



Геометрическая калибровка цифровых фотокамер с длиннофокусным объективом по серии снимков с общим центром проекции

В.Е. Чернышев¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия
 kwikun@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Чернышев В.Е. Геометрическая калибровка цифровых фотокамер с длиннофокусным объективом по серии снимков с общим центром проекции // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 35–45. DOI:10.30533/GiA-2025-012.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА калибровка, цифровая камера, длиннофокусный объектив, центр проекции, входной зрачок, оптическая система, фотограмметрия

АННОТАЦИЯ В статье представлены результаты калибровки цифровых фотокамер, оснащенных длиннофокусным объективом, по серии изображений с общим центром проекции. При калибровке камер с длиннофокусным объективом на стандартных тест-объектах параметры калибровки определяются с низкой точностью, а в некоторых случаях калибровка невозможна. На каждый снимок попадает малое количество маркированных точек тест-объекта, угол засечки острый, недостаточная глубина резкости (разница в положении дальней и ближней точек). Очевидно, что для калибровки камер с длиннофокусными объективами необходимо спроектировать специальный тест-объект. Автор предлагает другой подход к процессу калибровки. Камера устанавливается на штатив с панорамной головкой, используемой фотографами для получения сферических панорам; главное условие панорамной съемки — центр вращения фотоаппарата и центр проекции оптической системы объектива должны находиться в одной точке. В статье также представлена краткая теория центральной проекции с точки зрения оптики. Описаны основные заблуждения, связанные с центром проекции и узловыми точками. Рассмотрены понятия входного и выходного зрачков оптической системы, а также их роли в оптической системе объектива.

1 Введение

В XXI веке фотограмметрические методы стали более доступными, так как больше не требуют специализированного оборудования для обработки снимков и наличия профессиональной фототехники [1]. Подвергнув обычную цифровую фотокамеру (ЦФК) ряду подготовительных работ, можно использовать ее для целей фотограмметрии [2]. В частности, неметрические камеры используются на беспилотных летательных аппаратах и в наземной фотограмметрии.

Одним из важнейших этапов фотограмметрической съемки является калибровка ЦФК. В ходе калибровки вычисляются параметры внутреннего ориентирования камеры, а также искажения, вызванные дисторсией. Дисторсия — абберация оптической системы, нарушающая геометрическое подобие между объектом и его изображением¹ [3, 4]. Вычисление параметров калибровки позволяет использовать неметрические камеры для целей фотограмметрии² [5, 6].

Лабораторные тест-объекты ориентированы на калибровку коротко- и длиннофокусных объективов. При использовании данных тест-объектов для калибровки длиннофокусных объективов в кадр попадает малое количество точек из-за небольшого (порядка 10°) угла поля зрения. По этой причине параметры ЦФК определяются с низкой точностью.

Сильнее всего это отражается на точности определения фокусного расстояния, так как при использовании длиннофокусных объективов угол засечки между проектирующими лучами при центральной проекции (угол поля зрения) оказывается острым. По этой причине длиннофокусные объективы в наземной фотограмметрии практически не применяются. Производители длиннофокусных объективов для фотограмметрии, как правило, поставляют их без калибровки. Несмотря на это, в практике фотограмметрических съемок бывают ситуации, когда не обойтись без длиннофокусных объективов (например, когда требуется высокая детализация снимков или объект съемки находится на значительном расстоянии). Проблеме калибровки длиннофокусных объективов посвящен ряд статей в зарубежных изданиях [7–9].

В данной статье рассматриваются результаты калибровки ЦФК с длиннофокусными объективами по методике калибровки с дополнительными геометрическими условиями. Съемка проводится при вращении камеры вокруг центра проекции оптической системы объектива. При этом все снимки будут иметь общий центр проекции, координаты которого являются определяемой величиной в системе координат тест-объекта. Общий центр проекции выступает в роли дополнительного геометрического условия при вычислении калибровочных параметров. Данная методика позволяет увеличить угол засечки и, следовательно, повысить точность определения элементов внутреннего ориентирования.

