

УДК 004.932.2

Сравнительный анализ методов калибровки камеры для распознавания дорожной разметки

Цокуренко Семен Владимирович

Волосатова Тамара Михайловна (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены и сопоставлены два широко используемых подхода к калибровке камер для задач измерения расстояний в системах компьютерного зрения: внутренняя калибровка по Charuco-доске и внешняя калибровка по ArUco-маркерам. Произведена формализация математических моделей, включая вывод гомографий и оценка матриц K , R и t , и реализация программного комплекса на C++/OpenCV и Qt, автоматизирующего сбор изображений, детекцию шаблонов и вычисление параметров камеры. На экспериментальном наборе данных достигнута среднеквадратическая ошибка 0,18 пикселя, что подтверждает высокую точность методики. Представленное решение позволяет надежно определять как внутренние, так и внешние параметры камеры в реальных условиях и может служить основой для систем робототехники, беспилотного транспорта и AR/VR-приложений.

Ключевые слова: калибровка камеры, Charuco-доска, ArUco-маркеры, RMS-ошибка, OpenCV, Qt, C++

Введение. Калибровка камеры восстанавливает скрытые геометрические и оптические параметры (внутренние: фокусное расстояние, главный центр, искажения; внешние: положение и ориентация), необходимые для точного измерения в компьютерном зрении (дистанции, 3D-реконструкция, трекинг). Без нее любые алгоритмы дают неточные или несогласованные результаты. Даже малые погрешности приводят к большим ошибкам в современных приложениях, поэтому важно понимать, какие методы и в каких условиях обеспечивают нужную точность.

Цель работы — создать приложение для калибровки камеры с двумя базовыми методами:

- внутренняя калибровка по Charuco-доске;
- внешняя калибровка по набору ArUco-маркеров.

В работе подробно рассмотрены принципы Charuco- и ArUco-калибровок, после чего была создана программа с графическим интерфейсом на Qt и алгоритмической частью на C++/OpenCV, обеспечивающая автоматизированный сбор изображений, детекцию шаблонов и вычисление как внутренних, так и внешних параметров камеры. Качество калибровки оценивалось по RMS-ошибке проекции, на ее основе продемонстрированы практические сценарии использования приложения — от захвата видеопотока до сохранения результатов в формате YAML. Кроме того, в тексте работы рассмотрены альтернативные методы калибровки, их назначение и принципы, хотя они не были реализованы в данном приложении.

Основные задачи: описать математические модели Charuco и ArUco калибровки, включая вывод гомографий и алгоритмы оптимизации, разработать и протестировать приложение на C++ с использованием OpenCV и Qt для автоматизации сбора изображений, детекции шаблонов и вычисления параметров камеры.

Внутренняя калибровка. Классической моделью камеры служит модель, в рамках которой процесс проекции точек из трехмерного пространства на плоскость изображения описывается матрицей внутренних параметров

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где f_x, f_y — фокусные расстояния по горизонтали и вертикали соответственно; c_x, c_y — координаты главной точки; s представляет коэффициент сдвига, учитывающий неортогональность осей пикселей [1].

При этом ключевым шагом является вычисление гомографии — 3×3 -матрицы проектного преобразования [2]

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}, (u, v, w)^T = H (X, Y, 1)^T, \quad (1)$$

где $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ — коэффициенты, отвечают за аффинные преобразования (поворот, масштаб, сдвиг); h_{13}, h_{23} — задают трансляции (сдвиг по осям X и Y); h_{31}, h_{32} — учитывают перспективные искажения (наклон плоскости); h_{33} — обычно нормируется на единицу для сохранения масштаба; X, Y — декартовы координаты точки в исходной плоскости; u, v, w — однородные координаты точки в новой плоскости. После этого реальные пиксельные координаты находятся как [1]

$$x = \frac{u}{w}; y = \frac{v}{w}.$$

Именно через такие матрицы H можно «выпрямить» снимки, сделанные под разными углами, и свести все измерения к единой плоскости шаблона по формуле (1) [2].

Одним из широко известных подходов для внутренней калибровки является метод, который позволяет оценить параметры камеры на основе набора изображений плоского калибровочного шаблона, чаще всего шахматной доски (рис. 1) известного размера, захваченной с различными ориентациями.

Этот способ выбран для реализации в приложении благодаря простоте использования и удобству настройки. Классический характер метода обеспечивает его надежность, поэтому именно он был предпочтен.

На следующем изображении (рис. 2) представлена альтернатива шахматным мишеням — круговые шаблоны в регулярной или асимметричной сетке [3].

