

УДК 528.721

В. ГЛОТОВ, Ю. КРАВЧУК, М. ПРОЦИК

Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. (032)-258-2639, ел. пошта: yurii.v.kravchuk@lpnu.ua

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНІХ ЕЛЕМЕНТІВ ОРІЄНТУВАННЯ ТА ДИСТОРСІЇ ДЛЯ ЦИФРОВИХ НЕМЕТРИЧНИХ ЗНІМАЛЬНИХ КАМЕР

Мета. На підставі дослідження результатів калібрування цифрової неметричної знімальної камери (ЦНЗК) FC6310, яка встановлена на квадрокоптері DJI Phantom 4 Pro, розробити уніфіковану методику для визначення цих елементів для будь-яких ЦНЗК із можливістю подальшого їх застосування для великомасштабного топографічного аерознімання з БПЛА. **Методика.** Складається із сукупності способів, які розробили автори, в результаті яких визначають елементи внутрішнього орієнтування (ЕВнО) ЦНЗК. Причому методику апробовано на дослідженні калібрування реальної ЦНЗК FC6310. Насамперед було визначено ЕВнО, тобто значення f, x_0, y_0 . Значення фокусної віддалі отримано на підставі тригонометричного методу як найточнішого серед всіх відомих. Для реалізації цього методу застосовано контрольну-вимірну сітку (КВС), що дало змогу підвищити точність отримання вихідної величини. Аналогічно виконано визначення планових ЕВнО, тобто для збільшення точності застосовано фрагмент КВС. Для встановлення дисторсійних спотворень теж застосовано КВС і визначення дисторсії виконано фактично на рівні 3–5 мкм. Реалізація процесів була основана на умовно-статистичному методі, який дає змогу визначати не тільки безпосередню дисторсію об'єктива камери, а і зміщення центра сітки відносно центра CMOS, різномасштабність збільшення об'єктива за осями x та y , кут розвороту сітки, неперпендикулярність осей CMOS та значення середніх квадратичних похибок визначення дисторсії. В результаті цього комплексного дослідження фактично створено і відпрацьовано методику калібрування будь-яких ЦНЗК, причому без застосування унікального обладнання. **Результати.** На підставі досліджень з ЦНЗК FC6310 № 0AXDE3G0A30352, встановленої на БПЛА гелікоптерного типу DJI Phantom 4 Pro, розроблено та відпрацьовано методику визначення елементів внутрішнього орієнтування та дисторсії об'єктивів. **Наукова новизна.** На підставі розроблених способів автори запропонували інтегровану методику визначення елементів внутрішнього орієнтування та дисторсії оптичних систем неметричних цифрових знімальних камер, що встановлюються на БПЛА. **Практична значущість.** Запропоновану методику можна застосовувати для визначення елементів внутрішнього орієнтування будь-яких цифрових неметричних знімальних камер, причому, прилади та деталі, використані в них, не є номенклатурними, завдяки чому можлива реалізація цієї методики на будь-якому топографо-геодезичному підприємстві.

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

Вступ

У зв'язку із постійним розвитком знімальної апаратури, вдосконаленням БПЛА, цифрових вимірювальних приладів, програмного забезпечення та з урахуванням актуальності створення великомасштабних топографічних планів виникає необхідність підвищення точності елементів внутрішнього орієнтування ЦНЗК як невід'ємного елемента опрацювання цифрових зображень.

Перед тим, як перейти до висвітлення способів, які автори запропонували для калібрування ЦНЗК, проаналізуємо декілька сучасних публікацій, в яких подано різноманітні методики калібрування вищезгаданих цифрових неметричних знімальних камер (ЦНЗК).

У праці [Гончарук О. М., 2017] систематизовано та класифіковано різні підходи до калібрування ЦНЗК.

На підставі результатів аналізу розроблено класифікацію методів та методик калібрування ЦНЗК, що можуть використовуватись для вибору моделей калібрування камер із різною дисторсією. Виконано ґрунтовний аналіз та дослідження 12 одиниць програмного забезпечення для калібрування цифрових неметричних камер. Всі програмні засоби поділено на три групи з окремими підгрупами. Виявлено, що для завдань інженерної цифрової фотограмметрії доцільно використовувати програми другої або третьої групи. В результаті дослідження виокремлено програми, які дають змогу надійно, з потрібною точністю визначати елементи внутрішнього орієнтування та параметри дисторсії. Аналізуючи цю роботу, необхідно зауважити, що у дослідженні застосовано умову колінеарності, яка чинить значний кореляційний вплив на точність результатів калібрування ЦНЗК. Крім того, як еталон-

ний об'єкт використано паперовий носій, а це не дає змоги виконувати визначення дисторсії на мікрометричному рівні.

