

В.Г. Левицький, аспір.  
Р.В. Соболевський, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАПІВ КАЛІБРУВАННЯ ЦИФРОВИХ НЕМЕТРИЧНИХ КАМЕР З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАЗЕМНОЇ ФОТОГРАМЕТРИЧНОЇ ЗЙОМКИ

*Удосконалено методику калібрування цифрових неметричних камер на основі дослідження етапів калібрування та алгоритмів обчислення елементів внутрішнього і зовнішнього орієнтування цифрових знімків з метою підвищення ефективності наземної фотограмметричної зйомки.*

**Вступ.** Найбільша повнота маркшейдерської графічної документації досягається завдяки застосуванню сучасних геодезичних і фотограмметричних методів зйомок. На сьогодні важливим завданням є розробка ефективної методики зйомки кар'єру, яка б задовольняла за точністю і була оперативною. Одним із шляхів досягнення даного завдання є впровадження дистанційних методів, таких як наземна стереофотограмметрична зйомка. Розвиток цифрових технологій дозволив застосовувати як знімальну апаратуру професійні цифрові камери, в яких встановлюється високоточна оптична система, що зводить до мінімуму дисторсійні спотворення знімка та відповідає вимогам точності зйомки.

На сьогодні досліджується і є актуальним застосування неметричних цифрових камер, які, на відміну від дорогих метричних, необхідно відкалібрувати. Калібрування цифрової неметричної камери виконується з метою використання її як вимірювального інструменту при проведенні різних фотограмметричних робіт і складанні маркшейдерської документації та для забезпечення подальшої метричної обробки знімків, отриманих даною камерою. До параметрів, які визначаються в процесі повного калібрування, відносять елементи внутрішнього орієнтування (ЕВО) знімка та параметри дисторсії оптичної системи [1]. Ці параметри зберігаються і враховуються при подальшій фотограмметричній обробці знімків на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС).

Тому дослідження етапів калібрування цифрових неметричних камер є актуальною науково-практичною задачею, розв'язання якої дозволить оптимізувати маркшейдерське забезпечення розробки родовищ декоративного каменю.

**Завданням статті** є удосконалення існуючої методики калібрування та визначення основних параметрів оптичної системи даних камер на основі сформованої методики.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідженням оптимальних умов фотографування і параметрів плоского тестового полігону, при яких розв'язання задачі калібрування виконується з найбільш можливою точністю, займалися Шоломицький А.А., Лунев А.А. [2, 3], створенням дослідних стендів для калібрування цифрових неметричних камер займалися Шатохін А.Л. [4], Гельман Р.Н., Дунц А.Л. [5], розробкою способів і методики аналітичної обробки неметричних знімків та розв'язанням деяких задач фотограмметрії займалися Юрченко В.І. [6, 7], Дубиновський В.Б. [8], Глогов В.М. [9], Могильний С.Г. [10], Дорожинський О.Л. [11]. Огляд методів і моделей аналізу калібрування камер за останні 50 років представлений у Кларка і Фрайера [12]. Недоліком вищенаведених праць є те що, автори не аналізували вплив різних факторів і умов фотографування на точність визначення параметрів калібрування, не враховували коефіцієнти радіальної і тангенціальної дисторсій, обґрунтовували методику калібрування лише на теоретичному рівні без практичних досліджень, а також не використовували програмне забезпечення для виконання повного циклу калібрування, автоматичного розрахунку параметрів, аналізу похибок і візуалізації дисторсійних моделей.

**Викладення основного матеріалу статті.** Аналіз літературних джерел дозволив виділити наступні основні етапи калібрування:

1. *Вибір і створення тестового полігону (тест-об'єкта) для фотографування.* Тест-об'єкт може бути плоским або об'ємним, від чого залежить подальша методика обробки знімків.
2. *Вимірювання тестового полігону і обробка отриманих результатів.*
3. *Власне фотографування тестового полігону та отримання* з різних ракурсів не менше 12–15 знімків для більш високої точності визначення параметрів. Точність зростає із збільшенням числа вимірних точок на зображенні, які повинні розташовуватись по всій поверхні знімка. При виконанні зйомки з метою подальшого калібрування камери значення площі заповнення  $P$  (відношення площі фігури, отриманої шляхом оконтурювання зображення макета на знімку, до площі всього знімка) повинно бути максимально можливим [3].
4. *Обробка знімків* за допомогою програмного забезпечення на основі рішення поставлених задач, які можуть вирішуватись як лінійними, так і нелінійними методами. Лінійні методи є достатньо

простими і швидкими, однак для визначення дисторсії необхідна наявність масиву контрольних точок з відомими координатами. При цьому як правило модель спрощується, що призводить до низької точності результатів. Нелінійні методи, наприклад рішення сукупності рівнянь колінеарності, лежать в основі самокалібрування камери.

