

УДК 681.786.23

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО КАЛИБРОВКЕ
КАМЕР МОБИЛЬНОГО РОБОТА
ПРИ НАЛИЧИИ АППАРАТНЫХ
ДЕФЕКТОВ В СИСТЕМЕ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

**EXPERIMENTS ON CALIBRATION
OF MOBILE ROBOT CAMERAS
WITH HARDWARE DEFECTS
OF VISION SYSTEM**

*Сафин Р.Н., лаборант-исследователь;
Лавренов Р.О., младший научный сотрудник
лаборатории интеллектуальных
робототехнических систем Высшей
школы информационных технологий
и информационных систем Казанского
(Приволжского) федерального университета,
г. Казань, Россия;
Саха С.К., профессор Индийского
технологического института, г. Дели, Индия;
Магид Е.А., профессор, заведующий кафедрой
интеллектуальной робототехники,
лаборатория интеллектуальных
робототехнических систем, Высшая
школа информационных технологий
и информационных систем, Казанский
(Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия*

*Safin R.R., Research Assistant;
Lavrenov R.O., Research Associate of the Intelligent
Robotic Systems Laboratory, Higher Institute
for Information Technology and Information
Systems, Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia;
Saha S.K., Professor of the Indian Institute
of Technology Delhi, Delhi, India;
Magid E.A., Professor, Head of the Intelligent
Robotics Systems Laboratory, Higher Institute
for Information Technology and Information
Systems, Kazan federal university, Kazan, Russia*

Аннотация

Работа посвящена решению проблемы калибровки стереопары мобильного робота при наличии очевидных дефектов камер. Для идеальной калибровки стереопары необходимо, чтобы камеры находились на одном уровне по вертикали. Однако в процессе эксплуатации робота в реальных условиях камеры могут сместиться со своих позиций. Данный дефект усложняет процесс калибровки стереопары. Нами были проанализированы некоторые методы калибровки камер, и один из методов был реализован с различными параметрами шаблона калибровки.

Работа осуществлена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №17-48-160879. Часть работ выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Министерства науки и технологий и Государством Израиль (совместный проект ID 15-57-06010).

Abstract

This paper is devoted to solving the problem of a mobile robot stereo pair calibration in presence of obvious cameras malfunction. In order to achieve good stereo pair calibration cameras should have a same vertical level. However, due to severe conditions of robot operating, the robot cameras could be displaced relatively to their original locations. Then the calibration process becomes complicated due to the obtained hardware imperfection of the stereo pair. We reviewed several camera calibration methods and implemented one of them with different pattern parameters.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR, project ID 17-48-160879). Part of the work was supported by RFBR and Ministry of Science Technology & Space State of Israel (joint project ID 15-57-06010).

Ключевые слова: мобильный робот, калибровка, эксперименты, дефекты оборудования, ROS

Key words: mobile robot, calibration, experiments, hardware imperfection, ROS.

Введение

Калибровка камер является необходимым шагом в трехмерном техническом зрении для определения наиболее точной информации о различных метриках по двумерному изображению, включая размеры самих объектов и расстояние между ними [9]. Калибровка используется в таких прикладных задачах, как трехмерная реконструкция окружающей среды, интеллектуальные системы помощи управления автомобилем, системы обнаружения препятствий, методы одновременной локализации и картографирования [1].

Однако на практике приходится сталкиваться с некоторыми проблемами камер, связанными с функционированием аппаратной части, то есть с изначально имевшимися или приобретенными уже в процессе эксплуатации дефектами камер. В таком случае, необходимо определиться с наиболее подходящими алгоритмами калибров-

ки, которые позволят корректно откалибровать дефектную камеру. В своей работе мы используем камеры, установленные на российском мобильном роботе «Сервосила Инженер» [2]. Он оснащен стереопарой, одна из камер которой сместилась внутри корпуса робота после падения робота с большой высоты в процессе проведения экспериментов. Мы провели обзор некоторых методов калибровки камер, выбрали один из методов калибровки и рассмотрели его применимость в условиях неидеальной стереопары.

Система технического зрения робота

Система технического зрения (СТЗ) робота «Сервосила Инженер» включает в себя четыре камеры (рис. 1):

- широкоугольная камера заднего вида;
- передняя пара широкоугольных камер (стереопара);
- передняя камера с оптическим масштабированием.



