

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

Синицын Даниил Дмитриевич

Научный руководитель:
д. ф.-м. н., профессор А. Н. Терехов

Рецензент:
главный специалист ООО "Системы компьютерного зрения"
к. т. н. С. И. Федоренко

8 июня 2020 г.

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

2020-06-08

Здравствуйте, меня зовут Синицын Даниил, я представляю выпускную работу, посвящённую автоматической калибровке камер.

Научный руководитель Терехов Андрей Николаевич.
Рецензент Федоренко Сергей Игоревич.

Системы из камер



Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов

└ Введение

└ Системы из камер

В настоящее время существует множество устройств, оснащённых системой из камер: квадрокоптеры, автомобили (для реализации различных систем мониторинга), а так же устройства для съемки панорам (как у google maps).

Использование такого рода устройств предполагает наличие так называемой калибровки камер.



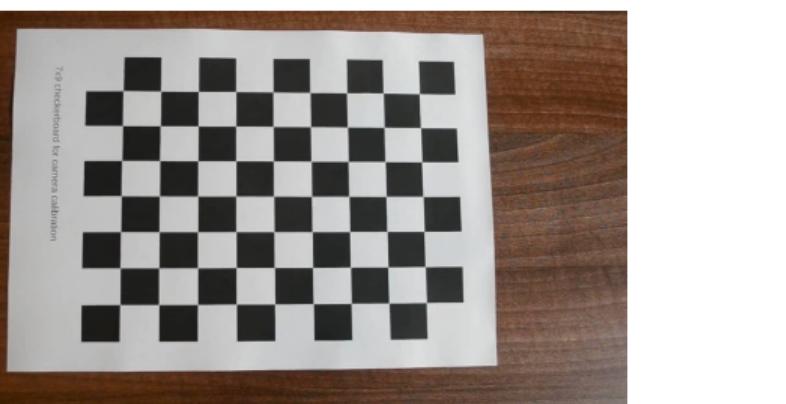
Калибровка

Внутренние параметры камеры:

- Отображение 3D точки в пиксель
- Отображение координаты пикселя в луч

Внешние параметры камеры:

- Отображение 3D точки мира в систему координат камеры



2020-06-08

Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов

└ Введение

└ Калибровка

Калибровка камер это оценка внутренних и внешних параметров:

Внутренние параметры отвечают за описание отображений 3D точек в пиксели и пикселей в лучи трёхмерного мира.

Внешние параметры отвечают за преобразование системы координат системы из камер в систему координат каждой из камер..

На слайде слева показан типичный паттерн, использующийся для калибровки. Как следует из названия моей работы – мною какой-либо подобный паттерн не используется.

Внутренние параметры камеры:
• Отображение 3D точки в пиксель
• Отображение координаты пикселя в луч

Внешние параметры камеры:
• Отображение 3D точки мира в систему координат камеры



Сравнение подходов

	Авто калибровка камер	Поддержка fisheye оценок	Калибровка систем	Область зрения может не пересекаться	Земля не плоская
Colmap	✓	✗	✗	✗	✓
CamOdoCal	✗	✗	✓	✗	✓
Theia	✓	✗	✗	✗	✓
Решение Knorr-a	✗	✗	✓	✓	✗
Решение из ВКР	✓	✓	✓	✓	✓

2020-06-08

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

Актуальность

Сравнение подходов

В мире существуют решения, которые способные откалибровать систему из камер. Сравнение некоторых из них с предлагаемым в работе решением приведены на экране.

Например colmap с его автоматической реконструкцией может быть использован для оценки внутренних параметров камер. Но не будет работать с широкоугольными камерами Так же невозможно задать ограничения твёрдого тела.

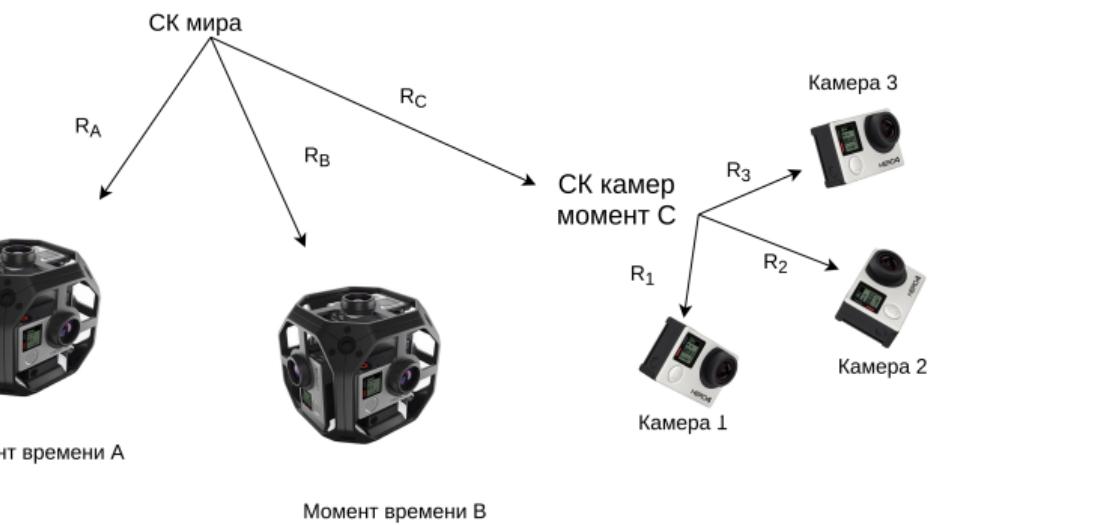
CamOdoCal требует использование калибровочных паттернов для оценки внутренних параметров. То есть автоматически проходит только этап оценки внешних параметров.

Предлагаемое в работе решение, не нуждается в приведенных на слайдах допущениях и ограничениях.