5. *Визначення параметрів калібрування.* Для неметричних цифрових камер параметрами самокалібрування є фокусна відстань, координати головної точки та систематичні похибки, які викликають зміщення точок знімку за радіальним і тангенціальним напрямками (дисторсія об'єктива). Оскільки основні математичні моделі описані нелійними рівняннями колінеарності, то для обчислення ЕВО і дисторсії застосовується метод найменших квадратів [13]. Виключення систематичних похибок у вимірних координатах точок знімку за допомогою поліномів дозволить отримати ідеальну проекцію тест-об'єкта і визначити параметри калібрування.

6. *Аналіз отриманих результатів та їх збереження у відповідному форматі з метою подальшого використання.* Після визначення коефіцієнтів поліномів, вводяться поправки в координати точок знімку і отримують об'єктивне зображення. Потім виправлені координати точок знімку підставляються в рівняння колінеарності й обчислюються нев'язки  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$ , за значеннями яких знаходять середні квадратичні похибки (СКП) калібрування  $m_x$  і  $m_y$ . Отримані значення СКП калібрування по осі  $X$  і  $Y$  порівнюються з розміром пікселя цифрової камери. Результати калібрування вважаються задовільними, якщо величина СКП калібрування дорівнює або менша розміру пікселя цифрової камери [14].

Розглянемо алгоритм визначення параметрів калібрування. Як вже зазначалось, в основі самокалібрування цифрових камер лежать рівняння колінеарності, які є системою нелінійних рівнянь і в загальному випадку мають такий вигляд:

$$\begin{cases} F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots \\ F_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Для розв'язання таких систем нелінійних рівнянь використовують ітераційні способи, а саме спосіб простих ітерацій або спосіб Ньютона. Взагалі розв'язання будь-яких рівнянь ітераційним способом полягає у отриманні послідовності точок  $\{x_n\}$ , яка зводиться до знаходження невідомих рівняння  $F(x) = 0$ . При цьому ітераційний процес зупиняється тоді, коли досягається задана точність  $\varepsilon$  отриманого результату  $|F(x_n)| < \varepsilon$ .

Функції, які описують систематичні похибки в координатах знімка, в загальному вигляді можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} \delta_x &= \delta x_f + \delta x_r + \delta x_t, \\ \delta_y &= \delta y_f + \delta y_r + \delta y_t, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\delta x_f$ ,  $\delta y_f$  – поправки, які враховують ЕВО знімка;

$\delta x_r$ ,  $\delta y_r$  – поправки радіальної дисторсії;

$\delta x_t$ ,  $\delta y_t$  – поправки тангенціальної дисторсії.

Існують такі основні методи врахування систематичних похибок: поліномний, зонний і метод кінцевих елементів. На сьогодні в програмних комплексах реалізовані всі три методи. Перший спосіб найбільше підходить для цифрових знімків – немає потреби рівномірного розташування контрольних точок на тестовому полігоні, на відміну від зонного, який передбачає розбиття знімка на рівні зони і забезпечення кожної зони мінімум трьома точками.

Математичні функції поліномного методу можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \delta x_j &= g_1(f_x, x_j, y_j), \\ \delta y_j &= g_2(f_y, x_j, y_j), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $f_x$ ,  $f_y$  – фокусна відстань;

$x_j$ ,  $y_j$  – координати контрольних точок.

Дані функції не розкривають внутрішні фізичні чи механічні джерела похибок, а тільки відображають їх загальний характер. Крім того, поліномний метод потребує наявності координат головної точки кожного знімку.

Невірна математична модель для визначення поправок вимірювання координат точок знімку лише посилює спотворення результатів обробки. Тому вибір математичної моделі аналізу систематичних похибок має важливе значення при створенні методики самокалібрування цифрових камер.

