

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа автоматизации и робототехники

Отчёт

по лабораторной работе №5

Дисциплина: Техническое зрение

Тема: Калибровка камеры с помощью шахматной доски и ArUco-маркеров

Студент гр. 3331506/90401

Ильясов А.Е.

Преподаватель

Титов В.В.

«__» _____ 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

Цель работы — калибровка камеры с помощью шахматной доски и ArUco-маркеров средствами библиотеки OpenCV и MATLAB.

З а д а н и я

Задание 1. Откалибровать камеру с помощью доски ArUco-маркеров средствами библиотеки OpenCV.

Задание 2. Откалибровать камеру с помощью шахматной доски средствами библиотеки OpenCV и приложения Camera Calibrator среды MATLAB.

Задание 3. Написать программу для детектирования ArUco-маркера и проецирования куба на плоскость изображения с основанием на маркере.

Краткие теоретические сведения

Положение некоторой точки в мировой системе координат $\mathbf{p}_w = (x_w \ y_w \ z_w)^T$ связано с её положением в системе координат камеры $\mathbf{p}_0 = (x_0 \ y_0 \ z_0)^T$ следующим соотношением:

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{R}\mathbf{p}_w + \mathbf{t}, \quad (1)$$

или

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где \mathbf{R} — матрица поворота;

\mathbf{t} — вектор смещения.

Точка, положение которой задано в системе координат камеры, может быть спроецирована в точку на плоскости изображения $\mathbf{p} = (x \ y)^T$ как

$$w\tilde{\mathbf{p}} = w \begin{pmatrix} \mathbf{p} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}\mathbf{p}_0, \quad (3)$$

или

$$w \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & u & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\tilde{\mathbf{p}}$ — вектор однородных координат точки в плоскости изображения;

\mathbf{K} — матрица внутренних параметров камеры;

f_x и f_y — фокусные расстояния вдоль осей Ox и Oy плоскости изображения;

u — перекося осей в плоскости изображения;

c_x и c_y — координаты оптического центра камеры в плоскости изображения;

w — масштабный коэффициент.

Таким образом, зная матрицу внутренних параметров камеры, можно связать между собой точку в мировой системе координат с её проекцией на плоскости изображения следующим образом:

$$w\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{K}(\mathbf{R} | t) \tilde{\mathbf{p}}_w, \quad (5)$$

или

$$w \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & u & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

а значит, появляется возможность с высокой точностью определять координаты объектов по их изображениям. Это и является основной причиной необходимости калибровки камер.

Упрощённо уравнение (6) с учётом уравнения (2) при $z_0 \neq 0$ и $u = 0$ можно записать в виде

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f_x}{z_0} x_0 + c_x \\ \frac{f_y}{z_0} y_0 + c_y \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В действительности из-за несовершенства оптической системы камеры изображение оказывается под влиянием радиальной и тангенциальной дисторсии. Их влияние можно описать следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x x''(\mathbf{k}, \mathbf{p}, r) + c_x \\ f_y y''(\mathbf{k}, \mathbf{p}, r) + c_y \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x'y' + p_2(r^2 + 2x'^2) \\ y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x'y' \end{pmatrix}, \quad r^2 = x'^2 + y'^2;$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0/z_0 \\ y_0/z_0 \end{pmatrix}.$$

Векторы $\mathbf{k} = (k_1 \ k_2 \ k_3)$ и $\mathbf{p} = (p_1 \ p_2)$ называются соответственно коэффициентами радиальной и тангенциальной дисторсии. Для более точной калибровки камеры требуется также определить и эти коэффициенты.

Выполнение работы

Задание 1. Калибровка камеры с помощью доски ArUco-маркеров

Первое задание заключается в калибровке камеры с помощью доски ArUco-маркеров. Для калибровки использовалась доска размером 7x5 маркеров. Маркеры выбирались из словаря DIST_6X6_250. Доска представлена на рисунке 1.