	Авто калибровка камер	Поддержка fisheye оценок	Калибровка систем	Область зрения может не пересекаться	Земля не плоская
Colmap	✓	✗	✗	✗	✗
CamOdoCal	✗	✗	✓	✗	✓
Theia	✓	✗	✗	✗	✓
Решение Knorr-a	✗	✗	✓	✓	✗
Решение из ВКР	✓	✓	✓	✓	✓

Цель

Разработка и реализация алгоритма оценки внутренней калибровки и ориентации жёстко закрепленной системы из камер по набору изображений окружающего мира



Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов

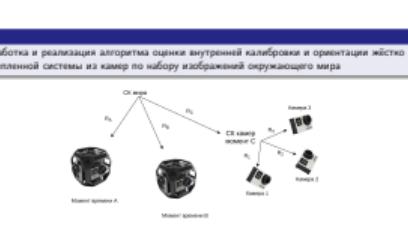
- └ Постановка задачи
 - └ Цель

Целью моей работы является разработка и реализация алгоритма оценки калибровки внутренних параметров, а также ориентаций системы из камер по изображениям мира.

На слайде схематически представлена решаемая задача. R_A, R_B – ориентации системы из камер в определённый момент времени.

R_1, R_2 – ориентации камер относительно системы координат системы из камер.

Необходим найти все R и внутренние параметры для каждой из камер.



1. Реализовать одновременную оценку параметров дисторсии и эпиполярной геометрии в парах изображений
2. Реализовать получение оценок фокусных расстояний и существенных матриц из оцененных ранее фундаментальных матриц
3. Разработать и реализовать агрегацию оценок, полученных для всех изображений, соответствующих одной физической камере
4. Разработать и реализовать общую оптимизацию оцениваемых параметров
5. Разработать и реализовать оценку ориентации камер

2020-06-08

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

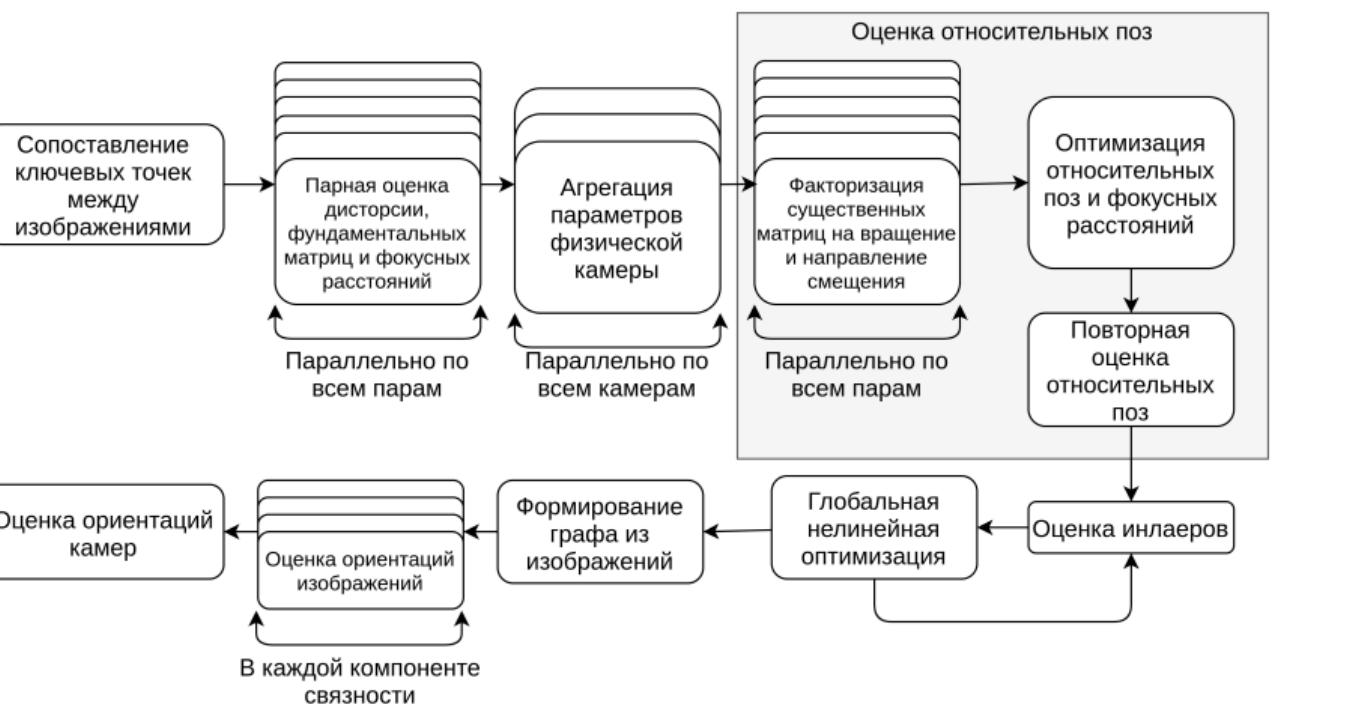
- Постановка задачи
- Задачи

В рамках выполнения данной работы стояли следующие задачи:

1. Реализация парных оценок дисторсии и фундаментальных матриц
2. Реализация получения фокусных расстояний и существенных матриц
3. Разработка и реализация агрегации оценок каждой из физических камер
4. Разработка и реализация нелинейной оптимизации для всех оцениваемых параметров
5. Разработка и реализация оценки ориентаций камер

1. Реализовать одновременную оценку параметров дисторсии и эпиполярной геометрии в парах изображений
2. Реализовать получение оценок фокусных расстояний и существенных матриц из оцененных ранее фундаментальных матриц
3. Разработать и реализовать агрегацию оценок, полученных для всех изображений, соответствующих одной физической камере
4. Разработать и реализовать общую оптимизацию оцениваемых параметров
5. Разработать и реализовать оценку ориентации камер

Схематическое представление алгоритма



Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

Реализация

Обзор

Схематическое представление алгоритма

Начинается алгоритм с поиска ключевых точек и их сопоставления, затем параллельно по всем парам изображений оцениваются параметры дисторсии, фундаментальные матрицы и фокусные расстояния.

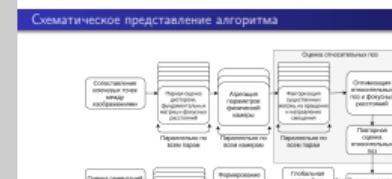
Оценённые параметры агрегируются для каждой физической камеры.