Розглянемо алгоритм обчислення систематичних похибок ЕВО знімка. Матриця внутрішніх параметрів камери  $K$  має вигляд:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Оцінювання елементів матриці  $K$  є одним із основних етапів калібрування камери і зводиться до обчислення ЕВО знімка при відомих просторових координатах контрольних точок  $(X_1, Y_1, Z_1)$  і координатах їх проєкцій у площині зображення  $(u_i, v_i)$ . Якщо положення камери відоме, тобто відомі елементи зовнішнього орієнтування камери, то координати контрольних точок можна відразу перерахувати в систему камери і використати залежності (5) для визначення внутрішніх параметрів:

$$\begin{aligned} f_x X + u_0 Z &= uZ, \\ f_y Y + v_0 Z &= vZ. \end{aligned} \quad (5)$$

Для  $N$  контрольних точок отримаємо дві системи, які складаються із  $N$  лінійних рівнянь кожна, відносно невідомих  $u_0, f_x$  і  $v_0, f_y$ . З врахуванням нев'язок (похибок)  $e_x$  і  $e_y$ , які є функцією від аргументів матриць  $a_u$  і  $a_v$ , запишемо дані системи у матричній формі:

$$\begin{aligned} e_x = w_u - B_u a_u &= \begin{bmatrix} u_1 Z_1 \\ \dots \\ u_N Z_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 & Z_1 \\ \dots & \dots \\ X_N & Z_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_x \\ u_0 \end{bmatrix}, \\ e_y = w_v - B_v a_v &= \begin{bmatrix} v_1 Z_1 \\ \dots \\ v_N Z_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_1 & Z_1 \\ \dots & \dots \\ Y_N & Z_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_y \\ v_0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Достатньо двох контрольних точок, щоб отримати значення внутрішніх параметрів камери, але для більшої точності визначення даних параметрів слід використовувати більшу кількість контрольних точок. В такому випадку системи (6) є перевизначеними, і для їх розв'язання використовують метод найменших квадратів (МНК). МНК полягає в мінімізації суми квадратів похибок (RSS – residual sum of squares) по  $a$ :

$$RSS(a) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (w_i - B_i a_i)^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Сума квадратів похибок в матричному вигляді:

$$RSS(a) = e^T e = (w - Ba)^T (w - Ba) = w^T w - 2w^T Ba + a^T B^T Ba. \quad (8)$$

Нехай мінімум досягається при  $a = a_i$ , тоді в цій точці повинна виконуватись умова першого порядку:

$$\frac{dRSS(a_n)}{da} = -2w^T B + 2a_n^T B^T B = 0. \quad (9)$$

З рівняння (9) отримують співвідношення, яке називають нормальним рівнянням:

$$B^T w = B^T B a_i. \quad (10)$$

Із нормального рівняння знаходять вектор коефіцієнтів МНК, які визначають внутрішні параметри камери:

$$a_u = (B_u^T B_u)^{-1} B_u^T w_u, \quad a_v = (B_v^T B_v)^{-1} B_v^T w_v. \quad (11)$$

Виконати точні вимірювання положення камери, тобто всіх елементів зовнішнього орієнтування, відносно довільної системи координат є технічно складним завданням. Тому калібрування здійснюють з врахуванням поворотної матриці  $R$  і вектора зміщення  $t$ , які разом із внутрішніми параметрами входять у калібрувальну матрицю  $C$ :

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^T & c_{14} \\ c_2^T & c_{24} \\ c_3^T & c_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x r_1^T + u_0 r_3^T & f_x t_x + u_0 t_z \\ f_y r_2^T + v_0 r_3^T & f_y t_y + v_0 t_z \\ r_3^T & t_z \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Задача калібрування зводиться до оцінювання елементів матриці  $C$ . В основі даної калібрувальної матриці лежать рівняння колінеарності, які дозволяють визначити 9 параметрів орієнтування камери, знаючи просторові координати  $(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi})$   $N$  контрольних точок і координати їх проєкцій  $(x_i, y_i)$  на цифровому зображенні. В результаті залежність між невідомими елементами  $c_{ij}$  матриці  $C$  і координатами  $N$  контрольних точок можна представити у вигляді однорідної системи із  $2N$  лінійних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} c_{11}X_1 + c_{12}Y_1 + c_{13}Z_1 + c_{14} - c_{31}X_1u'_1 - c_{32}Y_1u'_1 - c_{33}Z_1u'_1 - c_{34}u'_1 &= 0 \\ c_{21}X_1 + c_{22}Y_1 + c_{23}Z_1 + c_{24} - c_{31}X_1v'_1 - c_{32}Y_1v'_1 - c_{33}Z_1v'_1 - c_{34}v'_1 &= 0 \\ \dots & \\ c_{11}X_N + c_{12}Y_N + c_{13}Z_N + c_{14} - c_{31}X_Nu'_N - c_{32}Y_Nu'_N - c_{33}Z_Nu'_N - c_{34}u'_N &= 0 \\ c_{21}X_N + c_{22}Y_N + c_{23}Z_N + c_{24} - c_{31}X_Nv'_N - c_{32}Y_Nv'_N - c_{33}Z_Nv'_N - c_{34}v'_N &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Запишемо систему (13) у матрично-векторному вигляді:

$$Lc = 0, \quad (14)$$

де

$$L = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1u'_1 & -Y_1u'_1 & -Z_1u'_1 & -u'_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1v'_1 & -Y_1v'_1 & -Z_1v'_1 & -v'_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_N & Y_N & Z_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_Nu'_N & -Y_Nu'_N & -Z_Nu'_N & -u'_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_N & Y_N & Z_N & 1 & -X_Nv'_N & -Y_Nv'_N & -Z_Nv'_N & -v'_N \end{bmatrix}$$

$$c = (c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{21}, c_{22}, c_{23}, c_{24}, c_{31}, c_{32}, c_{33}, c_{34})^T.$$

Отже, знаючи елементи калібрувальної матриці  $c_{ij}$ , можна обчислити ЕВО, і елементами зовнішнього орієнтування (ЕЗО) камери за наступними формулами:

$$\begin{aligned} u_0 &= c_1^T c_3, v_0 = c_2^T c_3, f_x = c_1 \times c_3, f_y = c_2 \times c_3, \\ t_z &= c_{34}, t_x = (c_{14} - u_0 t_z) / f_x, t_y = (c_{24} - v_0 t_z) / f_y, \\ r_3^T &= c_3^T, r_1^T = (c_1^T - u_0 c_3^T) / f_x, r_2^T = (c_2^T - v_0 c_3^T) / f_y. \end{aligned} \quad (15)$$

Для визначення наведених вище параметрів необхідно скласти 12 рівнянь, тому кількість контрольних точок повинна бути не менше 6. Для зменшення впливу похибок використовують більше 6 контрольних точок, тоді система (14) стає перевизначеною і приймає наступний вигляд:

$$Lc = e, \quad (16)$$

де  $e$  – вектор поправок, обумовлений наявністю похибок вимірювань координат.

Розв'язок даної системи виконують методом найменших квадратів при умові  $c_3^T c_3 = 1$  на основі формули (8):

$$RSS(a) = e^T e = L^T L c^T c. \quad (17)$$

Пропонується наступна методика калібрування цифрових неметричних камер, яка відповідає вищенаведеним загальним етапам калібрування і наведеному методу обчислення систематичних похибок неметричних знімків.

*1 етап.* Як тест-об'єкт був вибраний калібрувальний лист формату А1 розміром 59×84 см, який містить 247 контрольних точок, відстань між якими 40 мм (рис. 1, а). Для автоматизації процесу калібрування на деяких тест-об'єктах позначаються 4 опорні точки, які легко можна було б ідентифікувати. Процеси автоматичної ідентифікації точок на цифровому знімку застосовуються в різних програмних комплексах для фотограмметричної обробки цифрових знімків і описані в спеціальній літературі.

*2 етап.* Вимірювання координат контрольних точок калібрувального листа полягає у прив'язці початку просторової системи координат до однієї з точок полігону і визначенні координат всіх точок відносно неї. В даному випадку за початок плоскої системи координат ОХУ приймається крайня ліва верхня точка (рис. 1, б).

