УДК 528.721

В. ГЛОТОВ, А. ГУНІНА, М. ПРОЦИК

Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел.(098) -59-21-463, ел. пошта: alla.v.hunina@lpnu.ua

КОМПЛЕКСНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ВНУТРІШНЬОГО ОРІЄНТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ЗНІМАЛЬНИХ КАМЕР

Мета. Мета роботи – розроблення та дослідження розробленого способу визначення елементів внутрішнього орієнтування (ЕВО) цифрових неметричних знімальних камер (ЦНЗК). **Методика.** Реалізація способу полягає у зніманні лазерного променя на ПЗЗ-матриці з об’єктивом та без об’єктива для визначення планових елементів. Потім знімки розташовують у вікнах взаємного орієнтування цифрової фотограмметричної станції (ЦФС) “Дельта-2” і вимірюють координати відображення центра світлової плями лазера. Різниця координат між зображенням лазерного променя без об’єктива та з об’єктивом – це планові ЕВО цифрової ЦНЗК. Для визначення фокусної віддалі необхідно в тому самому вікні виміряти координати лазерного зображення за всіх чотирьох відповідних положень об’єктива та обчислити за отриманими даними шукану величину. З метою встановлення точнісних параметрів способу враховано такі параметри: перпендикулярність встановлення лазерного візира стосовно ПЗЗ-матриці цифрової камери, діаметр лазерного пучка, переміщення лазерного візира, точність вимірювання координат точок на ЦФС “Дельта-2” та точність розташування міток фокатора. **Результати.** Розроблено спосіб визначення ЕВО ЦНЗК. Автори проаналізували способи визначення ЕВО ЦНЗК, обчислили апріорну оцінку точності визначення ЕВО ЦНЗК за запропонованим способом. Відносно цього було досліджено елементи способу, які впливають на точність визначення ЕВО знімальних камер. **Наукова новизна та практичне значення.** Досліджено розроблений спосіб, що забезпечує відповідну точність визначення ЕВО ЦНЗК. Спосіб призначений для застосування у різних галузях науки і техніки, наприклад, для визначення ЕВО ЦНЗК, які використовують для проведення топографічного аерознімання із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що дасть змогу підвищити точність визначення координат об’єктів місцевості.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; елементи внутрішнього орієнтування; фокусна віддаль; цифрова неметрична знімальна камера.

Вступ

Фотограмметричне виробництво сьогодні, як зазначено у відповідних публікаціях [Hamid, 2013; Hlotov, 2017; Tsai, 1987; Zhang Z., 1999; Zhang, 2000; Глотов, 2010, 2017; Шевченко, 2009], постійно вдосконалює знімальну апаратуру, вимірювальні прилади та програмне забезпечення до них, збільшує роздільну здатність цифрових неметричних знімальних камер (ЦНЗК). Інакше кажучи, зростає точність параметрів вихідних даних для подальших обчислювальних процесів. Зважаючи на це, необхідно збільшити і точність визначення ЕВО як невід’ємного інгредієнта розрахункових фотограмметричних робіт.

Отже, виникло завдання – розробити уніфікований спосіб визначення ЕВО, об’єктивів ЦНЗК. Актуальність поставленого завдання пояснюється ще й тим, що, припустимо, такий поширений метод для розв’язування цих задач, як гоніометричний, потребує номенклатурного обладнання. Питання

дослідження та аналізу способів визначення ЕВО ЦНЗК висвітлено у низці праць. Розглянемо та проаналізуємо деякі з них.

Спосіб визначення планових ЕВО ЦНЗК [Глотов, 2010] передбачає знімання фрагмента контрольновимірної сітки (КВС) із центральним перехрестям, не менш ніж у чотирьох положеннях, з обертанням КВС на 360°. Після цього визначають координати центрального перехрестя фрагмента КВС відносно центра знімка і за ними обчислюють планові ЕВО, за координатами цих перехресть для кожного положення фрагмента КВС.