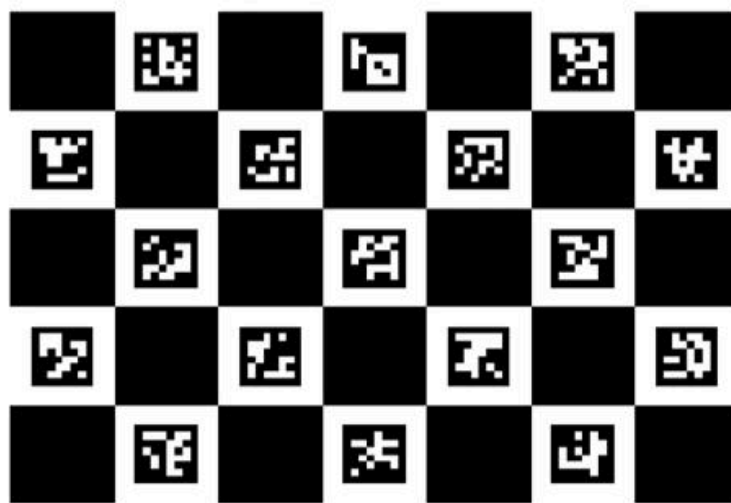


Рис. 1. Доска калибровки Charuco

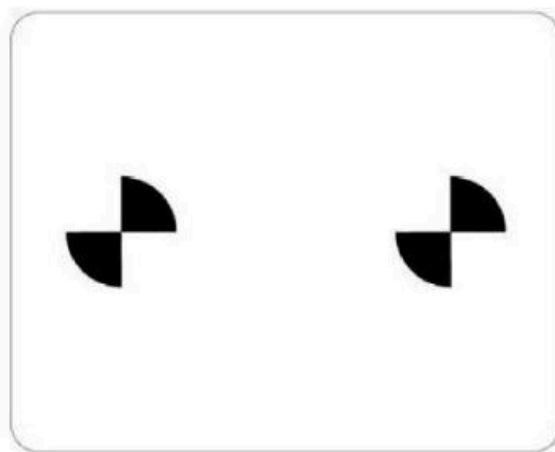


Рис. 2. Круговой шаблон калибровки

Они дают более точное положение центров при плохом освещении или сильных искажениях; асимметрия позволяет однозначно сопоставлять элементы шаблона и упрощает калибровку.

Внешняя калибровка. Внешняя калибровка представляет собой процедуру определения параметров, описывающих положение и ориентацию камеры в мировой системе координат. Внешняя калибровка направлена на установление взаимосвязи между координатами объектов в пространстве и их изображениями на плоскости [4]. Основная задача внешней калибровки состоит в вычислении матрицы поворота R и вектора трансляции t . Эти параметры позволяют перейти от системы координат мира к системе координат камеры посредством уравнения проекции

$$x = K [R, \quad t]X, \quad (2)$$

где x — вектор однородных координат точки на изображении; K — матрица внутренних параметров камеры; R — матрица поворота (свойство ортогональности $R^T R = I$ и $\det(R) = 1$); t — вектор трансляции; X — вектор однородных координат точки в мировой системе координат.

С математической точки зрения, задача внешней калибровки сводится к поиску такой пары (R, t) , которая минимизирует ошибку между наблюдаемыми координатами точек на изображении и их предсказанными значениями на основе модели проекции по формуле (2) [5, 6]. Обычно эта задача формулируется в виде задачи наименьших квадратов:

$$\min_{R, t} \sum_{i=1}^N |x_i - \pi(K, R, t, X_i)|^2,$$

где π обозначает нелинейную функцию проекции. Для решения данной задачи часто применяются методы нелинейной оптимизации, например алгоритм Левенберга — Марквардта, позволяющие итеративно уточнять значения R и t до достижения сходимости.

На сегодняшний момент существует большое количество способов получения матрицы калибровки R . Опишем наиболее известные из всех них.

Наиболее распространенным и удобным способом является калибровка при помощи активных маркеров. Активные маркеры, такие как ArUco (рис. 3) или AprilTag, представляют собой специально разработанные шаблоны с уникальными идентификаторами, позволяющие однозначно определить их положение и ориентацию на изображении. Этот способ выбран для реализации в приложении благодаря простоте использования и удобству настройки.



Рис. 3. Словарь ArUco меток

Процедура калибровки с активными маркерами включает в себя следующие действия:

- 1) размещение маркеров в поле зрения камеры;
- 2) автоматическое обнаружение и идентификация маркеров на изображениях;
- 3) расчет внутренних параметров камеры на основе известных размеров и расположения маркеров.