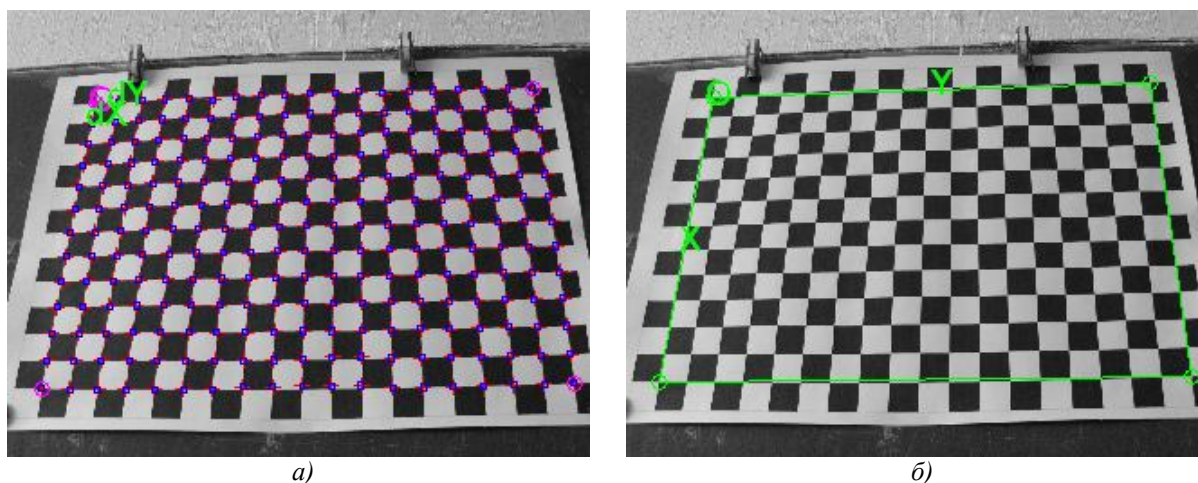


Рис. 1. Тест-об'єкт:  
а – ідентифіковані контрольні точки; б – внутрішня система координат

3 етап. Тест-об'єкт фотографувався чотирма неметричними цифровими камерами, технічна характеристика яких наведена в таблиці 1. Фотографування виконувалось з п'яти різних ракурсів, в результаті чого було отримано по 15 знімків кожною камерою.

Таблиця 1

Технічна характеристика неметричних цифрових камер

Модель	Samsung S1050	Kodak Z650	Panasonic DMC-FZ7	Olympus SP-500
Параметр				
Розміри ПЗЗ-матриці:				
– діагональ	1/1,8"	1/2,5"	1/2,5"	1/2,5"
– ширина (мм)	7,176	5,76	5,76	5,76
– висота (мм)	5,319	4,29	4,29	4,29
Кількість мегапікселів	10,0	6,0	6,0	6,0
Максимальний розмір кадра, пікселів	3648×2736	2832×2128	2816×2112	2816×2112
Розмір пікселя, мкм	1,97×1,94	2,03×2,02	2,05×2,03	2,05×2,03
Фокусна відстань (для 35 мм формату)	7,8–39 (38–190)	7,8–78 (38–380)	6–72 (36–432)	6,3–63 (38–380)
Оптичний зум	5x	10x	12x	10x
Світлочутливість ISO	50–1600	80–800	80–1600	80–400
Діапазон витримки, с	15–1/2000	16–1/1700	60–1/2000	15–1/1000
Діагональ дисплея, см	7,62	5,08	6,35	6,35
Живлення	2AA	2AA	Li-Ion	4AA

Для успішного застосування камери при її виборі бажано, щоб камера мала можливість відключення автофокуса і встановлення фокусування об'єктива на нескінченність. Автофокусування камери здійснюється за допомогою трансфокатора (зума), який переміщує об'єктив і змінює фокусну відстань, регулюючи при цьому чіткість і масштаб зображення. В результаті цього елементи внутрішнього орієнтування камери змінюються, що не дозволяє відкалібрувати камеру. Тому фокусування камери на нескінченність (закріплення положення лінз) або використання камери без трансфокатора дає можливість зафіксувати ЕВО і виконати калібрування.

У всіх камерах, які використовувались для калібрування, є оптичний зум, але в процесі фотографування фокусна відстань камери була постійною, що дозволило коректно її визначити на наступних етапах калібрування.

4 етап. Для обробки знімків використовувався програмний продукт «Camera Calibration Toolbox», реалізований в середовищі MatLab за алгоритмом, розробленому вченим Zhengyou Zhang [15, 16]. Даний програмний продукт був перекладений на українську мову і удосконалений в частині визначення коефіцієнтів тангенціальної дисторсії, а також автоматизовані етапи завантаження і обробки знімків. Інтерфейс оновленої програми зображений на рис. 2.