Однак у цьому способі визначають тільки планові ЕВО, що обмежує інформацію про ЦНЗК і не дає можливості одночасно визначити планові елементи та фокусну віддаль. Це особливо важливо для вивчення кінематичних процесів під час дистанційного знімання (аерознімання з БПЛА), оскільки знижує точність обчислення просторових координат точок досліджуваних об’єктів.

Відомий спосіб визначення планових ЕВО ЦНЗК [Шевченко, 2009], в якому марку із центральним перехрестям встановлюють на головній оптичній осі знімальної камери, яку приводять в робочий стан, наводять на центр об'єкта знімання, виконують знімання марки. Потім одержане зображення передають на цифрову фотограмметричну станцію, визначають координати центрального перехрестя марки відносно центра знімка і за ними обчислюють планові ЕВО. Марку з центральним перехрестям встановлюють так, щоб можна було обертати її у вертикальній площині навколо центрального перехрестя, знімають марку не менш ніж у чотирьох положеннях, обертючи на 360° , а обчислюють планові ЕВО за координатами цих перехресть для кожного положення марки.

Але за цим способом можна визначити тільки планові ЕВО без компенсації похибки цих елементів, що виникають через неточне орієнтування камери та марки з центральним перехрестям, оскільки обчислення виконують за одним значенням, що зумовлено нерухомим положенням марки.

У роботі [Глотов, 2017] запропоновано спосіб визначення фокусної віддалі ЦНЗК, який полягає у зніманні вертикально розташованої КВС із різних відстаней. На отриманих цифрових зображеннях вимірюють координати на відповідних перетинах контрольно-вимірної сітки та визначають фокусну віддаль ЦНЗК. Для апробації методу визначено фокусну відстань камер Canon EOS 350D, Canon EOS 450D, Canon EOS 5D. Але у цьому способі застосовують КВС, яка є сьогодні номенклатурним обладнанням, адже це комплектуюча оптико-механічних фотограмметричних приладів, що практично не застосовують на виробництві.

Метод калібрування [Tsai, 1987; Zhang Z., 1999; Zhang, 2000] потребує розміщення плоскої шахової сітки в різних орієнтаціях (щонайменше у двох) перед ЦНЗК. Можна переміщувати камеру або шахову сітку, відхилення знати не потрібно. Моделюється спотворення лінзи, після чого визначають елементи зовнішнього орієнтування (ЕЗО) та ЕВО, а також параметри дисторсії. Цей метод не потребує дорогого устаткування, на відміну від класичних, але оскільки калібрування камери виконується із застосуванням плоского шаблона, це можна зробити тільки в лабораторних умовах.

У статті [Hamid, 2013; Глотов, 2019] викладено способи калібрування ЦНЗМ у нормальному та конвергентному випадках знімання. Дослідження камери виконано в лабораторних та польових умовах. Лабораторне калібрування проведено на 3D-тестовому полігоні розміром $0,4 \times 0,4$ м із мережею

марок, розташованих на різних висотах. Для калібрування на місцевості використано таку саму концепцію 3D-тестового полігона, що складався із 81 марки, розташованої на рівнинній поверхні, розмірністю 9×9 м. Аерознімки полігона отримано за допомогою БПЛА. Метою калібрування було визначення планових ЕВО, фокусної віддалі та дисторсії. Всі зображення опрацьовували із використанням програмного забезпечення для фотограмметричного калібрування. Точність результатів оцінено на основі стандартного відхилення. Загалом точність результатів визначення ЕВО та дисторсії приблизно однакова, тому кращий спосіб калібрування автори рекомендують вибирати залежно від прикладних завдань.