Отдельным видом калибровки камер является стереокалибровка. Стереокалибровка одновременно определяет внутренние параметры двух камер (K_L , K_R) и их взаимное расположение (R_L, t_L, R_R, t_R), что необходимо для точного восстановления глубины. Проекция точки X задается компонентами

$$x_L = K_L [R_L | t_L] X, \quad x_R = K_R [R_R | t_R] X,$$

где X — однородный вектор координат 3D-точки в мировой системе; x_L, x_R — однородные координаты проекции точки X на плоскости изображения левой и правой камер.

При наличии предварительных оценок внутренних параметров можно вычислить так называемую существенную матрицу, которая определяется соотношением

$$E = K_R^T F K_L,$$

где E — существенная матрица, из которой через сингулярное разложение извлекают относительное вращение и трансляцию.

Результаты. Разработанное приложение представляет собой программное решение, реализующее весь спектр методов калибровки камер, включая внутреннюю, внешнюю, монокалибровку.

Окно настройки (рис. 4) позволяет осуществить захват и предобработку видео. Программа поддерживает работу с видеопотоками и статическими изображениями. Реализована возможность получения видеопотока с камеры, из файловой системы ПК или через UDP по выбранному порту.

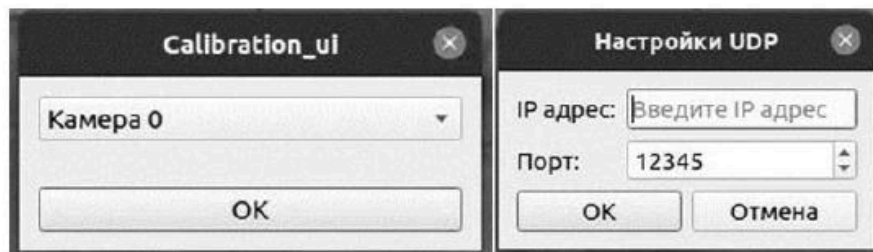


Рис. 4. Окна выбора источника

Дополнительно предусмотрена функциональность для динамического изменения таких параметров изображения, как масштаб, яркость.

Следующая вкладка приложения отвечает за проведение внутренней калибровки камеры. Ниже представлено краткое представление возможностей данного раздела программы.

Создание файла в PNG-формате Charuco доски с заданными параметрами, определяющими размеры доски (количество квадратов по горизонтали и вертикали, длину стороны квадрата, а также длину стороны маркера) и идентификатор словаря маркеров ArUco (рис. 5). Также в указанной директории появляется и YAML-файл с параметрами сохраненной калибровочной доски (рис. 6).



Рис. 5. Окно для создания калибровочной доски

```
1 %YAML: 1.0
2 ---
3 W_count: 6
4 H_count: 4
5 SquareSize: 60.
6 MarkerSize: 30.
7 currentDictID: 0|
```

Рис. 6. Параметры Charuco доски в YAML файле

Во вкладке реализовано интерактивное и автоматизированное сохранение данных. Все собранные изображения автоматически добавляются в базу данных для последующей калибровки.

По завершении процедуры калибровки результаты (внутренняя матрица камеры и коэффициенты искажений) могут быть сохранены в файле в форматах YAML, пример которого представлен на изображении [7] (рис. 7).

Основная цель следующего раздела заключается в автоматизированном распознавании маркеров ArUco, получении координат их углов и визуализации результатов детекции на исходном изображении. Также есть возможность создания и сохранения изображений маркеров выбранного словаря и размера.

```

1 %YAML:1.0
2 ---
3 camera_matrix: !!opencv-matrix
4   rows: 3
5   cols: 3
6   dt: d
7   data: [ 5.0834869102656485e+03, 0., 4.8072482393234844e+02, 0.,
8           6.6171579694705242e+03, 3.5613469271259970e+02, 0., 0., 1. ]
9 distortion_coefficients: !!opencv-matrix
10  rows: 1
11  cols: 5
12  dt: d
13  data: [ -2.0648086713206082e+00, 3.1401677700060510e+01,
14          2.4627363844111010e-02, 9.8899848355333303e-02,
15          5.4342529258680173e+01 ]

```

Рис. 7. YAML-файл с матрицами внутренней калибровки

Метод реализует процедуру калибровки внутренней матрицы камеры, при условии, что на изображении обнаружено ровно четыре маркера. Ключевые этапы данного метода состоят из следующих этапов.

Извлечение 2D-координат. Для каждого обнаруженного маркера (рис. 8) вычисляется центр, определяемый как среднее арифметическое всех углов. Полученные точки располагаются в массиве, что соответствует их положению на изображении.

Вызов функции калибровки. С использованием стандартной функции `cv::calibrateCamera()` вычисляются окончательные параметры калибровки. Полученные значения сохраняются в YAML-файл.