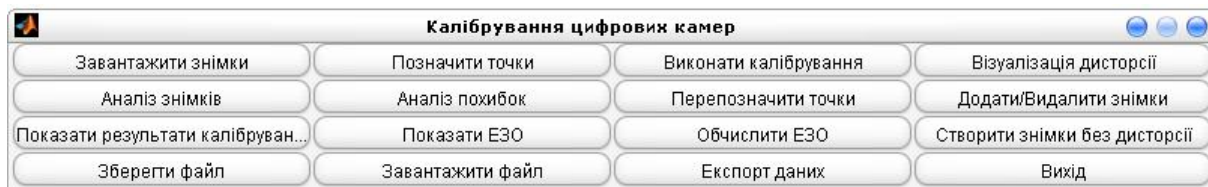


Рис. 2. Інтерфейс програми для калібрування цифрових камер

5 етап. Визначення параметрів калібрування виконувалось в автоматичному режимі за допомогою програми «Camera Calibration Toolbox» на основі залежностей, наведених в першій частині статті. Також дане програмне забезпечення дозволяє обчислювати параметри зовнішнього орієнтування камери: просторові координати центра проекції  $X_S, Y_S, Z_S$  та поворотну матрицю  $R$  [1]. Результат визначення ЕЗО камери Samsung S1050 зображений на рис. 3.

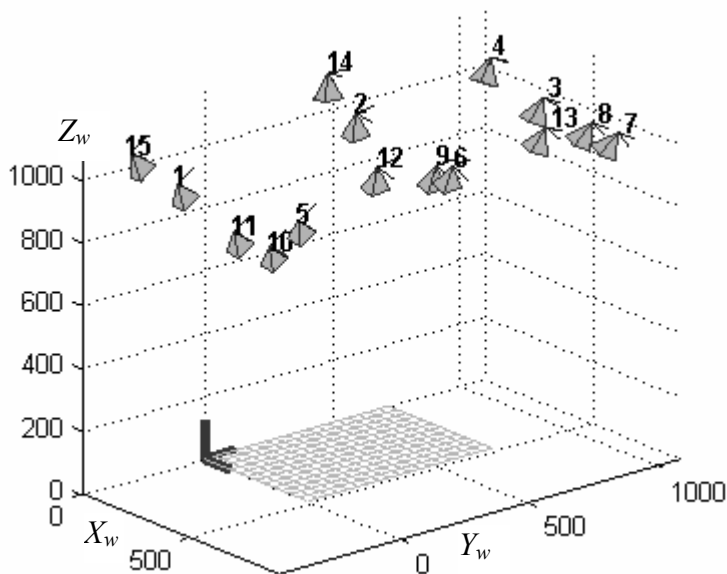


Рис. 3. Результат визначення елементів зовнішнього орієнтування камери Samsung S1050

В результаті визначення елементів внутрішнього орієнтування камери будується дисторсійна модель камери (рис. 4), основою якої є коефіцієнти радіальної і тангенціальної дисторсій. Останні визначались за наступними формулами:

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_r + \Delta x_t = x(K_1 r^2 + K_2 r^4) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy \\ \Delta y = \Delta y_r + \Delta y_t = y(K_1 r^2 + K_2 r^4) + 2P_1 xy + P_2(r^2 + 2y^2) \end{cases} \quad (18)$$