У дослідженні [Левицький, Соболевський, 2008] проаналізовано послідовні етапи проведення процедури калібрування ЦНЗК від вибору типу тестового полігона-об'єкта до визначення параметрів калібрування, їх аналізу та зберігання для подальшого використання. Зазначено, що точне визначення просторових координат на знімку фотограмметричним методом можливе лише із врахуванням впливу дисторсії оптичної системи та неточностей виготовлення ПЗЗ-матриці. Запропонована методика калібрування цифрових неметричних камер дає змогу полегшити оброблення знімків і підвищити достовірність отриманого неспотвореного зображення об'єкта, який досліджується. Недоліком праць [Єрмоленко Д.А. 2019; Левицький, Соболевський, 2008] є використання плоских калібрувальних стендів та макетів, зокрема: надрукованих зображень шахових клітинок або опорної сітки, маркованих фасадів автомобіля, архітектурних елементів та інше. Ці еталони не можуть забезпечити точність калібрування камери на необхідному для високоточних фотограмметричних вимірювань рівні.

Автори [Abdullah S., Tahar K.N., Rashid Fadzil Abdul, Osoman M. A., 2019] виконали калібрування трьох ЦНЗК (DJI Phantom 4 Pro, iPad mini 4 і Nikon SLR D60) із використанням двовимірного тестового полігона та ПЗ PhotoModeler. Для визначення ЕВНО і параметрів дисторсії використано метод самокалібрування. Зазначено, що СКП визначення шуканих величин у всіх трьох ЦНЗК однакова, проте не перевищує фізичного розміру пікселя відповідної камери, що відповідає вимогам до калібрування ЦНЗК. Однак сам еталон виконано на паперовому носії, що, безумовно, не відповідає визначенню дисторсійних спотворень на мікрометричному рівні.

Автори праці [Cramer M., Przybilla H.-J., Zurhorst A. (2017)] здійснили порівняння результатів польового самокалібрування трьох неметричних ЦНЗК, які часто використовують у аерозніманні із БПЛА. Зазначено, що результати лабораторних досліджень можуть істотно відрізнятися від результатів досліджень польового тестового полігона. Рекомендовано використовувати нестиснені зображення формату *.RAW, особливо для камер виробника DJI. Також зазначено, що метод самокалібрування забезпечує високу точність тільки у разі правильної геометрії блока аеротріангуляції. Однак не треба забувати, що сумісне визначення елементів орієнтування призводить до кореляційних впливів, а це впливає безпосередньо на власне точність визначення елементів внутрішнього орієнтування.

У дослідженні [Fryskowska A., Kedziński M., Grochala A., Braula A., 2016] виконано порівняльний аналіз різних методів калібрування бюджетних неме-

тричних ЦНЗК і точності отриманих результатів. Із використанням різного програмного забезпечення (Image Master Calib, Matlab and Agisoft Lens) проведено калібрування ЦНЗК Sony NEX 5T та SONY NEX 5R із використанням плоских тестових полігонів ("шахова дошка" та сітка точок). Зазначено, що точність результатів, одержаних методом самокалібрування на основі неоднакових алгоритмів, використаних у різному програмному забезпеченні, може відрізнятися. Найменші похибки калібрування та найкоротший час опрацювання забезпечило ПЗ Image Master Calib. У цій публікації фактично застосовували такі самі алгоритм і реалізацію, як і в попередніх, тому і точнісні параметри не можуть бути достатньо точними.