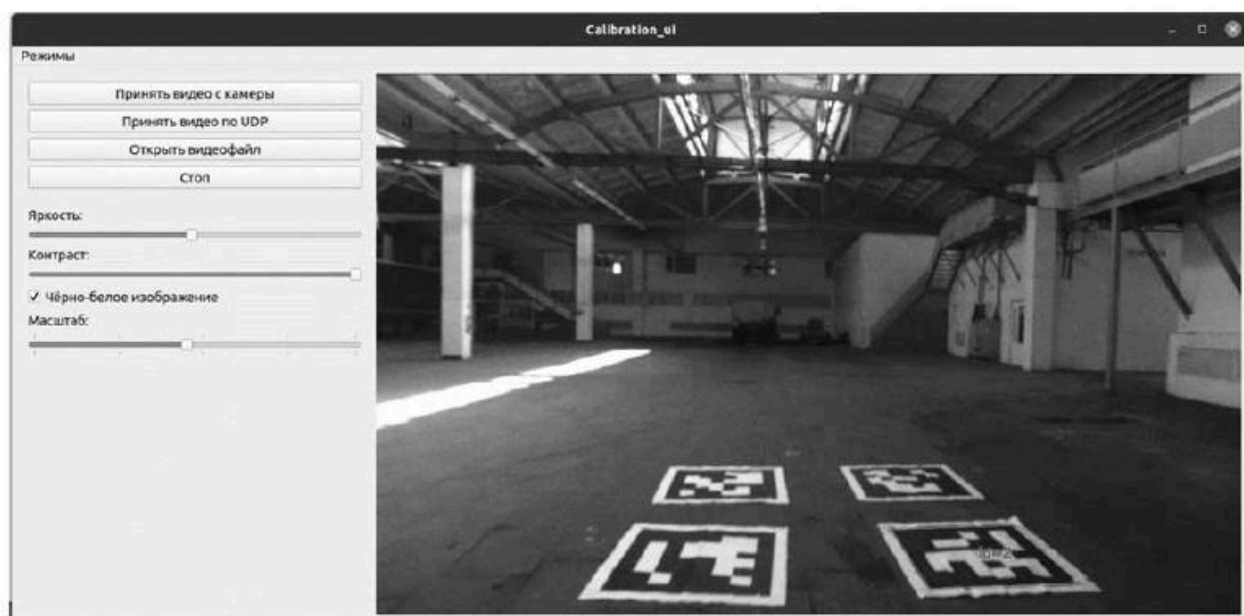


Рис. 8. Процесс обнаружения ArUco меток

Перед применением матриц к реальным данным проведена оценка качества калибровки с помощью RMS-ошибки (root-mean-square error) репроекционной погрешности. Для этого на эталонной Charuco-доске были рассчитаны известные трехмерные координаты контрольных точек и сопоставлены с их изображениями после калибровки. Полученное значение RMS оказалось на уровне 0,18 пикселя, что свидетельствует о высокой точности

После калибровки была получена матрица внутренних параметров камеры, которую затем, согласно описанным выше процедурам, применили к опорным точкам, извлеченным методами RANSAC и нейронной сети [8]. В результате получен следующий вывод (рис. 9).