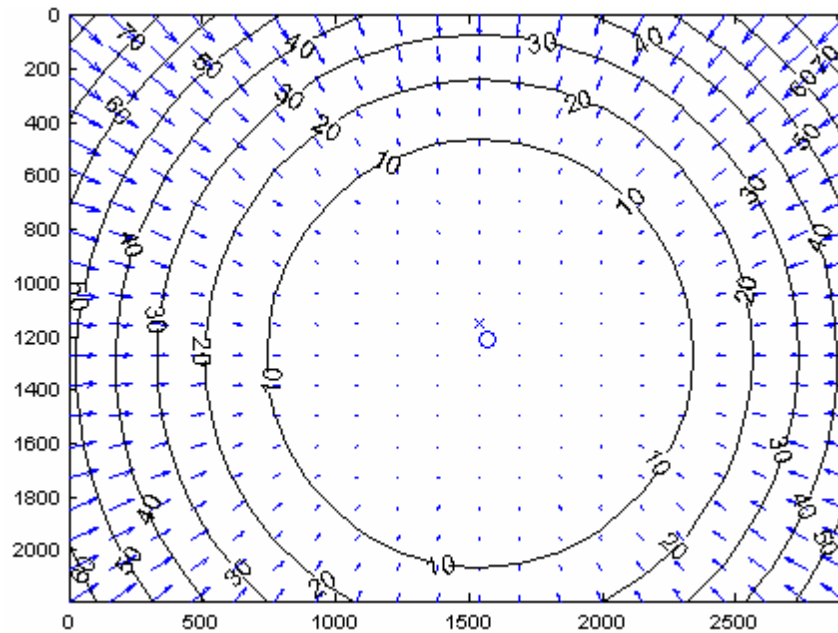


Рис. 4. Дисторсійна модель відкаліброваної камери Samsung S1050

6 етап. У процесі калібрування цифрових камер всі результати були задовільними, тобто СКП  $m_x$  і  $m_y$  менші одного пікселя (табл. 2).

Таблиця 2

Результати калібрування цифрових камер

Параметри калібрування		Модель цифрової камери			
		Samsung S1050	Kodak Z650	Olympus SP-500	Panasonic DMC-FZ7
Фокусна відстань:					
$f_x$		$3305,79 \pm 4,46$	$3207,39 \pm 4,34$	$4555,66 \pm 7,30$	$2994,71 \pm 3,55$
$f_y$		$3305,95 \pm 4,06$	$3207,98 \pm 3,95$	$4552,91 \pm 6,77$	$2995,18 \pm 3,30$
Розмір знімку, пікселів		3072×2304	2832×2128	2816×2112	2816×2112
Координати головної точки:					
$X_0$		$1566,82 \pm 7,19$	$1371,36 \pm 4,55$	$1372,13 \pm 8,20$	$1357,59 \pm 5,41$
$Y_0$		$1207,82 \pm 5,60$	$1152,39 \pm 3,73$	$1047,40 \pm 6,41$	$1075,65 \pm 4,07$
Коефіцієнти радіальної і тангенціальної дисторсій	$K_1$	$-0,2336 \pm 0,0103$	$-0,2029 \pm 0,0056$	$-0,1901 \pm 0,0099$	$-0,2027 \pm 0,0066$
	$K_2$	$0,3352 \pm 0,0794$	$0,3187 \pm 0,0346$	$0,8273 \pm 0,1030$	$0,2535 \pm 0,0525$
	$P_1$	$0,0033 \pm 0,0004$	$0,0006 \pm 0,0002$	$0,0019 \pm 0,0004$	$0,0017 \pm 0,0003$
	$P_2$	$-0,0016 \pm 0,0004$	$0,0007 \pm 0,0003$	$0,0012 \pm 0,0004$	$-0,0001 \pm 0,0003$
СКП:					
$m_x$		0,95480	0,82483	0,87029	0,66254
$m_y$		0,55459	0,55046	0,55204	0,42742

Дані результати показують достатню надійність запропонованої методики калібрування камер, оскільки похибка фотограмметричних вимірювань не перевищує допустимої. Це дозволяє виконувати фотограмметричну обробку знімків, отриманих даними камерами, з достатньою точністю. Разом з цим, аналізуючи результати калібрування, слід зазначити, що параметри оптичної системи камер, а саме розмір ПЗЗ-матриці, розмір пікселя, оптичний зум та якість виготовлення лінз безпосередньо впливає на значення середніх квадратичних похибок  $m_x$  і  $m_y$ . Тому визначення залежностей між цими параметрами потребує подальшого детальнішого дослідження.

**Висновки.** Визначення об'єктивних координат точок на знімку можливе лише при врахуванні похибок, спричинених дисторсією оптичної системи і неточностями виготовлення ПЗЗ-камери. Запропонована методика калібрування цифрових неметричних камер дозволяє полегшити процес обробки знімків і підвищити достовірність отримання неспотвореного зображення об'єкта, який досліджується.