2 Материалы и методы

Длиннофокусными объективами называют объективы с фокусным расстоянием, превышающим диагональ кадра в 1,5 раза и более. В прикладных сферах также применяют термин «узкоугольный объектив». При калибровке длиннофокусных объективов на стандартных лабораторных тест-объектах на снимки попадет малое количество точек и параметры калибровки определяются с низкой точностью. Для надежного определения параметров калибровки камер глубина пространственного тест-объекта (расстояние между дальними и ближними

1 Можаров Г.А. Теория аббераций оптических систем: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2021. 288 с.

2 Чибунчиков А.Г. Фотограмметрия: учебник. М.: Изд-во МИИГАиК, 2022. 328 с.

точками) должна быть не менее $0,5H$, где H — расстояние от точки фотографирования до калибровочного тест-объекта³. По этому условию тест-объект для калибровки длиннофокусных объективов должен обладать большой пространственной глубиной, в некоторых случаях составляющей десятки и сотни метров. На практике создать такой тест-объект практически невозможно. Не стоит забывать, что длиннофокусные объективы обладают малой глубиной резкости и при большой пространственной глубине тест-объекта точки на разном уровне могут быть не в фокусе.

Для калибровки длиннофокусных объективов на тест-объектах с малой пространственной глубиной можно задать дополнительные геометрические условия определения центра проекции. Для этого необходимо сделать серию снимков пространственного тест-объекта, вращая камеру вокруг центра проекции оптической системы. Далее следует выполнить калибровку по серии снимков с условием единого центра проекции снимков, являющегося при этом определяемой величиной. Уравнения поправок для трех снимков с общим центром проекции имеют вид

1 ✓

$$\begin{cases} a_1\delta X_s + a_2\delta Y_s + a_3\delta Z_s + a_4\delta\omega_1 + a_5\delta\alpha_1 + a_6\delta\aleph_1 + a_7\delta\omega_2 + a_8\delta\alpha_2 + a_9\delta\aleph_2 + a_{10}\delta\omega_3 + a_{11}\delta\alpha_3 + a_{12}\delta\aleph_3 + l_y = V_y, \\ b_1\delta X_s + b_2\delta Y_s + b_3\delta Z_s + b_4\delta\omega_1 + b_5\delta\alpha_1 + b_6\delta\aleph_1 + b_7\delta\omega_2 + b_8\delta\alpha_2 + b_9\delta\aleph_2 + b_{10}\delta\omega_3 + b_{11}\delta\alpha_3 + b_{12}\delta\aleph_3 + l_x = V_x, \end{cases}$$

где $a_1, a_2 \dots a_{12}, b_1, b_2 \dots b_{12}$ — частные производные от исходных уравнений по неизвестным (коэффициенты уравнения поправок);

δ — поправки к элементам внешнего ориентирования снимка;

X_s, Y_s, Z_s — координаты центра проекции;

$\omega, \alpha, \aleph$ — угловые элементы внешнего ориентирования;

l_y, l_x — свободные члены.

Дальнейшее решение выполняется по общепринятым алгоритмам.

Ранее данный метод был проверен на макетных снимках и показал хорошие результаты в сравнении со стандартными методами лабораторной калибровки ЦФК. Результаты экспериментов на макетных снимках представлены в предыдущей работе автора [10].

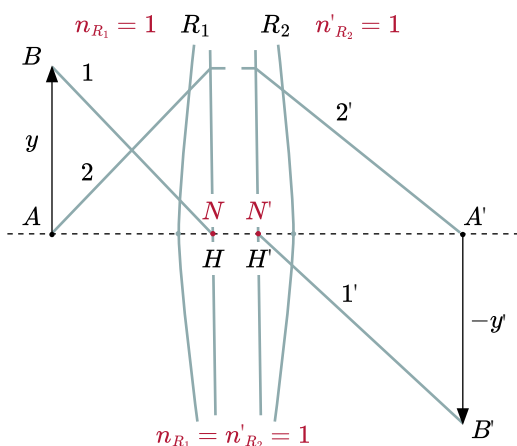
2.1 О центре проекции объектива

Рис. 1 ✓

Определение положения узловых точек N, N' в воздухе ($n_{R_1} = n'_{R_2} = 1$)

Fig. 1

The front and rear nodal points N, N' in air ($n_{R_1} = n'_{R_2} = 1$)



Важным условием рассматриваемого метода калибровки является вращение ЦФК вокруг точки, совпадающей с центром проекции оптической системы объектива. Но что является центром проекции оптической системы ЦФК?

