

Санкт-Петербургский государственный университет

Направление программной инженерии

Марьина Анна Валерьевна

Построение субпиксельно точных моделей камер

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель: Смирнов М.Н.

Рецензент: генеральный директор ООО «СКЗ» Пименов А.А.

Санкт-Петербург

2018

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Software Engineering

Anna Marina

Construction of sub-pixel accurate camera models

Graduation Thesis

Scientific supervisor: Smirnov M.N.

Reviewer: CEO "CVS" Pimenov A.A.

Saint Petersburg

2018

Оглавление

Введение.....	4
1. Постановка задачи.....	6
2. Обзор.....	7
2.1. Моделирование физических параметров КМОП матриц.....	7
2.2. Понижение хроматической аберрации.....	7
2.3. Моделирование процесса байеризации.....	7
2.4. Детекция границ объектов с заведомо известной формой.....	7
3. Метод для оценки параметров передаточной функции пикселя и эксперимент для ее исследования.....	8
3.1. Мотивировка.....	8
3.2. Описание метода.....	9
3.2.1. Шаблон.....	9
3.2.2. Освещение.....	9
3.2.3. Установка для эксперимента.....	10
3.2.4. Камера.....	11
3.2.5. Методика понижения степени случайного шума.....	12
3.2.6. Погрешности.....	14
3.2.7. Проведение эксперимента.....	15
4. Анализ результатов.....	16
4.1. Проверка пригодности данных для обработки.....	16
4.2. Работа с цветовыми каналами RGB.....	17
4.3. Интерполирование данных для получения передаточной функции.....	18
4.4. Локализация контрастной границы.....	22
5. Заключение.....	24
6. Список литературы.....	25

Введение

В настоящее время индустрия компьютерного зрения развивается крайне активно и современный мир уже невозможно представить без нее. Множество различных видов камер используется повсеместно. Многие общественные объекты оснащены системами наружного видеонаблюдения для облегчения процесса слежения и снижения уровня преступлений. В машиностроении камеры выступают в качестве сенсоров для повышения уровня безопасности автомобиля. Фотографии со спутников используются военными для отслеживания опасностей у границ государств, а так же для составления карт местности. Веб-камеры помогают налаживать коммуникацию между людьми, ведь появляется возможность видеть друг друга даже на больших расстояниях. Существование киноиндустрии невозможно без видеокамер. Научные исследования микробиологов, химиков, медиков предполагают в ходе работы фото и видео съемку. На рынке носимых гаджетов пользователям предлагаются устройства, в которых качество фотографий стремительно растет с каждым годом. Современная робототехника использует камеры в качестве различных датчиков и требует решения широкого круга задач компьютерного зрения. [5]

Очевидно, что от разрешения изображения, способности различить линии и определить локализацию объектов в пределах пикселя, зависит множество аспектов современной жизни. Например, при уточнении границы линии в два раза по сравнению с первоначальным снимком, являющимся кадром со спутника, появляется возможность идентифицировать подозрительный объект.

На сегодняшний день есть несколько эффективных способов повышения качества изображений, имеющих свои преимущества и недостатки. [7]

1. Улучшить оптическую систему, увеличив размер матрицы и добавив функции зума и вспышки. Однако, данный способ ведет к переоборудованию камеры. В разы возрастает цена, а так же увеличиваются размеры и вес устройства.

2. С помощью специальных алгоритмов повышать качество готового изображения. Например, использование алгоритма супер-разрешения по одной или нескольким фотографиям. К сожалению, данный способ не всегда является эффективным. К тому же выбор алгоритма очень сильно зависит от ситуации.

Например, способ для улучшения фотографии с камеры видеонаблюдения навряд ли подойдет для снимков со спутника.

3. Уточнение математической модели камеры. Процесс производится во время калибровки непосредственно перед съемкой. Например, производители известных панорамных камер Trimble V10 используют такой подход. [6] В данном случае один алгоритм можно адаптировать под разные модели камер и разные условия съемки, внося лишь незначительные изменения. Этот способ является очень эффективным. Например, уточнение модели камеры всего на десятые доли пикселя при съемке на большом расстоянии повышает точность измерения расстояния между объектами на несколько метров.

Существует проект Local Positioning System в компании ООО «СКЗ», одной из главных задач которого является локализация специальной мишени-метки в пространстве. В данный момент в нем происходит переход на промышленные камеры. В связи с этим появилась необходимость разработки эффективного метода уточнения математической модели камеры. Именно по этим причинам данный способ выбран для реализации в качестве выпускной квалификационной работы бакалавриата.

1. Постановка задачи

Целью данной работы является построение субпиксельно точной математической модели промышленной камеры Ueye. Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи.

1. Провести обзор существующих решений по построению субпиксельно точной математической модели камеры.
2. Разработать метод для оценки параметров передаточной функции пикселя и провести эксперимент для ее исследования.
3. Выполнить анализ результатов.

