

УДК 528.721

В. О. Катушков¹, А. О. Луньов²

¹ Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

² ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, Україна

Ректифікація неметричних, наземних, растрових знімків до фототріангуляції

В роботі детально проаналізовано спосіб ректифікації знімків, які отримані під час виконання наземного стереофотознімання неметричною камерою, з метою усунення оптичної дисторсії, спричиненої неортоскопичністю об'єктиву. Елімінація дисторсії виконана на підставі коефіцієнтів поліному систематичних похибок методом зворотного трансформування. Ректифіковані зображення практично вільні від впливу дисторсії і можуть в більшості випадків використовуватися в фотограмметричних роботах на виробництві нарівні з спеціалізованими камерами.

Ключові слова: дисторсія, калібрування, неметрична камера, ректифікація.

Під час вишукувань, або реставрації пам'яток архітектури та історії використовується практика дистанційних знімань та побудова векторних матеріалів 1:10 – 1:100 масштабів, до яких відносяться: горизонтальні, фронтальні плани, перерізи зовнішні, внутрішні, спільні, порушення конструкцій, інше [1, 2].

Порівняно недавно наземне знімання виконувалося за допомогою спеціальної апаратури – фототеодолітів. Зараз, використання спеціальної апаратури ускладнюється відсутністю: фотознімальних матеріалів (скляні пластини з фотошаром, рулонна фотоплівка на 18 см), якісної цифрової апаратури.

Але процес знімання та отримання векторної графічної документації залишається актуальною і потрібною задачею. Практика робіт показує що спеціально розроблену метричну апаратуру як фототеодоліти можливо замінити неметричними, малоформатними фотографічними чи цифровими камерами, якщо провести попереднє дослідження, та внести потрібні поправки [4–9].

Головними помилками неметричного зображення є помилки: елементів внутрішнього орієнтування (f , x_0 , z_0) і викривлення зображення за ортоскопію неметричного об'єктива або викривлення дисторсії. Інші помилки мають значення на порядок нижче. Вони так само враховуються при роботах зв'язаних з великоточним координуванням дослідного об'єкта. Характер радіальної дисторсії залежить від якості об'єктива знімальної камери. Визначення дисторсії робиться різними методами: камеральними, польовими. Камеральні виконуються у лабораторних умовах, при вимірюванні кутів на гоніометрі, чи визначаються аналітичним шляхом при зніманні закоординованих в приміщенні (лабораторії) марок, або фотографуються спеціальні тести, які намальовані на паперу чи пластику. При цьому доцільно, щоби зображення марок рівномірно покривало площину знімка.

Польові методи основані на зніманні полігонів на місцевості з рядом закріплених марок, просторове положення яких відомо.

По розходженнях координат знімків вільно розташованих марок, або розходженнях відстаней на центральних радіальних напрямках визначається характер та величини радіальної дисторсії. Як показали дослідження у звичайних, неметричних об'єктивах характер викривлень і величини радіальної дисторсії значно перевищують дисторсії у метричних об'єктивах і можуть досягати збільшення у сотні разів [3]. Наприклад, якщо у метричних об'єктивах (об'єктиви АФА) з розміром кадру 24 чи 30 см на діагональних радіусах допуск радіальної дисторсії не перебільшує 3 – 5 мкм, то на неметричних об'єктивах з розміром кадру 6 см величина дисторсії досягає значення 600 – 900 мкм. Різний незбіг на кутах неметричної камери викликаний її асферичністю. У наведеному матеріалі величини дисторсії неметричної камери перевищують метричну у 120 – 180 разів, якщо порівнювати з метричною дисторсією порядку 5 мкм та в 200 – 300 разів при дисторсії 3 мкм.

Виконана робота прикладної фотограмметрії для реставрації пам'ятника історії та архітектури за адресою м. Київ, вул. Сагайдачного 20/2. Для геодезичного обґрунтування на зовнішніх стінах закріплені контрастні марки в виді ромба з розміром 8x8 см (0,2x0,2 мм на знімку). Центри марок визначені в спільній системі координат з точністю ± 1 мм. Вище 2 поверху (бельетажем) замість марок приймалися характерні точки які розташовані на кутах будівельних елементів: башмаках, балюстрадах, бегунцях, пілонах, інш. які добре дешифрувалися на фотографічних знімках. Точність координування кутових точок порядку $\pm 2 - 3$ мм, тому як вони мають викривлену поверхню, де якість контурів гірше якості контурів марок.