У [Harwin S., Lucieer A., Osborn J. (2015)] проаналізовано результати використання різних методів калібрування неметричної ЦНЗК на тестовому полігоні із мережею високоточних планово-висотних опорних пунктів. Апробовано різні сценарії знімання із використанням різної кількості опорних пунктів, висоти знімання, включенням та вилученням перспективних зображень. Зазначено, що результати лабораторного калібрування ЦНЗК можуть бути менш точними порівняно із польовим самокалібруванням. Також рекомендується, використовуючи метод самокалібрування, вводити у проект перспективні зображення, які можуть покращити якість аеротріангуляції. Аналізуючи технологію, що запропонували автори публікації, необхідно акцентувати на визначенні дійсних елементів внутрішнього орієнтування, що для майбутнього опрацювання дуже важливо. Це знову пов'язано з кореляційними зв'язками елементів орієнтування.

Автори [Hastedt H., Luhmann T. (2015)] здійснили дослідження двох неметричних ЦНЗК. Проведено калібрування трьома методами: знімання тестового тривимірного об'єкта (куб із фіксованими дискретними чорними і білими кодованими марками), двовимірної шахової дошки та двовимірного вертикального тестового полігона. Проаналізовано також результати калібрування на точність фотограмметричних вимірювань. Автори статті у висновках цілком слушно зауважили, що необхідно застосовувати знімальні камери без теленасадок, оскільки їх використання приводить до суттєвої зміни елементів внутрішнього орієнтування, яка можлива навіть у польоті. Окрім цього, необхідно підкреслити, що знов-таки застосовано макетний зразок тільки на міліметровому рівні, а це, як зазначено вище, не дає змогу отримати реальні значення на рівні вимірів координат зображень.

У праці [Peppas M. V., Hall J., Goodyear J., Mills J. P., 2019] проведено дослідження двох інтегрованих неметричних ЦНЗК на БПЛА DJI Phantom 4 Pro та DJI Phantom 4 RTK. Калібрування обох ЦНЗК здійснено в три етапи. Під час першого та другого етапів виконано

знімання тестового тривимірного об'єкта (куб із фіксованими дискретними чорними і білими кодованими марками). Під час третього етапу виконано знімання тестового полігона із мережею інструментально вимірних планово-висотних опорних пунктів. На всіх етапах дослідження використано методику самокалібрування на основі різних алгоритмів. Автори доволі ґрунтовно провели експериментальні роботи, але знов-таки застосували алгоритм оберненої фотограмметричної засічки, а це спричинило суттєву відмінність між значеннями планових елементів внутрішнього орієнтування, що і підкреслили автори в підсумках: «при всіх випробуваннях на калібрування впливав високий коефіцієнт кореляції, який перевищував 95 %».

У роботі [Remondino F., Fraser C. (2005)] запропоновано спосіб калібрування камери із використанням тривимірного та плоского тестового полігонів із подальшим самокалібруванням за різними алгоритмами та програмним забезпеченням. Визначено радіальну дисторсію ЦНЗК для кожного окремого кольору спектра (RGB), а також чорно-білого зображення. Автори [Remondino F., Fraser C. (2005); Valkov V. A., Kuzin A. A., Kazantsev A. I. (2018)] запропонували замість процедури самокалібрування використовувати попередньо метод калібрування камери на тестовому полігоні (мережі) та визначати всі необхідні параметри ЦНЗК. Сьогодні калібрування ЦНЗК може проводитись повністю автоматично і досвід показує, що часові зміни параметрів ЕВНО для бюджетних неметричних камер загалом незначні, враховуючи, що їх використовують у невисокоточних роботах. В згаданих вище двох публікаціях підкреслено нагальну необхідність стосовно самокалібрування камер, однак автори як першої статті, так і другої знову застосовують умову колінарності, що спричиняє вплив коефіцієнта кореляції і, як наслідок, зменшення точності досліджуваних величин.

Автори праці [Yusoff A.R., Ariff M., M. Farid. Idris K. M. & Majid Z. Chong A., 2017] здійснили порівняльний аналіз результатів калібрування бюджетної ЦНЗК Sony NEX6 на різних відстанях до еталонних об'єктів та оцінювання точності вимірних величин. Знімання виконано із відстані 1,5 м у лабораторних умовах і з 15 та 25 метрів у польових умовах. Як тестові об'єкти використано закоординований полігон на місцевості та портативну складну раму розмірами 1,5×1 м, яку розробили автори. Автори зосередилися на дослідженні впливу перевищень та висоти і визначенні оптимальної висоти аерознімання, однак без урахування калібрування безпосередньо самої камери. Тобто значення ЕВНО згідно з результатами обчислення оберненої фотограмметричної засічки дуже

відрізняються, а це підтверджує наявність кореляційних зв'язків.