У працях [Глотов 2016; Глотов 2019] запропоновано спосіб визначення фокусної віддалі ЦНЗК, згідно з яким отримують цифрові зображення дзеркального тест-об'єкта у вигляді плоскої дзеркальної поверхні, на яку нанесено контрольні точки із взаємним розташуванням. Фокусну віддаль визначають за вимірними координатами точок на поверхні лінзи об'єктива ЦНЗК. Але в цьому способі використовують прецизійне дзеркало на металевій основі, необхідно також підбирати контрольно-вимірну сітку (КВС) з отвором для різних досліджуваних камер, що робить реалізацію способу трудомісткою і знижує його собівартість та технологічність.

Всебічні дослідження знімальних камер в експлуатаційному режимі дають підстави стверджувати, що точність отримання координат точок об'єктів, які знімають, залежить від періодичності виконання компарування і юстування ЦНЗК. Аналіз результатів попередніх досліджень дає можливість зробити певні висновки:

- перед польовими роботами ЦНЗК необхідно ретельно дослідити в лабораторних умовах для визначення ЕВО і радіальної дисторсії;
- якщо ЦНЗК довго перебували не в польових умовах, необхідно періодично уточнювати значення ЕВО безпосередньо в полі;
- після завершення експлуатації ЦНЗК весь комплекс досліджень необхідно повторити, щоб виявити зміни параметрів, які можуть виникнути у знімальних системах внаслідок різних паразитичних зсувів під час роботи, особливо у разі застосування для БПЛА.

Отже, визначення ЕВО необхідно здійснювати оперативним, тобто у виконавця завжди повинні бути прилади для виконання поставленого завдання.

Мета

Метою роботи є розроблення та дослідження розробленого способу визначення ЕВО ЦНЗК.

Методика

З урахуванням наведеного вище сформулюємо загальні вимоги до розроблення способів визначення ЕВО ЦНЗК [Глотов, 2007]:

1. Точність способів повинна забезпечувати визначення фокусної відстані з точністю $1/10000 + 1/20000$ від f , а m_{x_0} і m_{z_0} не повинні перевищувати 5 мкм.

2. Деталі й вузли пристроїв повинні створюватися на основі уніфікації наявних і поширених у топографогеодезичному виробництві засобів.

3. Технології методів повинні бути простими і не вимагати спеціальних навичок виконавця.

В основу запропонованого способу покладено принцип Аббе [Мальцев, 1969], який ґрунтується на визначенні збільшення для декількох, не менше ніж для двох різних положень предмета, розташованого на оптичній осі об'єктива, який підлягає дослідженню. Причому відстань між положеннями предмета повинна бути відома. Розглянемо суть принципу

Якщо предметна шкала (ПШ) (рис. 1) розташована на відстані z_1 від досліджуваного об'єктива (Об), то через систему спостереження у положенні I об'єктива можна взяти відлік A_1 на предметній шкалі A_1C_1 ; в положенні II після переміщення об'єктива на величину x_1 цей відлік буде вже C_1 . Позначимо величину інтервалу шкали через x_1 . З подібності трикутників $F'BF'$ і A_1BC_1 маємо:

$$\frac{f}{x_1} = \frac{z_1}{x_1} \text{ і } z_1 = \frac{f \cdot x_1}{x_1}. \quad (1)$$

Якщо змістити предметну шкалу на відстань z_2 від випробовуваного об'єктива, то отримаємо аналогічно:

$$\frac{f}{x_2} = \frac{z_2}{x_2} \text{ і } z_2 = \frac{f \cdot x_2}{x_2}. \quad (2)$$

Віднявши від (2) вираз (1), знаходимо:

$$z_1 - z_2 = h = f \left(\frac{x_2}{x_2} - \frac{x_1}{x_1} \right),$$

Звідси:

$$f = \frac{h}{\frac{x_2}{x_2} - \frac{x_1}{x_1}}. \quad (3)$$

Перейдемо до розгляду реалізації способу. Встановлюють штативи з ЦНЗК з діафрагмованим лазерним візором на відстані мінімального фокусування об'єктива камери. Підставки камери і лазерного візира горизонтують за допомогою накладного рівня (рис. 2, 3). Механізм встановлення камери – каретка з мікрометричним гвинтом, за допомогою якої камера може переміщатися перпендикулярно до головної оптичної осі в діапазоні 60 мм, відповідно ліворуч або праворуч відносно лазерного променя. Механізм встановлення лазерного візира складається аналогічно із каретки мікрометричного гвинта, за допомогою якої лазерний візор переміщається вздовж променя в діапазоні 60 мм. На цій каретці встановлено супорт із мікрометричним гвинтом, завдяки якому лазер може переміщатися вертикально вгору або вниз у діапазоні 15 мм.

