

УДК 004

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ КАМЕРЫ

Никитин К.А.

к.т.н., доцент,

*Поволжский Государственный Университет Телекоммуникаций и
Информатики,*

Россия, г. Самара

Аникина Н.А.

магистрант,

*Поволжский Государственный Университет Телекоммуникаций и
Информатики,*

Россия, г. Самара.

Аннотация. Статья посвящена исследованию процесса калибровки камеры, которая заключается в нахождении внутренних параметров камеры, с целью дальнейшего совмещения изображений. Для обоснованного выбора метода получения внутренних параметров камеры было проведено экспериментальное исследование двух наиболее распространённых методов калибровки: с использованием шахматной доски и с использованием ArUco маркеров.

Ключевые слова: Компьютерное зрение, камера, калибровка, методы калибровки, шахматная доска, ArUco маркеры, внутренние и внешние параметры, коэффициенты дисторсии, среднеквадратическая ошибка перепроецирования.

INVESTIGATION OF THE CAMERA CALIBRATION PROCESS

Nikitin K.A.

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Volga Region State University of Telecommunications and Informatics,
Russia, Samara*

Anikina N.A.

*Master's student,
Volga State University of Telecommunications and Informatics,
Russia, Samara*

Annotation. The article is devoted to the study of the camera calibration process, which consists in finding the internal parameters of the camera, in order to further combine images. To make a reasonable choice of the method for obtaining the internal parameters of the camera, an experimental study of two of the most common calibration methods was carried out: using a checkerboard and using ArUco markers.

Keywords: Computer vision, camera, calibration, calibration methods, chessboard, ArUco markers, internal and external parameters, distortion coefficients, RMS error of reprojection.

Система компьютерного зрения является одной из составляющих искусственного интеллекта. Она призвана решать множество задач, которые связаны со сбором и анализом визуальной информации в разных областях деятельности человека. Компьютерное зрение помогает извлекать нужную информацию из фото и видео изображений.

При решении некоторых задач компьютерного зрения возникает потребность нахождения взаимосвязи положения объекта с его отображением на плоскости матрицы снимающей камеры. Если при теоретическом моделировании все параметры оптико-электронной системы (далее камера) могут быть заданы и рассчитаны, то для реальных систем из-за допусков при

изготовлении и неточностей при сборке камер, ошибках при определении положения объектов и камеры в пространстве возникают сложности при однозначном сопоставлении объекта с его изображением.

Для решения этой проблемы собранную и настроенную камеру предварительно калибруют. В отличие от калибровки измерительных приборов, целью которой является установление зависимости между показаниями средства измерительной техники (прибора) и размером измеряемой (входной) величины, в компьютерном зрении под калибровкой камеры понимается процесс определения внешнего и внутреннего ориентирования камеры, включая параметры объектива, по формируемым камерой изображениям. Внешнее ориентирование камеры характеризуется поворотом и смещением камеры относительно некоторой мировой системы координат. Наибольший интерес при калибровке представляют собой внутренние параметры опико-электронной системы:

- фокусные расстояния по обеим координатам (f_x, f_y);
- главная точка (оптический центр) (c_x, c_y);
- коэффициент перекоса осей матрицы камеры (γ);
- коэффициенты дисторсии (искажения) объектива.

Перечисленные выше параметры, за исключением коэффициентов дисторсии, обычно записываются в виде матрицы:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Найденные, в ходе калибровки, параметры способствуют исправлению искажений на фотографиях и видео. Более того, найденные параметры могут быть полезны в определении относительного положения камеры и снимаемого объекта [2].

К факторам, влияющим на качество и точность калибровки, относят:

- принятую модель формирования изображения камерой;

– выбранный метод калибровки.

Хотя в настоящее время теории калибровки камер посвящено множество работ отечественных и зарубежных учёных до сих пор нет универсального метода, который бы с большой точностью давал бы хорошие результаты в различных областях применения камер. Для обоснованного выбора метода получения внутренних параметров камеры было проведено экспериментальное исследование двух наиболее распространённых методов калибровки камер.