Методика

БПЛА DJI Phantom 4 Pro має інтегровану ЦНЗК FC6310 із номінальною фокусною віддаллю 8,8 мм та однодюдюмовим CMOS сенсором із ефективною роздільною здатністю 20 мегапікселів і номінальним фізичним розміром пікселя 2,41×2,41 мкм. Матеріал лінзи об'єктива – пластик. Розмір матриці 13,2×8,8 мм.

Для калібрування застосовано запатентовані способи визначення фокусної віддалі ЦНЗК [Глотов, 2011], планових елементів внутрішнього орієнтування ЦНЗК [Глотов, 2010] та методику опрацювання дисторсійних спотворень об'єктивів ЦНЗК [Глотов (2004)].

Коротко розглянемо сутність способу визначення фокусної віддалі (рис. 1).

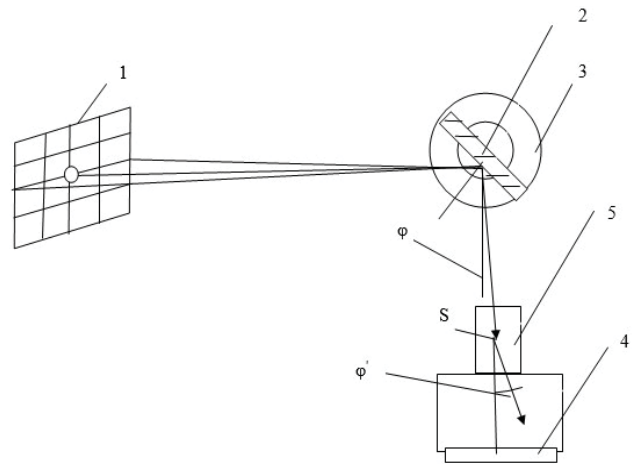


Рис. 1. Схематичне зображення способу визначення фокусної віддалі ЦНЗК:

- 1 – контрольна-вимірна сітка; 2 – плоске дзеркало;
3 – кутомірний пристрій; 4 – ПЗЗ-матриця ЦНЗК;
5 – об'єктив ЦНЗК

Для оптимального розміщення приладів комплексу виконують такі процеси:

а) плоске дзеркало 2 суміщають із зображенням КВС 1, це зображення потрапляє на елемент CMOS камери 4;

б) камеру орієнтують так, щоби зображення, яке будує об'єктив 5 на вибраному перехресті сітки, опинилося на перетині центральних напрямків міток, які відображаються на планшеті пульта керування камерою та горизонтальних кутів φ між перетинами КВС та електронним тахеометром 3.

Це виключає вплив похибок елементів зовнішнього орієнтування, що підвищує точність визначення фокусної віддалі ЦНЗК та об'єктів, які досліджуються.

Передають цифрові зображення у вікно “Взаємне орієнтування” ЦФС “Дельта-2” і здійснюють вимірювання координати x або y відображення і перехрестя сітки, за якими визначають фокусну віддаль за умови:

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \min, \quad (1)$$

де Δ_i – значення дисторсії в i точці. Відповідно, фокусну віддаль камери можна вибрати так, щоб сума значень дисторсії була мінімальна. Ця умова, основана на теорії найменших квадратів, є найстрогішою. Враховуючи цю умову і склавши почленно обидві частини рівностей

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= x_1 - f_{cp} \cdot tg\varphi_1, \\ \Delta_2 &= x_2 - f_{cp} \cdot tg\varphi_2, \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_i &= x_i - f_{cp} \cdot tg\varphi_i, \end{aligned} \quad (2)$$

де x_i – відповідна віддаль на ПЗЗ-матриці; f_{cp} – середня арифметична фокусна віддаль, що виражають дисторсію по зонах поля зору, знаходять:

$$f_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n tg\varphi_i} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot tg\varphi_i}{\sum_{i=1}^n tg\varphi_i}. \quad (3)$$

Звідси видно, що під час розрахунку фокусної віддалі значення $tg\varphi_i$ є ваговим коефіцієнтом.

