

## ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА КАМЕРЫ ПО СНИМКАМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА

студент В.В. Андрейчиков, студент К.С. Будкевич,  
(Научный руководитель Е.И. Радцевич)  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь, inggeod@bntu.by

Выполнена экспериментальная фотограмметрическая калибровка камеры мобильного телефона с целью определения элементов внутреннего ориентирования, включая параметры фотограмметрической дисторсии объектива съёмочной камеры. Определены поправки за тангенциальную и радиальную дисторсию в координаты измеренных точек на снимке в программном продукте Agisoft Photoscan с целью уменьшения влияния фотограмметрической дисторсии объектива фотокамеры. Обобщена технология фотограмметрической калибровки мобильного телефона по снимкам пространственного тест-объекта.

**Ключевые слова:** калибровка камеры, элементы внутреннего ориентирования, дисторсия объектива, пространственный тест-объект, выравнивание фотографий.

В процессе изучения дисциплины «Прикладная фотограмметрия» возникла необходимость выполнения экспериментальной наземной фотограмметрической съёмки камерой телефона MI 11 Lite с разрешением 2610×4640 и фокусным расстоянием 4,74 мм. Так как цифровая камера телефона не относится к метрическим камерам, а является любительской, возникает необходимость её калибровки с целью определения элементов внутреннего ориентирования, включая параметры фотограмметрической дисторсии объектива съёмочной камеры, поскольку нельзя предполагать долговременную стабильность механических и оптических компонентов, как в случае со специальными метрическими камерами.

Уменьшить влияние фотограмметрической дисторсии объектива фотокамеры можно учтя поправки за тангенциальную и радиальную дисторсию в координаты измеренных точек на снимке. Эти поправки описываются следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} d_x &= x(r^2 \cdot k_1 + r^4 \cdot k_2 + r^6 \cdot k_3 + \dots) + (r^2 + 2x^2)p_1 + 2xyp_2; \\ d_y &= y(r^2 \cdot k_1 + r^4 \cdot k_2 + r^6 \cdot k_3 + \dots) + (r^2 + 2y^2)p_2 + 2xyp_1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $x, y$  – координаты точек снимка;

$k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты радиальной дисторсии;

$p_1, p_2$  – коэффициенты тангенциальной дисторсии объектива;

$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  – расстояние от точки изображения до главной точки.

Поскольку достижимая точность измерения в пространстве объекта всегда зависит от текущего масштаба изображения в фотограмметрии, необходимо стремиться к чрезвычайно малой погрешности измерения координат в пространстве изображения. Обычно они находятся в диапазоне от 0,5 до 0,02 пикселей или от 1–2 мкм до 0,3 мкм.

Съёмку пространственного тест-объекта осуществляют многократно с поворотом камеры вокруг оптической оси объектива на 180° (рисунок 1) с целью повышения надежности и достоверности определения элементов внутреннего ориентирования калибруемых камер.

