

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра системного программирования

Петров Алексей Андреевич

Автоматическая калибровка внешних параметров широкоугольных камер в автомобильных системах кругового обзора

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель,
канд. физ.-мат. наук, ст. преп.
Д.В.Луцив

Консультант,
ст. преп.
А.А.Пименов

Рецензент,
филиал корпорации
“ЛГ Электроникс Инк.”,
руководитель проекта
В.В.Новосельский

Санкт-Петербург
2020

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Software Engineering

Aleksei Petrov

Automatic extrinsic calibration of wide-angle
cameras in automotive around view
monitoring systems

Master's thesis

Scientific Supervisor,
Candidate of Physics and Mathematics
Senior Lecturer
Dmitry Luciv

Consultant,
Senior Lecturer
Alexander Pimenov

Reviewer,
“LG Electronics”,
Project Leader
Vadim Novoselskii

Saint-Petersburg
2020

Оглавление

Введение	5
Постановка задачи	6
1 Литобзор	7
1.1 Описание предметной области	7
1.1.1 Система кругового обзора	7
1.1.2 Геометрия проективных камер	9
1.2 Анализ и сравнение существующих методов решения задачи автоматической калибровки	11
1.2.1 Методология анализа	11
1.2.2 Natroshvili и Scholl, 2017: “Automatic extrinsic calibration methods for Surround View Systems”	12
1.2.3 Liu и др., 2019: “Online Camera Pose Optimization for the Surround-view System”	12
1.2.4 Choi и др., 2018: “Automatic Calibration of an Around View Monitor System Exploiting Lane Markings”	13
1.2.5 Zhao и др., 2014: “An automatic online camera calibration system for vehicular applications”	14
1.2.6 Heng, Li и Pollefeys, 2013: “CamOdoCal: Automatic intrinsic and extrinsic calibration of a rig with multiple generic cameras and odometry”	14
1.2.7 Heng, Furgale и Pollefeys, 2014: “Leveraging Image- Based Localization for Infrastructure-Based Calibration of a Multi-Camera Rig”	15

1.2.8	Knorr, Niehsen и Stiller, 2013: “Online extrinsic multi-camera calibration using ground plane induced homographies”	16
1.2.9	Knorr, 2018: “Self-Calibration of Multi-Camera Systems for Vehicle Surround Sensing”	16
1.2.10	Выводы	17
2	Основной подход	19
2.1	Внешнесистемные требования	19
2.2	Требования к системе	20
2.3	Направление реализации	21
3	Архитектура системы	23
3.1	Высокоуровневые модули	23
3.2	Состояния системы	24
3.3	Поток данных	26
4	Прототип	27
4.1	Система координат	27
4.2	Сегментация поверхности земли	28
4.3	Сопоставление точек	28
4.4	Фильтр Калмана	30
4.5	Финальная сшивка	34
5	Апробация	35
5.1	Наборы данных	35
5.2	Проверка эффективности	35
	Заключение	38
	Список литературы	39

Введение

В современных автомобилях все чаще используются многокамерные системы кругового обзора. Применение таких систем помогает водителю лучше ориентироваться в окружающей обстановке с помощью виртуальных видов, таких как проекция на плоскость земли, вид на колеса или псевдо-трехмерная панорама. Также, множество программ и сервисов, параллельно работающих на вычислительном блоке мультимедиа системы, используют информацию с камер для обнаружения определенных событий и оповещения водителя о нештатной ситуации (появление пешехода, пересечение траекторий транспортных средств и др.). Для обеспечения согласованного представления об окружающей среде, все программы и сервисы, использующие видеокадры, должны иметь полную информацию о внутренних и внешних параметрах каждой камеры.

Внутренние параметры (фокус, центр оптической оси и коэффициенты нелинейных искажений) вычисляются при производстве конкретной камеры и не меняются в процессе эксплуатации. В отличие от них, внешние параметры (относительное расположение и направление с привязкой к плоскости земли) зависят от модели автомобиля и даже от процесса монтажа на машину и со временем могут изменяться. При производстве автомобиля калибровка внешних параметров камер кругового обзора происходит в конце линии, после того, как машина уже на ходу и камеры зафиксированы в своих посадочных местах. Работник завода заезжает на машине в специально оборудованную зону с расположенным на полу калибровочным объектом (чаще всего - паттерн из черных и белых квадратов) и производит процедуру калибровки. Знание всех физических размеров такого объекта и видимость частей паттерна из всех калибруемых камер позволяют достаточно точно вычислить их внешние параметры.

Основная проблема, связанная с этим производственным процессом, со-

стоит в том, что внешние параметры камер привязываются к системе координат калибровочного объекта и плоскости земли, и действительны только на момент проведения процедуры. Но существуют факторы, которые меняют взаимное расположение камер и плоскости земли во время эксплуатации автомобиля - это количество людей в машине, размер колес, давление в шинах, люфт зеркал, изменяемая геометрия подвески и др. В ситуации, когда внешние параметры камер потеряли актуальность, требуется повторение процедуры калибровки в специализированном сервисном центре с использованием калибровочных объектов, аналогичных заводским.

Для того, чтобы улучшить характеристики системы кругового обзора за счет своевременного реагирования на изменение взаимного положения камер относительно друг друга и плоскости земли, крайне желательно иметь возможность автоматической калибровки внешних параметров в естественной ситуации вождения при езде по обычным городским дорогам. Реализация алгоритма автоматической калибровки на аппаратной платформе системы кругового обзора позволит избавиться от необходимости в содержании специальных калибровочных зон на заводе и в сервисных центрах, а поэтому поспособствует удешевлению производства и обслуживания машины.

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка эффективной и производительной программной системы автоматической калибровки внешних параметров сверхширокоугольных камер кругового обзора автомобиля в естественной ситуации вождения по городским дорогам. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи.

- Анализ существующих методов решения задачи автоматической калибровки системы камер.
- Выбор основного подхода к реализации.
- Создание архитектуры системы.
- Создание прототипа.
- Апробация системы на реальных данных.

Глава 1

Литобзор

1.1 Описание предметной области

1.1.1 Система кругового обзора

Система кругового обзора является важным источником информации для водителей, позволяющим следить за пространством, окружающим транспортное средство. Типичная система кругового обзора состоит из четырех сверхширокоугольных камер, расположенных по периметру автомобиля. Передняя и задняя камеры обычно установлены в бамперах, две боковые - в корпусах наружных зеркал. Все видеокамеры имеют большое разрешение, что позволяет передавать изображение с высокой степенью детализации [1].

Пересечение полей зрения камер позволяет объединять информацию с них и создавать различные бесшовные виртуальные виды, которые помогают водителю лучше оценить обстановку и легче маневрировать при наличии препятствий или других транспортных средств. Углы обзора камер позволяют изображениям покрыть практически всю площадь вблизи автомобиля.

Для получения метрических величин, таких как углы и расстояния на изображениях камер, а также для создания согласованного представления об окружающей среде, необходимо знать как геометрические характеристики изображений отдельных камер (внутренние параметры), так и их относительные положения и углы ориентации (внешние параметры) в системе координат, привязанной к поверхности земли.

Внутренние параметры камеры - это фокальные расстояния по осям, координаты центра оптической оси, формат сенсорной матрицы, а также на-

бор параметров модели нелинейного искажения линзы объектива [2]. Все эти числа вычисляются при производстве конкретной камеры и в данной работе считаются известными, хотя и подразумевается, что их значения могут содержать небольшую погрешность.

Внешние параметры задают ориентацию и положение камеры в мировой системе координат [2] и вычисляются при производстве автомобиля. Машина заезжает в специально оборудованную зону, где механизм ее фиксирует в центральном положении относительно набора калибровочных объектов. Чаще всего это шахматные паттерны, т.к. они легко позволяют локализовать проекции точек пересечения пар черных и белых квадратов. Известные трехмерные точки и их проекции вместе с известными внутренними параметрами дают достаточно информации для вычисления ориентации и положения центра каждой камеры в заранее заданной системе координат. Такая процедура достаточно эффективна и проста, но обладает существенным недостатком. Проблема состоит в привязке к конкретной системе координат, актуальной на момент проведения калибровки. Также, в процессе дальнейшего использования автомобиля положение и направления камер как между собой, так и относительно плоскости земли, может изменяться из-за различных факторов, а это напрямую влияет на визуальное качество виртуальных видов. Проблему частично решает возможность проведения повторной калибровки в сервисном центре, но это неудобно и требует лишних усилий со стороны производителя автомобиля по организации такой возможности, обучению персонала и т.д. Но в первую очередь это неудобно владельцу транспортного средства, так как требует временных, а по истечении гарантийного срока, также и материальных затрат.