В материалах по основам оптики, фотограмметрии и аэрофотосъемки можно увидеть одну и ту же схему, показывающую построение изображения в простой оптической системе (рис. 1). Большое внимание уделено узловым точкам объектива.

Узловые точки — две сопряженные точки оптической системы. Луч 1 из внеосевой точки B предмета AB , направленный в переднюю узловую точку N , выходит через заднюю узловую точку N' оптической системы, заданной поверхностями R_1 и R_2 , под тем же самым углом, что и падающий луч, т. е. $\alpha_N = \alpha'_{N'}$. Для системы, расположенной в воздухе ($n_{R_1} = n'_{R_2} = 1$), узловые точки N, N' совпадают с главными точками H, H' , и угловое увеличение $y = \alpha'_{N'}/\alpha_N$ в этих плоскостях равно единице⁴. Передняя узловая точка находится в пространстве объекта, задняя — в пространстве изображения. Расстояние от задней узловой точки до плоскости фотоприемника (пленка или матрица) равно фокусному расстоянию объектива.

Глядя на эту схему, логично предположить, что центром проекции является передняя узловая точка, расположенная

³ Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. М.: Недра, 1982. 224 с.

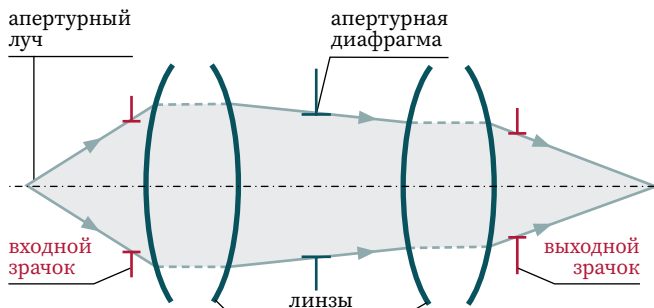
⁴ Можаров Г.А. Основы геометрической оптики: учеб. пособие. М.: Логос, 2006. 280 с.

Рис. 2 ✓

Входной и выходной зрачки оптической системы

Fig. 2

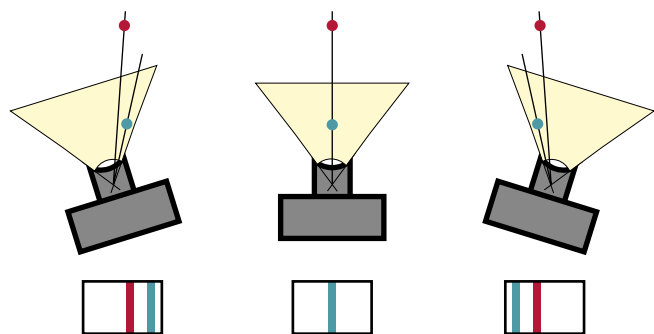
Entrance and exit pupils of the optical system

**Рис. 3** ✓

Определение центра проекции ЦФК по двум объектам. Расхождение объектов из-за несоответствия точки вращения с центром проекции ЦФК

Fig. 3

Determining the center of projection of a digital camera based on two objects. Divergence of objects due to a discrepancy between the rotation point and the center of the digital camera projection

**Рис. 4** Ⓢ

Внешняя диафрагма из крышки для объектива

Fig. 4

External aperture from lens cap



в пространстве объектов. Однако на практике выясняется, что это не так. Например, у объектива Canon EF-S 18-135mm $f/3.5-5.6$ IS USM точка, соответствующая центру проекции оптической системы, находится за плоскостью матрицы. Из определения узловых точек следует, что это не может быть задняя узловая точка, так как она должна быть удалена от матрицы на расстояние, равное фокусному расстоянию. Она также не может быть передней узловой точкой, так как в этом случае будет располагаться позади задней.

В отличие от простой оптической системы (рис. 1), объектив представляет собой многокомпонентную оптическую систему, каждая линза которой имеет свои узловые точки; есть также узловые точки всей оптической системы. Кроме линз в объективе присутствует апертурная диафрагма, ограничивающая пучки лучей, проходящих через оптическую систему объектива. С апертурной диафрагмой связаны понятия входного и выходного зрачков (рис. 2).