Як бачимо з алгоритму визначення фокусної віддалі, відсутній вплив похибок елементів зовнішнього орієнтування, що підвищує точність визначення фокусної віддалі ЦНЗК та об’єктів, які досліджуються.

У результаті реалізації вищенаведеного способу визначено фокусну віддаль ЦНЗК FC6310 встановленої на БПЛА DJI Phantom 4 Pro № 0AXDE3G0A30352, яка становить 8,54 мм і відрізняється від величини, заявленої в технічних характеристиках ЦНЗК (8,8 мм).

Розглянемо тепер спосіб для отримання планових ЕВнО, розташування приладів та вузлів якого схематично зображено на рис. 2.

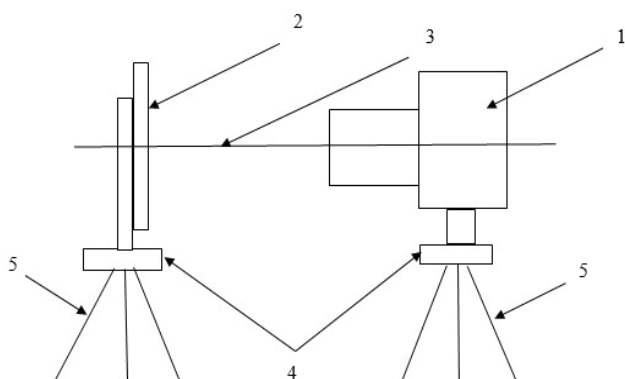


Рис. 2. Схема методу визначення планових ЕВнО, де: 1 – ЦНЗК; 2 – марка із центральним перехрестям, напр., контрольно-вимірні сітки; 3 – головна оптична вісь; 4 – підставки; 5 – штативи

Розташовують цифрову знімальну камеру 1 на штативі 5 із підставкою 4 і приводять у робочий стан – нівелюють за допомогою планшета пульта керування. Безпосередньо поблизу від неї встановлюють на штатив 5 марку 2 – КВС, на головній оптичній осі 3 ЦНЗК, з можливістю обертання навколо горизонтальної осі за допомогою кулькопідшипника так, щоб головний оптичний промінь проходив через центр перехрестя. Цей вузол вставляють у підставку та приводять у робоче положення за допомогою накладного рівня.

Встановлюють за допомогою пульта керування ЦНЗК КВС, розвертаючи в перше положення 0° так, щоб її центральне перехрестя збігалось із центром зображення на пульта керування, і виконують знімання КВС.

Далі сітку повертають відповідно на 90° , 180° та 270° і у цих положеннях також роблять знімки. Передають одержані цифрові зображення у вікно “Взаємне орієнтування” цифрової фотограмметричної станції (ЦФС) “Дельта-2. Відтак здійснюють вимірювання координат (x, y) центрального перехрестя КВС, за якими обчислюють планові ЕВнО.

Обчислені значення планових ЕВнО ЦНЗК FC6310 № 0AXDE3G0A30352 відповідно $x_o=32$ мкм та $y_o=8,5$ мкм.

Дисторсію об’єктива ЦНЗК визначено, як вказано вище, умовно-статистичним методом. Для цього:

1. Складають рівняння, які описують дисторсійне спотворення.
2. Здійснюють дослідження цього способу.
3. Коригують початкові рівняння та виконують відповідні обчислення.

Схему розташування основних величин подано на рис. 3.

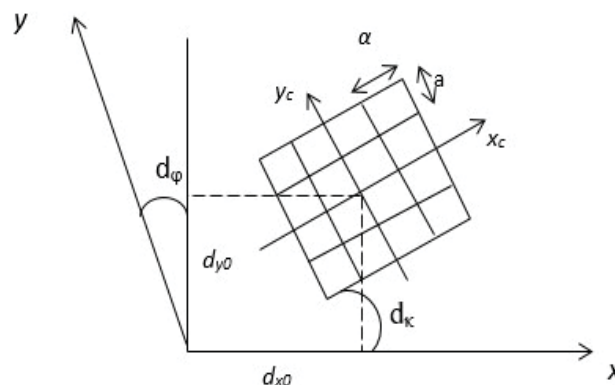


Рис. 3. Схема розташування основних величин: d_{y0}, d_{x0} – незбіг центрів координат; d_k – розворот сітки відносно сенсора; d_φ – неперпендикулярність комірок матриці; dm_x, dm_y – різномасштабність об’єктива по вісі x, y ; x, y – виміряні координати сітки на знімку; dx, dy – різниця між виміряними на зображенні сітки координатами та на самій сітці