Рис. 1. Схема реалізації принципу Аббе

Рис. 2. Схематичне розташування приладів та елементів знімання:
1 – ЦНЗК; 2 – мікрометр; 3 – лазерний візир; 4 – каретка; 5 – головна оптична вісь

Рис. 3. Розташування приладів та елементів знімання:
1 – ЦНЗК; 2 – мікрометр; 3 – лазерний візир; 4 – каретка

Технологічна схема визначення фокусної віддалі ЦНЗК складається із таких процесів:

1. Камеру без об'єктива встановлюють щодо лазерного променя за допомогою мікрометричних гвинтів камери та вертикального гвинта лазера так, щоб центральна мітка фокатора була в центрі плями лазера.

2. Монтують об'єктив та переміщенням лазерного візира встановлюють промінь лазера на центральну мітку фокатора, нахилиючи підставку камери та розвертаючи лазерний промінь. Такий процес орієнтування виконують за необхідності в декілька наближень, після чого здійснюють експозицію лазерної плями на ПЗЗ-матриці. Виконують наведення на

бокові мітки фокатора, зміщуючи камеру в одну та другу сторону від середнього положення за допомогою мікрометричного гвинта на відповідні відстані, здійснюючи відповідні експозиції.

3. Зміщуючи лазерний візир мікрометричним гвинтом, віддаль якого $h = 20$ мм, виконують аналогічні вимірювання та експонування.

4. Знімки розташовують у вікнах взаємного орієнтування ЦФС "Дельта-2" і вимірюють координати центра світлової плями лазера. Різниця координат між зображенням лазерного променя без об'єктива та з об'єктивом – це й будуть планові ЕВО знімальної камери.

Якщо після орієнтування зображення променя не змістилося, то планові координати точки o дорівнюють нулю. Величини x_0 і z_0 обчислюють за формулами (4):

$$x_0 = x_1 - x_2, \quad z_0 = z_1 - z_2, \quad (4)$$

де x_1, z_1 – координати зображення променя без об'єктива; x_1', z_1' – координати, отримані під час встановлення об'єктива.

Для визначення знаків координат необхідно перед вказаними вимірюваннями уточнити, в котрому квадранті містяться зображення лазерного променя.

Для визначення фокусної віддалі необхідно в тому самому вікні виміряти координати лазерного зображення за всіх чотирьох положень об'єктива та за формулою (3) обчислити фокусну віддаль ЦНЗК.

Розглянемо питання про точність запропонованого способу. Під час дослідження враховано вплив усіх приладів, вузлів і деталей, з яких складався вимірювальний комплекс. В результаті виявлено параметри, які впливають на точність способу:

1. Перпендикулярність встановлення лазерного візира стосовно ПЗЗ-матриці цифрової камери.
2. Діаметр лазерного пучка.
3. Переміщення лазерного візира.
4. Точність вимірювання координат точок на ЦФС "Дельта-2".
5. Точність розташування міток фокатора.

Перш ніж перейти до розгляду результатів досліджень за вищезгаданою схемою, необхідно довести доцільність застосування лазера в пропонованому способі. Відповідно до суті способу виникає завдання відтворення візирного променя, що проходить через досліджуваний об'єкт, і спостереження його зображення у площині ПЗЗ-матриці. Це можна зробити лише за наявності спеціального автоколіматора з вимірною мірою, що суперечить вимогам, поставленим до способу, що розробляється. Тому з метою уніфікації та конструкторського спрощення запропоновано використовувати лазерний візир замість коліматора. Ця пропозиція зумовлена тим, що: по-перше, світло лазера монохроматичне; по-друге, розбіжність лазерного променя мала; по-третє, випромінювання лазера когерентне. Сукупність цих параметрів дала змогу замінити складну оптичну систему (коліматор) лазером.

