Images. *Remote Sensing*. 2015. 7(3), 2302–2333. URL: <https://doi.org/10.3390/RS70302302>.
- Bosak, K. (2013). Secrets of UAV photomapping. URL: http://s3.amazonaws.com/DroneMapper_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf.
- Cramer, M., Przybilla, H. J., & Zurhorst, A. (2017). UAV cameras: Overview and geometric calibration benchmark. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*. 2017. 42(2W6), 85–92. URL: <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W6-85-2017>.
- Gerke, M., & Przybilla, H. J. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*. 2016. (1), 17–30. URL: <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284>.
- Griffiths, D., & Burningham, H. (2019). Comparison of pre-and self-calibrated camera calibration models for UAS-derived nadir imagery for a SfM application. *Progress in Physical Geography*, 43(2), 215–235. URL: <https://doi.org/10.1177/0309133318788964>.
- Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *Drones*. 2022. 6(6), 147. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6060147>.
- Niemeyer, F. (2015). Konzept und prototypische Umsetzung eines “Four Vision” – Kamerasystems mit Anwendungen in kommunalen und landwirtschaftlichen Bereichen für den Einsatz auf UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) [Doctoral thesis]. The university of Rostock. ResearchGate. (n. d.). ResearchGate. Retrieved May 9, 2023. URL: <https://www.researchgate.net/>.

Volodymyr HLOTOV¹, Myroslava BIALA², Yevhenii SHYLO³

^{1,2}Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: ¹volodymyr.m.hlotov@lpnu.ua, ²myroslava.s.biala@lpnu.ua, ¹<https://orcid.org/0000-0002-1779-763X>,

²<https://orcid.org/0000-0002-0345-8354>

³Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: yevhenii.o.shylo@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2998-2813>

ANALYSIS OF THE RESIDUAL DISTORTION AND FORWARD MOTION INFLUENCE ON THE ACCURACY OF SPATIAL COORDINATES DETERMINATION BASED ON UAV SURVEY

The purpose of this work is to study the operation of a non-metric digital camera Canon EOS 5D Mark III installed on a DJI S1000 octocopter, regarding the accuracy of spatial coordinates determination on images, and perform the identification and analysis of errors affecting the accuracy of stereophotogrammetry survey. During the experimental part, we conducted the stereophotogrammetric and aerial surveys of the areas including marked points. This served as a source of data for creating stereo models with their subsequent processing with the use of the Delta 2 software. The catalogs of spatial coordinates of the marked points were formed according to measurements taken by the Trimble M3 DR Total Station and from stereo models. We calculated the differences and defined root-mean-square error of determining the spatial coordinates of the points on images. Considering the specifics of the marked points placement on the studied sites, we also calculated the errors of image displacements caused by terrain. Additionally, the research studied the influence of camera's forward motion on the accuracy of survey data of unmanned aerial vehicle (UAV). The obtained results confirm the presence of residual distortion in the optical system of the Canon EOS 5D Mark III digital camera. This leads to the need to calibrate the camera for improving the accuracy of the obtained images for their further use in mapping, monitoring geomorphological processes and phenomena, creating a Digital Elevation Model, etc. Also, the study revealed the influence of forward motion of the survey camera and image displacements caused by the height difference of the survey sites on the accuracy of created stereo models. The authors proposed a configuration and created an experimental site of marked control points on the ground for calibrating a digital non-metric camera in conditions as close as possible to the real survey conditions. Considering the analyzed literary sources, it is more effective than calibration in a laboratory.

Key words: digital non-metric camera, aerial survey, unmanned aerial vehicle (UAV), image motion, residual distortion.

Надійшла 22.03.2023 р.