Таким образом, минусы калибровки очевидны - эта процедура относительно дорогостоящая, требует экспертного контроля, заранее подготовленных калибровочных объектов и специально выделенного дополнительного пространства. Поэтому, естественным запросом на улучшение системы кругового обзора является автоматическая калибровка входящих в неё камер в ситуации естественного вождения.

1.1.2 Геометрия проективных камер

Цель данного раздела - это краткое описание модели камер, которая использовались в данной работе [3], а также введение соответствующих математических обозначений. Геометрические ограничения, накладываемые на двумерные проекции трехмерных объектов используются в данной работе в качестве основы для автоматической калибровки, поэтому им уделено особое внимание.

Следующие уравнения описывают модель проективной камеры:

$$P = K[R|t] \quad (1.1)$$

$$x = PX \quad (1.2)$$

где R, t - матрица поворота и вектор переноса в глобальной системе координат, относительно центра камеры, K - матрица внутренних параметров. P преобразует обобщенные координаты X трехмерной точки в пространстве в обобщенные координаты x двумерной точки на плоскости (Рис. 1.1).

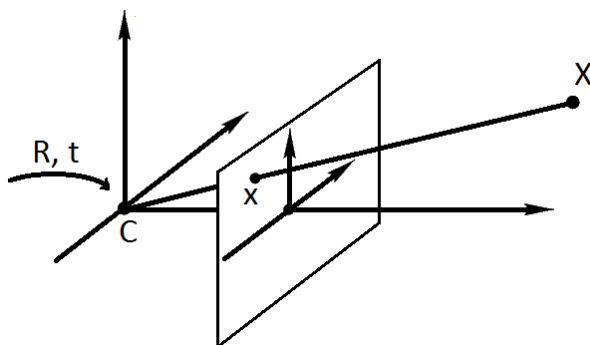
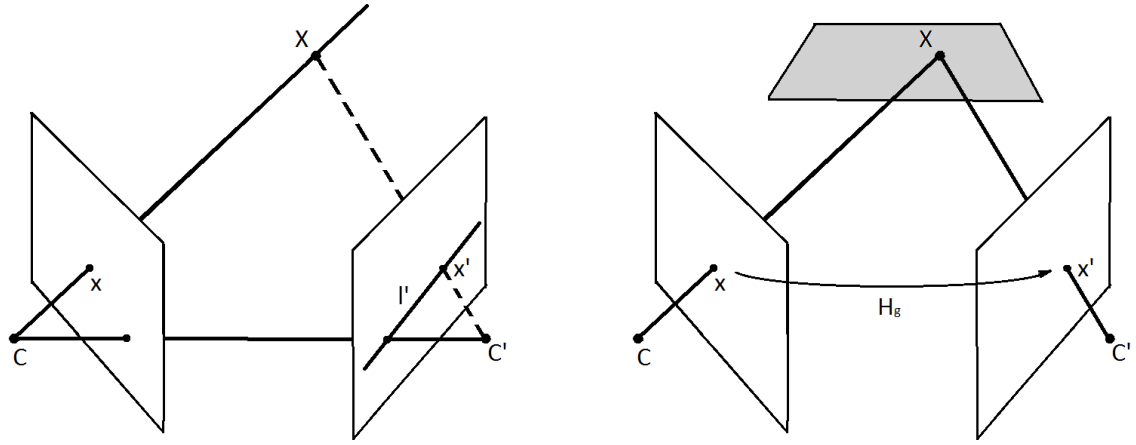


Рис. 1.1: Проективная камера

При добавлении второй камеры, возникают ограничения на проекции трехмерной точки. Одно из них связывает обобщенные координаты двумерных проекций следующим уравнением:

$$x'^T F x = 0 \quad (1.3)$$

где F - матрица 3 на 3 (фундаментальная матрица). Уравнение описывает тот факт, что проекция трехмерной точки на другой камере обязательно лежит на прямой линии (эпиполярная линия) l' - проекции луча направленного из центра первой камеры на эту точку (Рис. 1.2а).



(a) Проекция произвольной трехмерной точки лежит на эпиполярной линии

(b) Координаты проекций точки на плоскости связаны гомографией

Рис. 1.2: Геометрические ограничения двух проективных камер

Также, если имеются две камеры $P = K[I|0]$ и $P' = K'[R|t]$, и плоскость $\pi = (n^T, d)^T$ (Рис. 1.2b), то преобразование координат из плоскости первой в плоскость второй камеры задается уравнением:

$$H_g = K'(R - tn^T/d)K^{-1} \quad (1.4)$$

где H_g - матрица 3 на 3, обратимое проективное преобразование (гомография). Таким образом, двумерные проекции точек лежащих на плоскости (в данной работе это плоскость земли), удовлетворяют следующему уравнению:

$$x' = H_g x \quad (1.5)$$

Реальные камеры помимо прочего отличаются от проективной модели наличием нелинейных искажений от линз. Существует множество моделей таких искажений. В данной работе внутренние параметры камер, в том числе и нелинейные искажения считаются известными, поэтому для простоты будем считать все камеры одинаковыми и обозначать полное преобразование координат из плоскости камеры в координаты на изображении как $\kappa(x)$. Тогда уравнение 1.5 для координат на оригинальном изображении становится:

$$x' = \kappa((R - tn^T/d)\kappa^{-1}(x)) \quad (1.6)$$

1.2 Анализ и сравнение существующих методов решения задачи автоматической калибровки

1.2.1 Методология анализа

Исследованы научные работы по тематике автоматической калибровки системы камер, закрепленных на любой движущейся платформе (не обязательно относящихся к системе кругового обзора). Анализ и сравнение научных работ проводилось по следующим критериям.

- Необходимо ли начальное приближение значений внешних параметров, и если так, то насколько близко оно должно быть к реальным значениям.
- Какой набор внешних параметров вычисляются автоматически (количество степеней свободы).
- Используется ли информация о движении автомобиля (одометрия).
- Что является калибровочными объектами.
- Используется ли информация из пересекающихся полей зрения камер.
- Насколько долго теоретически может работать реализация алгоритма или его частей на встроенной системе - секунды, минуты или часы. Согласно этому критерию, решениям присваивалось три уровня относительной вычислительной сложности - низкая, средняя и высокая.

Также, обращалось внимание на надежность предложенного подхода. Проверялось присутствие эвристических методов и существенных ограничений для работы алгоритма.

Основной целью анализа являлся поиск решений и идей, которые имеют большой потенциал для промышленной реализации и применимы в данной работе.

1.2.2 Natroshvili и Scholl, 2017: “Automatic extrinsic calibration methods for Surround View Systems”

В статье [4] описывается три метода для калибровки внешних параметров системы кругового обзора, два из которых помогают автоматизировать данный процесс. Несмотря на то, что данные приемы позволяют упростить калибровку на заводе, подходы, рассмотренные в этой работе неприменимы для решения задачи о вычислении внешних параметров в процессе эксплуатации автомобиля, так как связаны с использованием заранее известных калибровочных объектов - шахматных паттернов.

Начальное приближение не используется. Вычисляются абсолютные значения всех внешних параметров камер. Одометрия для калибровки не используется. Калибровочными объектами являются заранее известные паттерны, хоть и расположенные в неизвестных местах. Пересечение полей зрения не требуется, каждая камера калибруется отдельно. Вычислительная сложность низкая.

1.2.3 Liu и др., 2019: “Online Camera Pose Optimization for the Surround-view System”

В работе [5] описывается метод автоматической калибровки внешних параметров системы AVM с помощью локальной минимизации фотометрической ошибки пересечения наземных проекций кадров с камер. К сожалению, глобальный минимум фотометрической ошибки в общем случае не может быть найден данным методом, поэтому, чтобы использовать этот подход, нужно уже иметь достаточно точную оценку внешних параметров камер. Алгоритм возможно применять как финальный этап в более сложной системе по доведению сшивки наземных проекций до оптимального состояния. Также, из проблем подхода, стоит отметить, что присутствие объектов вне плоскости земли может негативно повлиять на сходимость алгоритма.

Таким образом, требуется очень близкое начальное приближение внешних параметров. Вычисляются гомографии, а не углы ориентации и позиции камер напрямую. Одометрия не используется. Никаких калибровочных объектов не требуется. Активно используются области пересечения полей зрения камер. Вычислительная сложность низкая.