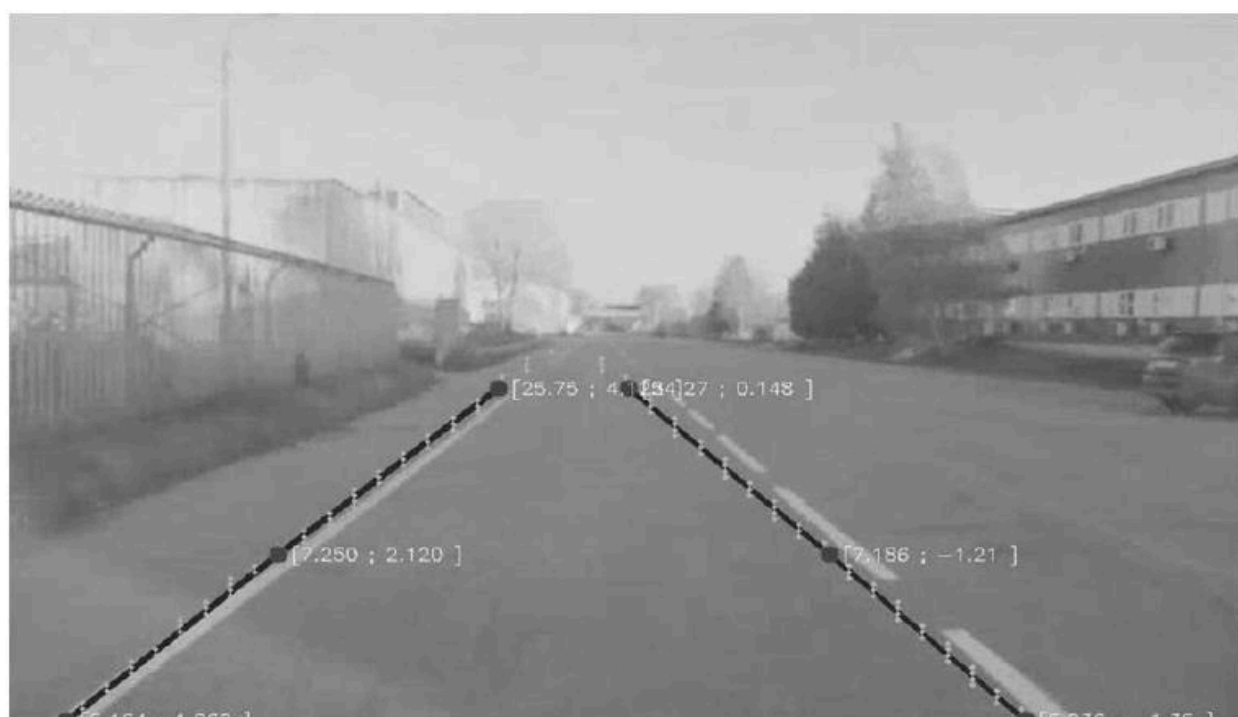


Рис. 9. Результат определения расстояния.

Заключение. В ходе исследования выполнен анализ современных методов калибровки камер, охвативший внутреннюю (Charuco-доска) и внешнюю (ArUco-маркеры) калибровку, а также обзор альтернативных подходов.

Созданное на базе C++/OpenCV и Qt приложение продемонстрировало надежное определение как внутренних, так и внешних параметров камеры в реальных условиях. Проверка качества калибровки по RMS-ошибке проекции подтвердила эффективность реализованных методик. Полученные результаты обеспечивают основу для дальнейшего внедрения в системы компьютерного зрения, где точность геометрических преобразований критична для корректной работы алгоритмов измерения и 3D-реконструкции.

Литература

- [1] Федоров А.А., Смирнова Е.П. Внешняя и внутренняя калибровка камер: теоретические аспекты. *Вестник СПбГЭТУ*, 2011, № 4, с. 97–103.
- [2] Волосатова Т. М., Козов А.В., Рыжова Т. П. Анализ методов обнаружения препятствий системы навигации мобильного робота. *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2018, № 7, с. 420–429.
- [3] Иванов И.И., Петров П.П., Сидоров С.С. Методы внутренней калибровки цифровых камер. *Известия РАН. Информатика*, 2012, № 3, с. 45–53.
- [4] Соколова А.В., Кузнецов М.И. *Основы компьютерного зрения и калибровки камер*. Москва, Наука, 2010, 256 с.
- [5] Морозов В.В., Чернышев К.Р. Анализ алгоритмов калибровки оптических систем. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 2014, № 1, с. 78–85.
- [6] Новиков А.С. Проблемы и перспективы калибровки камер в системах автоматического управления. *Труды Института автоматики*, 2013, № 2, с. 112–118.
- [7] Лебедев И.В. Математические модели в задачах калибровки камер. *Математическое моделирование и программирование*, 2015, № 3, с. 56–62.
- [8] Цокуренок С.В. *Сравнительный анализ методов компьютерного зрения для детекции дорожной разметки: расчетно-пояснительная записка к научно-исследовательской работе*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024, 32 с.

Comparative analysis of camera calibration methods for recognizing road markings

Tsokurenko Semyon Vladimirovich

Volosatova Tamara Mikhailovna (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

Two widely used approaches to camera calibration for distance measurement tasks in computer vision systems are analyzed and compared: intrinsic calibration using a Charuco board and extrinsic calibration using ArUco markers. A formalization of the mathematical models is provided, including the derivation of homographies and estimation of the K , R , and t matrices. A software suite has been implemented in C++/OpenCV and Qt, automating image acquisition, pattern detection, and camera parameter computation. On an experimental dataset, a root-mean-square error of 0.18 pixels was achieved, confirming the high accuracy of the method. The presented solution enables reliable determination of both intrinsic and extrinsic camera parameters under real-world conditions and can serve as a foundation for robotics systems, autonomous vehicles, and AR/VR applications.

Keywords: camera calibration, Charuco board, ArUco markers, RMS error, OpenCV, Qt, C++