Знімки отримані вдосконаленою широкоформатною фотокамерою КИЇВ TTL з фокусною відстанню об'єктива у 45 мм. Цифрові (растрові) знімки отримані методом контактного сканування з семи фото плівкових ч/б негативів розміром 60 на 60 мм. Сканування зроблено на фотограмметричному сканері Photo Scan (Віницька ГЕОСИСТЕМА) з пікселем у 16 мкм. Об'єм знімку біля 13,7 Мб.

Радіальна дисторсія визначена за допомогою відпрацьованого методу точного вимірювання кутів на 1" гоніометрі (науково-дослідна оптична лабораторія, м. Санкт-Петербург). До вимірювань кутів на гоніометрі камера з об'єктивом була зорієнтована таким чином, щоби передня вузлова точка об'єктива проектувалася на центр лімбу гоніометра, а площа спостерігаемого радіального напрямку проходила паралельно площині лімбу. Величини кутів вимірювалися наведенням перетинів контрольної сітки, встановленої у рамочне вікно камери на постійно закріплену точку (марку), яка розташована за гіперфокальною відстанню. Кути виміряні трьома прийомами. На чотирьох радіальних (парних від середини) напрямках камера орієнтується по новому, а дисторсія обчислюється за формулою

$$\delta_{ri} = r_{ic} - r_{ie} = r_{ic} - f \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (1)$$

де r_{ic} – радіальна відстань на контрольній сітці, r_{ie} – радіальна відстань, обчислена за виміряним кутом α_i , f – фокусна відстань об'єктива.

Спочатку досліджувалися несиметричні поліноми третього ступеня на дві координати знімка:

$$\begin{aligned} \delta_x &= K_0 + K_1x + K_2z + K_3xz + K_4x^2 + K_5z^2 + K_6xz^2 + K_7x^2z + K_8x^3 + K_9z^3 - W; \\ \delta_y &= K'_0 + K'_1x + K'_2z + K'_3xz + K'_4x^2 + K'_5z^2 + K'_6xz^2 + K'_7x^2z + K'_8x^3 + K'_9z^3 - W_z, \end{aligned} \quad (2)$$

де x, z – координати пікселя (P_{mn}).

Дослідження полінома (2) показує, що значення коефіцієнтів полінома відрізняються. Коефіцієнти з малим значенням можна не враховувати та знайти спрощений поліном який за точністю визначення буде не гірше початкової функції (2).

$$\begin{aligned} \delta_x &= K_1x + K_2xz + K_3x^2 + K_4xz^2 + K_5x^3 - W_x, \\ \delta_z &= K'_1z + K'_2xz + K'_3z^2 + K'_4x^2z + K'_5z^3 - W_z. \end{aligned} \quad (3)$$

При роботі нами більш ретельно досліджувалися симетричні поліноми. Для знаходження розподілу радіальної дисторсії на восьми напрямках з кроками у 5мм на основних осях і 7 мм на діагональних, складені поліноміальні залежності п'ятого ступеня які обчислюються методом найменших квадратів.

$$\left. \begin{aligned} \delta_{r1} &= a_1r_1 + a_2r_1^3 + a_3r_1^5 - W_{r1} \\ \delta_{r2} &= a_1r_2 + a_2r_2^3 + a_3r_2^5 - W_{r2} \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \delta_{ri} &= a_1r_i + a_2r_i^3 + a_3r_i^5 - W_{ri} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Кількість поліноміальних рівнянь у (4) дорівнює 40 з кроком 5 мм. Визначені за (4) коефіцієнти радіальної дисторсії перетворюються на поправки за радіальну дисторсію у положення пікселей неметричного знімку. При цьому, ректифіковані координати знімка обчислюються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x'_i + \Delta_{xi} = x'_i + \delta_{ri} \cos \alpha_i = x'_i (1 + \delta_{ri} r_i^{-1}) = (1 + (a_1 + a_2 r_i^2 + a_3 r_i^4)) x'_i \\ z_i &= z'_i + \Delta_{zi} = z'_i + \delta_{ri} \sin \alpha_i = z'_i (1 + \delta_{ri} r_i^{-1}) = (1 + (a_1 + a_2 r_i^2 + a_3 r_i^4)) z'_i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Ректифікація «сирих» растрових знімків за радіальну дисторсію виконано, як казалося раніше, в науково-експериментальній роботі по складанню векторної інформації 1:50 масштабу для двоповерхового будинку, побудованого на фундаментах 17-18 століття (час правління Катерини II).