Входной зрачок — параксиальное (идеальное) изображение апертурной диафрагмы через линзы, стоящие впереди. Выходной зрачок — параксиальное

(идеальное) изображение апертурной диафрагмы через линзы, стоящие позади нее. Входной и выходной зрачки сопряжены. Через апертурную диафрагму проходят те лучи, которые изначально имеют направление во входной зрачок объектива. Центром проекции оптической системы объектива является центр входного зрачка⁵.

Если перед оптической системой установить дополнительную диафрагму, последняя автоматически станет входным зрачком. Если установить ее позади оптической системы, диафрагма автоматически станет выходным зрачком. Именно это можно увидеть на рис. 1, где указаны лишь основные точки оптической системы, но некоторые важные элементы опущены для упрощения. Такая схема прохождения лучей через тонкий компонент будет работать только при наличии апертурной диафрагмы. В данном случае апертурной диафрагмой является оправа и входной зрачок располагается спереди, а выходной — сзади одиночного компонента.

Теорию о том, что центром проекции объектива является центр входного зрачка, можно проверить на практике с помощью внешней диафрагмы и методики панорамной съемки. Важным условием получения сферических панорам 360 градусов является вращение камеры вокруг центра проекции объектива, в этом случае все снимки будут иметь общий центр проекции и без искажений будут совмещены в единое изображение. Для этого используются специальные панорамные штативы. Чтобы на практике найти точку вращения, соответствующую центру проекции объектива, нужно выбрать два объекта, находящиеся на одной прямой, и произвести съемку этих объектов при разных поворотах камеры (рис. 3). При этом необходимо перемещать камеру относительно панорамного штатива, чтобы найти точку, при вращении вокруг которой выбранные объекты не будут менять свое положение относительно друг друга.

Для практического эксперимента применялись ЦФК Canon EOS 70D и объектив Canon 100 мм. ЦФК была установлена в панорамный штатив, внешней диафрагмой служила крышка для объектива с отверстием в центре (рис. 4).

5 Волосов Д.С. Фотографическая оптика: учеб. пособие для киновузов. 2-е изд. М.: Искусство, 1978. 543 с.

Рис. 5 ➔

Съемка при вращении камеры вокруг центра внешней диафрагмы (центра входного зрачка). При повороте камеры объект на дальнем плане (край оконной коробки) и объект на переднем плане (вертикальная рейка) не меняют своего положения относительно друг друга

Fig. 5

Shooting while rotating the camera around the center of the outer aperture (the center of the entrance pupil). When you rotate the camera, the object in the background (the edge of the window frame) and the object in the foreground (the vertical rail) do not change their position relative to each other



В качестве объектов съемки были выбраны оконная рама на дальнем плане кадра и вертикальная планка на переднем плане. Согласно теории, диафрагма, установленная перед оптической системой, является входным зрачком, а центр входного зрачка — центром проекции ЦФК. Следовательно, при вращении камеры вокруг точки, проходящей через центр внешней диафрагмы, выбранные объекты съемки не будут менять своего положения относительно друг друга. Результаты съемки представлены на рис. 5. Как видно на снимках, объекты не меняют своего положения при вращении вокруг центра внешней диафрагмы (центра входного зрачка), следовательно, камера вращается вокруг центра проекции.

Данный эксперимент на практике показывает, что центром проекции ЦФК является центр входного зрачка оптической системы.

2.2 Практическое применение метода калибровки с общим центром проекции

Калибровка выполнялась на стандартном маркированном тест-объекте (рис. 6).

Для съемки использовались панорамные головы Manfrotto 303SPH и Nodal Ninja 4. Сведения об откалиброванных ЦФК приведены в табл. 1.