1.2.4 Choi и др., 2018: “Automatic Calibration of an Around View Monitor System Exploiting Lane Markings”

В статье [6] предлагается метод автоматической калибровки камер системы кругового обзора в естественной ситуации вождения по прямым участкам дорожной разметки. Авторы полагаются на то, что разметка имеется почти во всех дорожных ситуациях и очень часто присутствует в пересечении полей зрения соседних камер. Алгоритм начинается с нахождения прямых полос дорожной разметки по изображениям с каждой из камер отдельно. Неправильно найденные полосы отбрасываются путем статистического анализа. Как только собрано достаточное количество прямых, по ним калибруются передняя и задняя камеры, а затем, с помощью результатов этой предварительной калибровки - левая и правая. Авторы утверждают, что двухэтапный подход необходим, поскольку боковые камеры не могут быть полностью откалиброваны сами по себе из-за недостающей информации. После этого исследуются полосы разметки, присутствующие в пересечении полей зрения соседних камер. Первоначальные результаты калибровки итеративно уточняются.

Данная процедура калибровки эффективна и не требует больших вычислительных ресурсов, но имеет и достаточно серьезные недостатки. Предложенный алгоритм предназначен только для вычисления углов ориентации камер и предполагает, что их расположение известно заранее и не меняется. Также, предположение о том, что разметка существует практически во всех дорожных ситуациях и видна на изображениях с соседних камер слишком ограничивает возможности получения актуальных внешних параметров. Данный подход не помогает решить проблему изменения геометрии подвески автомобиля во время его эксплуатации. Также, присутствие объектов вблизи машины может привести к неправильной работе алгоритма.

Начальное приближение неизвестных внешних параметров не требуется. Вычисляются только углы ориентации камер. Одометрия в данном методе никак не применяется. В качестве калибровочных объектов используются прямые участки дорожной разметки. Обработка информации из пересекающихся полей зрения является частью алгоритма. Вычислительная сложность низкая.

1.2.5 Zhao и др., 2014: “An automatic online camera calibration system for vehicular applications”

В алгоритме автоматической калибровки, описанном в статье [7], тоже используются полосы дорожной разметки в качестве калибровочных объектов. В отличие от [6] количество полос не ограничено, а их форма не ограничивается прямыми линиями или любыми другими заранее определенными моделями. Из внешних параметров калибруются только углы тангажа и рыскания установленных камер. Угол крена предполагается нулевым. Все остальные параметры считаются известными и не меняются. На каждом кадре с камер вычисляются точки схода сегментов полос дорожной разметки. Оценивается среднее положение точки с помощью взвешенного метода наименьших квадратов с фильтрацией выбросов методом RANSAC¹. Полученные точки схода отслеживаются во времени фильтром Калмана для лучшей согласованности и надежности. Авторы утверждают, что метод позволяет оценить углы тангажа и рыскания камеры при изначальной максимальной ошибке до 4 градусов.

Обобщая, алгоритм можно рассматривать только как часть более сложной системы автоматической калибровки. Требуется слишком близкое приближение оцениваемых параметров. Для каждой камеры вычисляется только два параметра из шести. Одометрия не используется, пересечение полей зрения камер тоже. Калибровочными объектами являются сегменты линий дорожной разметки. Вычислительная сложность низкая.

1.2.6 Heng, Li и Pollefeys, 2013: “CamOdoCal: Automatic intrinsic and extrinsic calibration of a rig with multiple generic cameras and odometry”

Работа [8] посвящена разработке универсального решения по автоматизации процесса калибровки внутренних и внешних параметров системы камер на транспортном средстве. В качестве ключевого элемента алгоритма используется одометрия. Сначала производится калибровка внутренних параметров каждой камеры с помощью заранее известного паттерна. Для калибровки внешних параметров требуется запись набора кадров с каждой камеры в

¹(англ.) random sample consensus

течение непродолжительного промежутка времени в естественной ситуации вождения. Используя методы SLAM¹, одновременно находятся трехмерная карта местности и преобразования из координатных систем камер в координатную систему сенсора одометрии. Самая ресурсоемкая часть алгоритма - это глобальная нелинейная оптимизация всех параметров и координат опорных точек. Авторы создали и опубликовали инструмент, позволяющий, кроме внутренних параметров, вычислить углы ориентации и положения центров камер. Высота над уровнем земли не находится, используется только относительная разница в вертикальном положении.

Итак, начальное приближение ни внутренних, ни внешних параметров не требуется. Вычисляются все параметры, кроме высоты. Одометрия играет значительную роль в алгоритме, решая проблемы масштаба относительных смещений во времени и расстояний между камерами. Информация из пересечения полей зрения камер не используется. Вычислительная сложность высокая - из статьи следует, что набор из 2000 кадров обрабатывается на компьютере 90 минут.

1.2.7 Heng, Furgale и Pollefeys, 2014: “Leveraging Image-Based Localization for Infrastructure-Based Calibration of a Multi-Camera Rig”

Статья тех же авторов [9] предлагает еще один интересный подход к автоматической калибровке, основанный на использовании элементов инфраструктуры в качестве калибровочных объектов². С помощью предварительно откалиброванной системы камер транспортного средства создается трехмерная карта местности методами SLAM. Использование одометрии гарантирует метрическую точность. Затем эта карта применяется для калибровки похожих систем. Для получения внешних параметров используется метод на основе PnP алгоритма³.

Начальное приближение параметров не требуется. Вычисляются все внешние параметры. Одометрия используется, информация из перекрывающихся полей зрения камер - нет. Авторы утверждают, что сам алгоритм калибровки

¹(англ.) simultaneous localization and mapping

²(англ.) infrastructure-based calibration

³(англ.) perspective-n-point algorithm

работает практически в режиме реального времени. Но процесс создания инфраструктурной карты вычислительно очень трудоемкий, поэтому итоговая вычислительная сложность алгоритма высокая.

1.2.8 Knorr, Niehsen и Stiller, 2013: “Online extrinsic multi-camera calibration using ground plane induced homographies”

В работе [10] предложен алгоритм постоянной оценки внешних параметров многокамерной установки. Используя грубое начальное приближение, относительные положения и направления камер уточняются с помощью рекурсивной фильтрации. Этот подход основан на гомографиях между последовательными кадрами, индуцированными плоскостью земли. Движение машины, относительное расположение камеры и плоскости земли оцениваются одновременно с использованием одного расширенного фильтра Калмана. В отличие от работ [6] и [7] не только дорожная разметка, но и вся плоскость земли используется в качестве естественного калибровочного объекта. Такой подход значительно расширяет возможности по вычислению внешних параметров камер в ситуации естественного вождения автомобиля.

Обобщая, требуется начальное приближение внешних параметров, оценка расстояний делается только с точностью до масштаба. Информация из пересекающихся полей зрения камер и о движении автомобиля не используется. Вычислительная сложность средняя.

1.2.9 Knorr, 2018: “Self-Calibration of Multi-Camera Systems for Vehicle Surround Sensing”

Диссертация [11] является развитием идей работы [10]. Рассматривается система широкоугольных камер. Исследуются различные классы движения и конфигурации системы камер, проводится теоретический анализ набора вычисляемых параметров. В итеративный алгоритм добавляется информация о пересекающихся полях зрения камер.

В данной работе также используется начальное приближение параметров и расстояния тоже вычисляются с точностью до масштаба. Не используется

информация о движении автомобиля, хотя и предполагается, что внедрение дополнительных измерений в фильтр Калмана может увеличить эффективность алгоритма. Активно используется информация из пересечения полей зрения камер, что позволяет увеличить надежность метода. Вычислительная сложность средняя.

1.2.10 Выводы

Результаты анализа и сравнения работ представлены в таблице 1.1.

В статье [4] используются заранее известные калибровочные объекты. В работах [6, 7] калибруется только вращение. В работах [5, 7] тоже вычисляются не все внешние параметры, а также выставлены слишком большие ограничения на начальное приближение. Таким образом, описанные в этих работах подходы если и могут использоваться, то только лишь частично.

Решения, описанные в статьях [8] и [9] являются частью опубликованной библиотеки и показали себя надежным и эффективным средством для автоматизации калибровки внутренних и внешних параметров многокамерной системы, но, к сожалению, они неприменимы в нашей задаче по причине их недостаточной универсальности и высокой вычислительной сложности. Также, на практике не представляется возможным создать и хранить инфраструктурные карты всех местностей, где может происходить калибровка.