Рис. 1. Голова робота «Сервосила Инженер»: расположение фронтальных камер

Как показано на фотографии с кадрами, полученными стереопарой робота в стационарном положении, левая и правая камеры стереопары показывают различающиеся кадры, с существенным смещени-

ем по вертикали (рис. 2). Это объясняется наклоном левой камеры под углом вверх относительно правой камеры. Таким образом, для реализации некоторых задач, например, для определения относительного

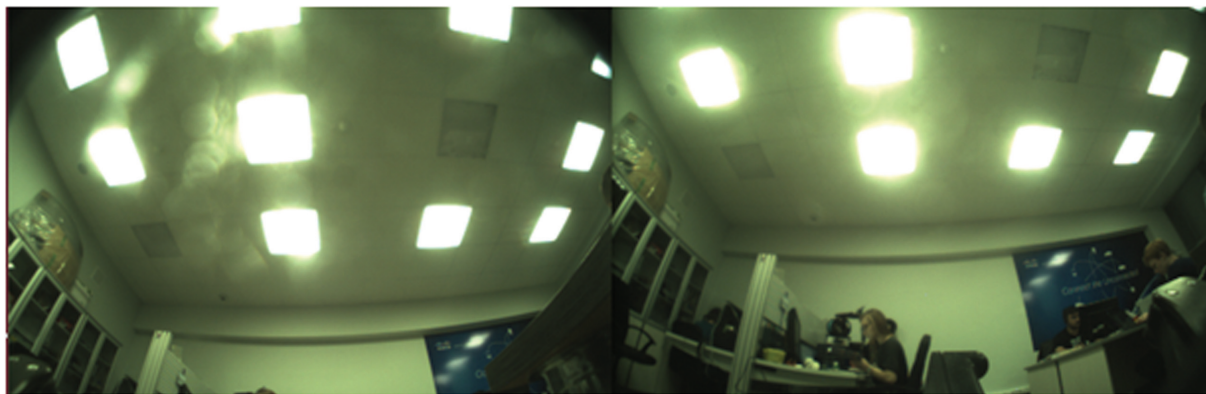


Рис. 2. Кадры с фронтальной стереопары робота «Сервосила Инженер»

расстояния до объектов на изображении при построении карты глубин, необходимо осуществить предварительную калибровку стереопары.

Обзор методов калибровки

Калибровка камер подразумевает вычисление внутренних и внешних параметров системы камеры [6]. Внутренние параметры включают в себя фокусное расстояние, главную точку (англ. principal point), коэффициент кривизны (англ. skew coefficient), радиальное искажение [4] и другие параметры. Внешние параметры могут включать в себя матрицу поворота и вектор перехода между координатной системой, связанной

с камерой, и абсолютной системой координат (англ. world coordinate system) [9, 6].

Метод калибровки с использованием трехмерных объектов осуществляется путем наблюдения за калибровочным объектом, трехмерная геометрия которого хорошо известна. Калибровочный объект может быть представлен в виде двух или трех плоскостей (рис. 3), ортогональных друг другу, или плоскости, подвергающейся заранее известному перемещению [7]. Данный метод обеспечивает высокоточную калибровку камер [3], однако требует дорогостоящее калибровочное оборудование и его тщательную настройку.

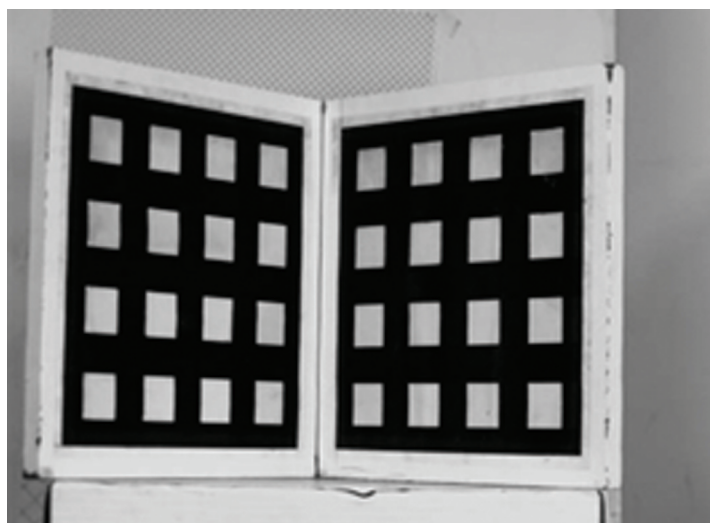


Рис. 3. Трехмерный шаблон калибровки [9]