Як вказано вище, лазерний візир повинен встановлюватися відносно ПЗЗ-матриці перпендикулярно. Неперпендикулярність призведе до помилкових вимірів величин x' . З цих міркувань розрахуємо допустимий кут неперпендикулярності лазерного пучка за формулою (5):

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{r}{L}, \quad (5)$$

де r – мінімальний радіус діафрагмового пучка лазера; L – відстань від вхідної зіниці лазера до площини ПЗЗ-матриці.

Якщо $r = 0,02$ мм і $f_k = 55$ мм (Canon EOS 450D), з розрахунком максимальної відстані, $L = 25$ мм, тоді $\delta = 3'$. Зрозуміло, що настільки висока точність вимагає

розроблення відповідної технології встановлення. Завдання вирішено так. До основи вертикального мікрометричного гвинта прикріплено зовнішнім кільцем кулькопідшипник, а у внутрішнє кільце встановлено лазерний візир. Розглядаючи зображення лазерного променя, обертають випромінювач довкола горизонтальної осі. Внаслідок нахилу промінь описуватиме коло відповідного радіуса. Вертикальним та горизонтальним мікрометричними гвинтами послідовними наближеннями зменшують діаметр кола до радіуса пучка. Отже, умова перпендикулярності в межах встановленої точності виконується.

Точність виконання вимірювань на ЦФС великою мірою залежить від діаметра вимірника – марки. Проте діаметр лазерного пучка, який ми використовуємо як вимірювальну марку, доволі великий для високоточних вимірів (діаметр пучка випромінювача, вимірюваний на рівні 0,5 потужності випромінювача, становить 1,5 мм). Тому виникає необхідність діафрагмування променя. Діаметр діафрагми визначимо за формулою:

$$d = L_f \cdot \theta_n, \quad (6)$$

де L_f – відстань до розрахованого фокуса; θ_n – кут нелінійної збіжності, відповідно дорівнює

$$\theta_n = \frac{\lambda}{r}, \quad (7)$$

де λ – довжина хвилі лазера; r – діаметр вихідного пучка.

Прийmemo $L_f = 200$ мм $\theta_n = 0,00042$ (для лазера дорівнює 0,63 мкм), тоді $d = 0,08$ мм. Діафрагма може бути виконана у вигляді зачорненого кола або хрестоподібної сітки ниток, нанесеної на скляну пластину, закріплену безпосередньо поблизу вихідного отвору випромінювача.

Для реалізації технологічної схеми визначення фокусної віддалі необхідно перемістити камеру або лазерний візир на відповідну відстань. Як зазначено вище, це виконується за допомогою відповідного мікрометричного гвинта.

Розглянемо питання про розрахунок точності пропонованого способу. Доданки похибок, що впливають на точність, такі:

1. Точність вимірювання за допомогою мікрометричних гвинтів.
2. Точність визначення відстаней між мітками фокатора.
3. Точність вимірювання координат на зображеннях за допомогою ЦФС.

Переміщення лазерного візира відбувається, як вказано вище, за допомогою мікрометричного гвинта. Згідно з технічними характеристиками точність мікрометричних гвинтів становить 4 мкм, тоді маємо:

$$m_{K_1} = \sqrt{m_{K_1'}^2 + m_{K_2'}^2} \quad (8)$$

де $m_{K_1'} = m_{K_2'}$ – відліки за шкалою мікрометричного гвинта.

У цьому випадку можна прийняти $m_{K_1} = 5,5$ мкм.

Аналогічно визначаємо похибку переміщення камери за допомогою мікрометричного гвинта.

