

УДК 681.518.5

АВТОНОМНАЯ КАЛИБРОВКА БОРТОВОЙ КАМЕРЫ РОБОТА: ЭТАПЫ И ТРЕБОВАНИЯ КАЛИБРОВКИ

Р.Н. Сафин

*Институт информационных технологий и интеллектуальных систем
Казанский федеральный университет
Россия, 420008, Казань, Кремлевская ул., 35
E-mail: safin.ramil@it.kfu.ru*

Е.А. Магид

*Институт информационных технологий и интеллектуальных систем
Казанский федеральный университет
Россия, 420008, Казань, Кремлевская ул., 35
E-mail: magid@it.kfu.ru*

Ключевые слова: калибровка камер, техническое зрение, автономные системы, робототехника, киберфизические системы.

Аннотация: Исследование и разработка методов и алгоритмов автоматизации мобильных робототехнических систем (РТС) являются приоритетным направлением в области интеллектуальной робототехники. Автоматизация позволяет мобильным роботам более эффективно и безопасно выполнять задачи, исключая человеческий фактор и его негативные последствия. Одной из ключевых задач, требующих автоматизации, является поддержание высокого уровня точности калибровки бортовых камер РТС в процессе их эксплуатации для достижения надежного восприятия окружающей среды. В данной работе рассматривается система автономной калибровки бортовой камеры, закрепленной на многозвенном манипуляторе мобильной РТС. Представлены ключевые этапы калибровки камеры и требования к проведению калибровки, призванные обеспечить высокую точность и надежность, и сценарий работы системы автономной калибровки.

1. Введение

Исследование и разработка методов и алгоритмов автоматизации мобильных РТС является приоритетным направлением в области интеллектуальной робототехники. Автоматизация позволяет мобильным роботам более эффективно и безопасно выполнять задачи, минимизируя вмешательство человека и обеспечивая снижение временных и энергетических затрат выполняемых роботом операций, повышение точности и надежности используемых алгоритмов [1,2]. Одной из важных задач, требующих автоматизации, является калибровка бортовых камер мобильных РТС. Задача калибровки камеры состоит в корректном выравнивании параметров оптической системы камеры для достижения точного и надежного восприятия окружающей среды [3].

В процессе эксплуатации мобильные РТС подвергаются физическому воздействию со стороны окружающей среды. В результате такого воздействия оптические параметры бортовой камеры могут значительно измениться, что приводит к некорректным измерениям и затрудняет работу ключевых для мобильных РТС

алгоритмов, таких как визуальная локализация, картографирование и реконструкция сцены [4].

Обычно калибровка камер осуществляется человеком в ручном режиме в строго контролируемых лабораторных условиях [5]. Преимуществами ручной калибровки являются полный пошаговый контроль над процессом калибровки, тщательная настройка камеры к определенным условиям (в том числе к нестандартным), возможность применения экспертных знаний. Недостатки включают человеческий фактор, зависимость от квалификации оператора, большие временные затраты, наличие опасности для человека при работе в опасных или вредных условиях, сложность обеспечения высокого качества и согласованности данных для калибровки.

Автоматизация процесса калибровки камер позволяет частично либо полностью решить перечисленные проблемы. Данная работа посвящена вопросам автономной калибровки бортовой камеры мобильного робота, оснащенного многозвенным манипулятором; калибруемая камера располагается на фланце или последнем звене манипулятора. Рассматриваемые в работе этапы калибровки камеры, требования к проведению калибровки и сценарий работы системы автономной калибровки направлены на повышение эффективности калибровки камер для обеспечения точного визуального восприятия окружающей среды мобильным РТС.

2. Классический метод калибровки

Калибровка камеры заключается в вычислении параметров, определяющих взаимосвязь (проекцию) между точками трехмерного пространства и пикселями двумерного изображения. Параметры такой проекции могут быть заданы в явном или неявном виде в зависимости от выбранной математической модели камеры. Наиболее распространенной является модель идеальной камеры, или «камера-обскура» [6]. В данной модели осуществляется перспективная проекция точек трехмерного пространства на двумерную плоскость изображения, которая задается в явном виде через уравнения коллинеарности, см. формулу (1).

$$(1) \quad s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & t_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix},$$

где x_w, y_w, z_w – координаты точки в мировой системе координат (в метрах); u, v – координаты проекции точек на плоскость изображения (в пикселях); c_x, c_y – оптический центр (в пикселях); f_x, f_y – фокусное расстояние (в пикселях), s – коэффициент масштабирования; $R_{3 \times 3}, t_{3 \times 1}$ – матрица поворота и вектор перемещения, задающих трансформацию из мировой системы координат в систему координат камеры.