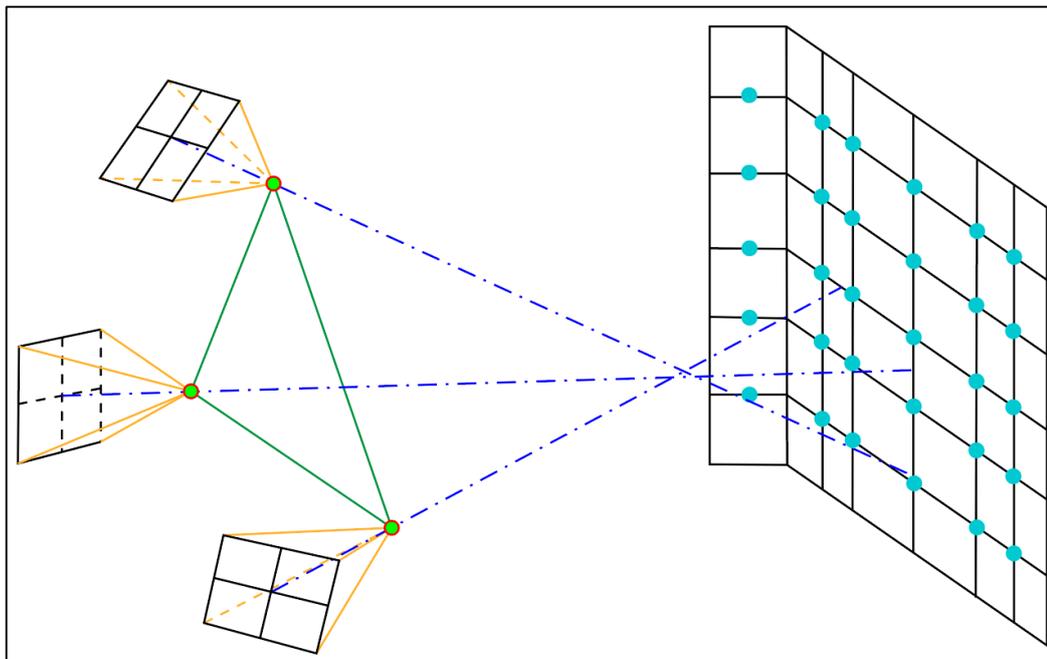


Рис. 1. Схема фотосъёмки тест-объекта

Процесс калибровки камеры, то есть уточнение коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии, выполнен в программном продукте Agisoft Photoscan в следующей последовательности.

После импорта фотографий в программу выполнено их выравнивание. На этой стадии определяется положение и ориентация камеры для каждого кадра, строится разреженное облако точек.

Следующим этапом выполнен импорт каталога координат маркированных точек. На каждом снимке с высокой точностью последовательно измерены все точки пространственного тест-объекта (рисунок 2).

Далее выполнена оптимизация выравнивания фотографий, с предварительно отключенными снимками, с целью исключения навигационной привязки камер и оптимизация положения