В свою очередь, работы [10] и [11] выглядят наиболее перспективными с точки зрения промышленной реализации, т.к. описанные там алгоритмы обладают не слишком большой вычислительной сложностью и позволяют автоматически откалибровать все внешние параметры. Из минусов этих работ стоит отметить необходимость использования одного из расстояний между камерами для фиксации масштаба и использование эвристических методов для фильтрации точек с поверхности земли.

Научная работа	Использование начального приближения	Количество вычисляемых параметров (на 4 камеры)	Использование одометрии	Что используется в качестве калибровочных объектов	Использование пересечения полей зрения камер	Вычислительная сложность
Natroshevili et al. (2017)	нет	24	нет	заранее известные паттерны	нет	низкая
Liu et al. (2019)	да (очень близкое)	-	нет	-	да	низкая
Choi et al. (2018)	нет	12 (только вращение)	нет	прямые линии дорожной разметки	да	низкая
Zhao et al. (2014)	да (очень близкое)	8 (только по два угла)	нет	сегменты линий разметки	нет	низкая
Heng et al. (2013)	нет	20 (кроме высот)	да	все ключевые точки	нет	высокая
Heng et al. (2015)	нет	24	да	карта инфраструктуры	нет	высокая
Knorr et al. (2013)	да	23 (кроме масштаба)	нет	ключевые точки с поверхности земли	нет	средняя
Knorr et al. (2018)	да	23 (кроме масштаба)	нет	все ключевые точки	да	средняя

Таблица 1.1: Сравнение научных работ по выбранным критериям

Глава 2

Основной подход

Необходимо разработать универсальное, эффективное и производительное решение для калибровки внешних параметров камер системы кругового обзора. Для того, чтобы выбрать подход к реализации и разработать архитектуру программного продукта, а также для получения возможности численной оценки эффективности и производительности полученного решения, были обозначены и конкретизированы условия для работы и требования к финальной системе.

2.1 Внешнесистемные требования

Ограничения, которым должны соответствовать внешние системы и среда.

- Имеющиеся камеры - сверхширокоугольные, то есть при монтаже в стандартные для системы кругового обзора места, имеют значительные пересечения полей зрения. Это практически всегда так в современных автомобилях, поэтому данное условие не должно ограничивать универсальность решения.
- Основное измерительное устройство, которое доступно для алгоритма автоматической калибровки - это сами камеры, внешние параметры которых нужно найти. Для полноценной работы требуется, чтобы эти камеры позволяли производить измерения без ошибок. Поэтому они должны быть чистые, без загрязнений.

- Внутренние параметры камер известны.
- Начальное приближение внешних параметров камер системы кругового обзора известно и доступно для использования на целевой аппаратной платформе. Это легко осуществимое на практике условие, так как при производстве серии машин есть возможность откалибровать внешние параметры одной из них любым удобным способом, чтобы сохранить и использовать их в качестве начального приближения для остальных автомобилей. Также, оценку параметров можно получить из 3D модели автомобиля, которая практически всегда имеется у производителя или легко получается из чертежей.
- Одометрия (смещение и изменение ориентации автомобиля с момента предыдущих кадров камер) дана или получается преобразованием известных данных. Обычно, из информации на CAN шине современного автомобиля доступны, как минимум, поворот рулевого колеса и модуль скорости машины. Этих параметров обычно хватает, чтобы достаточно точно оценить угол поворота и проекцию вектора смещения автомобиля на плоскость земли. Вертикальные сдвиги редко регистрируются датчиками машины, поэтому знание смещений автомобиля в этом направлении не требуется.
- Внешняя среда для калибровки - это в основном плоская поверхность земли, без значительных искусственных и естественных неровностей. Калибровка происходит днем, при достаточном освещении, автомобиль в это время не производит резких маневров и движется со скоростью не более 30 км/ч. Любые осадки в виде дождя, тумана, снега или града отсутствуют.

2.2 Требования к системе

Ограничения на финальную систему автоматической калибровки.

- **Универсальность.** Полученная система будет считаться универсальной, если для ее применения на разных моделях автомобилей и похожих аппаратных платформах требуются минимальные изменения.

- **Эффективность.** Цель системы для пользователя - это качество сшивки виртуального вида сверху и надежность работы (устойчивость к различным входным данным). Новое изображение не должно быть хуже, чем обновляемое. Допустимая средняя остаточная ошибка значений внешних параметров составляет не более 20мм по расстояниям и 0.5° по углам ориентации.
- **Производительность.** Время, необходимое для проведения процедуры калибровки должно быть не более нескольких минут при реализации алгоритма на целевой аппаратной платформе. Стоит отметить, что это лишь примерное ограничение, тем не менее, оно дает возможность отсеять целые классы слишком ресурсоемких алгоритмов.
- **Требования к вычисляемым параметрам.** Необходимо обеспечить вычисление абсолютных значений внешних параметров камер с привязкой к плоскости земли. Кроме того, так как на практике обычно имеются или легко получаются приблизительные значения внешних параметров, то задача состоит в уточнении уже имеющихся значений. Будем считать, что имеющаяся средняя остаточная ошибка составляет не более 10° по углам ориентации и не более 100мм по расстояниям.
- **Сценарии использования.** Когда система не может найти оптимальные внешние параметры, она должна сообщить об этом. Если процесс калибровки запущен, то результат должен быть не хуже, чем был. Должны быть предусмотрены следующие сценарии выполнения: возможность запуска системы по требованию и автоматический запуск каждый раз при старте двигателя.

2.3 Направление реализации

На основе конкретизированных требований и анализа существующих решений задачи автоматической калибровки, выбран основной подход к реализации системы.

С целью экономии вычислительных ресурсов целевой аппаратной платформы и для большей гибкости в реализации, решено не делать решение, которое будет работать в режиме реального времени. Вместо этого целью ста-

вится разработка модуля автоматической калибровки, который будет принимать последовательность из 100-200 кадров со всех камер с соответствующей одометрией. Такой модуль будет запускаться только тогда, когда все условия для его полноценной работы выполняются. Поэтому, в дополнение, должен быть разработан программный блок, который будет работать в режиме реального времени и быстро анализировать выполнение необходимых условий для полноценной работы основного вычислительного модуля.

Как и в работах [10] и [11] основой для алгоритма выбран фильтр Калмана [20], очень удобный тем, что можно в одной инструментарии объединить разнородные измерения. Также, оптимизация внешних параметров таким фильтром решает проблему локально неровной поверхности земли. В качестве управления в модели фильтра Калмана должна использоваться одометрия, доступная практически на всех современных автомобилях. Измерениями будут являться сопоставленные ключевые точки с поверхности земли между кадрами с разных положений камер во времени и пространстве. Даже когда вокруг автомобиля есть пешеходы или другие транспортные средства, плоскость земли видна практически всегда со всех четырех камер, поэтому она служит естественным калибровочным объектом. Часть алгоритма должна надежно решать проблему отделения точек на поверхности земли и вне ее.

Целью использования фильтра Калмана в данной схеме является приведение внешних параметров к их оптимальному значению с точки зрения имеющихся измерений. Но после обработки всех последовательных кадров, все равно возможны небольшие остаточные ошибки из-за неточных внутренних параметров, шумных измерений и т.д. Основная цель запуска системы для пользователя - это хорошее качество сшивки виртуального вида сверху, поэтому даже при оптимально найденных внешних параметрах должно быть предусмотрено их уточнение. Для решения данной проблемы должен быть сделан модуль финальной сшивки, равномерно распределяющий остаточные ошибки по площади изображения виртуального вида сверху. Такой программный блок, помимо прочего, будет отвечать и за сравнение новых параметров со старыми и принимать решение об обновлении внешних параметров или откате к предыдущим значениям.

Глава 3

Архитектура системы

3.1 Высокоуровневые модули

Согласно требованиям и выбранному подходу к решению задачи, для реализации полноценной системы автоматической калибровки были спроектированы следующие программные модули (Рис. 3.1).