У другому випадку, як вже наголошено вище, $m_{k1}' = m_{k2}' = 4$ мкм, тоді точність вимірюваних відрізків:

$$m_{x_1}' = m_{x_2}' = \sqrt{m_{c_1}^2 + m_{c_2}^2} \quad (9)$$

і становить $m_{x1}' = m_{x2}' = 5,5$ мкм.

Стосовно третього пункту: точність вимірів на "Дельта-2" – півпікселя щодо зображення; в нашому випадку становитиме мкм.

З аналізу отриманих даних можна зробити висновки про однакову точність всіх трьох параметрів (десяти й соті частки мкм є фактично невеликими цифрами, а заокруглення до одиниць мкм приводить до рівних значень). Звідси середньоквадратичну похибку визначення фокусної віддалі досліджуваного об'єктива подамо у вигляді:

$$m_f = \sqrt{m_k^2 + m_{x_1}^2 + m_{x_2}^2 + m_{x_1}'^2 + m_{x_2}'^2} \quad (10)$$

Підставивши числові значення, одержимо $m_f = 10$ мкм.

Реальну точність визначено із застосуванням камери Canon EOS 450D. Загалом отримано більше ніж 50 значень ЕВНО. В табл. 1 наведено деякі значення ЕВНО.

Таблиця 1

Результати визначення фокусної віддалі ЦНЗК Canon EOS 450D

H, мм	x_0 , мм	z_0 , мм	f, мм
250	0,098	0,045	48,662
300	0,167	0,113	49,505
350	0,139	0,051	50,761
400	-0,094	0,072	52,219
450	0,046	-0,085	53,333

Рис. 4. Залежність значення фокусної віддалі від відстані від передньої лінзи об'єктива до випромінювача

Зміна фокусної віддалі спричинена тим, що змінюється положення теленасадки, відповідно і планові елементи змінюються через наявність ексцентриситету цієї теленасадки відносно головної оптичної осі об'єктива.

Оцінку точності способу виконаємо за допомогою методу емпіричних моментів [Зазуляк, 2007]. Початковий момент першого порядку (математичне очікування):

$$M(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

Дисперсія:

$$D(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2 \quad (12)$$

Стандарт:

$$\delta(x) = m = \sqrt{D(x)} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2 \quad (13)$$

Середня квадратична похибка:

$$m_m = \frac{m}{\sqrt{2(n-1)}} \quad (14)$$

Однак точкова оцінка дає оцінне значення відповідного параметра, але нічого не дає для точності та достовірності оцінки. Такі дані визначаються довірчим інтервалом:

$$v_1 m \leq \delta \leq v_2 m, \text{ де } v_1 = \sqrt{\frac{n-1}{\zeta_1^2}}, \quad v_2 = \sqrt{\frac{n-1}{\zeta_2^2}} \quad (15)$$

Середньоквадратична похибка і довірчий інтервал обчислені за формулами (14), (15) і відповідно становили $m_f = 0,01$ мм; $0,008 \text{ мм} \leq \delta \leq 0,012 \text{ мм}$, $m_{x0} = m_{x0} = 0,06$ мм; $0,004 \leq \delta \leq 0,009$ мм, що відповідає попередньому розрахунку величини.

Результати

Розроблено спосіб визначення ЕВО ЦНЗК. Автори проаналізували способи визначення ЕВО ЦНЗК. Обчислено апіорну оцінку точності визначення ЕВО ЦНЗК за запропонованим способом. Відносно цього досліджено елементи способу, які впливають на точність визначення ЕВО знімальних камер.

Отримані результати дають підстави зробити висновки, що визначення запропонованим способом фокусної відстані ЦНЗК за точністю відповідає попередньо розрахованим значенням (12).

Наукова новизна та практичне значення

Досліджено розроблений спосіб, що забезпечує належну точність визначення ЕВО ЦНЗК. Спосіб призначений для застосування у різних галузях науки і техніки, наприклад, для визначення ЕВО ЦНЗК, які використовують для проведення топографічного аерознімання із БПЛА, що дасть змогу підвищити точність визначення координат об'єктів місцевості.