Рис. 6 ▼

Калибровочный тест-объект

Fig. 6

Calibration test object

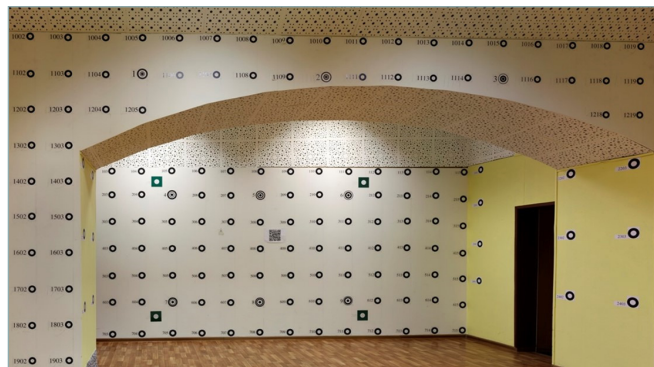


Таблица 1 ▼

Откалиброванные ЦФК

Table 1

Calibrated digital cameras

ЦФК	Объективы
Canon 70D	Canon 100 мм
	Canon 135 мм
	Canon 70–135 мм (зафиксирован на фокусном расстоянии 135 мм)
Nikon DF	Pentacore Auto 135 мм
	Калейнар-5Н 100 мм
Hasselblad H4D-60	Hasselblad HC 100 мм
PhaseOne iXM-RS150F	PhaseOne 50 мм

3 Результаты

ЦФК Canon 70D

Паспортные данные: x_0 2736 pix; y_0 1824 pix; размер пикселя 0,0041 мм. Данные по откалиброванным объективам Canon 70D приведены в табл. 2.

Таблица 2 ▶
Откалиброванные объективы
ЦФК Canon 70D
Table 2
Calibrated Canon 70D lenses

Параметры	Canon 100 мм	Canon 135 мм
Sigma0	0,566 068	0,662 416
Focal length, pix (мм)	24 395,5 +/- 2,0 (100,022)	33 171,0 +/- 2,6 (136,001)
x_0 , pix	2697,8 +/- 5,6	2699,8 +/- 7,0
y_0 , pix	1823,3 +/- 7,8	1811,1 +/- 10,5
C1	1,2537E-10 +/- 2,985 925e-11	3,2879E-10 +/- 2,178 858e-11
C2	-6,0233E-18 +/- 2,792 432e-18	-4,6446E-18 +/- 1,825 534e-18
Количество снимков	48	115

В ходе калибровки объектива Canon 70–135 мм программа не может найти стабильное решение. Было проведено несколько съемок тест-объекта, но результат остался таким же. Откалибровать данный объектив стандартным методом на тест-объектах с малой пространственной глубиной также невозможно. Причина кроется во встроенной системе стабилизации изображения. Даже в отключенном состоянии она оказывает влияние на положение главной точки.

ЦФК Nikon DF

Паспортные данные: x_0 2464 pix; y_0 1640 pix; размер пикселя 0,0073 мм. Данные по откалиброванным объективам Nikon DF приведены в табл. 3.

Таблица 3 ▶
Откалиброванные объективы
ЦФК Nikon DF
Table 3
Calibrated Nikon DF lenses

Параметры	Pentacoon Auto 135 мм	Калейнар-5Н 100 мм
Sigma0	0,523 478	0,343 744
Focal length, pix (мм)	18 848,7 +/- 1,4 (137,596)	13 740,6 +/- 0,6 (100,307)
x_0 , pix	2418,8 +/- 2,5	2474,9 +/- 1,0
y_0 , pix	1639,4 +/- 3,3	1668,8 +/- 1,4
C1	1,8717E-09 +/- 2,730 492e-11	2,0250E-09 +/- 1,583 858e-11
C2	-5,8095E-18 +/- 3,064 700e-18	-1,1394E-16 +/- 1,801 805e-18
Количество снимков	80	58

Hasselblad H4D-60 с объективом HC 100 мм

Паспортные данные: x_0 3354 pix; y_0 4478 pix; размер пикселя 0,0060 мм. Данная камера обладает матрицей размером 40,2×53,7 мм, по этой причине используемый объектив Hasselblad HC 100 мм попадает в категорию среднефокусных и может быть откалиброван стандартным методом с индивидуальными центрами проекции. Поскольку данная камера часто используется для аэрофотосъемки, было решено провести калибровку стандартным методом с индивидуальными центрами проекции и методом с общим центром проекции и сравнить результаты (табл. 4). Были также проведены обработка стереопары снимков с применением полученных параметров калибровки и оценка точности (табл. 5).