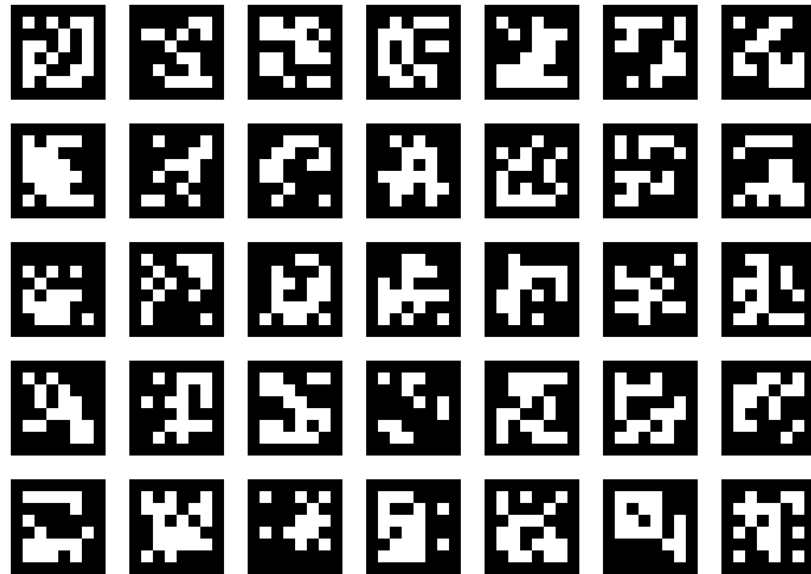


Рисунок 1 — Доска ArUco-маркеров

Калибровка камеры осуществлялась средствами библиотеки OpenCV на наборе из 30 изображений, представленных на рисунке 2.

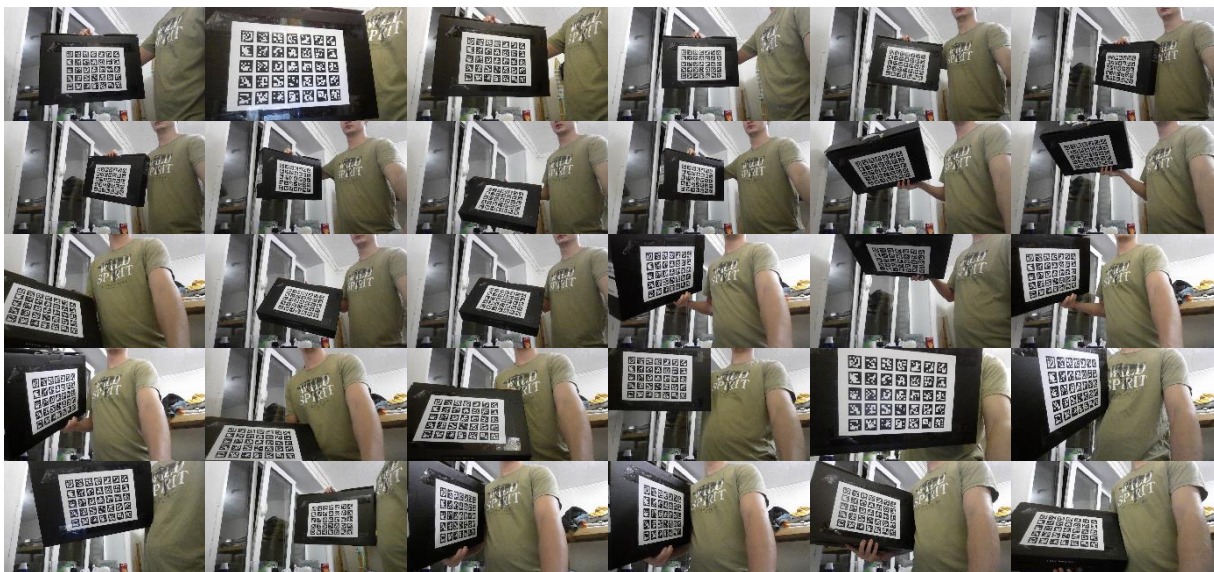


Рисунок 2 — Изображения для калибровки камеры

Задание 2. Калибровка камеры с помощью шахматной доски

Второе задание заключается в калибровке камеры с помощью шахматной доски. Для калибровки использовалась доска размером 9х6 клеток. Шахматная доска представлена на рисунке 3.