Камеры также вносят оптические искажения в получаемые изображения. Основной причиной возникновения искажений являются неровности на линзах. Искажения моделируются различными математическими нелинейными моделями, например, моделями радиальной и тангенциальной дисторсии.

Параметры камеры разделяют на внешние и внутренние. Внутренние параметры определяют каким образом лучи света проходят через линзу на плоскость изображения. Они включают в себя фокусное расстояние, оптический центр и коэффициенты искажения (дисторсии). Внешние параметры определяют пространственное расположение системы координат камеры относительно мировой системы координат. В роли мировой системы координат обычно выступает специально изготовленный калибровочный объект (КО).

Процесс калибровки заключается в использовании КО с известными геометрическими характеристиками и наличием обнаруживаемых контрольных точек. Примером такого объекта является плоскость с нанесенной на нее шаблоном шахматной доски (см. рис. 1). В роли контрольных точек в данном случае выступают углы на пересечении белых и черных клеток.

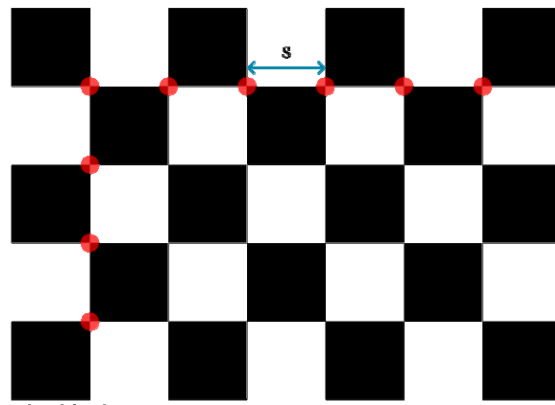


Рис. 1. Калибровочный объект с шаблоном шахматной доски размерностью 6×4 , размер клетки составляет $S = 39$ мм. Контрольные точки выделены красными кругами.

Камера фотографирует КО в различных пространственных расположениях, устанавливаемых человеком вручную. На основе полученных изображений алгоритм калибровки выявляет соответствия между контрольными точками и их проекциями, строит систему уравнений коллинеарности и определяет параметры камеры. Вычисление параметров, как правило, осуществляется методами нелинейной оптимизации [7,8]. Результаты калибровки используются для коррекции искажений в будущих изображениях, позволяя РТС более точно воспринимать и анализировать окружающую среду.

3. Система автономной калибровки

Калибровка камер состоит из следующих ключевых этапов: сбор изображений КО, обработка данных и вычисление параметров камеры. В рамках решения задачи автономной калибровки бортовой камеры мобильного РТС дополнительно возникают проблемы выбора КО (шаблона) и поиска места для его закрепления на корпусе робота.

В первую очередь необходимо определиться с размером КО [9], что обусловлено ограничениями размеров и наличием свободного места на корпусе робота. Наиболее эффективными с точки зрения простоты размещения и создания, эффективности обнаружения при частичной видимости и при различных (порой экстремальных) углах обзора являются планарные КО с координатными метками [10].

Следующей проблемой является поиск места для закрепления КО на корпусе мобильного робота. Проблема обусловлена наличием кинематических ограничений (например, робототехнического манипулятора) и особенностями строения мобильного робота, а также необходимостью увеличения количества конфигураций (пространственных расположений) бортовой камеры, обеспечивающих необходимый уровень видимости КО. Тривиальным решением является полный перебор всех возможных размещений, что может потребовать создание виртуальной модели мобильного робота для ускорения процесса выбора.

На этапе сбора изображений осуществляется передвижение бортовой камеры относительно КО и регистрация изображений – обнаружение шаблона и сохранение изображения в базу данных. Для достижения высокоточной и надежной калибровки необходимо соблюдение следующих требований:

- вариативность пространственных расположений камеры относительно КО;
- полное либо частичное нахождение КО в кадре;
- обеспечение фильтрации конфигураций на основе ограничений используемой математической модели камеры;
- обеспечение фильтрации конфигураций, обусловленной кинематическими ограничениями робототехнического манипулятора;
- гарантия непрерывного статического баланса (устойчивости) мобильной платформы РТС;
- обеспечение контроля плавности движения манипулятора;
- контроль уровня нагрузки сочленений (сервоприводов) манипулятора.

Вышеперечисленные требования необходимо интегрировать в алгоритм генерации пространственных расположений бортовой камеры. Необходимо отметить, что задача генерации пространственных расположений сводится к задаче генерации конфигураций манипулятора.