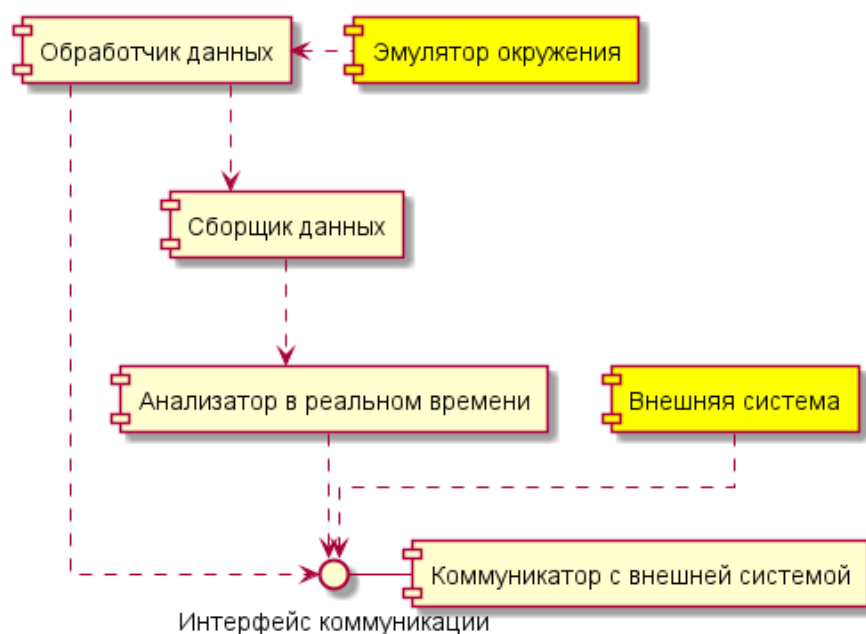


Рис. 3.1: Модули системы

- **Коммуникатор с внешней системой.** Отвечает за принятие и отправку сигналов о начале и завершении процедуры калибровки, прием и отправку текущих и обновленных внешних параметров при коммуникации с внешней системой.

- **Анализатор в реальном времени.** Предназначен для принятия решения о начале сбора данных для обработки. Использует для анализа входные кадры и значения одометрии. В реальном времени решает, имеется ли достаточно потенциальных измерений (сопоставленных ключевых точек) для старта алгоритма, и являются ли значения скорости и поворота автомобиля оптимальными для успешного прохождения процедуры калибровки. Основная цель - запуск ресурсоемких сбора и обработки данных только в наиболее подходящие для этого моменты времени.
- **Сборщик данных.** Отвечает за сбор необходимого количества последовательных кадров с четырех камер, синхронизированной с ними одометрии, а также текущих значений внешних параметров в буфер памяти для последующей обработки.
- **Обработчик собранных данных.** Предназначен для итеративного улучшения значений внешних параметров при использовании собранных данных. На каждом шаге, с помощью измерений, производит коррекцию предсказанного состояния. Завершает обработку поиском набора внешних параметров, оптимизирующих качество сшивки виртуального вида сверху.
- **Эмулятор окружения** Обеспечивает возможность прототипирования модуля обработки с помощью эмуляции входных и выходных данных, исключая зависимость от целевой аппаратной платформы при апробации алгоритма.

3.2 Состояния системы

На рис. 3.2 изображен проект архитектуры состояний системы автоматической калибровки внешних параметров. На диаграмме можно видеть как высокоуровневые модули, представленные выше, взаимодействуют друг с другом для достижения цели всей системы - получения актуальных внешних параметров.

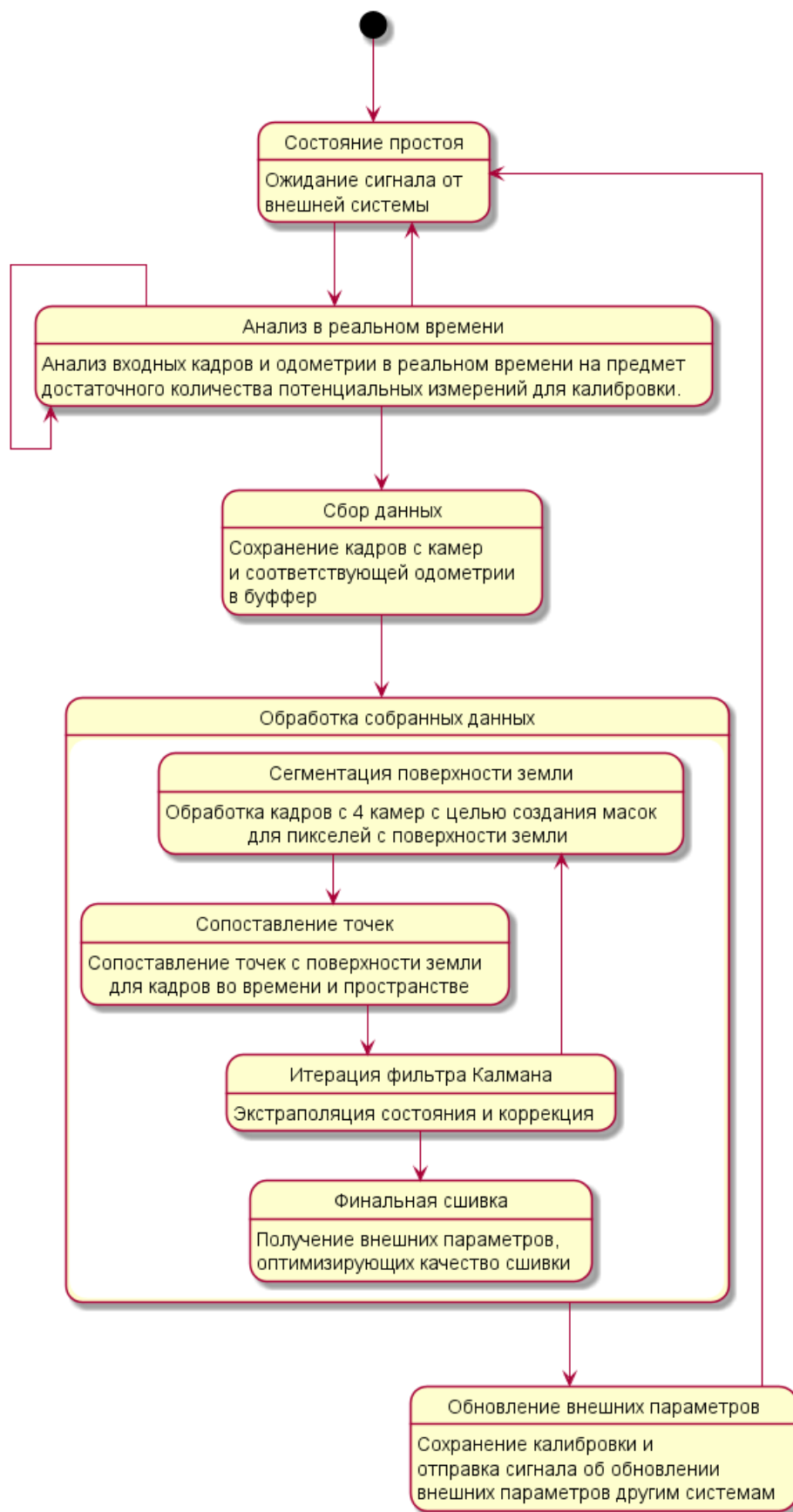


Рис. 3.2: UML диаграмма состояний

Необходимо отметить важность анализа входной информации (кадров с камер и одометрии) в режиме реального времени, т.к. это обеспечивает снижение вычислительной нагрузки на систему, запуская ресурсоемкие части алгоритма только при наличии подходящих условий для проведения процедуры калибровки. Также следует обратить внимание, что модуль обработки собранных данных включает в себя финальный этап по обеспечению качества сшивки виртуального вида сверху. Эта часть системы может осуществить численную оценку текущего качества итогового изображения и сравнить с новой оценкой, поэтому имеется возможность оставить текущие значения внешних параметров, не обновляя их, если результат по каким-либо причинам окажется хуже имеющегося. В таких редких случаях внешняя система получит сигнал о факте отката к предварительным значениям параметров.

3.3 Поток данных

Внешняя система передает текущие значения внешних параметров и сигнал о начале процедуры коммуникатору. Коммуникатор передает сигнал дальше анализатору и организует канал передачи кадров с камер (в виде трехканальных полноразмерных изображений) и одометрии (в виде организованной структуры данных). При принятии решения о начале процедуры калибровки, канал передачи кадров и одометрии перенаправляется для сохранения в сборщик данных. После окончания набора кадров и одометрии в буфер памяти, сохраненные данные и сигнал о начале обработки передаются в обработчик. Выходная информация обработчика коммуникатору - это только значение результата калибровки и обновленные параметры при успешном завершении процедуры.

Глава 4

Прототип

Целями создания прототипа системы автоматической калибровки внешних параметров являлись доказательство работоспособности и эффективности выбранного подхода и созданной архитектуры, а также выбор на ранней стадии конкретных способов реализации частей алгоритма. Для удобства программирования и отладки прототипа был выбран язык Python с использованием библиотек OpenCV и NumPy.