Висновки

Досліджені критерії, що впливають на точнісні характеристики пропонованого способу, дають змогу зробити такі висновки:

1. Використання в пропонованому способі лазерного візира дало можливість реалізувати умови принципу Аббе без спеціальних прецизійних оптичних приладів. Діафрагмування лазера дало змогу отримати необхідний діаметр променя, сумірний із діаметрами вимірювальних: марок ЦФС.
2. Прилади, застосовані для реалізації способу, доволі поширені в геодезичному і фотограмметричному виробництві.
3. Технологічна схема способу відповідає вимогам, викладеним вище.
4. У подальших дослідженнях заплановано підвищити точність визначення як планових елементів, так і фокусної віддалі ЦНЗК.

Література

- Hamid N. F. A., Ahmad A., Samad A. M., Ma'Arof I., Hashim K. A. (2013). Accuracy assessment of calibrating high resolution digital camera. In *Proceedings. 2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, CSPA*, P. 349–352. <https://doi.org/10.1109/CSPA.2013.6530070>.
- Hlotov V., Hunina A., Yurkiv M. (2017). Method for determining the focal length in a digital non-metric camera. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, No. 3, P. 71–81.
- Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(4), pp. 323–344.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22 (11), 1330–1334.
- Zhang, Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *I ICCV*, Vol. 99, pp. 666–673.
- Шевченко Т. Г., Бабій Л. В., Глотов В. М. (2009). Спосіб калібрування фототеодоліта: патент № 87646, Бюл. № 14.
- Глотов В. (2007). Методи навігаційно-цифрової фотограмметрії при дослідженні кінематичних процесів: дис. .... д-ра техн. наук.
- Глотов В. М., Марусаж Х. І. (2016) Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери: патент на корисну модель № 110910, Бюл. № 20.
- Глотов В. М., Марусаж Х. І. (2016). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*: зб. наук. праць ЗГТ УТГК, Львів: Видавництво Львівської політехніки, Вип. 1 (31), С. 105–110.
- Глотов В. М., Марусаж Х. І. (2019). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, Вип. I (37), 2019, С. 85–90.
- Глотов В. М., Пашетник О. Д. (2010). Спосіб визначення планових елементів внутрішнього орієнтування цифрових знімальних камер: патент на корисну модель № 50155, Бюл. № 10.
- Зазуляк П., Гавриш В., Євсєєва Е., Йосипчук М. (2007). Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань: навч. посіб. Львів, 408 с.
- Мальцев М. Д., Каракулина Г. А. (1968). Прикладная оптика и оптические измерения. Москва: Машиностроение, 472 с.

V. HLOTOV, A. HUNINA, M. PROTSYK

Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. (098)-59-21-463, e-mail alla.v.hunina@lpnu.ua

A COMPLEX METHOD OF DETERMINING THE ELEMENTS OF INTERNAL ORIENTATION OF DIGITAL CAMERAS

Aim. The purpose of this work is to develop and investigate a method developed by the authors to determine the elements of the internal orientation of digital cameras. **Methodology.** The implementation of the method is to remove the laser beam on the CCD with the lens and without the lens to determine the planned elements. Next, the pictures are then placed in the windows of mutual orientation of the CFS Delta-2 and measure the coordinates of the center of the light spot of the laser. The difference of coordinates between the image of a laser beam without a lens and with a lens is the planned element of the internal orientation of a digital nonmetric camera. To determine the focal length, it is necessary to measure the coordinates of the laser image in all four relevant lens positions in the same window and calculate the required value from the data obtained. In order to establish the precision parameters of the method, the following parameters were taken into account: the non-perpendicularity of the laser visor placement with respect to the CCD camera of the digital camera, the laser beam diameter, the laser visor displacement, the accuracy of measuring the coordinates of the points on the Delta-2 DPS, the accuracy of the focal points. **Results.** A method of determining the elements of the internal orientation of the