На следующем этапе осуществляется обработка (фильтрация) собранных данных, согласованность и корректность которых обеспечивается:

- проверкой наличия размытых изображений методами частотного анализа;
- проверкой изображений на согласованность ошибок перепроекции: хаотичность векторов, контроль стандартного отклонения;
- корректной идентификацией КО и его контрольных точек.

Изображения, которые не прошли вышеуказанные проверки, удаляются из финального набора данных для калибровки.

На заключительном этапе вычисляются параметры бортовой камеры в рамках выбранной математической модели камеры. Проблема калибровки формулируется в виде задачи нелинейной оптимизации, и возникает характерная проблема попадания в локальные экстремумы оптимизируемой функции стоимости, представляющей из себя общую ошибку перепроекции по всем кадрам. Решением данной проблемы является регуляризация или подбор начальных значений параметров калибровки. Корректный подбор начальных значений внутренних параметров калибровки не всегда представляется возможным, но часть параметров доступна в технической документации к используемой камере. Внешние параметры задают трансформацию между системами координат камеры и КО. Обладая знаниями о конфигурации манипулятора, можно вычислить приближенную трансформацию, например, методом прямой кинематики. Для получения более точных значений трансформаций необходимо провести калибровку системы «камера – КО».

Предлагается следующий сценарий работы системы автономной калибровки бортовой камеры:

- подготовительный этап: осуществляется выбор КО и шаблона, выбирается оптимальное по выбранным критериям место для его закрепления на корпусе робота, анализируется математическая модель камеры и кинематика робототехнического манипулятора для выявления ограничений;
- генерация оптимальных по выбранным критериям конфигураций манипулятора (то есть пространственных расположений калибруемой камеры) для выполнения сбора калибровочных данных;

- сбор данных: оптимальное по выбранным критериям передвижение камеры относительно закрепленного КО по сгенерированным конфигурациям, регистрация изображений с фильтрацией кадров по выбранным критериям качества;
- вычисление параметров камеры: решение нелинейной задачи оптимизации с использованием априорных данных о внешних и внутренних параметрах.

Первые два пункта могут быть выполнены в лабораторных условиях специалистом, в то время как пункты 3-4 выполняются непосредственно РТС в автономной режиме. Запуск процесса автономной калибровки может осуществляться по команде оператора, по заранее подготовленному сценарию (планировщик, таймер) или автоматически, в случае обнаружения сбоя в калибровке камеры или регистрации внешнего воздействия.

4. Заключение

В данной работе рассматриваются вопросы автономной калибровки бортовой камеры мобильного робота, оснащенного многозвенным манипулятором; калибруемая камера располагается на фланце или последнем звене манипулятора. Представлены ключевые этапы калибровки камеры и требования к проведению калибровки, призванные обеспечить высокую точность и надежность калибровки. Предложен сценарий работы системы автономной калибровки, который позволяет поддерживать высокий уровень точности бортовой камеры без вмешательства человека. Предложенный подход может быть расширен для стерео конфигураций и мультимодальных систем осязательного ощущения на основе визуальных датчиков.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

Список литературы

1. Li J., Liu Z. Efficient camera self-calibration method for remote sensing photogrammetry // *Optics express*. 2018. Vol. 26, No. 11. P. 14213-14231.
2. Tsoy T., Safin R., Magid E., Saha S. K. Estimation of 4-DoF manipulator optimal configuration for autonomous camera calibration of a mobile robot using on-board templates // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2021. P. 1-6.
3. Tsoy T., Safin R., Martinez-Garcia E. A., Roy S. D., Saha S. K., Magid E. Exhaustive simulation approach for a virtual camera calibration evaluation in Gazebo // 2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). 2022. P. 233-238.
4. Zhang Y. J. Camera calibration // 3-D Computer Vision: Principles, Algorithms and Applications. Singapore: Springer Nature Singapore. 2023. P. 37-65.
5. Ren Y., Hu F. Camera calibration with pose guidance // ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). 2021. P. 2180-2184.
6. Juarez-Salazar R., Zheng J., Diaz-Ramirez V. H. Distorted pinhole camera modeling and calibration // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59, No. 36. P. 11310-11318.
7. Hu G., Zhou Z., Cao J., Huang H. Non-linear calibration optimization based on the Levenberg-Marquardt algorithm // *IET Image Processing*. 2020. Vol. 14, No. 7. P. 1402-1414.
8. Fetić A., Jurić D., Osmanković D. The procedure of a camera calibration using Camera Calibration Toolbox for MATLAB // 2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO. 2012. P. 1752-1757.
9. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2000. Vol. 22, Vol. PAMI-11. P. 1330-1334.
10. Wang J., Olson E. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 4193-4198.