В методах калибровки с использованием двумерной плоскости используется двумерный калибровочный шаблон (рис. 4), который размещается в нескольких раз-

личных позициях [5, 8]. В отличие от метода, где используется плоский двумерный шаблон, перемещающийся по заранее известной траектории [7], в данном методе

знание характера движения шаблона не обязательно. Данный метод калибровки является наиболее простым в реализации, так как создание шаблона калибровки является тривиальной задачей, и подготовка калибровки камеры легче, чем при калибровке на основе трехмерных объектов калибровки. Калибровка с использованием двумерного шаблона является наилучшим решением в большинстве случаев из-за его простоты и достаточно высокой точности [9].

Модель камеры

Для описания процесса отображения точки двумерного шаблона в трехмерном пространстве в плоскость изображения (англ. retinal plane) будет использована модель камеры с точечной диафрагмой (англ. pinhole camera model) (рис. 5) [3]. Трехмерные координаты обозначаются большими латинскими буквами: $M = [X, Y, Z]^T$, а двумерные координаты обозначаются маленькими латинскими буквами: $m = [u, v]^T$. Для обозначения расширенного вектора в гомогенных координатах, получаемого путем добавления 1 в конец вектора, используются следующие обозначения: $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ и $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$.

Образ трехмерной точки M на плоскости изображения, обозначаемый как m , образуется лучом, исходящим из точки M , проходящим через оптический центр C и пересекающим плоскость изображения. Точки m , M и C лежат на одной прямой. Отношение между трехмерной точкой M и ее проекцией m задается следующим образом:

$$s\tilde{m} = \underbrace{A[R \ t]}_P \tilde{M} \equiv P \tilde{M}, (1)$$

$$\text{где } A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (2)$$

$$\text{и } P = A[R \ t] (3)$$

где s – произвольный масштабирующий коэффициент, (R, t) – внешние параметры камеры, матрица поворота и вектор переноса, связывающие абсолютную систему координат и координатную систему камеры, и A – матрица внутренних параметров камеры, в которой (u_0, v_0) – координаты главной точки, α и β – коэффициенты масштабирования соответствующих осей u и v системы координат изображения, а γ обозначает коэффициент отклонения между осями системы координат изображения.



Рис. 4. Двумерный шаблон калибровки в виде шахматной доски

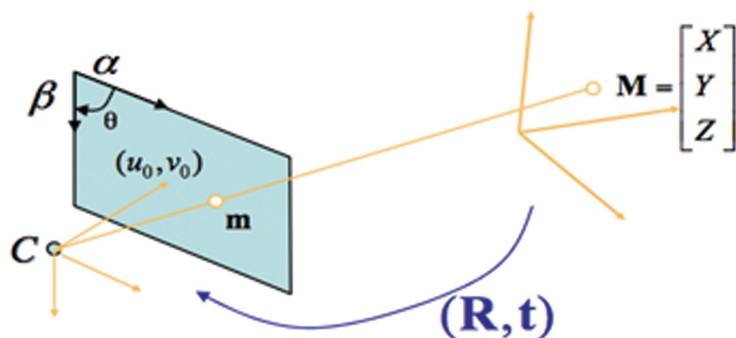


Рис. 5. Модель камеры с точечной диафрагмой [9]

Матрица P размерностью 3×4 называется матрицей проекции камеры (англ. projection matrix). Она совмещает в себе внешние и внутренние параметры камеры. Угол между осями системы координат изображения обозначается как θ (см. рис. 5), тогда $\gamma = \alpha \cot \theta$. В случае прямоугольных пикселей имеем: $\theta = 90^\circ$ и $\gamma = 0$. Матрица поворота R состоит из 9 элементов и имеет 3 степени свободы. Вектор переноса t имеет 3 параметра – (x, y, z) . Следовательно, имеем 6 внешних и 5 внутренних параметров. Таким образом, процесс калибровки заключается в нахождении внутренних и внешних параметров: A, R, t или P (уравнение 3).