4.1 Система координат

В качестве базовой системы координат была выбрана система отсчета одометрии. Ось x направлена вдоль машины по ходу движения, ось y - влево, ось z - вверх. В отличие от работ [10, 11], где координатная система привязывается к одной из камер, внося некий дисбаланс, такой выбор позволяет осуществить относительно равномерное распределение остаточных ошибок по положениям и углам ориентации всех четырех камер во время работы алгоритма. Также, направление нормали к поверхности земли в любой момент времени совпадает с направлением оси z , что позволяет упростить вектор состояния системы (и не отслеживать нормаль, как в работах [10, 11]) и приводит к стабилизации ориентации всей системы камер относительно плоскости земли. Реальные небольшие изменения этого фиксированного направления во время движения автомобиля моделируются с помощью шума процесса в фильтре Калмана. Значительные отклонения направления нормали являются изменением положения и ориентации всей системы камер в целом.

4.2 Сегментация поверхности земли

Для того, чтобы передавать в фильтр Калмана измерения в виде координат сопоставленных точек с поверхности земли, необходимо знать, что конкретная трехмерная точка действительно лежит на земле. Для решения этой задачи в работах [10, 11] предлагаются методы, такие как:

- отсечение проекций точек выше линии горизонта
- построение модели плоскости, которой удовлетворяет большинство координат точек и отсечение выбросов методом RANSAC
- моделирование распределения координат точек и статистический тест

Такие эвристические методы обычно хорошо работают на тестовых данных, но обладают плохой способностью к обобщению. При реализации промышленного решения требуются более надежные методы. Это не значит, что описанные способы совсем бесполезны, но применения только их одних недостаточно. В данной работе предлагается существенно более надежный способ узнать, лежит ли точка на поверхности земли - это сегментация изображения с помощью глубокого обучения. В литературе описано много архитектур нейросетей, способных справиться с такой задачей [12, 13, 14, 15].

С целью эффективно решить задачу отделения пикселей проекции поверхности земли от остальных была выбрана архитектура UNet [15]. Для создания нейросети использовалась библиотека TensorFlow. Сеть была обучена на тысяче вручную размеченных кадрах с камер, установленных на реальном автомобиле. Каждый кадр искажался вместе с разметкой разными способами для получения большей обучающей выборки и, соответственно, для достижения лучших обобщающих свойств предсказания. Этого оказалось достаточно для создания прототипа. На вход сети подается уменьшенное трехканальное изображение с камеры, на выходе получается маска с сегментированными пикселями поверхности земли.

4.3 Сопоставление точек

Как и в работе [11], для упрощения сопоставления ключевых точек на изображениях с камер во времени и пространстве, используется нелинейная

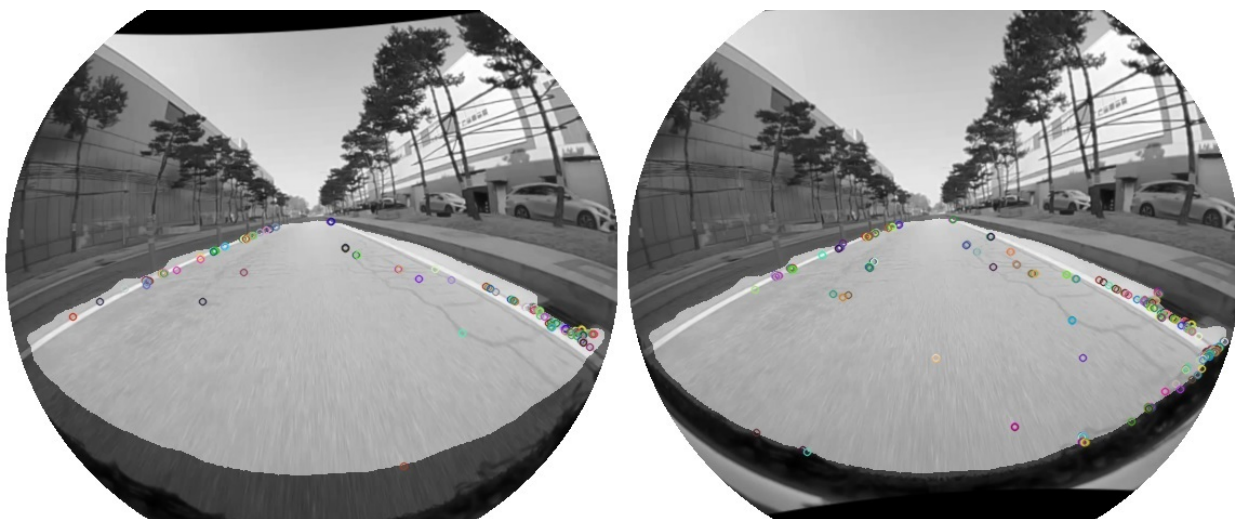


Рис. 4.1: Сопоставление ключевых точек во времени (передняя камера)

деформация кадров¹. В отличие от [11], искажаются оба изображения. Это решает проблему неизбежной потери высоких частот при деформации кадра за счет одинаковой интерполяции, а также помогает получить средний виртуальный вид, примерно одинаково удаленный от обоих положений камер, что приводит области на поверхности земли к максимально похожему виду. На рис. 4.1 и рис. 4.2 представлены примеры деформированных изображений для положений камер во времени и в пространстве. По мере схождения внешних параметров к их истинным значениям, схожесть областей вокруг точек увеличивается, количество сопоставленных точек становится больше. Также, один из побочных эффектов такой деформации - объемные объекты вне плоскости земли искажаются больше и сопоставляются хуже, что сильно уменьшает вероятность ошибок.

Общая схема процедуры сопоставления точек с двух кадров, соответствующих разным положениям камер, состоит из следующих этапов.

- Нелинейная деформация обоих кадров для получения максимально похожих виртуальных видов поверхности земли.
- Детектирование координат потенциально интересных точек алгоритмом FAST [16].
- Подавление точек, не-максимумов, имеющих меньший потенциал для сопоставления по сравнению с соседними. Используется метод, описанный в статье [17].

¹(англ.) image warp

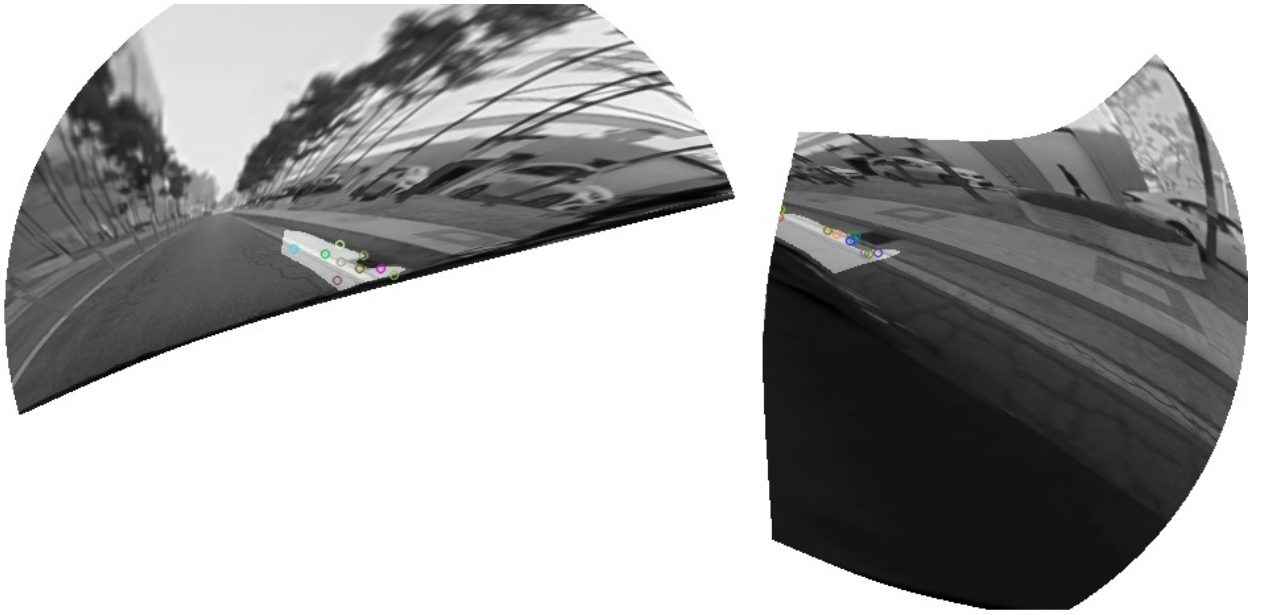


Рис. 4.2: Сопоставление ключевых точек в пространстве (передняя и левая камеры)

- Описание областей вокруг ключевых точек алгоритмом ORB [18].
- Сравнение дескрипторов точек для нахождения потенциальных пар методом FLANN [19].
- Фильтрация с помощью априорных данных о геометрической модели, которой эти точки должны соответствовать, схемой RANSAC [3].