Классическим методом калибровки камер является модификация метода Zhengyou Zhang реализованного в OpenCV с использованием шахматной доски в качестве калибровочного объекта. Для реализации данного метода необходимо иметь несколько изображений шахматной доски, полученных с помощью исследуемой камеры. Зная информацию о количестве и размере клеток шахматной доски в пространстве объектов, а также найдя координаты внутренних углов клеток шахматной доски на изображении можно определить параметры проекционного преобразования, по которым восстанавливаются внешние и внутренние параметры камеры. Далее вычисляются коэффициенты радиальной дисторсии методом наименьших квадратов и уточняются найденные параметры методом Левенберга – Марквардта.

При использовании данного метода обязательным является нахождение всех внутренних углов клеток шахматной доски на изображении. Для преодоления этого ограничения в OpenCV имеется реализация метода калибровки по ArUco маркерам. ArUco – это открытая библиотека для оценки положения камеры с применением квадратных маркеров [3], каждый из которых может быть идентифицирован на изображении. Калибровочный объект (доска) с несколькими ArUco маркерами также снимается с помощью исследуемой камеры, но в отличие от метода с шахматной доской используются не внутренние углы клеток, а углы каждого маркера. Математическая основа данного метода аналогична методу с шахматной доской. Данный метод

допускает использование изображений, на которых часть маркеров может быть не видна.

Алгоритм калибровки камеры с использованием шахматной доски включает в себя следующие этапы:

1) Подготовка калибровочного объекта, в виде изображения шахматной доски.

2) Печать и закрепление листа с изображением шахматной доски на жёсткой поверхности.

3) Получение несколько изображений (15-20 файлов) калибровочного объекта снятых исследуемой камерой с разных точек наблюдения.

4) Поиск и уточнение координат внутренних углов клеток шахматной доски на каждом изображении с субпиксельной точность.

5) Передача координат углов клеток шахматной доски на всех изображениях и их соответствия на калибровочном объекте функции `calibrateCamera` для получения внешних и внутренних параметров камеры.

6) Оценка результатов калибровки путём обратного перепроецирования точек из пространства объектов в пространство изображения с учётом найденных параметров и вычисления среднего значения ошибки перепроецирования.

Алгоритм калибровки камеры с использованием ArUco маркеров аналогичен методу с шахматной доской за исключением этапов формирования калибровочного объекта, поиска углов маркеров и вычисления внешних и внутренних параметров камеры. При создании калибровочного объекта учитывается содержимое набора маркеров (словарь), количество маркеров по горизонтали и вертикали, а также расстояние между маркерами. Особенностью работы с ArUco-маркерами является то, что маркеры не только обнаруживаются, но и распознаются. При этом зная размещение их на

исходном калибровочном объекте можно вычислить внешние и внутренние параметры камеры с помощью функции `calibrateCameraAruco`.

Для экспериментального исследования были разработаны две программы на языке программирования Python с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV, которые позволяют реализовать выше указанные алгоритмы калибровки камеры.

При калибровке камеры использовалось 20 статических изображений, снятых исследуемой камерой, с соответствующими тестовыми объектами:

- изображения шахматной доски, с размерами чёрного квадрата 20×20 мм и количеством внутренних углов 9×6 .
- изображения доски с ArUco маркерами, с размерами: 9 маркеров по горизонтали и 6 маркеров по вертикали. Размер маркера 6×6 бит.

В результате были получены: матрица внутренних параметров камеры (`mtx`), коэффициенты дисторсии объектива (`dist`) и значения среднеквадратической ошибки (`ret`), которые представлены в таблицах 1 и 2.

Сравнение результатов методов калибровки

Метод калибровки камер с использованием шахматной доски наиболее распространён, так как клетки шахматной доски достаточно легко различимы на изображении и их легко обнаружить. Более того, углы клеток шахматной доски идеально подходят для их локализации, поскольку имеют резкие градиенты в двух направлениях. Также, углы находятся на пересечении прямых линий шахматной доски, что позволяет оценить нелинейные искажения вносимые объективом. Все эти факторы определяют точность поиска углов клеток, расположенных в шахматном порядке. А метод калибровки с использованием ArUco маркеров более универсален, поскольку он допускает частичного отсутствия маркеров (выход за пределы изображения) на калибровочных изображениях.