Далее происходит оценка относительных поз в несколько этапов.

В дальнейшем происходит несколько этапов нелинейной оптимизации и переоценки инлаеров.

После оптимизаций формируется граф из изображений, где ребро это относительная ориентация между двумя изображениями. В каждой компоненте происходит оценка ориентаций изображений и после одновременно оцениваются ориентации камер.

На следующих слайдах будут более подробно описаны некоторые из этапов.



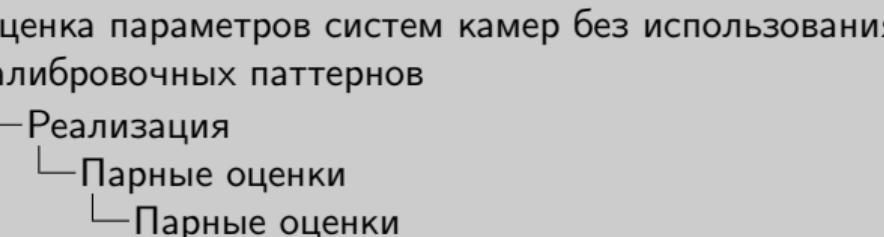
Парные оценки

1. Оценка однопараметрической модели дисторсии¹, фундаментальной матрицы²
 - Реализован десятиточечный алгоритм³
 - RANSAC
 - Адаптированная к дисторсии ошибка Сэмпсона в качестве ценовой функции
2. Оценка радиальной дисторсии в рамках модели с большим количеством параметров

¹Искажение изображения, в рамках данной работы в виде полинома от радиуса

²Абстракция, связывающая точки двух изображений с геометрией сцены

³Efficient Solution to the Epipolar Geometry for Radially Distorted Cameras, Zuzana Kukelova



Для каждой пары изображений одновременно оцениваются параметры дисторсии и фундаментальные матрицы.

Для этого был реализован 10-ти точечный решатель, из статьи посвящённой алгоритмам решения неминимальной задачи оценки фундаментальных матриц и параметров дисторсии в однопараметрической модели.

Поверх данного алгоритма была реализована процедура RANSAC, используя усовершенствованную ошибку Сэмпсона в качестве ценовой функции

Получив оценки в рамках однопараметрической модели дисторсии, степень полинома описывающего искажение увеличивается путем нелинейной оптимизации. Старшие коэффициенты при этом инициализируются нулями.

1. Оценка однопараметрической модели дисторсии¹, фундаментальной матрицы²
 - Реализован десятиточечный алгоритм³
 - RANSAC
 - Адаптированная к дисторсии ошибка Сэмпсона в качестве ценовой функции
2. Оценка радиальной дисторсии в рамках модели с большим количеством параметров

¹Искажение изображения, в рамках данной работы в виде полинома от радиуса

²Абстракция, связывающая точки двух изображений с геометрией сцены

³Efficient Solution to the Epipolar Geometry for Radially Distorted Cameras, Zuzana Kukelova

Оптимизация относительных поз и оценок калибровки

$$\arg \min_{\alpha_i, R_i, T_i} \sum \rho(\varepsilon^2)$$

- Ошибка Сэмпсона:

$$\varepsilon^2 = \frac{y^\top Fx}{(Fx)_1^2 + (Fx)_2^2 + (F^\top y)_1^2 + (F^\top y)_2^2}$$

- Ошибка Сэмпсона, учитывая дисторсию

$$\varepsilon^2 = \frac{y^\top Fx}{\|(Fx)^\top J_x\|^2 + \|(F^\top y)^\top J_y\|^2}$$

p, p_y – полиномы дисторсии, F – фундаментальная матрица, J_x, J_y – якобианы проецирования точек изображения, x, y – лучи, полученные из точек изображения

$$F = \text{diag}(1, 1, f_1)[T]_x R \text{diag}(1, 1, f_2)$$

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

└ Реализация
└ Общая оптимизация
└ Оптимизация относительных поз и оценок калибровки

2020-06-08

Оптимизация относительных поз и оценок калибровки

arg min $\sum \rho(\varepsilon^2)$

• Ошибка Сэмпсона:
 $\varepsilon^2 = \frac{y^\top Fx}{(Fx)_1^2 + (Fx)_2^2 + (F^\top y)_1^2 + (F^\top y)_2^2}$

• Ошибка Сэмпсона, учитывая дисторсию
 $\varepsilon^2 = \frac{y^\top Fx}{\|(Fx)^\top J_x\|^2 + \|(F^\top y)^\top J_y\|^2}$

p, p_y – полиномы дисторсии, F – фундаментальная матрица, J_x, J_y – якобианы проецирования точек изображения, x, y – лучи, полученные из точек изображения

$F = \text{diag}(1, 1, f_1)[T]_x R \text{diag}(1, 1, f_2)$

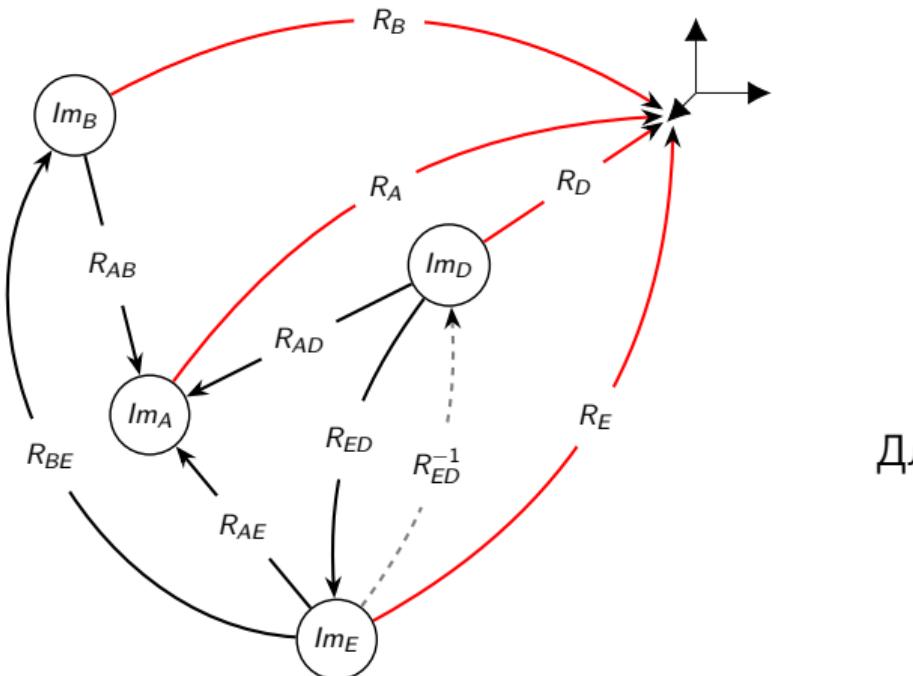
Для всех пар одновременно реализуется нелинейная оптимизация относительных поз и параметров калибровки, используя ошибку Сэмпсона.