Порівняння вимірних координат x, y з еталонними координатами сітки x_c, y_c , здійснюється згідно із рівняннями похибок:

$$\begin{aligned} -a - xb - yc + l_x &= v_x, \\ -a' - yb' - xc' + l_y &= v_y, \end{aligned} \quad (4)$$

де a, a' – незбіг центра КВС з центром сенсора, b та b' – масштабні похибки оптичної системи камери відповідно по осі x та по осі y , c' – кут нахилу сенсора відносно КВС; c – кут неперпендикулярності осей сенсора, l_x та l_y – фактичний незбіг перехресть КВС із її зображенням (дисторсія), v_x, v_y – випадкові похибки відповідно за осями x та y . У цих рівняннях систематичними похибками є a, a', b, b', c, c' .

Система рівнянь, складена для усіх вимірних точок, у матричному вигляді подана формулою:

$$B\Delta + L = V, \quad (5)$$

де B – матриця вимірних координат зображення сітки; Δ – матриця невідомих; L – матриця-стовпець дисторсії; V – матриця-стовпець залишкових похибок.

Систему рівнянь розв'язують за способом найменших квадратів.

Нагадаємо, що значення дисторсії у цьому алгоритмі визначають з матриці L , безпосередньо вимірної. Оцінка точності здійснюється за формулами (6)

$$\mu_x = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_x^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}; \mu_y = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_y^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Здійснено лабораторні випробування запропонованої технології. Проведено знімання КВС вищевказаною ЦНЗК. Виконано вимірювання перехресть сітки ($n=150$) на ЦФС “Дельта-2” у вікні “Взаємне орієнтування”, а результати вимірювань опрацьовано за вищенаведеним алгоритмом. У результаті одержано значення матриці Δ . Масштабні похибки оптичної системи ЦНЗК які відповідно становили: $b=0,9999641$ та $b'=0,999185$, не впливають на точність вимірних координат у перерахунку щодо метричних похибок. Неперпендикулярність осей сенсора досягла відповідно $-1'33''$, що вносить похибку в максимальну координату на знімку $\Delta x = 3$ мкм, а це можливо виправити аналітично. Значення дисторсійних спотворень подано на рис. 4. Середні квадратичні похибки цих величин відповідно становили: $m_{\Delta x} = 12$ мкм, $m_{\Delta y} = 38$ мкм. За отриманими результатами навіть візуально видно, що дисторсія “подушкоподібна” і, безумовно, за поданими величинами повинна бути врахована.

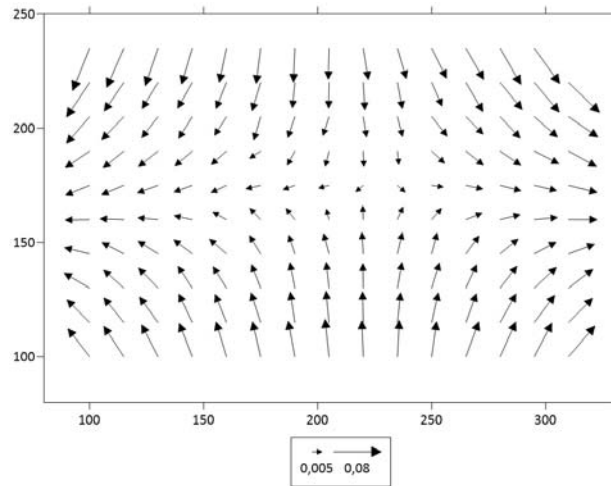


Рис. 4. Векторна діаграма дисторсійних спотворень

Висновки

1. Аналіз сучасних літературних джерел дає підставу констатувати актуальність проблеми. Це пов'язано із активним упровадженням засобів БПЛА та ЦНЗК для опрацювання великомасштабних топографічних планів, а також для розв'язування різноманітних задач у різних галузях науки та техніки.

2. Оскільки фактично підприємства, які випускають ЦНЗК, не надають дані стосовно ЕВНО та величини реальних залишкових дисторсійних спотворень, то необхідно розробляти способи та методики визначення цих величин. Причому польові методи завдяки кореляційним зв'язкам не дають дійсних значень, що і підтвердили виконані дослідження.

