

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра системного программирования

Солнцев Кирилл Михайлович

**Помехоустойчивая одометрия для широкоугольных камер**

**Дипломная работа**

Научный руководитель:

ст. преп. Пименов А.А.

Рецензент:

директор деп. моб. техн. ЗАО «Ланит-Терком» Сабашный В. Е.

Санкт-Петербург

2019

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Software Engineering

Solntsev Kirill

**Noise resistant odometry for wide-angle cameras**

**Graduation Thesis**

Scientific supervisor:

Senior lecturer Pimenov A.A.

Reviewer:

Director of mobile technology Sabashnii V. E.

Saint-Petersburg

2019

## **Оглавление**

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>Постановка задачи</b>	<b>4</b>
<b>Обзор</b>	<b>4</b>
Существующие решения	5
Pipeline	5
Калибровщик камеры	5
Фильтр помех	6
Линейный фильтр	6
Медианный фильтр	6
Детектор особых точек	7
Алгоритм Moravec	7
Алгоритм FAST	8
Детектор Harris	9
Оптический поток	10
Алгоритм Lucas-Kanade	11
RANSAC	11
Вычисление относительных поз	11
<b>Результаты</b>	<b>12</b>
<b>Заключение</b>	<b>13</b>
<b>Список литературы</b>	<b>13</b>

## **Введение**

В современном мире еще не достаточно широко распространено использование дронов. Но в недалеком будущем беспилотные малые летательные аппараты смогут быть использованы во многих сферах, таких например как, доставка продуктов, патрулирование, ведение репортажей и многое другое. Для подобных задач может понадобиться возможность автономного ориентирования в пространстве. Достичь этого можно несколькими способами. Первый подход оснастить летательный аппарат множеством различных датчиков, таких как дальномеры, gps-трекеры, стереокамеры. Такой подход имеет несомненное преимущество в точности определения положения в пространстве, но проигрывает в цене, полезной нагрузке и энергопотреблении, а следовательно и в массовости и в автономности. Другой подход состоит в том, чтобы поставить одну широкоугольную камеру на летательный аппарат которая сможет дать дрону достаточно информации о его позиции на маршруте. Так например вместо стереокартинки можно рассматривать два кадра идущих друг за другом. Также из этой последовательности кадров можно извлечь информацию о движении летательного аппарата в пространстве.

## **Постановка задачи**

Целью данной работы является создание изолированного модуля визуальной одометрии для библиотеки `corecv`. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать модуль для калибровки широкоугольной камеры;
2. Разработать модуль для фильтрации входного сигнала;
3. Разработать модуль для вычисления относительных поз;
4. Объединить результаты в один автономный модуль;
5. Протестировать с помощью популярных наборов данных.

# Обзор

## Существующие решения

На данный момент в мире насчитывается большое число различных вариаций программного обеспечения, которое решает задачи визуальной одометрии. Подходы, которые используют эти решения, делятся на два типа: прямые и непрямые. В прямых подходах используется все изображение целиком, а в непрямых используется облако особых точек. Для широкоугольных камер плохо работают непрямые методы, так как большой угол обзора накладывает искажения на изображение, которое нужно компенсировать, в то время как прямой подход может анализировать массив пикселей целиком. Примером прямого подхода являются DSO (Direct Sparse Odometry)[17] и LSD-SLAM (Large Scale Direct SLAM)[15, 16]. В этой работе осуществляется непрямой подход в сочетании с требованием широкоугольности объектива. Переход от анализа всех пикселей к анализу облака особенностей должен существенно повысить производительность.

## Pipeline

На входе мы имеем сигнал с камеры оснащенной широкоугольным объективом с большим количеством помех, перед запуском системы камеру необходимо откалибровать

## Калибровщик камеры

Для камер с широкоугольными объективами характерна подушкообразная дисторсия. Это означает, что линии на изображении изгибаются к центру кадра и соответственно информация в центре становится более концентрированной, чем по краям. К тому же изменяется форма объектов. Из этого факта следует, что, например, квадрат находящийся в центре одного кадра, на следующем

кадре после смещения, окажется вытянут вдоль диагонали. В виду такого эффекта, анализ последовательности таких изображений будет сильно затруднен.