4.4 Фильтр Калмана

Так как зависимость состояния системы от одометрии и измерений нелинейна, то используется расширенный фильтр Калмана [20]. Модель эволюции системы представлена следующими уравнениями:

$$\Sigma_k = f(\Sigma_{k-1}, u_k) + w_k \quad (4.1)$$

$$z_k = \bar{z}_k + v_k \quad (4.2)$$

где Σ_k - текущий вектор состояния системы, u_k - управление (одометрия), w_k - шум процесса, с соответствующей матрицей ковариаций Q_k , z_k - измерения, v_k - шум измерений.

Вектор состояния системы составлен из следующих элементов (всего 27

чисел):

- **3 параметра одометрии** - поворот в радианах и смещение в миллиметрах в плоскости земли со времени предыдущего кадра по осям x и y
- **6 внешних параметров передней камеры** - ориентация, параметризованная тремя параметрами, способом угол-ось¹ и координаты центра камеры в миллиметрах
- **6 внешних параметров левой камеры**
- **6 внешних параметров задней камеры**
- **6 внешних параметров правой камеры**

Параметризация для ориентаций выбрана минимальная, что позволяет избежать вырожденных случаев. Также, в отличие от методов SLAM, координаты трехмерных точек не являются частью вектора состояния, т.к. нет необходимости в построении карты местности. Как и в работах [10, 11], это позволяет значительно снизить вычислительную сложность алгоритма.

В фазе экстраполяции системы параметры одометрии внедряются в вектор состояния в качестве параметров управления, остальные элементы (внешние параметры камер) остаются неизменными. Изменение значений внешних параметров моделируется шумом процесса:

$$\Sigma_k^- = f(\Sigma_{k-1}, u_k) \quad (4.3)$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1}^+ F_k^T + Q_k \quad (4.4)$$

где P_k - матрица ковариаций состояния системы, F_k - матрица Якоби, соответствующая функции экстраполяции:

$$F_k = \left. \frac{\partial f(\Sigma, u)}{\partial \Sigma} \right|_{\Sigma=\Sigma_{k-1}^+, u=u_k} \quad (4.5)$$

¹(англ.) angle-axis

В фазе коррекции расширенного фильтра Калмана внедряются измерения, полученные сопоставлением точек с камер во времени и пространстве:

$$K_k = P_k^- M_k^T (M_k P_k^- M_k^T + W_k)^{-1} \quad (4.6)$$

$$\Sigma_k^+ = \Sigma_k^- - K_k m(\Sigma_k^-, z_k) \quad (4.7)$$

$$P_k^+ = (I - K_k M_k) P_k^- \quad (4.8)$$

где m - функция, связывающая текущий вектор состояния системы измерения, при отсутствии шума измерений, равная нулю:

$$m(\Sigma_k, \bar{z}_k) = 0 \quad (4.9)$$

M_k - соответствующая матрица Якоби:

$$M_k = \left. \frac{\partial m(\Sigma, z)}{\partial \Sigma} \right|_{\Sigma=\Sigma_k^-, z=z_k} \quad (4.10)$$

Используя текущее значение внешних параметров, строится гомография через поверхность земли для сопоставляемых кадров и соответствующих им положений камер.

Пусть имеются две камеры $P = K[R_1|t_1]$ и $P' = K'[R_2|t_2]$ (это могут быть как разные камеры в пространстве, так и одна и та же камера в разные моменты времени), и плоскость земли $\pi = (n^T, d)^T$. Обозначим за $\Delta R, \Delta t$ - преобразование координат из R_1, t_1 в R_2, t_2 , тогда координаты сопоставленных точек согласно уравнению 1.6 должны удовлетворять следующему соотношению:

$$x' = \kappa((\Delta R - \Delta t n^T / d) \kappa^{-1}(x)) \quad (4.11)$$

Когда мы имеем сопоставленную x точку \bar{x}' , то измерением является двумерная разность координат x' и \bar{x}' в идеальном случае равная нулю:

$$m(\Sigma_k, \bar{z}_k) = x' - \bar{x}' \quad (4.12)$$

или

$$m(\Sigma_k, \bar{z}_k) = \kappa((\Delta R - \Delta t n^T / d) \kappa^{-1}(x)) - \bar{x}' \quad (4.13)$$

		Одометрия (управление) и измерения в виде координат сопоставленных точек							
Компоненты вектора состояния	одометрия	передняя камера во времени	левая камера во времени	задняя камера во времени	правая камера во времени	передняя и левая камеры в пр-ве	передняя и правая камеры в пр-ве	задняя и левая камеры в пр-ве	задняя и правая камеры в пр-ве
	α								
одометрия	Δx								
	Δy								
вращение передней камеры	rx_front								
	ry_front								
	rz_front								
позиция передней камеры	tx_front								
	ty_front								
	tz_front								
вращение левой камеры	rx_left								
	ry_left								
	rz_left								
позиция левой камеры	tx_left								
	ty_left								
	tz_left								
вращение задней камеры	rx_rear								
	ry_rear								
	rz_rear								
позиция задней камеры	tx_rear								
	ty_rear								
	tz_rear								
вращение правой камеры	rx_right								
	ry_right								
	rz_right								
позиция правой камеры	tx_right								
	ty_right								
	tz_right								

Таблица 4.1: Влияние одометрии и конкретных измерений на компоненты вектора состояния

В таблице 4.1 можно видеть как соотносятся конкретные элементы вектора состояния системы (по вертикали) и одометрия с измерениями (по горизонтали). Серым цветом обозначен факт прямой связи. Следует отметить, что одометрия является важным источником масштаба для положений камер. Абсолютные значения расстояний распространяются по цепочке связей между компонентами вектора состояния и измерениями. Также, видно, что измерения во времени не влияют на положения камер вдоль плоскости земли, но вместе с измерениями в пространстве, покрываются все элементы вектора состояния системы.

4.5 Финальная сшивка

Несмотря на то, что после достаточного количества итераций получают-ся довольно точные внешние параметры камер, неизбежно остаются небольшие ошибки связанные с неоптимальностью расширенного фильтра Калмана, неточными значениями внутренних параметров, неровностью поверхности дороги и ограниченной точностью измерений.

В качестве последнего шага с целью улучшения качества изображения виртуального вида сверху используется нелинейная оптимизация - групповое выравнивание¹. Целевая функция такой оптимизации - это ошибка репроекции в плоскости земли всех сопоставленных в пространстве точек.

С помощью данного метода, оставшаяся ошибка равномерно распределяется по изображению виртуального вида сверху, что позволяет получить более качественную сшивку и практически добиться отсутствия разницы между проекциями изображений с соседних камер на поверхность земли.

¹(англ.) bundle adjustment

Глава 5

Апробация

5.1 Наборы данных

Для тестирования алгоритма собрано и структурировано 15 наборов данных с видеокадрами с четырех камер и соответствующей одометрией в естественной городской среде. Каждый набор содержит 200 последовательных трехканальных изображений с разрешением 960 на 1280 для каждой камеры. Одометрия и кадры с разных камер синхронизированы во времени. Для каждого набора известно реальное значение внешних параметров, полученных калибровкой с помощью специального калибровочного паттерна.

5.2 Проверка эффективности

Основой тестирования эффективности решения являлась проверка сходимости зашумленных известных внешних параметров к их заранее откалиброванным значениям. В среднем на всех имеющихся наборах данных получена остаточная ошибка в 15мм по расстояниям и 0.3° по углам ориентации, что имеет потенциал для дальнейшего улучшения, но достаточно для доказательства работоспособности и эффективности выбранного подхода (в [11] получен результат 10.8мм и 0.11° , а в [9] примерно 40мм и 0.41°). Время работы неоптимизированного прототипа на 100 кадрах около 3 минут.

На графике 5.1 представлен результат одного из запусков системы. Видно, что средняя ошибка более 12° в углах и около 90мм в расстояниях становится меньше 20мм и 0.5° менее чем за 100 итераций алгоритма.