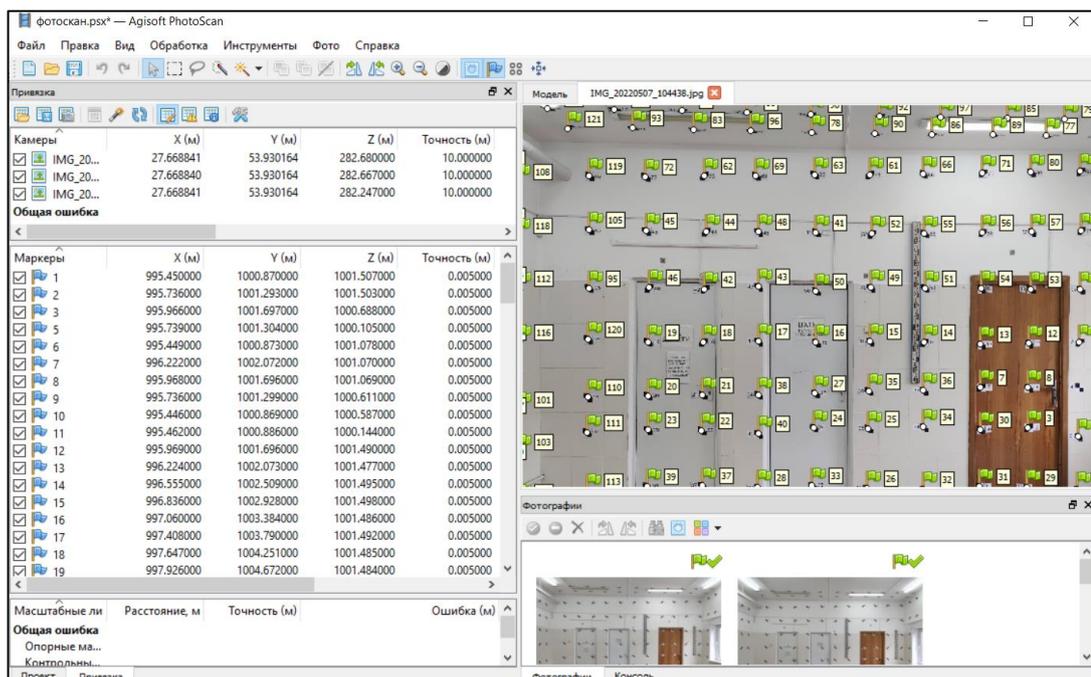


Рис. 2. Процесс измерения точек пространственного тест-объекта

Для сохранения данных фотограмметрической калибровки камеры в окне «Калибровка камеры» выбором пункта «Калибровка камеры» в меню «Инструменты» необходимо перейти на вкладку «Уточненная» и сохранить параметры (рисунок 3).

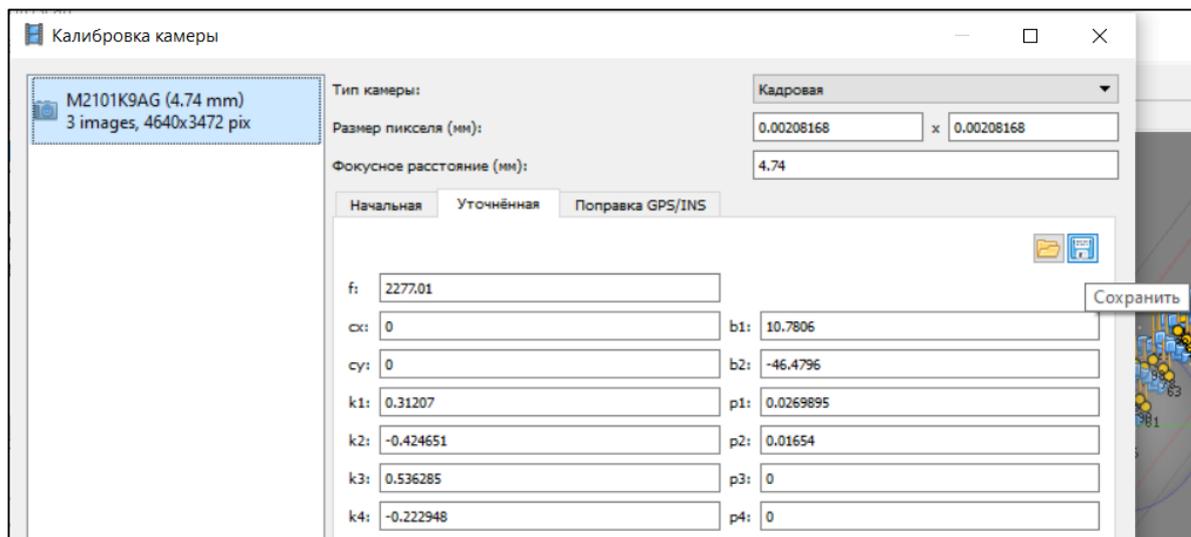


Рис. 3. Сохранение параметров калибровки

Формирование и анализ отчета обработки. В начале работы упоминалось, что критерием оценки точности, выполненной пространственной фотограмметрической калибровки, являются значения погрешностей координат измеренных на снимке точек и эти значения не должны превышать 0,5 пикселя. На рисунке 4 представлен фрагмент программного отчета об обработке, согласно которому остаточные значения не превышают данного требования.

Количество	Ошибка, X (мм)	Ошибка, Y(мм)	Ошибка, Z (мм)	Ошибка XY(мм)	Общая (мм)	Фото (пикс)
124	14.2327	10.1682	5.43977	17.4918	18.3181	0.364

Таблица 2. СКО по опорным точкам.