На слайде приведена задача оптимизации, где α_i – параметры внутренней калибровки камеры i ; R_i, T_i – относительная поза; f_1 и f_2 – фокусные расстояния. Получение фундаментальной матрицы из относительной позы и фокусных расстояний так же приведено на слайде.

Ошибка Сэмпсона приведена в двух случаях: в стандартном виде и в виде, учитывающем дисторсию камер.

Ошибка Сэмпсона даёт преимущество перед распространённой ошибкой репроекции тем, что она явно не вводит трёхмерные точки в рассмотрение, тем самым не увеличивая размер оптимизационной задачи. В случае введения трёхмерных точек размер задачи увеличивается в 1.5 раза, так как на каждую пару точек соответствия создаётся одна трёхмерная точка.

Оценка ориентаций изображений



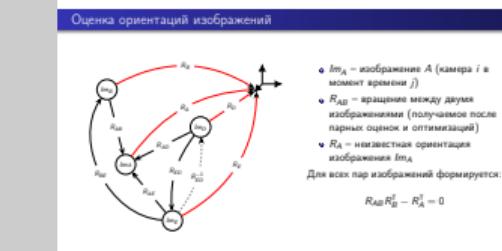
- Im_A – изображение A (камера i в момент времени j)
- R_{AB} – вращение между двумя изображениями (получаемое после парных оценок и оптимизаций)
- R_A – неизвестная ориентация изображения Im_A

Для всех пар изображений формируется:

$$R_{AB} R_B^T - R_A^T = 0$$

2020-06-08
Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

- └ Реализация
 - └ Оценка ориентаций
 - └ Оценка ориентаций изображений



- Im_A – изображение A (камера i в момент времени j)
- R_{AB} – вращение между двумя изображениями (получаемое после парных оценок и оптимизаций)
- R_A – неизвестная ориентация изображения Im_A

Для всех пар изображений формируется:

$$R_{AB} R_B^T - R_A^T = 0$$

Из изображений и их относительных поз формируется граф, где ребро это относительное вращение, а вершина – изображение.

Стоит задача поиска ориентации изображений т.е. вершин.

Граф разбивается на компоненты связности.

На слайде изображена диаграмма, где красным помечены неизвестные параметры.

R_A и R_B – неизвестная ориентации вершин, а R_{AB} это оценка относительного вращения между ними.

Можно заметить, что одно чёрное ребро и два красных образуют коммутативную диаграмму, формируя указанное на слайде ограничение.

Собрав ограничения по всем рёбрам, формируется линейная задача для всей системы, параметризируя вращения матрицами вращения.

Оценка ориентаций изображений

1. В матричном виде:

$$\begin{bmatrix} R_{ab} & 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\ 0 & R_{ab} & 0 & \cdots & 0 & -I \\ 0 & 0 & R_{ab} & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{b11} \\ \vdots \\ R_{b33} \\ \vdots \\ R_{a11} \\ \vdots \\ R_{a33} \end{bmatrix} = 0$$

2. Ответ приближается ближайшей по $\|\cdot\|_F$ матрицей вращения

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

Реализация

- └ Оценка ориентаций
- └ Оценка ориентаций изображений

На слайде приведена матричная форма этой системы.

Как видно матрица системы преимущественно заполнена нулями. Имеет смысл использовать методы решения разреженные системы. В работе используется метод сопряженных градиентов с диагональным предобуславливателем.

Покомпонентно собрав ответ, мы не получаем матрицы поворота, так как не было наложено ограничений на определитель и ортогональность, поэтому матрица поворота приближается ближайшей по норме Фробениуса.

1. В матричном виде:

$$\begin{bmatrix} R_{ab} & 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\ 0 & R_{ab} & 0 & \cdots & 0 & -I \\ 0 & 0 & R_{ab} & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{a11} \\ \vdots \\ R_{a33} \end{bmatrix} = 0$$

2. Ответ приближается ближайшей по $\|\cdot\|_F$ матрицей вращения

Оценка ориентаций камер

1. Камеры A и B в разных компонентах

$$A_{ij}X = XB_{ij}$$

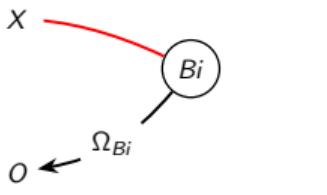
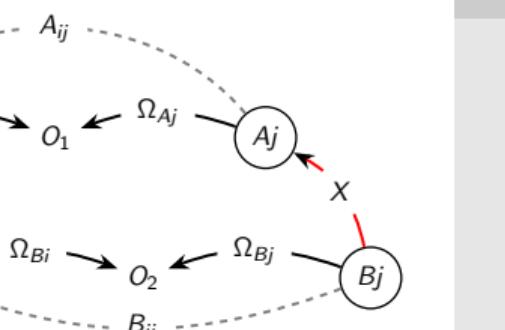
A_{ij} – вращение камеры A из момента j в i

2. Камеры A и B в одной компоненте

$$X = \Omega_{Ai}^{-1}\Omega_{Bi}$$

Ω_{Ai} – ориентация камеры A в момент i

X – искомое вращение из B в A



2020-06-08
Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов
└ Реализация
 └ Оценка ориентаций
 └ Оценка ориентаций камер

Оценка ориентаций камер происходит в 2 этапа: оценка относительных вращений, оценка ориентаций самих камер.