Таблица 4 ➤

Результаты калибровки Hasselblad H4D-60 с объективом HC 100 мм стандартным методом и методом с общим центром проекции

Table 4

Calibration results of Hasselblad H4D-60 HC 100mm by the standard method and the method with a common projection center

Параметры	Метод калибровки	
	Стандартный с индивидуальными центрами проекции	С общим центром проекции
Focal length, pix (мм)	16 663,8 +/- 2,3 (98,316)	16 656,4 +/- 1,4 (98,272)
xo, pix	3363,2 +/- 2,3	3360,7 +/- 2,4
yo, pix	4522,7 +/- 2,5	4532,3 +/- 1,9
C1	-1,8614E-10 +/- 9,878 049e-12	-2,0206E-10 +/- 9,939 447e-12
C2	-1,1706E-18 +/- 3,241 053e-19	-7,8066E-19 +/- 3,348 799e-19
Количество снимков	4	4

Таблица 5 ➤

Среднеквадратическая ошибка определения координат с использованием параметров калибровки, полученных стандартным методом и методом с общим центром проекции

Table 5

Root mean square error in determining coordinates using calibration parameters obtained by the standard method and the method with a common projection center

Координаты	СКО, мм	
	Стандартный метод	Метод с общим центром проекции
X	0,173	0,161
Y	0,216	0,114
Z	0,495	0,310

PhaseOne iXM-RS150F с объективом 50 мм

Паспортные данные: xo 7102 pix; yo 5326 pix; размер пикселя 0,003 76 мм.

Профессиональная камера для аэрофотосъемки. Размер матрицы 40,1×53,4 мм. Среднефокусная камера. Может быть откалибрована стандартным методом, но для сравнения также была проведена калибровка с общим центром проекции (табл. 6).

Таблица 6 ➤

Результаты калибровки PhaseOne iXM-RS150F с объективом 50 мм стандартным методом и методом с общим центром проекции

Table 6

Calibration results of PhaseOne iXM-RS150F 50 mm by the standard method and the method with a common projection center

Параметры	Метод калибровки	
	Стандартный с индивидуальными центрами проекции	С общим центром проекции
Sigma0	0,515 244	0,619 825
Focal length, pix (мм)	13 736,4 +/- 0,4 (51,649)	13 735,0 +/- 0,4 (51,644)
xo, pix	7101,4 +/- 0,2	7101,1 +/- 0,3
yo, pix	5355,1 +/- 0,4	5356,2 +/- 0,4
C1	-2,0369E-10 +/- 9,673 891e-13	-2,0373E-10 +/- 1,133 164e-12
C2	7,6815E-19 +/- 1,278 454e-20	7,6261E-19 +/- 1,487 752e-20
Количество снимков	6	6

4 Обсуждение

ЦФК Canon 70D

Результаты калибровки ЦФК с объективами Canon 100 мм и Canon 135 мм показывают, что данные объективы приемлемы для дальнейшего использования. Объектив Canon 70–135 мм непригоден для целей фотограмметрии из-за конструктивных особенностей (наличие стабилизатора, оказывающего влияние на элементы внутреннего ориентирования даже в отключенном состоянии).

В эксперименте с камерой Canon 70D вращение камеры осуществлялось так, чтобы в кадр попадало как можно большее количество точек. При такой съемке точки тест-объекта охватывают не всю площадь матрицы, следовательно, геометрические искажения определяются с меньшей точностью, чем могли бы. В дальнейших экспериментах это было учтено.

ЦФК Nikon DF

Результаты калибровки ЦФК с объективами Pentacon Auto 135 мм и Калейнар-5Н 100 мм показывают, что данные объективы приемлемы для дальнейшего использования. При выполнении съемки камерой Nikon DF камера вращалась таким образом, чтобы точки тест-объекта оказывались в разных частях снимка и при совместной обработке покрывали всю площадь матрицы. Это увеличило общее количество снимков, но повысило точность определения параметров калибровки.

Hasselblad H4D-60 с объективом HC 100 мм

Метод калибровки с общим центром проекции определил фокусное расстояние с чуть большей точностью, чем стандартный метод калибровки. При сравнении СКО по стереопаре снимков видно, что при обработке снимков с параметрами калибровки, полученными методом с общим центром проекции, точность по оси Z выросла в 1,5 раза.