Калибровка стереопары

Калибровка стереопары мобильного робота «Сервосила Инженер» проводилась на основе метода с двумерным шаблоном вида шахматной доски (рис. 5) [8]. Калибровка камер проводилась на основе пакета *stereo_camera_calibration* робототехнической операционной системы (ROS).

Для работы данного метода в качестве входных данных следует указать параметры шаблона: размер клетки и количество клеток по вертикали и по горизонтали. На начальном этапе алгоритму необходимо получить образцы изображений с отображенным на них шаблоном. Далее, на полученных изображениях, осуществляется поиск особых точек (мест пересечения черных квадратов шахматной доски). Благодаря известным параметрам шаблона (размеры и количество клеток) алгоритм способен вычислить координаты осо-

рых точек как в абсолютной системе координат, так и в системе координат изображения. Полученные данные в свою очередь позволяют вычислить параметры калибровки. Процесс калибровки заключается в перемещения шаблона относительно камеры:

- Перемещение шаблона в краевые положения в кадре
 - крайнее левое и крайнее правое положения (горизонтальная ось)
 - крайнее верхнее и крайнее нижнее положения (вертикальная ось)
- Заполнение области видимости камеры шаблоном
- Наклоненный шаблон

Были экспериментально апробированы различные размеры шаблона. Подвергались изменению количество клеток в шаблоне и размеры самих клеток. Изначально испытывался шаблон №1 размерностью 12×9 клеток и размером клетки в 46 мм (сторона клетки). До калибровки стереопары получаемые кадры отличались по высоте и обладали существенным искажением (см. рис. 6, например, прямые линии были изогнутыми). Результат показал, что при большом размере шаблона алгоритму калибровки не удастся правильно вычислить параметры и калибровка не дает ожидаемого результата (рис. 7, искривление осталось).

Далее применялся шаблон №2 меньшего размера: 10×7 клеток и размером клетки в 21 мм (сторона клетки). В результате калибровки кадры со стереопары практически выровнялись по высоте и искривление уменьшилось (рис. 8, 9).

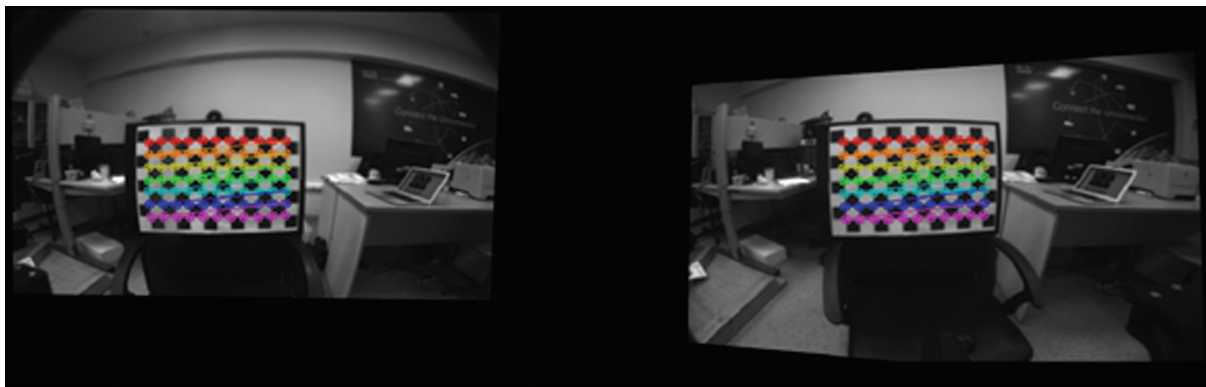


Рис. 6. Кадры, получаемые левой (слева) и правой (справа) камерами СТЗ, составляющими стереопару, до осуществления калибровки стереопары (шаблон №1)



Рис. 7. Кадры, получаемые левой (слева) и правой (справа) камерами СТЗ, составляющими стереопару, после осуществления калибровки стереопары (шаблон №1)