Ректифікація «сирих» знімків (поліноміальна апроксимація) виконана таким чином за допомогою алгоритму зворотної трансформації з інтерполяцією кольору вихідного растру методом каллокації [10]. Варіанти вихідного (сирого) та ректифікованого (каліброваного) зображення знімка (одного з семи) представлені на рис. 1. Аналізуючи растрове зображення дорожньої розмітки можна побачити випуклість прямих ліній на вихідному знімку – а і виправлення на каліброваному зображенні б. Таж картина видна на зображенні ліній окремих горизонтів на окремих поверхах будинку та контурах рамки кадру, але с протилежним знаком. На вихідному зображенні рамка кадру пряма, а на виправленому вигнута за коефіцієнтами радіальної дисторсії.



Рис. 1. Вихідний – а та ректифікований – б варіанти зображення знімка.

В табл. 1 представлені результати вимірювань неметричної цифрової моделі, яка складена з пари неметричних растрових знімків. Для скорочення представлені спостереження по перший моделі з семи на дві фасадні стіни, які побудовані на спільному фундаменті. Таблиця розбита на чотири частини: перша – номери 9 зв'язкових точок; друга – координати некаліброваних, «сирих» знімків; третя – координати ректифікованих (каліброваних) знімків за ф.(5); четверта – різниці у координатах каліброваних та некаліброваних знімків, або поправки за радіальну дисторсію у кожену точку моделі в мікронах. Літерами $x_{л}$, $z_{л}$, $x_{п}$, $z_{п}$ позначені координати лівого, правого знімків. Поправки за радіальну дисторсію дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \delta x_{л} &= x'_{л} - x_{л}; & \delta x_{п} &= x'_{п} - x_{п}; \\ \delta z_{л} &= z'_{л} - z_{л}; & \delta z_{п} &= z'_{п} - z_{п}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для аналізу, на всю фронтальну поверхню, приведені результати точності просторових координат спільної неметричної моделі (з семи окремих моделей), які побудовані з некаліброваних та каліброваних знімків див. табл. 2. Некалібрована модель дає результат по координатах X , Z близький до вимог складання векторних планів 1:50 масштабу ($\pm 24, 27$ мм). Точність визначення просторових координат відрізняється, що зв'язано з якістю зображення та

нелінійним впливом радіальної дисторсії. При цьому, точність координат по відстані Y (± 73 мм) не задовольняє умовам обробки моделі при будіванні перерізів у площинах XY , ZY .

Таблиця 1. - Ректифікація растрових неметричних знімків на одну модель з шести.

| № пп. | Координати «сирих» знімків, мм | | | | Координати ректифікованих знімків, мм | | | | Поправки за радіальну дисторсію, мкм | | | |
|-------|--------------------------------|---------|---------|--------|---------------------------------------|--------|---------|--------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | х'л | z'л | х'п | z'п | хл | zl | хп | zp | $\delta_{хл}$ | δ_{zl} | $\delta_{хп}$ | δ_{zp} |
| 12 | -1,933 | 7,052 | -23,604 | 7,572 | -1,899 | 6,927 | -23,819 | 7,641 | -34 | 125 | 215 | -69 |
| 2 | 20,616 | -2,256 | -1,374 | -1,507 | 20,643 | -2,259 | -1,346 | -1,476 | -27 | 3 | -28 | -31 |
| 211 | 12,947 | 21,243 | -8,821 | 22,302 | 13,067 | 21,440 | -8,887 | 22,470 | -120 | -197 | 66 | -168 |
| 22 | 20,832 | 6,927 | -1,113 | 7,957 | 20,907 | 6,952 | -1,094 | 7,821 | -75 | -25 | -19 | 136 |
| 21 | 19,292 | 20,863 | -2,183 | 22,149 | 19,606 | 21,202 | -2,192 | 22,241 | -314 | -339 | 9 | -92 |
| 20 | 20,472 | -4,438 | -1,608 | -3,751 | 20,507 | -4,445 | -1,576 | -3,677 | -35 | 7 | -32 | -74 |
| 10 | -2,100 | -3,8900 | -23,684 | -3,182 | -2,059 | -3,814 | -23,858 | -3,205 | -41 | -76 | 174 | 23 |
| 1 | -1,226 | -1,485 | -22,839 | -0,811 | -1,201 | -1,455 | -22,961 | -0,815 | -25 | -30 | 122 | 4 |
| 11 | -2,152 | 17,77 | -23,901 | 18,218 | -2,144 | 17,702 | -24,365 | 18,571 | -8 | 68 | 464 | -353 |

В нижньому рядку табл. 2 представлено точність визначення точок по каліброваній моделі. Відчувається значне (стрибкове) підвищення точності на трьох координатах. Видно, що точність по всім координатам наближується до точності, яка дотрималася метричною апаратурою, коли знімання проводилося фототеодолітами.