PhaseOne iXM-RS150F с объективом 50 мм

Стандартный метод калибровки и метод калибровки с общим центром проекции показали практически идентичные результаты. Погрешность определения параметров калибровки при использовании метода с индивидуальными центрами проекции меньше, чем при калибровке методом с общим центром проекции, хоть и незначительно (сотые доли пикселя). Следует отметить, что данная камера подразумевает установку в стабилизирующую платформу и не имеет крепления под стандартный штатив. Для проведения съемки требуется использовать дополнительное внешнее крепление, что увеличивает погрешность определения положения центра проекции при установке камеры в панорамный штатив. В данном случае применение метода калибровки с общим центром проекции нецелесообразно.

5 Выводы

Метод калибровки с общим центром проекции позволяет калибровать ЦФК с длиннофокусными объективами на стандартных лабораторных тест-объектах с маркированными точками, что практически невозможно при калибровке стандартными методиками с индивидуальными центрами проекции. При вращении камеры необходимо охватывать всю рабочую площадь матрицы, а не стараться поймать в кадр как можно больше маркированных точек тест-объекта. В этом случае при совместной обработке снимков геометрические искажения будут описаны более точно, следовательно, точность определения параметров калибровки будет выше. Стоит избегать использования объективов с электронными стабилизаторами, так как даже в отключенном состоянии стабилизатор может оказывать влияние на положение главной точки на снимках при вращении камеры. Применение данного метода при калибровке ЦФК со среднефокусными объективами нецелесообразно.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, кандидату технических наук, доценту кафедры фотограмметрии МИИГАиК Александру Валерьевичу Говорову, коллективу кафедры прикладной оптики МИИГАиК, ассистенту Елизавете Леонидовне Тарасовой, старшему преподавателю кафедры эпидемиологии и доказательной медицины Института общественного здоровья им. Ф.Ф. Эрисмана Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Артему Александровичу Позднякову за предоставленную фототехнику, а также своему дедушке, доктору геолого-минералогических наук, профессору Игорю Владимировичу Давиденко.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Тюфлин Ю.С. Фотограмметрия — вчера, сегодня и завтра // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2011. № 2. С. 3–8.
2. Джарроуш Д. Цифровая камера как практический геодезический инструмент: проблемы и решения // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. Т. 1. № 2. С. 52–56. DOI:10.17273/CADGIS.2014.1.11.
3. Бездидько С.Н. Ортогональные аберрации. Теория, методы и практика применения в вычислительной оптике // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 6. С. 32–43.
4. Бездидько С.Н. Методологические аспекты применения полиномов Цернике в вычислительной оптике // Фундаментальные основы инженерных наук: сборник трудов Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения нобелевского лауреата академика А.М. Прохорова. М.: ИРЭ РАН, Междунар. центр по информатике и электронной технике, 2006. Т. 1. С. 88–101.
5. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г., Курков В.М. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.racurs.ru/www_download/articles/Camaras_digiales_rus.pdf (дата обращения: 10.09.2018).
6. Гук А.П., Тихонов В.И., Белошапкин М.А. Исследование возможности применения неметрических цифровых снимков для обновления топографических карт // Сборник материалов Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2006»: в 6 т. Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3. Ч. 1. С. 80–82.
7. Cramer M. EuroSDR network on digital camera calibration // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Istanbul, 2004. Vol. 35. Part B6. P. 204–209.
8. Cramer M., Przybilla H.-J., Zurhorst A. UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. XLII-2/W6. P. 85–92. DOI:10.5194/isprs-archives-xlii-2-w6-85-2017.
9. Ergun B. Photogrammetric observing the variation of intrinsic parameters for zoom lenses // Scientific Research and Essays. 2010. Vol. 5. No. 5. P. 461–467.
10. Chibunichev A.G., Govorov A.V., Chernyshev V.E. Research of the camera calibration using series of images with common center of projection // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W18. P. 19–22. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-19-2019.

АВТОР

Чернышев Василий Евгеньевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра фотограмметрии, геодезический факультет

 0009-0007-8643-799X

Поступила 01.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Geometric calibration of digital cameras with long focal length lenses using a series of images with a common center of projection

Vasily E. Chernyshev¹✉

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ kwikun@gmail.com

CITATION Chernyshev VE. Geometric calibration of digital cameras with long focal length lenses using a series of images with a common center of projection. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 35–45. DOI:10.30533/GiA-2025-012.