Оценка относительных вращений собирается из двух ситуаций: 2 камеры в разных компонентах связности, но имеют 2 общих момента времени (так называемая HandEye калибровка), и когда в одной компоненте в один момент времени. Оба случая приведены на экране вместе с коммутативными диаграммами для лучшего понимания природы ограничений.

В данном случае используется параметризацию кватернионами, это позволяет получить более компактную систему.

Ориентации самих камер оцениваются решая аналогичную прошлому слайду систему.

1. Камеры A и B в разных компонентах

$$A_{ij}X = XB_{ij}$$

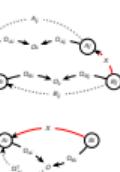
A_{ij} – вращение камеры A из момента j в i

2. Камеры A и B в одной компоненте

$$X = \Omega_{Ai}^{-1}\Omega_{Bi}$$

Ω_{Ai} – ориентация камеры A в момент i

X – искомое вращение из B в A



Выполнение задач

Реализация поставленных задач была выполнена на языке C++ с использованием следующих технологий:

1. Eigen – линейная алгебра
2. Sophus – параметризация вращений
3. ceres-solver – нелинейная оптимизация

Для поиска соответствий ключевых точек между изображениями:

1. Colmap

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

Результаты

Выполнение задач

Описанный ранее алгоритм реализован на языке C++, используя представленные на слайде библиотеки.

В нелинейной оптимизации для ускорения работы общие вычисления (формирование существенных матриц и их якобианы) вынесены в предподсчёт. Для решения разреженных систем используются итеративные решатели не требующие конструирование матриц в явном виде, применяемые к абстрактному линейному оператору с реализованным умножением на вектор.

Реализация поставленных задач была выполнена на языке C++ с использованием следующих технологий:

1. Eigen – линейная алгебра
2. Sophus – параметризация вращений
3. ceres-solver – нелинейная оптимизация

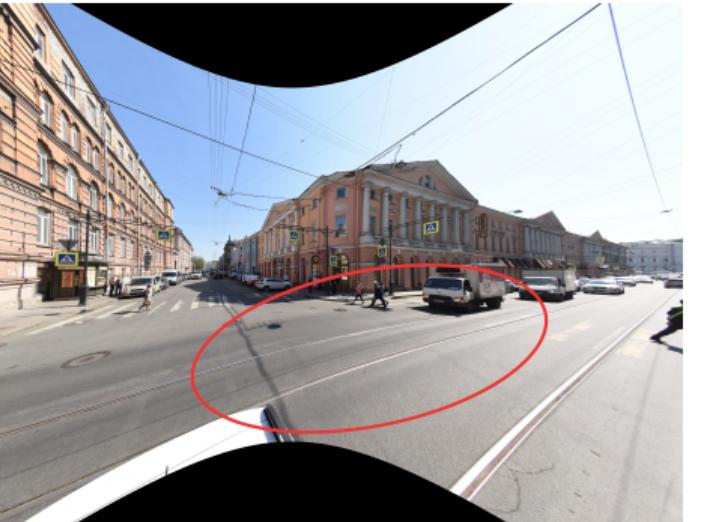
Для поиска соответствий ключевых точек между изображениями:

1. Colmap

Парные оценки



(a) Исходное изображение

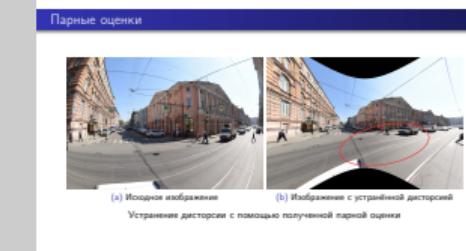


(b) Изображение с устраниённой дисторсией

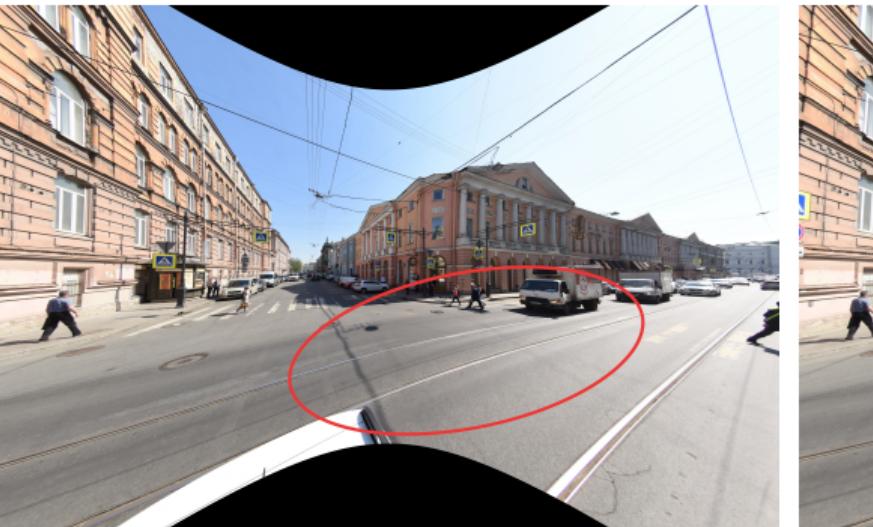
Устранение дисторсии с помощью полученной парной оценки

2020-06-08
Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов
└ Результаты
 └ Парные оценки
 └ Парные оценки

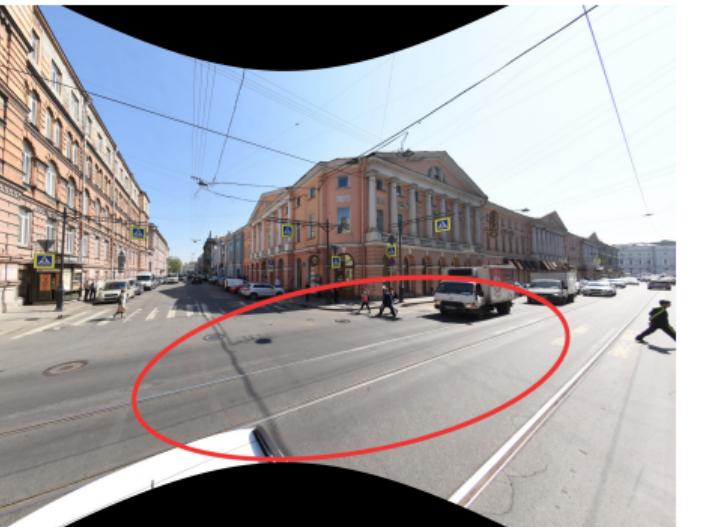
На данном слайде вы можете видеть результаты оценки калибровки в парных оценках. Калибровку можно визуализировать путём выпрямления изображения (проецирование на pinhole камеру). Чем более прямые становятся прямые линии, тем лучше калибровка. Слева изображено исходное изображение, справа изображение с устранинной дисторсией.