Чтобы избежать подобного рода искажений изображения, можно предварительно откалибровать камеру. Достаточно часто для этих целей используют алгоритм Zhengyou Zhang на шаблоне в виде шахматной доски. Нужно получить как минимум три изображения шаблона под различными углами к камере. Затем, в процессе анализа калибровочных изображений, алгоритм определит точки углов клеток доски и, в силу того, что форма шаблона заранее известна программе, вычислит коэффициенты для компенсации дисторсии камеры с текущими настройками. Если потребуется изменить какие-либо настройки камеры, например, фокусное расстояние, то калибровку следует провести заново.

## **Фильтр помех**

После калибровки мы должны избавиться от помех во входном сигнале. Каждый кадр перед обработкой необходимо пропустить через специальный фильтр, чтобы убрать лишние шумы, мешающие вычислению относительных позиций дрона.

## **Линейный фильтр**

Самая простая фильтрация: выбирается окно которое проходит по изображению и усредняет значение пикселя соседними. По сути, просто размывает изображение и становится сложнее определить границы объектов.

## **Медианный фильтр**

Является примером нелинейной фильтрации, идея которой состоит в том, чтобы определить положение импульса и заменить его некоторым оценочным

значением при сохранении значений других пикселей. Здесь центральный пиксель заменяется на медиану всех пикселей по всему окну. Таким образом, данный вид фильтра очень хорошо борется с импульсными помехами, вместе с тем не размывая существующие границы объектов

## **Детектор особых точек**

После того как кадр был успешно очищен от шумов и помех, можно приступить к ориентированию в пространстве. Обработать все изображение целиком очень трудоемкая задача с точки зрения компьютера, поэтому предлагается найти на последовательности кадров так называемые особые точки. Обычно это углы или места изменения контрастности. Смысл в том, что такие точки переходят из одного кадра в другой меняя лишь положение на изображении. Особые точки должны обладать следующими свойствами:

- *Отличимость*: требует контрастность с фоном и единственность в своей окрестности.
- *Инвариантность*: требует независимость к преобразованиям сдвига и вращения(аффинным)
- *Стабильность*: требует нахождение одной и той же особенности на последовательности кадров

## **Алгоритм Moravec**

Один из самых простых представителей детекторов углов. В нем рассматривается функция изменения яркости окна правильной формы при его сдвиге в восьми направлениях на 1 пиксель.

Сначала нужно вычислить функцию изменения интенсивности для каждой точки:



$$V_{u,v}(x,y) = \sum_{\forall a,b \in w} (I(x+u+a, y+v+b) - I(x+a, y+b))^2$$

Где  $(u, v) \in \{(1, 0), (1, 1), (0, 1), (-1, 1), (-1, 0), (-1, -1), (0, -1), (1, -1)\}$

Потом находится направление в котором полученная функция достигает минимума. Иначе говоря, мы ищем направление, в котором яркость изменилась меньше всего, потому что у угла обязательно присутствуют смежные ребра. Далее отсечем полученные значения по некоторому пороговому значению и удалим повторяющиеся углы с помощью нахождения локальных максимумов. Оставшиеся ненулевые значения будут помечены как особенности.

## Алгоритм FAST

Для поиска особенностей на изображении осуществляется проход по каждой точке и сравнивается яркость выбранной точки и точек на окружности с радиусом 3 пикселя. Получаем для каждой пары три возможных исхода

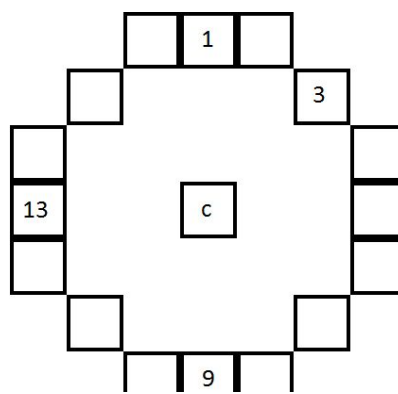
$$I_p > I_c + t$$

$$I_p < I_c - t$$

$$I_c - t < I_p < I_c + t$$

Здесь  $I$  – яркость пикселей,  $t$  – заранее выбранное пороговое значение яркости.  $t$  используется как мера особенности точки, выступает в роли того значения яркости пикселя, при котором точка все еще может считаться особенностью. Будем считать точку особой в том случае, когда на окружности найдется дуга из 12 пикселей, которая будет светлее или темнее центра.