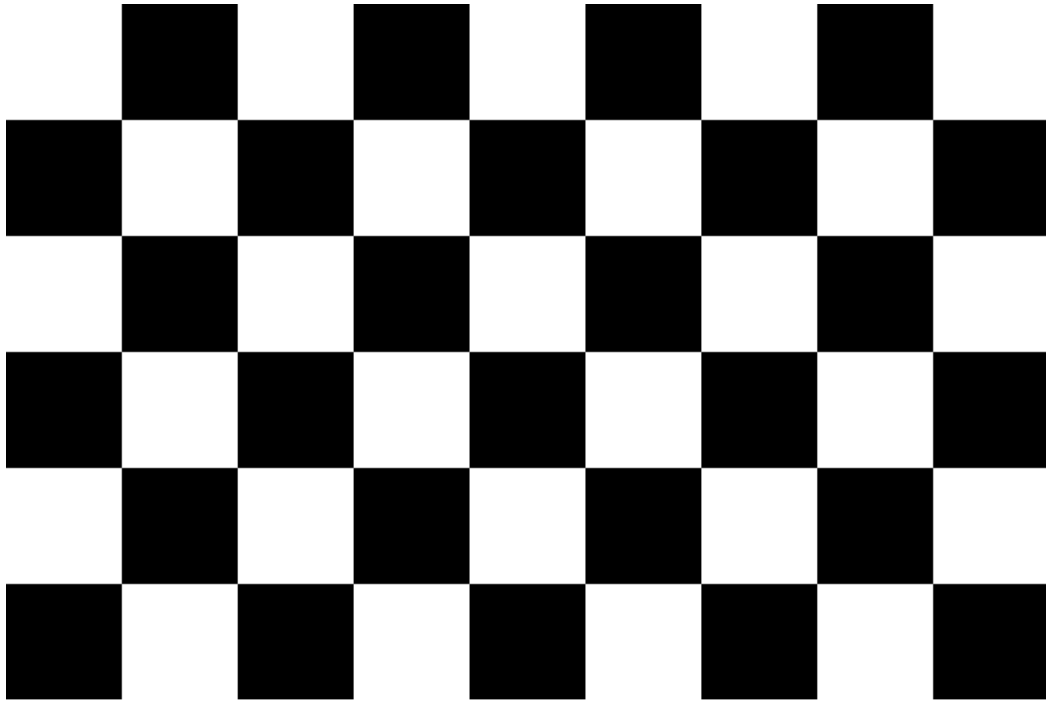


Рисунок 3 — Шахматная доска

Калибровка камеры осуществлялась средствами библиотеки OpenCV и среды MATLAB на наборе из 30 изображений, представленных на рисунке 4.