Сравнивая эти два метода, можно сказать, что они не имеют явных различий. Критерием оценки точности является среднеквадратичная ошибка перепроецирования (ret), которая для хорошей калибровки должна находиться в пределах от 0.1 до 1.0 [5]. Ошибка, равная 1.0, означает, что в среднем каждая из проецируемых точек, после устранения искажений, находится на расстоянии 1 пикселя от своего фактического положения.

Таблица 1

Среднеквадратичные ошибки, полученные в результате калибровки камеры

Название метода	Среднеквадратичная ошибка (ret)
Метод с использованием шахматной доски	0,719937741781041
Метод с использованием ArUco маркеров	0,9860433247531747

Из таблицы 1 видно, что исследование, проведённое методом, с использованием шахматной доски показало результат немного лучше, чем с использованием ArUco маркеров. Но калибровка и тем, и другим методом выполнена хорошо, так как значение ret не превышает единицы. Такой точности достаточно для решения многих задач компьютерного зрения.

Таблица 2

Внутренние параметры камеры, полученные в результате калибровки камеры

Название метода	Матрица внутренних параметров камеры (mtx)	Коэффициенты дисторсии ($dist$)
Метод с использованием шахматной доски	[[1.45020414e+03 0.00000000e+00 9.53488688e+02] [0.00000000e+00 1.44138614e+03 4.89983502e+02] [0.00000000e+00 0.00000000e+00 1.00000000e+00]]	$k_1 = 0.03573746$ $k_2 = 0.07443507$ $p_1 = -0.00057019$ $p_2 = 0.00407444$ $k_3 = -0.34759057$
Метод с использованием ArUco маркеров	[[1.49229850e+03 0.00000000e+00 9.56118851e+02] [0.00000000e+00 1.48208245e+03 4.80103567e+02]]	$k_1 = 0.10482728$ $k_2 = -0.08104831$

ArUco маркеров	[0.00000000e+00 0.00000000e+00 1.00000000e+00]]	$p_1 = -0.00445254$ $p_2 = 0.00649485$ $k_3 = -0.1123807$
----------------	---	---

Разница между полученными внутренними параметрами камеры небольшая. Но, результат метода с использованием шахматной доски является более точным, это видно из полученной среднеквадратической ошибки перепроецирования. Полученные коэффициенты дисторсии также не сильно отличаются.

Полученные, в результате калибровки, параметры камеры можно применять для восстановления или улучшения изображений, а также для геометрических коррекций, совмещения или наложения изображений.

Таким образом, калибровка камеры, рассмотренными методами, практически идентична, но проведенное исследование помогло сделать обоснованный выбор метода с использованием шахматной доски, для работы по совмещению изображений.

Библиографический список

1. Никитин, В. Н. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 2. – С. 71–80.

2. Atcheson, B. ArUco: High Precision Fiducial Markers for Camera Calibration [Text] / Atcheson, B., Heide, F., Heidrich, W. – Vision, Modeling, and Visualization Workshop, 2011. vol.10. – 897 с.

3. Калибровка камеры с использованием OpenCV [Электронный ресурс]: Записки преподавателя / ред. В.В. Костерин – Электрон. Дан. – Ч., 2020. – Режим доступа: <https://waksoft.susu.ru/2020/02/29/kalibrovka-kamery-s-ispolzovaniem-s-opencv/>

4. Camera Calibration using OpenCV [Electronic resource] / Satya Mallick. – Electron. dan. – W., 2020. – Access mode: https://learnopencv.com/camera-calibration-using-opencv/#disqus_thread

5. Camera Calibration and 3D Reconstruction [Electronic resource] / Open Source Computer Vision. – Electron. dan. – 2015. – Access mode: https://docs.opencv.org/3.1.0/d9/d0c/group_calib3d.html#ga687a1ab946686f0d85ae0363b5af1d7b

Оригинальность 92%