При реализации обычно проверяются 4 точки.



Проверка всей окрестности производится в том случае когда среди этих точек находится одновременно 3 более светлых или более темных, чем точка С. Если иначе, то точка сразу пропускается как не имеющая особенности. Метод имеет ряд недостатков. Например, близко расположенные точки могут быть все помечены как особые, но смысла в такой информации будет не много.

## Детектор Harris

Это улучшенная версия алгоритма Моравца. Повышение качества нахождения углов достигается введением анизотропии по всем направлениям, иначе говоря, начинают рассматриваться производные функции яркости по всем направлениям. Введем функцию E:

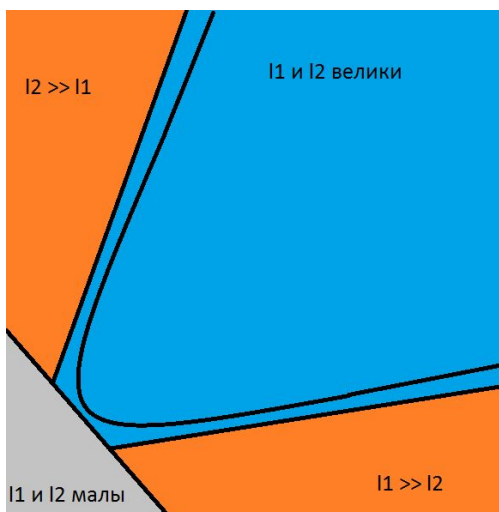
$$E(x, y) = \sum_{\forall x, y \in W} w(x, y) (I(x+u, y+v) - I(x, y))^2$$

Где w – это вес (Обычно функция Гаусса).

Эту функцию можно представить в другом виде:

$$E(x, y) = (x, y) M \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \text{ где } M = \sum_{(u, v) \in W} w(u, v) [I_x^2 \ I_x I_y \ I_x I_y \ I_y^2]$$

Если изменения функции E велики по всем направлениям, то это характеризует угол. С другой стороны большие изменения функции E



эквивалентны тому факту, что собственные значения матрицы  $M$  достаточно велики по модулю. Как известно вычисление собственных значений матрицы достаточно сложная вычислительная задача, поэтому авторами данного метода была введена следующая мера отклика:

$$R = \det M - k(\text{tr}M)^2 > k$$

Здесь  $k$  – константа полученная опытным путем,  $k \in [0.04, 0.06]$

Получили, что для особых точек значение  $R$  будет положительным. Затем, как и в методе Моравеца, отседем значения  $R$  которые не превосходят некоторого порога и найдем локальные максимумы.

Такой детектор углов инвариантен к аффинным изменениям яркости и поворотам изображения. Поэтому для данной работы было решено реализовать именно этот метод. Также стоит отметить, что Harris detector не устойчив к помехам на кадре, но с этим мы успешно боремся с помощью предварительной фильтрации изображения от шумов.

## **Оптический поток**

Из последовательности кадров можно построить так называемый оптический поток, который будет нести информацию об относительном движении камеры. На вход алгоритму можно принять массив особых точек изображения, так как особых точек существенно меньше, чем пикселей в кадре, то такой подход значительно ускорит работу алгоритма. Поиск оптического потока с опорой только на особые точки изображения называется разреженным. Часто используется метод Lucas-Kanade

## Алгоритм Lucas-Kanade

Метод исходит из предположения что между двумя последовательным кадрами смещение камеры мало и одинаково для некоторой окрестности точки.

Пусть  $q_i$  точки окна поиска, которое выбирается вокруг особенностей.

Запишем систему уравнений

$$\{I_x(q_1)V_x + I_y(q_1)V_y = -I_t(q_1) \quad I_x(q_2)V_x + I_y(q_2)V_y = -I_t(q_2) \quad \vdots \quad I_x(q_n)V_x + I_y(q_n)V_y = -I_t(q_n)\}$$

Здесь  $I_x(q_i), I_y(q_i), I_t(q_i)$  частные производные по пространственным координатам и времени в точках  $q_i$  в текущий момент времени.