Количество	Ошибка, X (мм)	Ошибка, Y(мм)	Ошибка, Z (мм)	Общая (мм)	Фото (пикс)
49	18.6738	-13.1951	-2.46703	22.998	0.413 (2)
51	18.3304	-9.25851	-2.40286	20.676	0.092 (2)
53	22.6681	-3.70184	-2.33589	23.0868	0.410 (2)
55	24.8334	-13.7624	-6.29413	29.0812	0.268 (2)
56	25.4832	-10.2713	-6.10316	28.145	0.445 (2)
57	25.5289	-6.2891	-6.08384	26.9869	0.440 (2)
58	16.395	6.65154	-1.52083	17.7582	0.480 (2)
<b>Общая</b>	<b>14.2327</b>	<b>10.1682</b>	<b>5.43977</b>	<b>18.3181</b>	<b>0.364</b>

Таблица 3. Опорные точки.

Рис. 4. Фрагмент программного отчета об обработке

По результатам работы можно сделать вывод о возможности применения камеры мобильного телефона MI 11 Lite с фокусным расстоянием 4,74 мм для производства наземной съемки с предварительной фотограмметрической калибровкой.

#### Литература

1. Радцевич, Е. И. Проектирование наземной фотограмметрической съёмки / Е. И. Радцевич, А. В. Кабацкий, Н. О. Куприенко // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение [Электронный ресурс]: материалы Международной научно-технической

конференции / редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]; сост. В. А. Ходяков. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 201-207.

2. Скрыпицына, Т.Н., Курс лекций по дисциплинам «Основы архитектурной фотограмметрии» и «Архитектурная фотограмметрия» : учебное пособие / Т.Н. Скрыпицына, А.В. Уколова. – М. : МИИГАиК, 2020. – 127 с.

3. Фотограмметрия : учеб. для вузов / А.Г. Чибуничева [и др.]; под общ. ред. А. Г. Чибуничева. – М. : МИИГАиК, 2016. – 294 с.

УДК 3054

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

студент Р.В. Будай, студент А.И. Лаппо, студент И.С. Ахалли  
(Научный руководитель Б.А. Бадак)

Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220030, г. Минск, Беларусь, ftk75@bntu.by

Понятие интеграл является одним из важнейших понятий математического анализа. Из определения данного понятия следует, что интеграл - это сумма числа бесконечно малых слагаемых. Элементы интегрального исчисления широко используются во многих аспектах астрономии, биологии, медицине, а также при строительстве различных сооружений. В зависимости от пространства, на котором задана подынтегральная функция, интеграл может быть двойной, тройной, криволинейный, поверхностный и так далее.

Первоначально, использование интегралов Френеля применялось при вычислении интенсивности электромагнитного поля в среде, где свет огибает непрозрачные объекты. Относительно недавно они начали использоваться при проектировании автомобильных и железных дорог и их переходных зон кривизны.

**Ключевые слова:** автомобильные дороги; интеграл; строительство; освещение; уплотнение.

Автомобильные дороги – транспортная система, имеющая двухполосное, многополосное и встречное направления движения транспортных средств. Экономика любого государства не может успешно функционировать без транспорта. Из-за его отсутствия не будет происходить нормальное функционирование различных промышленных предприятий, возникнут затруднения в освоении новых экономических районов, ослабнет оборона государств и так далее. Так как интегралы активно используются при строительстве автомобильных дорог, то можно сделать вывод, что они довольно важная составляющая в развитии экономики и социальной жизни.

Одной из главных дорог города Минска является магистраль М9 (также - Минская кольцевая автомобильная дорога).

При проектировании закруглений дорог, наряду с известными переходными кривыми используются новые типы кривых, задаваемых посредством переменного радиуса кривизны. [4, стр. 283]

Рассмотрим несколько примеров применения интегралов при строительстве автомобильных дорог:

- Светотехника (яркость), изучаемая в спец. дисциплине “Диагностика автомобильных дорог“

Яркость освещаемых поверхностей зависит от коэффициентов яркости или коэффициентов отражения. Эти коэффициенты изменяются в зависимости от угла падения и отражения света и от оптических свойств поверхности, отражающей световой поток.