3. Необхідно зазначити, що суттєва відмінність між фокусними віддалями спричинена тим, що виробник за рахунок зміни цієї величини вирішив зменшити дисторсійні спотворення. Стосовно планових елементів, то вони близькі до значень, отриманих у результаті оброблення цифрових зображень.

4. Технологічна схема методики є оперативною і може бути реалізована в будь-яких умовах (перед або після польового сезону). Аналіз точності способів доводить можливість визначити дисторсію з точністю такого порядку, як і виміри координат знімків. Способи визначення дисторсії ЦНЗК ґрунтуються на уніфікації обладнання і є малоємними та оперативними.

5. Автори планують здійснити аналіз отриманих значень дисторсії та можливості її усунення.

Література

- Глозов В. М. (2011). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери № 94376, Бюл. № 26.04.2011.
- Глозов В. М., Пашетник О. Д. (2010). Спосіб визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових знімальних камер № 50155, Бюл. № 10.

- Глотов В. М. (2004). Визначення дисторсії цифрових знімальних систем. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, Частина 1, Вип. 4 (28). С. 207–213.
- Гончарюк О. М. (2017). Дослідження програмних засобів та моделей для автоматичного калібрування цифрових неметричних камер за площинними тестовими об'єктами. *Інженерна геодезія*, Вип. 64, С. 106–128. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ig_2017_64_12.
- Левицький В. Г., Соболевський Р. В. (2008). Дослідження етапів калібрування цифрових неметричних камер з метою підвищення ефективності наземної фотограмметричної зйомки. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*, Серія: Технічні науки, Вип. 2 (45), С. 77–84.
- Abdullah S., Tahar K. N., Rashid Fadzil Abdul, Osoman M. A. (2019). Camera Calibration Performance on Different Non-metric Cameras. *Pertanika Journal of Science and Technology*. 27. 1397–1406.
- Cramer M., Przybilla H.-J., Zurhorst A. (2017). UAV cameras: overview and geometric calibration benchmark. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W6, 2017 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 4–7 September 2017, Bonn, Germany.
- Fryskowska A., Kedzierski M., Grochala A., Braula A. (2016). Calibration of low cost RGB and NIR UAV cameras. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLI-B1, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.
- Harwin S., Lucieer A., Osborn J. (2015). The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sens.* 2015, 7, 11933–11953.
- Hastedt H., Luhmann T. (2015). Investigations on the quality of the interior orientation and its impact in object space for UAV photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W4, 321–328. 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015.
- Peppas M. V., Hall J., Goodyear J., Mills J. P. (2019). Photogrammetric assessment and comparison of DJI Phantom 4 Pro and Phantom 4 RTK small unmanned aircraft systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W13, 2019 ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands.
- Remondino F., Fraser C. (2005). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *Ine. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 36.
- Valkov V. A., Kuzin A. A., Kazantsev A. I. (2018). Calibration of digital non-metric cameras for measuring works. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1118 (2018) 012044.
- Yusoff A. R., Ariff M., Farid M., Idris K. M. & Majid Z., Chong A. (2017). Camera calibration accuracy at different UAV flying heights. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-2/W3, 595–600. 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-595-2017.

V. HLOTOV, Y. KRAVCHUK, M. PROTSYK

Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. (032)-258-2639, e-mail yurii.v.kravchuk@lpnu.ua

METHODS FOR DETERMINING THE INTERNAL ELEMENTS OF ORIENTATION AND DISTORTION FOR DIGITAL NON-METRIC CAMERAS

Aim. Based on the study of the calibration results of the digital non-metric camera FC6310 installed on the DJI Phantom 4 Pro UAV, develop a unified methodology for determining these elements for any digital non-metric camera with the possibility of their further application for large-scale topographic aerial photography with UAVs. **Methodology.** It consists of a set of methods developed by the authors as a result of which the elements of internal orientation of the digital non-metric camera are determined. Moreover, the approbation of the method was performed on the study of calibration of the real digital non-metric camera FC6310. First of all, the elements of internal orientation, ie the values of f , x_0 , y_0 , were determined. The values of the focal length were obtained based on the trigonometric method, as the most accurate among all known. To implement this method, the control and measuring grid was used, which made it possible to increase the accuracy of obtaining the initial value. Similarly, the determination of x_0 , y_0 was performed, ie to increase the accuracy, a fragment of control and measuring grid was used. Regarding the determination of lens distortion, even in that case, control and measuring grid was used and lens distortion was determined at the level of 3–5 μm . The implementation of the