Агрегация оценок



(a) Парная оценка

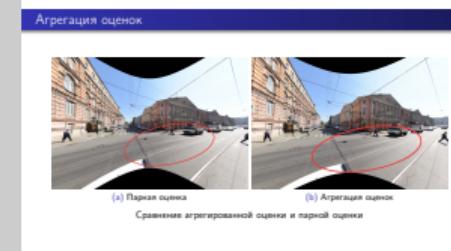


(b) Агрегация оценок

Сравнение агрегированной оценки и парной оценки

2020-06-08
Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов
└ Результаты
 └ Агрегация
 └ Агрегация оценок

Агрегирование оценок внутренних параметров можно сравнить с парной оценкой.
Агрегация происходит по всем парам датасета, то есть должна лучше описывать искажение камеры.
Слева изображения после парной оценки, справа после агрегации всех оценок.
Как видно по прямым рельсам, оценки дисторсии после агрегации лучше описывают искажения.



Датасет KITTI



Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов

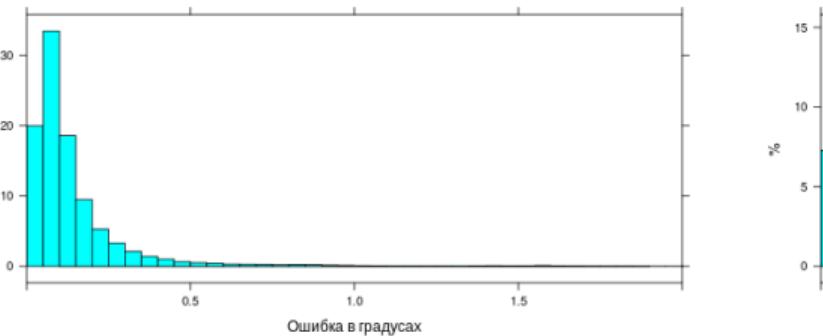
└ Результаты
 └ KITTI
 └ Датасет KITTI

Для оценки относительных вращений и ориентаций изображений была использована одна из последовательностей датасета KITTI для визуальной одометрии.

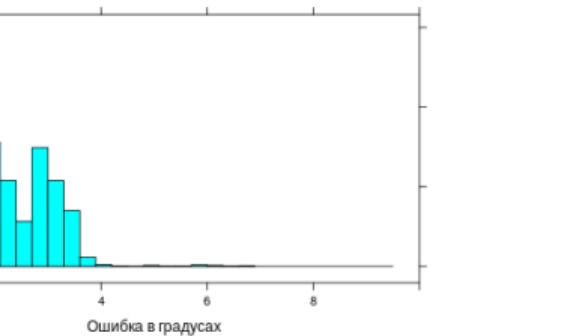
Камеры имеют большую область перекрытия, а радиальное искажение пренебрежительно мало.



Оценка ориентаций



(a) Ошибка относительных вращений

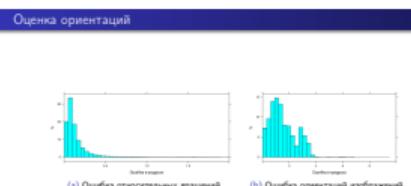


(b) Ошибка оценок ориентаций изображений

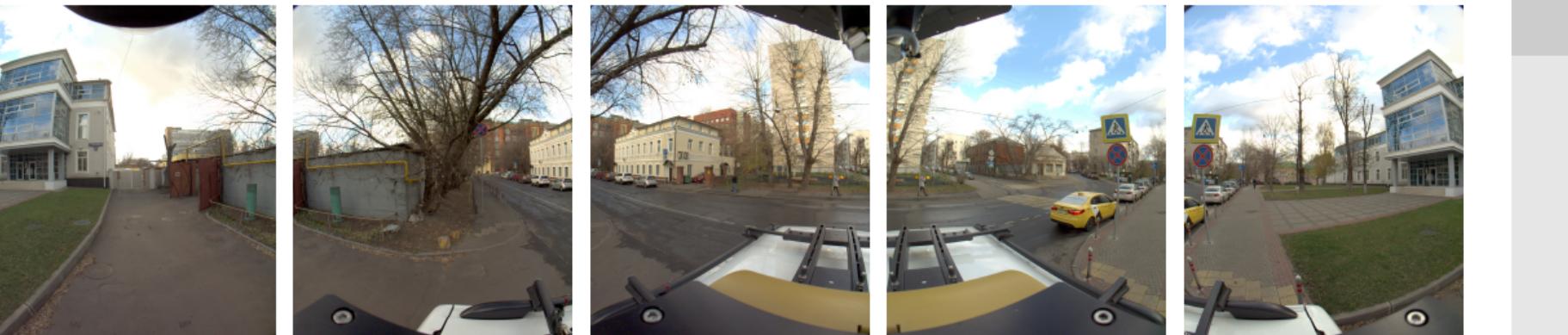
Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов
└ Результаты
 └ Усреднение вращений
 └ Оценка ориентаций

На слайде показаны гистограмма ошибки относительных вращений. А также гистограмма ошибки оценки ориентаций изображений.

Данные графики сопоставимы с графиками, обозреваемыми мною методов по усреднению вращений, идеи из которых использовались в оценке ориентаций. Это говорит, о том что текущая оценка пригодна для дальнейшей переоценки смещений и построения реконструкции.