Полученная система – избыточна и можно решать её с помощью метода наименьших квадратов

$$v = (A^T A)^{-1} A^T b$$

$$(V_x \ V_y) = \left( \begin{array}{cccc} \sum_i I_x(q_i)^2 & \sum_i I_x(q_i)I_y(q_i) & \sum_i I_x(q_i)I_y(q_i) & \sum_i I_y(q_i)^2 \end{array} \right)^{-1} \left( \begin{array}{c} -\sum_i I_x(q_i)I_t(q_i) \\ -\sum_i I_y(q_i)I_t(q_i) \end{array} \right)$$

## RANSAC

После построения оптического потока нужно воспользоваться алгоритмом на основе случайных выборок чтобы отфильтровать ложные векторы, так называемые выбросы.

## Вычисление относительных поз

Теперь можно вычислить относительное положение дрона в пространстве с помощью перехода к существенной матрице и кватернионам.

## Результаты

В ходе работы были достигнуты следующие результаты. исследованы способы калибровки широкоугольной камеры и написан соответствующий класс. Изучены различные алгоритмы шумоподавления и сделан выбор в пользу медианного фильтра, который был реализован и использован основным модулем. Также были подробно рассмотрены несколько методов определения особых точек на изображении и реализован оптимальный - Детектор Харриса. Проведено исследования принципа работы алгоритма Лукаса-Канье поиска оптического потока и принято решение использовать в реализации именно этот метод. Изучен и реализован метод отбрасывания ложных срабатываний на основе статистических данных RANSAC. На финальном этапе работы был написан вспомогательный модуль для восстановления относительных поз дрона и объединены все части системы в единый автономный модуль, реализующий полный процесс нахождения относительной позиции дрона в пространстве на основе данных полученных с широкоугольной камеры. Также полученный модуль был успешно протестирован на тестовой наборе реальных данных KITTI[16]

## **Заключение**

1. Разработан модуль для калибровки широкоугольной камеры
2. Разработан модуль для фильтрации входного сигнала
3. Разработан модуль для вычисления относительных поз
4. Разработан единый автономный модуль, осуществляющий визуальную одометрию
5. Модуль протестирован на наборе KITTI

## Список литературы

1. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. — Springer, 2010.
2. Klein G., Murray D. Parallel tracking and mapping for small ar workspaces // 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. — IEEE, 2007.
3. Engel J., Sturm J., Cremers D. Camera-based navigation of a low-cost quadrocopter // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System. — IEEE, 2012.
4. Opencv — open source computer vision library. — Access mode: <https://opencv.org> (online; accessed: 2019-05-16).
5. Benefit of large field-of-view cameras for visual odometry / Zichao Zhang, Henri Rebecq, Christian Forster, Davide Scaramuzza // Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on / IEEE. — 2016. — P. 801–808.
6. Beauchemi S.S., Barron J. L., The computation of optical flow
7. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion // Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06). — 2006. — P. 45.
8. Kannala J., Brandt S. S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 2006. — Vol. 28, no. 8. — P. 1335–1340.
9. Kerl C., Sturm J., Cremers D. Robust odometry estimation for rgb-d cameras // Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on / IEEE. — 2013. — P. 3748–3754.

10. Caruso D., Engel J., Cremers D. Large-scale direct slam for omnidirectional cameras // IROS. — 2015.
11. Медианная фильтрация: метод. указания / А. Л. Приоров, В. В. Хрящев, Яросл. гос. ун-т. — Ярославль : ЯрГУ, 2006
12. Tinne Tuytelaars, Krystian Mikolajczyk. Local Invariant Feature Detectors: A Survey, 2008.
13. M. H. Miroslav Trajkovii. Fast corner detection, 1998
14. Andreas Geiger, Philip Lenz, Raquel Urtasun Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)
15. Engel J., Sturm J., Cremers D. Semi-dense visual odometry for a monocular camera // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. — IEEE, 2013. — P. 1449–1456.
16. Engel J., Schöps T., Cremers D. Lsd-slam: Large-scale direct monocular slam // European Conference on Computer Vision. — Springer, 2014. — P. 834–849.
17. Engel J., Koltun V., Cremers D. Direct sparse odometry // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 2018. — Vol. 40, no. 3. — P. 611–625.