processes was based on the conditional-statistical method, which allows obtaining not only the direct distortion of the camera lens but also the offset of the grid center relative to the CMOS center, determining the zoom magnification of the lens along the x and y axes, grid rotation angle CMOS axes and mean square error distortion errors. As a result of this comprehensive study, a method of calibration of any digital non-metric camera was created and tested, furthermore, without the use of unique equipment. **Results.** Based on the conducted researches with digital non-metric camera FC6310 No. 0AXDE3G0A30352 installed on the UAV of the helicopter type DJI Phantom 4 Pro the technique of definition of elements of internal orientation and distortion of lenses is developed and fulfilled. **Scientific novelty.** Based on the methods developed by the authors, the method of determining the elements of internal orientation and distortion of optical systems of non-metric digital camera cameras installed on UAVs is integrated. **Practical significance.** The proposed technique can be used to determine the elements of internal orientation of any digital non-metric camera, and since the devices and parts used in them are not nomenclature, it is possible to implement this technique in any topographic and surveying enterprise.

References

- Hlotov V. M. (2011). Sposib vyznachennia fokusnoi viddali tsyfrovoy zimalnoi kamery No. 94376, Biul. No. 26.04.2011.
- Hlotov V. M., Pashchetnyk O. D. (2010). Sposib vyznachennia elementiv vnutrishnoho oriientuvannia tsyfrovyykh zimalnykh kamer No. 50155, Biul. No. 10.
- Hlotov V.M. (2004). Vyznachennia dystorsii tsyfrovyykh zimalnykh system. Visnyk natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Chastyna 1. Vyp. 4 (28). S. 207–213
- Honcheriuk O. M. (2017). Doslidzhennia prohramnykh zasobiv ta modelei dlia avtomatychnoho kalibruvannia tsyfrovyykh nemetrychnykh kamer za ploshchynnyy testovyy ob'ektamy. Inzhenerna heodeziia. Vyp. 64. S. 106–128. Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ig_2017_64_12.
- Levytskyi V.H., Sobolevskiy R.V. (2008). Doslidzhennia etapiv kalibruvannia tsyfrovyykh nemetrychnykh kamer z metoiu pidvyshchennia efektyvnosti nazemnoi fotohrammetrychnoi ziomky. Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. Vyp. 2 (45), S. 77–84.
- Abdullah S., Tahar K.N., Rashid Fadzil Abdul, Osoman M. A. (2019). Camera Calibration Performance on Different Non-metric Cameras. *Pertanika Journal of Science and Technology*. 27. 1397–1406.
- Cramer M. , Przybilla H.-J., Zurhorst A. (2017). UAV cameras: overview and geometric calibration benchmark. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W6, 2017 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 4–7 September 2017, Bonn, Germany.
- Fryskowska A., Kedzierski M., Grochala A., Braula A. (2016). Calibration of low cost RGB and NIR UAV cameras. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B1, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.
- Harwin S., Lucieer A., Osborn J. (2015). The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sens.* 2015, 7, 11933–11953.
- Hastedt H., Luhmann T. (2015). Investigations on the quality of the interior orientation and its impact in object space for UAV photogrammetry. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XL-1/W4. 321-328. 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015.
- Peppas M. V., Hall J., Goodyear J., Mills J. P. (2019). Photogrammetric assessment and comparison of DJI Phantom 4 Pro and Phantom 4 RTK small unmanned aircraft systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W13, 2019 ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands.
- Remondino F., Fraser C. (2005). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. In: *Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 36.
- Valkov V.A., Kuzin A.A., Kazantsev A.I. (2018). Calibration of digital non-metric cameras for measuring works. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1118 (2018) 012044.
- Yusoff A.R., Ariff M., M. Farid. Idris K. M. & Majid Z. Chong A. (2017). Camera calibration accuracy at different UAV flying heights. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-2/W3. 595-600. 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-595-2017.