Ladybug датасет



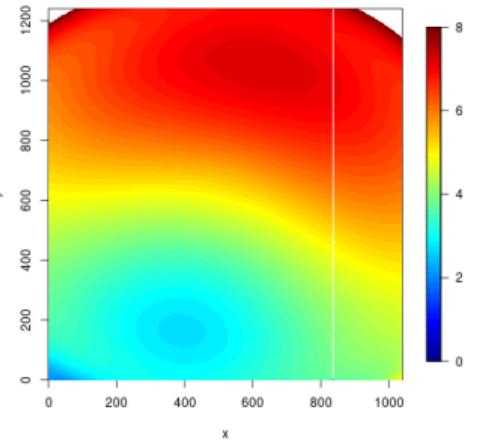
2020-06-08
Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов
└ Результаты
 └ Ladybug
 └ Ladybug датасет

Так как Китти – стерео датасет, то перекрытие очень большое.
Дополнительно был использован датасет, снятый на ladubug, картинки с которого вы видите на экране.
Он состоит из 6-ти камер, из которых использовались 5. Как можно заметить картинки в нём имеют значительное искажение.

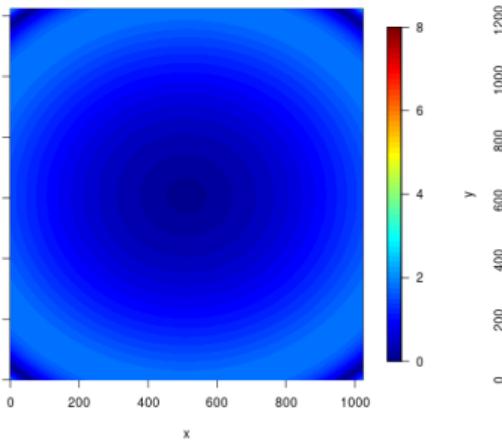


Подсчёт ошибки: $\|\pi_{gt} \circ \pi^{-1}(u) - u\|$

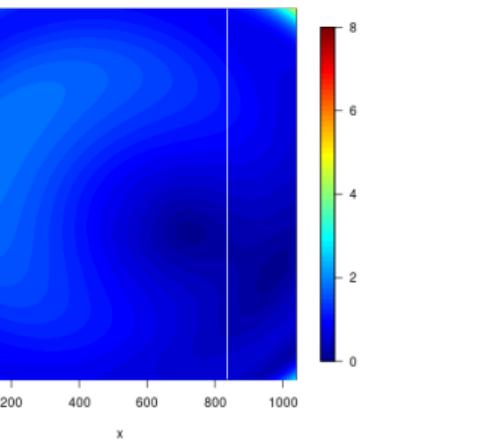
u – пиксель, π – оценённая калибровка, π_{gt} – ground-truth калибровка



(a) Центр проекции
фиксирован центре
изображения



(b) Центр проекции
фиксирован в центре из
ground-truth



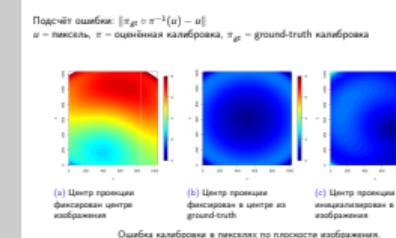
(c) Центр проекции
инициализирован в центре
изображения

Ошибка калибровки в пикселях по плоскости изображения.

Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов

- └ Результаты
- └ Калибровка камер

2020-06-08



На данном слайде показана ошибка оценки калибровки в пикселях.

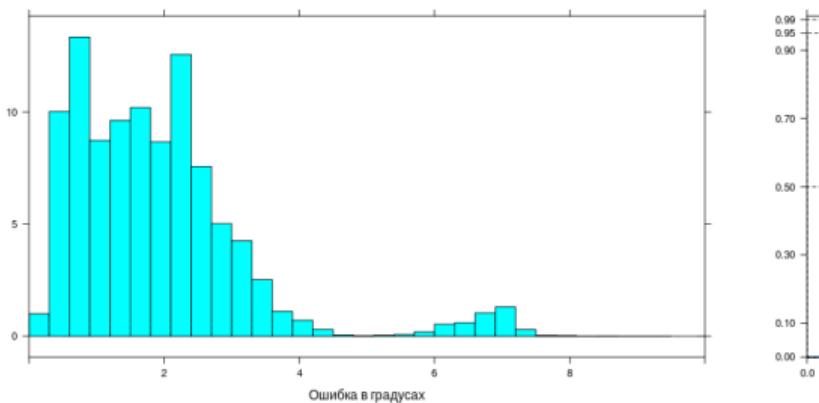
Для сравнения калибровки каждый пиксель изображения проецировался оценённой калибровкой в луч и отображался назад калибровкой из GT, ошибка это разница первоначальной позиции и полученной.

На графиках показана ошибка для каждого пикселя изображения.

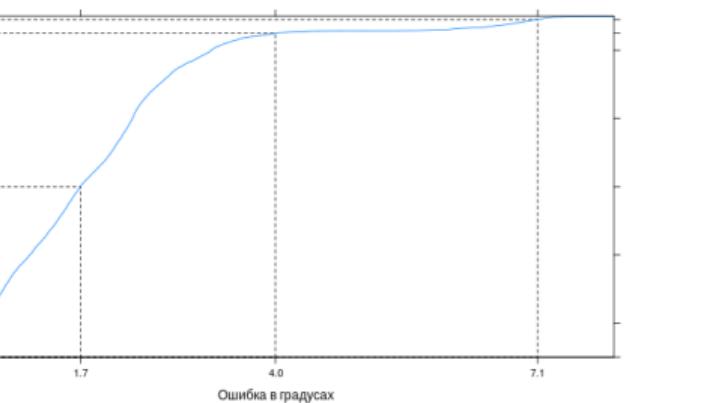
Мой алгоритм никак не оценивает центр проекции, поэтому сравнение проводилось в трёх вариантах,

1. Фиксируя центр проекции в центре изображения
2. Фиксируя центр проекции в центре из известной калибровки.
3. Инициализируя центр в центре изображения и изменяя его посредством общей нелинейной оптимизации

Ошибка в 2-3 пикселя на данном этапе удовлетворительна (см. Рисунок (c)), так как в дальнейшем после оценки смещений планируется этап глобальной оптимизации.