Digital Camera is developed. The authors analyzed the ways of determining the elements of the internal orientation of the Digital Camera. The a priori estimate of the accuracy of determining the internal orientation of the Digital Camera elements by the proposed method is calculated. In this regard, it was investigated the elements of the method that affect the accuracy of determining the elements of the internal orientation of the camera. **Scientific novelty and practical significance.** The developed method, which provides the appropriate accuracy of determining the elements of the internal orientation of digital cameras, is investigated. The method is intended for use in various fields of science and technology, for example, to determine the elements of the internal orientation of digital non-metric surveying cameras used for topographic aerial photography using UAVs, which will improve the accuracy of determining the coordinates of the objects of the terrain.

Key words: unmanned aerial vehicle; elements of internal orientation; focal length; digital nonmetric camera.

References

- Hamid N. F. A., Ahmad A., Samad A. M., Ma'Arof I., Hashim K. A. (2013). Accuracy assessment of calibrating high resolution digital camera. In Proceedings. 2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, CSPA, pp. 349–352. <https://doi.org/10.1109/CSPA.2013.6530070>
- Hlotov V., Hunina A., Yurkiv M. (2017). Method for determining the focal length in a digital non-metric camera. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, No. 3, pp. 71–81.
- Tsai R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(4), pp. 323–344.
- Zhang Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22 (11), pp. 1330–1334.
- Zhang Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *I ICCV*, Vol. 99, pp. 666–673.
- Shevchenko T. H., Babii L. V., Hlotov V. M. (2009). *Sposib kalibruvannia fototeodolita* [The method of calibrating a phototheodolite], patent № 87646, bul. No. 14.
- Hlotov V. (2007). *Metody navihatsiino-tsyfrovoi fotohrammetrii pry doslidzhenni kinematychnykh protsesiv* doctoral dissertation [Methods of navigation-digital photogrammetry in the study of kinematic processes].
- Hlotov V., Marusazh Kh. (2016). *Sposib vyznachennia fokusnoi viddali tsyfrovoy znimalnoi kamery* [A method of determining the focal length of a digital camera]. Patent № 110910 UA MPK. Opubl. biul. No. 20 vid 25.10.2016.
- Hlotov V., Marusazh Kh. (2016). *Sposib vyznachennia fokusnoi viddali tsyfrovoy nemetrychnoi znimalnoi kamery* [A method of determining the focal length of a digital camera] *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva: zbirnyk naukovykh prats ZHT UTHK*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, Vyp. 1 (31), pp. 105–110.
- Hlotov V., Marusazh Kh. (2019). *Sposib vyznachennia fokusnoi viddali tsyfrovoy nemetrychnoi znimalnoi kamery* [Method for determining focal length of digital non-metric camera], *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva: zbirnyk naukovykh prats ZHT UTHK*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, Vyp. 1 (37), pp. 85–90.
- Hlotov V., Pashchetnyk O. D. (2010). *Sposib vyznachennia planovykh elementiv vnutrishnoho oriiientuvannia tsyfrovyykh znimalnykh kamer* [A method for determining the planar elements of the internal orientation of digital cameras], Patent No. 50155, bul. No. 10.
- Zazuliak P., Havrysh V., Yevsieieva E., Yosypchuk M. (2007). *Osnovy matematychnoho opratsiuvannia heodezychnykh vymiriuvan: Navchalnyi posibnyk* [Basics of mathematical processing of geodetic measurements: Tutorial], 408 p.
- Maltsev M. D., Karakulyna H. A. (1968). *Prykladnaia optyka y optycheskye yzmerenyia* [Applied optics and optical measurements]. M.: Mechanical Engineering, pp. 472.

GEO
BUSINESS 2020

THE GEOSPATIAL EVENT
BUSINESS DESIGN CENTRE
20 – 21 MAY