Таблиця 2 - Просторова точність неметричних моделей

| Тип моделі | Скп на координатних висях (мм) | | |
|---|--------------------------------|-------|-------|
| | M_x | M_z | M_y |
| Спільна некалібрована моделі з «сирих» знімків | 24 | 27 | 73 |
| Спільна калібрована модель з ректифікованих знімків | 5 | 6 | 17 |

Висновки. Калібрування знімків, отриманих неметричною апаратурою за радіальну дисторсію, навіть без врахування інших викривлень, дозволяє підняти точність просторових координат на зовнішніх фронтальних поверхнях практично до точності метричної апаратури (фототеодолітів). Методи калібрування знімків є похідними від дослідження об'єктивів, схожими для неметричної фотоплівкової та неметричної цифрової - сенсорної апаратури.

Бібліографічний список

- Сердюков В.М. Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве / В.М. Сердюков. - М.: «Недра», 1977. – 248 с.
- Руководство по применению фотограмметрических методов для составления обмерных чертежей инженерных сооружений / [В.М. Сердюков, Г.А. Патыченко, В.А. Катусков, В.К. Львов и др.]. - М.: Стройиздат, 1984. – 311 с.
- Катусков В.О. Радіальна дисторсія дистанційних неметричних моделей / В.О. Катусков // Збірник статей. ГІС – Форум. – 2007. – С. 62-64.
- Луньов А.О. Выбор оптимальных параметров калибровки цифровой камеры / А.О. Луньов // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: гірничо-геологічна. – 2006. – випуск 111, Т.2. – С. 30-37.
- Купко В.С. Атестація неметричних цифрових фотокамер на метрологічному стенді / В.С. Купко, І.В. Лукін, І.О. Власов // Вісник геодезії та картографії. – 2009. – №1. – С. 24-27.
- Гельман Р.Н. Лабораторная калибровка камер с большой дисторсией / Р.Н. Гельман, А.Л. Дунц // Геодезия и картография. -2002. - № 7. - С. 23-31.
- Шоломицкий А.А. Создание испытательного стенда для калибровки цифровых камер / А.А. Шоломицкий, А.Л. Шатохин // Наукові праці Донецького Державного Технічного Університету, Серія: гірничо-геологічна. – 2002. – випуск 45. – С. 80 – 84.
- Influence factors evaluation on high-precision planar calibration of non-metric digital camera / [Wenjin Wang, Bingxuan Guo, Xin Lib, Jing Cao] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Beijing). – 2008. - Vol. XXXVII., Part B1. - P. 1071-1075.

9. Christopherson Standards and specification for the calibration and stability of amateur digital cameras for close-range mapping applications / [A. Habib, A. Jarvis, I. Datchev, G. Stensaas, D. Moe, J.] // *Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Beijing)*. – 2008. - Vol. XXXVII., Part B1. - P. 1059-1064.
10. Стрельцов В.И. Маркшейдерское обеспечение природопользования недр / В.И. Стрельцов, С.Г. Могильный. - М.: Недра, 1989. – 205 с.

Надійшла до редакції 25.05.2012

В. А. Катушков¹, А. А. Лунев²

¹ – *Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина*

² – *ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Украина*

Ректификация неметрических, наземных, растровых изображений до фототриангуляции

В работе детально проанализирован способ ректификации снимков, полученных при выполнении наземной стереофото съемки неметрической камерой, с целью устранения оптической дисторсии, вызванной неортоскопичностью объектива. Элиминация дисторсии выполнена на основании коэффициентов полинома систематических ошибок методом обратного трансформирования. Ректифицированные изображения практически свободны от влияния дисторсии и могут в большинстве случаев применяться в фотограмметрических целях на производстве наравне со специализированными камерами.

Ключевые слова: дисторсия, калибровка, неметрическая камера, ректификация.

V. Katushkov¹, A. Lunov²

¹ – *Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine*

² – *Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine*

Rectification of Non-Metric, Terrestrial, Raster Images to Phototriangulation

In this paper we have analyzed in detail the method of rectification of images obtained in the close range photogrammetry with a non-metric camera, in order to eliminate the errors of optical distortion. Eliminating distortion is made on the basis of the coefficients of the systematic errors by reverse transformation. Rectified images are virtually free from the influence of distortion and, in most cases, can be used for photogrammetric purposes along with specialized cameras.

Key words: distortion, calibration, non-metric camera, rectification.