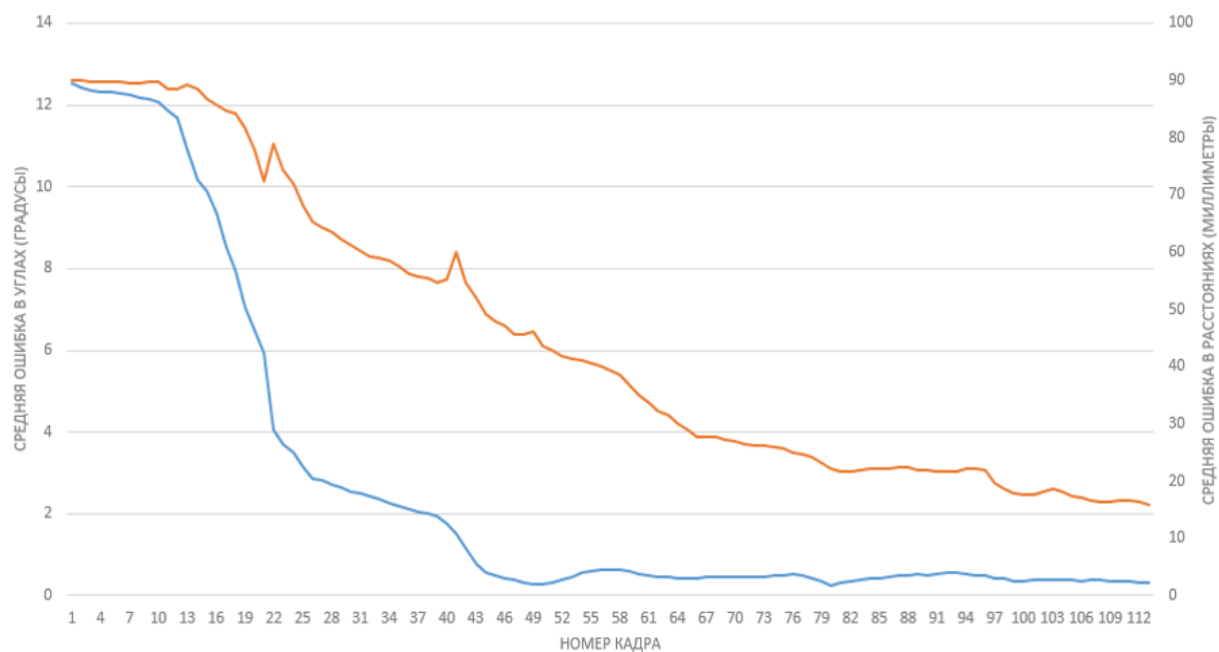


Рис. 5.1: Графики средних остаточных ошибок в углах и расстояниях



Рис. 5.2: выходные данные нейросети (красный цвет) и ручная разметка поверхности земли (синий цвет)



Рис. 5.3: Пример сшивки виртуального вида сверху с помощью автоматически откалиброванных внешних параметров

Побочным результатом проверки эффективности решения является численная оценка допустимого на практике различия начальных параметров от реальных. На всех имеющихся наборах данных проверено, что остаточная ошибка в 100 мм по расстояниям и 10° по углам ориентации становится менее, чем 20 мм и 0.5° ранее, чем за 100 кадров. Также протестирована надежность решения. Сходимость к реальным значениям проверена при средней ошибке в 200 мм и 20° , гораздо большей, чем имеющаяся на практике.

Было произведено тестирование качества отдельных элементов алгоритма, в частности, выхода нейросети для сегментации поверхности земли. Проверка производилось не на тех же данных, что и обучение сети. В сумме, ошибки первого и второго рода в выходных данных процедуры сегментации составляли менее 1% площади в пикселях вручную размеченной поверхности земли (Рис. 5.2).

Также, была осуществлена визуальная проверка качества полученного виртуального вида сверху. На всех наборах имеющихся данных, не выявлено существенных ошибок в качестве сшивки (Рис. 5.3).

Заключение

В ходе данной работы, согласно поставленным задачам, были получены следующие результаты.

- **Проанализированы существующие подходы к решению задачи.** Произведено исследование и сравнение научных работ.
- **Выбран подход к реализации.** Конкретизирован список требований к системе. Общеизвестные методы и собственные решения скомпонованы для решения задачи.
- **Создана архитектура решения.** Составлена высокоуровневая схема алгоритма и модулей системы.
- **Создан прототип системы.** Создана эмуляция окружения обработчика данных с реализацией интерфейсных входов и выходов. Прототип системы реализован на языке Python с использованием библиотек OpenCV и NumPy.
- **Произведена апробация системы.** Показана работоспособность и эффективность спроектированного и реализованного решения на собранных 15 наборах реальных данных.

Дальнейшая работа может проводиться в направлении реализации автоматической калибровки в режиме реального времени (тогда можно иметь актуальную калибровку с привязкой к плоскости земли в каждый момент времени, даже на неровной поверхности), ослаблении требований к начальному приближению неизвестных параметров, а также к увеличению скорости сходимости к оптимальному решению.

Список литературы

- [1] 2020. URL: http://systemsauto.ru/active/round_review.html.
- [2] 2020. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Camera_resectioning.
- [3] R. I. Hartley и A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, 2004.
- [4] Koba Natroshvili и Kay-Ulrich Scholl. “Automatic extrinsic calibration methods for Surround View Systems”. В: (июнь 2017), с. 82—88. DOI: 10.1109/IVS.2017.7995702.
- [5] Xiao Liu и др. “Online Camera Pose Optimization for the Surround-view System”. В: (окт. 2019), с. 383—391. DOI: 10.1145/3343031.3350885.
- [6] Kyoungtaek Choi и др. “Automatic Calibration of an Around View Monitor System Exploiting Lane Markings”. В: *Sensors* 18 (сент. 2018), с. 2956. DOI: 10.3390/s18092956.
- [7] Kun Zhao и др. “An automatic online camera calibration system for vehicular applications”. В: *2014 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014* (окт. 2014), с. 1490—1492. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6957643.
- [8] Lionel Heng, Bo Li и Marc Pollefeys. “CamOdoCal: Automatic intrinsic and extrinsic calibration of a rig with multiple generic cameras and odometry”. В: *Proceedings of the ... IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (нояб. 2013), с. 1793—1800. DOI: 10.1109/IRoS.2013.6696592.
- [9] Lionel Heng, Paul Furgale и Marc Pollefeys. “Leveraging Image-Based Localization for Infrastructure-Based Calibration of a Multi-Camera Rig”. В: *Journal of Field Robotics* 32 (сент. 2014). DOI: 10.1002/rob.21540.

- [10] Moritz Knorr, Wolfgang Niehsen и Christoph Stiller. “Online extrinsic multi-camera calibration using ground plane induced homographies”. В: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings* (июнь 2013), с. 236—241. DOI: 10.1109/IVS.2013.6629476.
- [11] Moritz Knorr. “Self-Calibration of Multi-Camera Systems for Vehicle Surround Sensing”. Дис. ... док. Март 2018.
- [12] Gabriel Oliveira, Wolfram Burgard и Thomas Brox. “Efficient deep models for monocular road segmentation”. В: окт. 2016, с. 4885—4891. DOI: 10.1109/IR0S.2016.7759717.
- [13] Shashank Yadav и др. “Deep CNN with color lines model for unmarked road segmentation”. В: сент. 2017, с. 585—589. DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296348.
- [14] Felipe Reis и др. “Combining convolutional side-outputs for road image segmentation”. В: июль 2019, с. 1—8. DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8851843.
- [15] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer и Thomas Brox. “U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation”. В: т. 9351. Окт. 2015, с. 234—241. ISBN: 978-3-319-24573-7. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- [16] Edward Rosten и Tom Drummond. “Machine Learning for High-Speed Corner Detection”. В: т. 3951. Июль 2006. DOI: 10.1007/11744023_34.
- [17] Oleksandr Bailo и др. “Efficient adaptive non-maximal suppression algorithms for homogeneous spatial keypoint distribution”. В: *Pattern Recognition Letters* 106 (2018), с. 53—60.
- [18] Ethan Rublee и др. “ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF”. В: нояб. 2011, с. 2564—2571. DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544.
- [19] Marius Muja и David Lowe. “Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration.” В: т. 1. ЯНВ. 2009, с. 331—340.
- [20] Yaakov bar shalom, X.Rong Li и Thia Kirubarajan. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software*. ЯНВ. 2004. DOI: 10.1002/0471221279.ch11.