Рис. 8. Кадры, получаемые левой (слева) и правой (справа) камерами СТЗ, составляющими стереопару, после осуществления калибровки стереопары (шаблон №2)

Результаты

В нашей работе были проанализированы методы калибровки камер для систем технического зрения (СТЗ), и был выбран один из методов для калибровки стереопары мобильного робота «Сервосила Инженер». При помощи выбранного метода, была осуществлена калибровка. Практи-

ческой проблемой калибровки была асимметрия расположения двух камер относительно друг друга, полученная ранее в результате падения робота с большой высоты в процессе экспериментальной работы. Для решения данной проблемы не имелось возможности физически привести камеру в корректное состояние. В итоге, в резуль-

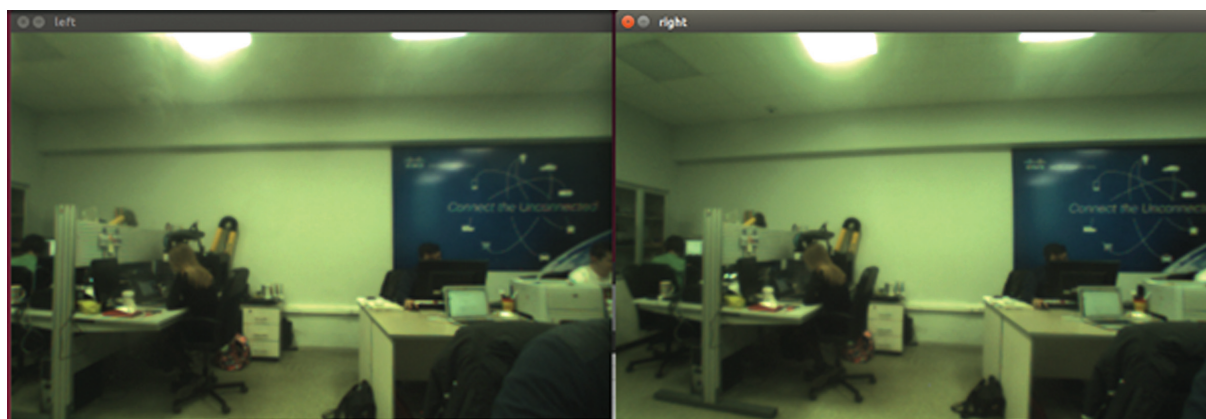


Рис. 9. Кадры, получаемые левой (слева) и правой (справа) камерами СТЗ, составляющими стереопару, после осуществления калибровки стереопары (шаблон №2)

тате калибровки кадры с обеих камер были выровнены программным путем. Однако информация, получаемая с оптических устройств СТЗ, уменьшилась, так как кадры приводились к одной высоте путем об-

резания. Были опробованы различные размеры шаблона калибровки. Эксперименты показали, что при большом количестве клеток на шаблоне алгоритм некорректно калибрует камеры или не калибрует вовсе.

Список литературы

1. Buyval A., Afanasyev I., and Magid E. Comparative analysis of ROS-based Monocular SLAM methods for indoor navigation// Proc. SPIE 10341, Ninth International Conference on Machine Vision. – 103411K. – 2017.
2. Alishev N., Lavrenov R., and Gerasimov Y. Russian mobile robot Servosila Engineer: designing an optimal integration of an extra laser range finder for SLAM purposes// International Conference on Artificial Life and Robotics. – 2018 (в печати).
3. Faugeras O. Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint. – MIT press. – 1993.
4. Fiala M., Shu C. Fully automatic camera calibration using self-identifying calibration targets // Techn. Rep. – 48306. – 2005. – P. 26.
5. Sturm, Peter F., and Stephen J. Maybank. On plane-based camera calibration: A general algorithm, singularities, applications // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Vol. 1. – 1999. – P. 432–437.
6. Suriansky J., Cmarada M. Analysis of methods for camera calibration in 3D scanning systems //Annals & Proceedings of DAAAM International. – 2012.
7. Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses // IEEE Journal on Robotics and Automation. – 3(4). – 1987. – P. 323–344.
8. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 22(11). – 2000. – P. 1330–1334.
9. Zhang Z. Camera calibration // Computer vision. – 2014. – P. 76–77.