(a) Гистограмма ошибки ориентаций

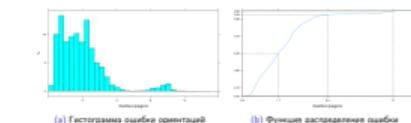


(b) Функция распределения ошибки

2020-06-08

Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов

- └ Результаты
- └ Оценка ориентаций



На слайде показаны графики ошибок на данном датасете.
Ошибка сопоставима с другими подходами к глобальной оценке ориентаций отдельных изображений.
С единственным отличием в том, что в случае статей использовались калиброванные камеры, а в случае описываемой работы – некалиброванные камеры со значительным радиальным искажением.

Оценка ориентаций камер

2020-06-08

$$\varepsilon = \left\| \log_{\text{so}(3)} (R_{gt}^T R) \right\|$$

0	1	2	3	4
0°6'23"	0°22'21"	0°11'3"	0°7'26"	0°20'52"

Ошибка оценки ориентаций камер

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

Результаты

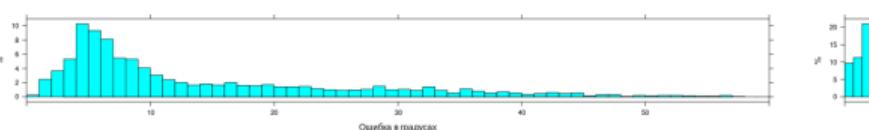
Оценка ориентаций

Оценка ориентаций камер

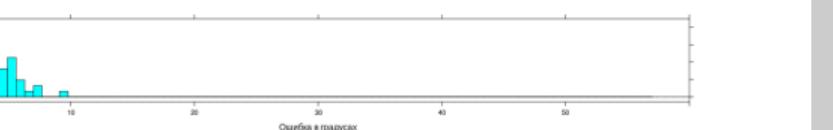
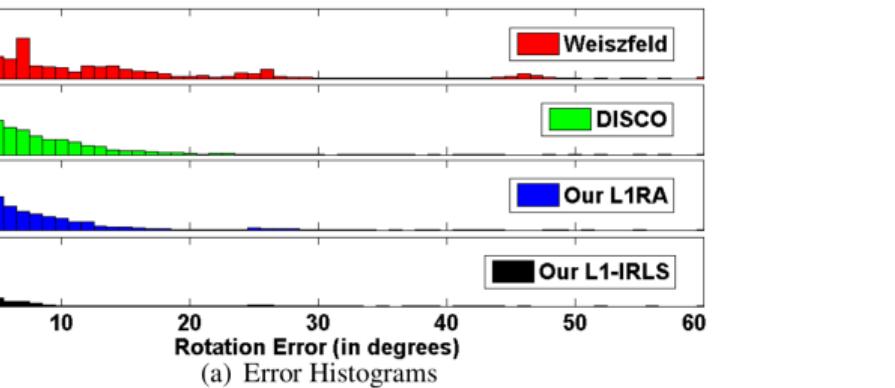
$$\varepsilon = \left\| \log_{\text{so}(3)} (R_{gt}^T R) \right\|$$

0	1	2	3	4
0°6'23"	0°22'21"	0°11'3"	0°7'26"	0°20'52"

Ошибка оценки ориентаций камер



(а) Результаты предлагаемого алгоритма

(б) Результаты предлагаемого алгоритма
(Увеличенный порог на инлаеры)

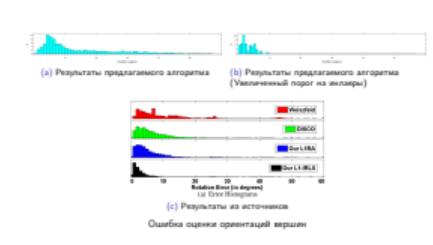
(с) Результаты из источников

Ошибка оценки ориентаций вершин

2020-06-08

Оценка параметров систем камер без использования
калибровочных паттернов

- └ Результаты
- └ Сравнение с обозреваемыми подходами



Для демонстрации работоспособности предлагаемого подхода, алгоритм был проверен на датасете QUAD. Данный датасет не подходит под решаемую в работе задачу, так как состоит из 6500 одиночных камер, но в свою очередь является популярным датасетом для сравнения подходов к реконструкции.

Алгоритм запускался 2 раза, во второй раз с большим порогом на минимальное количество инлаеров в парных оценках, большое количество рёбер и вершин были отфильтрованы этим, что может говорить о проблемах в матчинге, который в данную работу не входит.

По графикам можно заметить, что результаты не сильно хуже результатов, ориентированных датасеты подобного типа решения.

Заключение

По результатам данной работы:

- Реализована и протестирована калибровка внутренних параметров камер в системе (парные оценки, агрегация, оптимизация)
 - Реализован и апробирован подход, учитывающий дисторсию в ошибке Сэмпсона
 - Реализована оценка ориентаций камер в системе
-
- Код доступен по ссылке
https://bitbucket.org/ivernylsi/camera_autocalibration

2020-06-08

Оценка параметров систем камер без использования калибровочных паттернов

- └ Результаты
- └ Заключение
- └ Заключение

За время выполнения работы были получены следующие результаты.

1. Реализована калибровка внутренних параметров для каждой из камер внутри системы
2. Реализован и апробирован подход, с использованием поддерживающей дисторсию ошибки Сэмпсона
3. Реализована оценка ориентации изображений, ориентации одиночных камер

Заключение

По результатам данной работы:

- ♦ Реализована и протестирована калибровка внутренних параметров камер в системе (парные оценки, агрегация, оптимизация)
- ♦ Реализован и апробирован подход, учитывающий дисторсию в ошибке Сэмпсона
- ♦ Реализована оценка ориентаций камер в системе

♦ Код доступен по ссылке
https://bitbucket.org/ivernylsi/camera_autocalibration