На сьогодні калібрування може бути повністю автоматичною процедурою. Варіації калібрувальних параметрів цифрових неметричних камер незначні, тому дані камери можна використовувати з метою фотограмметричної зйомки.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Левицький В.Г.* Удосконалення методики аналітичної обробки знімків, отриманих неметричними цифровими камерами при виконанні фотограмметричної зйомки // Вісник Житомирського державного технологічного університету / Технічні науки. – № 1 (44). – 2008. – Житомир, ЖДТУ. – С. 154–164.
2. *Шоломицкий А.А., Лунев А.А.* Новая технология измерения станда для калибровки цифровых камер // Проблемы гирського тиску. – 2005. – С. 333.
3. *Лунев А.А.* Выбор оптимальных параметров калибровки цифровой камеры // Наукові праці Донецького національного технічного університету / Серія гірничо-геологічна. – Вип. 111. – Т. 2. – 2006. – С. 30–37.
4. *Шоломицкий А.А., Шатохин А.Л.* Создание испытательного станда для калибровки цифровых камер // Наукові праці Донецького державного технічного університету / Серія гірничо-геологічна. – Вип. 45. – 2002. – С. 80–84.
5. *Гельман Р.Н., Дунц А.Л.* Лабораторная калибровка камер с большой дисторсией // Геодезия и картография. – № 7. – 2002. – С. 23–31.
6. *Юрченко В.И.* Об учете систематических искажений неметрических снимков // Геодезия и картография. – № 7. – 2002. – С. 31–38.
7. *Юрченко В.И.* Способ аналитической обработки неметрических снимков // Геодезия и картография. – № 11. – 2000. – С. 23–30.
8. *Дубиновский В.Б.* Калибровка снимков. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
9. *Глотов В.М.* Особливості визначення фокусної відстані цифрових фототеодолітних камер // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – № 63. – 2003. – С. 122–127.
10. *Могильный С.Г., Беликов И.Л., Ахонина Л.И.* Фотограмметрия. – К.: Вища школа, 1985. – 278 с.
11. *Дорожжінський О.Л.* Основи фотограмметрії: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 214 с.
12. *Clarke T.A., Fryer, J.G.* The development of camera calibration methods and models. The Photogrammetric Record, Vol. 16(91), 1998. – Pp. 51–66.
13. *Remondino F., Fraser C.S.* Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. ISPRS Commission V Symposium "Image Engineering and Vision Metrology". – Vol. 36. – part 5. – 2006. – Pp. 266–272.
14. *Комиссаров А.В., Комиссаров Д.В.* Методика калибровки цифровых неметрических камер для наземных лазерных сканеров // Геопрофи. – № 6. – 2006. – С. 32–34.
15. *Zhang Z.* Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations // International Conference on Computer Vision. – Vol. 1. – 1999. – Pp. 666–673.
16. *Zhang Z.* A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Vol. 22(11). – 2000. – Pp. 1330–1334.

ЛЕВИЦЬКИЙ Володимир Григорович – аспірант кафедри маркшейдерії Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- маркшейдерська справа;
- фізичні процеси видобування і обробки природного каменю.

СОБОЛЕВСЬКИЙ Руслан Вадимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри маркшейдерії Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- маркшейдерська справа.

Подано 24.04.2008

**Левицький В.Г., Соболевський Р.В.** Дослідження етапів калібрування цифрових неметричних камер з метою підвищення ефективності наземної фотограмметричної зйомки

**Левицкий В.Г., Соболевский Р.В.** Исследование этапов калибрования цифровых неметрических камер с целью повышения эффективности наземной фотограмметрической съемки

**Levitskiy V.G., Sobolevskiy R.V.** Research of the stages of calibration of digital nonmetric cameras for the purpose of increase of efficiency of surface photogrammetric survey



УДК 528.71+622.35

**Исследование этапов калибрования цифровых неметрических камер с целью повышения эффективности наземной фотограмметрической съемки / В.Г. Левицкий, Р.В. Соболевский**

Усовершенствована методика калибрования цифровых неметрических камер на основе исследования этапов калибрования и алгоритмов вычисления элементов внутреннего и внешнего ориентирования цифровых снимков с целью повышения эффективности наземной фотограмметрической съемки.

УДК 528.71+622.35

**Research of the stages of calibration of digital nonmetric cameras for the purpose of increase of efficiency of surface photogrammetric survey / V.G. Levitskiy, R.V. Sobolevskiy**

The procedure of calibration of digital nonmetric cameras is improved on the basis of research of the stages of calibration and algorithms of calculation of elements of internal and external orientation of digital pictures for the purpose of increase of efficiency of surface photogrammetric survey.