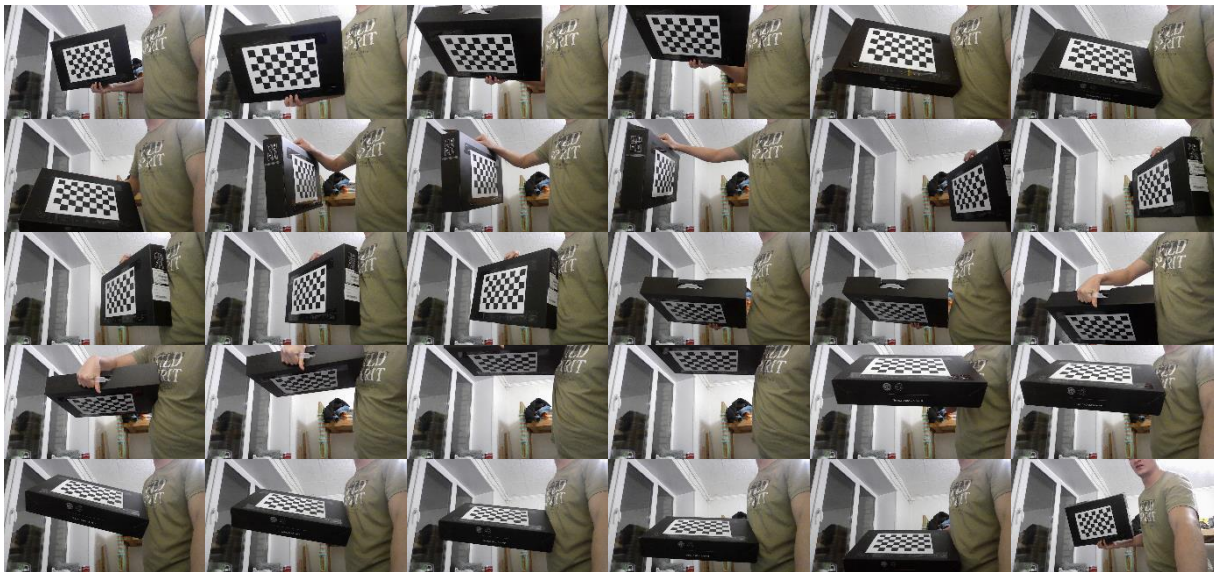


Рисунок 4 — Изображения для калибровки камеры

Параметры камеры, полученные в результате выполнения калибровочной программы с применением доски ArUco, написанной с использованием библиотеки OpenCV представлены ниже:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{(1)} &= \begin{pmatrix} 996,58 & 0 & 638,24 \\ 0 & 1238,67 & 324,5 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{k}^{(1)} &= (-7,95 \quad -29,32 \quad -1) \cdot 10^{-2}, \\ \mathbf{p}^{(1)} &= (-6,84 \quad 70,35) \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Параметры камеры, полученные в результате калибровки с применением шахматной доски в приложении Camera Calibrator среды MATLAB также представлены ниже:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{(2)} &= \begin{pmatrix} 959,64 & 0 & 0 \\ 0 & 962,89 & 0 \\ 649,44 & 378,28 & 1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{k}^{(2)} &= (3,56 \quad -18,78 \quad 26,48) \cdot 10^{-2}, \\ \mathbf{p}^{(2)} &= (0,48 \quad 0,35) \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметры камеры, полученные в результате выполнения калибровочной программы с применением шахматной доски, написанной с использованием библиотеки OpenCV представлены ниже:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{(2)} &= \begin{pmatrix} 1194,32 & 0 & 79,16 \\ 0 & 770,81 & -92,48 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{k}^{(2)} &= (2,69 \quad -3,06 \quad 10,7) \cdot 10^{-2}, \\ \mathbf{p}^{(2)} &= (-5,72 \quad -5,08) \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Как видно, матрицы внутренних параметров, коэффициенты радиальной и тангенциальной дисторсии, полученные в разных средах, достаточно разнятся.

Задание 3. Проецирование трёхмерного куба на плоскость изображения

Результат работы алгоритма с использованием коэффициентов (11) представлен на рисунке 5.

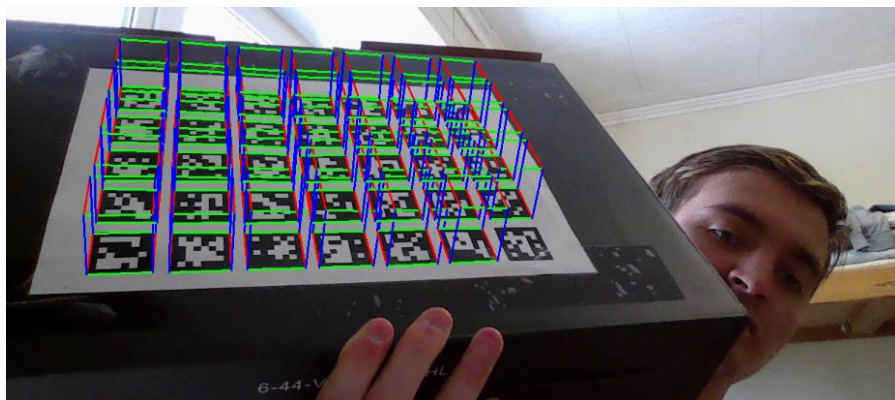


Рисунок 5 — Результат работы алгоритма с использованием коэффициентов (12)

Результат работы алгоритма с использованием коэффициентов (10) представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 — Результат работы алгоритма с использованием коэффициентов (10)

Результат работы алгоритма с использованием коэффициентов (11) представлен на рисунке 7.

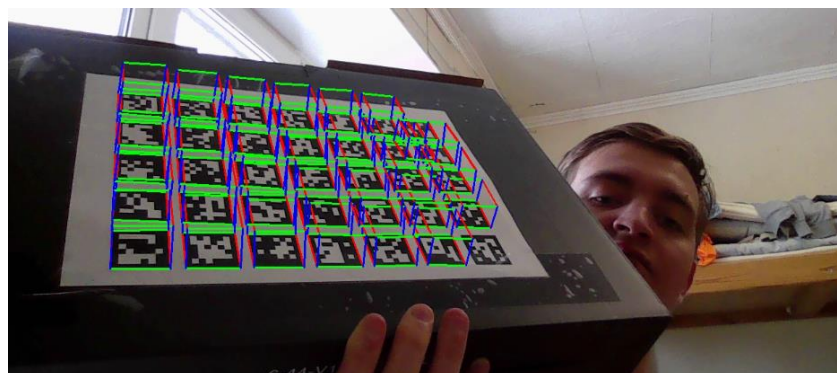


Рисунок 7 — Результат работы алгоритма с использованием коэффициентов (11)

Вывод. Наиболее точные параметры камеры получены при помощи калибровки с использованием ArUco маркеров и библиотеки OpenCV (9). Для наиболее точного определения параметров камеры следует выполнять калибровку с числом кадров 20 и выше.