KEYWORDS calibration, digital camera, long focal length camera, center of projection, entrance pupil, optical system, photogrammetry

ABSTRACT The article presents the results of calibration of digital cameras equipped with a long-focus lens using a series of images with a common projection center. When calibrating cameras with a long-focus lens on standard test objects, the calibration parameters are determined with low accuracy, and in some cases, calibration is impossible. This is due to poor geometric parameters and conditions. Each picture includes a small number of marked points of the test object, the intersection angle is sharp, and the depth of field is insufficient (the difference in the position of the far and near points). Obviously, a special test object must be designed for long-focus calibration. We propose a different approach to the calibration process. The camera is mounted on a tripod with a panoramic head used by photographers to obtain spherical panoramas. The main condition for panoramic shooting is that the center of rotation of the camera and the projection center of the lens optical system must be at the same point. The article also presents a brief theory of central projection from the point of view of optics. The main misconceptions associated with the projection center and nodal points are described. The concepts of entrance and exit pupils of an optical system, as well as their roles in the optical system of a lens, are considered.

ACKNOWLEDGEMENTS The author would like to thank his scientific supervisor Alexander V. Govorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Photogrammetry, MIIGAiK; the team of the Department of Applied Optics, MIIGAiK; Elizaveta A. Tarasova, Assistant; Artem A. Pozdnyakov, the Senior Lecturer, Department of Epidemiology and Evidence-Based Medicine, F.F. Erisman Institute of Public Health, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, for providing photographic equipment; Igor V. Davidenko, author's grandfather, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor.

REFERENCES

1. Tyuflin YuS. Fotogrammetrija – vchera, segodnja i zavtra [Photogrammetry – yesterday, today and tomorrow]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophptosurveying*. 2011;2: 3–8 (In Russian).
2. Jarowush D. Cifrovaja kamera kak prakticheskij geodezicheskij instrument: problemy i reshenija [Digital camera as a practical geodetic tool: problems and solutions]. *CAD & GIS for roads*. 2014;1(2): 52–56. (In Russian). DOI:10.17273/CADGIS.2014.1.11.
3. Bezdidko SN. Ortogonal'nye aberracii. Teorija, metody i praktika primenenija v vychislitel'noj optike [Orthogonal aberrations: theory, methods, and practical applications in computational optics]. *Opticheskii Zhurnal*. 2016;83(6): 32–43. (In Russian).
4. Bezdidko SN. Metodologicheskie aspekty primenenija polinomov Cernike v vychislitel'noj optike [Methodological aspects of the application of Zernike polynomials in computational optics]. *Fundamental principles of engineering sciences: collection of articles of the International conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Nobel laureate academician A.M. Prokhorova*. Moscow: IRE RAS, International Center for Informatics and Electronic Engineering; 2006(1): 88–101. (In Russian).
5. Mikhailov AP, Chibunichev AG, Kurkov VM. *Primenenie cifrovyh nemetriceskih kamer i lazernyh skanerov dlja reshenija zadach fotogrammetrii* [The use of digital non-metric cameras and laser scanners to solve photogrammetry problems]. (In Russian). Available from: http://www.racurs.ru/www_download/articles/Camaras_digitales_rus.pdf (Accessed 10 September 2018).
6. Guk AP, Tihonov VI, Beloshapkin MA. Issledovanie vozmozhnosti primenenija nemetriceskih cifrovyh snimkov dlja obnovlenija topograficheskikh kart [Research on the possibility of using non-metric digital images to update topographic maps]. *Proceedings of the International scientific congress "GEO-Siberia-2006"*. In 6 vols. Vol. 3. Part 1. Novosibirsk: SSGA, 2006: 79–81. (In Russian).
7. Cramer M. EuroSDR network on digital camera calibration. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Istanbul, 2004;35(B6): 204–209.
8. Cramer M, Przybilla HJ, Zurhorst A. UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017(XLII-2/W6): 85–92. DOI:10.5194/isprs-archives-xlii-2-w6-85-2017.
9. Ergun B. Photogrammetric observing the variation of intrinsic parameters for zoom lenses. *Scientific Research and Essays*. 2010;5(5): 461–467.
10. Chibunichev AG, Govorov AV, Chernyshev VE. Research of the camera calibration using series of images with common center of projection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019;XLII-2/W18: 19–22. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-19-2019.

AUTHOR **Vasily E. Chernyshev**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Photogrammetry, Faculty of Geodesy

 0009-0007-8643-799X

Submitted: November 01, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.