2. Обзор

2.1. Моделирование физических параметров КМОП матриц

Одним из методов построения субпиксельно точной математической модели камеры является моделирование устройства пикселя в КМОП матрицах. В них пиксель формируется следующим образом. До съёмки подаётся сигнал сброса, потом в процессе экспозиции происходит накопление заряда фотодиодом, а затем в процессе считывания происходит выборка значения напряжения на конденсаторе. Более подробно в статье. [1]

2.2. Понижение хроматической аберрации

Еще одним способом построения математической модели камеры является моделирование явления хроматической аберрации. Это явление является следствием прохождения луча света от точки в пространстве через оптическую систему камеры.[2]

2.3. Моделирование процесса байеризации

Для получения цветного RGB изображения над каждым элементом матрицы камеры устанавливается специальный цветофильтр, пропускающий свет соответствующий красной, синей или зеленой зоне спектра. Для того, чтобы узнать яркости всех трех цветов в каждой ячейке матрицы используются интерполяционные алгоритмы, которые опираются на информацию о яркости цветов в соседних ячейках. [8]

2.4. Детекция границ объектов с заведомо известной формой

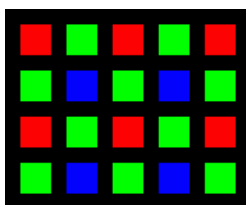
Построение математической модели камеры может быть следствием алгоритма детекции границ объектов с заведомо известной формой. Имея точные сведения о природе объекта, при анализе пикселя становится возможным внести поправки в калибровочные коэффициенты. Более подробно в статье [3]

Методы моделирующие хроматическую абберацию, процесс байеризации и физические параметры КМОП матриц рассматривают только определенные аспекты, влияющие на математическую модель камеры. Способ детекции границ объектов с заведомо известной формой требует точных сведений об объекте, границы которого детектируются и вследствие имеет низкую точность. Метод, который учитывал бы все условия, влияющие на математическую модель камеры найден не был. Исходя из этого сделан вывод о необходимости разработки собственного универсального метода для построения субпиксельно точной математической модели камеры.

3. Метод для оценки параметров передаточной функции пикселя и эксперимент для ее исследования

3.1. Мотивировка

До того момента, пока не появится проекция точки пространства на экране, свет от нее прорезывает долгий путь. Он проходит через воздушную среду, линзу, попадает на ячейку КМОП матрицы, энергии фотонов и их число меняют заряд в ячейки. После данного процесса получается монохромное изображение. Для получения цветного изображения, существуют несколько способов. Можно расщеплять свет после объектива системой призм на красную, зеленую и синюю области и подавать на три монохромных сенсора. Можно установить светофильтры перед сенсором. В камере, которая будет использоваться для проведения эксперимента установлены светофильтры непосредственно над каждым пикселем сенсора.



1. Рисунок:
Фильтр Байера

Данный вид светофильтра называется байеровским. В основе данного фильтра лежит принцип дискретизации яркостного канала на большей частоте, нежели двух оставшихся цветовых. За яркостной канал был принят зеленый. Это связано с такими особенностями человеческого зрения, что зеленочувствительных рецепторов на сетчатке в два раза больше, чем красных или синих и что кривая яркостной чувствительности глаза человека имеет максимум около точки 550 нм, а это соответствует зеленому цвету.

Ячейка матрицы определенного цвета и является субпикселем. Далее просходит процесс байеровской фильтрации. Это специальный алгоритм, в котором для того, чтобы получить конечный цвет пикселя, зная яркость цвета одного субпикселя, данные об яркостях двух других цветов берутся, как среднее значение цветов соседних субпикселей. Минусы данной цветовой интерполяции — это искажения цветов и контуров, исчезновение мелких деталей и муар.

Таким образом, нам необходимо разработать метод, который сможет учесть все факторы, влияющие на искажение реального положения точки в пространстве.

В рамках проекта Local Positioning System (LPS), который занимается локализацией объекта в пространстве по фотоснимкам специальной метки, необходима субпиксельная локализация контрастных шаблонов с помощью инженерных камер.

3.2. Описание метода

3.2.1. Шаблон

Для исследования контрастной границы было принято решение выбрать шаблон, используемый в проекте LPS детекции местоположения объекта по фотографиям специальной метки.



2. Рисунок: Шаблон для съемки

Почему выбран данный шаблон для анализа? Мишень изготовлена из негнувшегося материала, что обеспечивает ровные линии. Так же она имеет антибликовое покрытие, обеспечивая качество съемки. На ней присутствует контрастная граница перехода между белым и черным цветами. Белый цвет содержит максимальные значения трех цветовых каналов RGB, а черный цвет их минимальные значения, очевидно, что для анализа это очень удобно, так как планируется анализ поведения разных каналов.

3.2.2. Освещение

В качестве освещения необходимо выбрать такой источник света, поведение которого предсказуемо. Сразу стало понятно, что свет за окном в качестве источника света категорически не подходит. Ртутные лампы излучают различные спектральные линии, что может оказать непрогнозируемое влияние на эксперимент. Многие лампы мерцают с частотой 50 Гц, такой эффект может

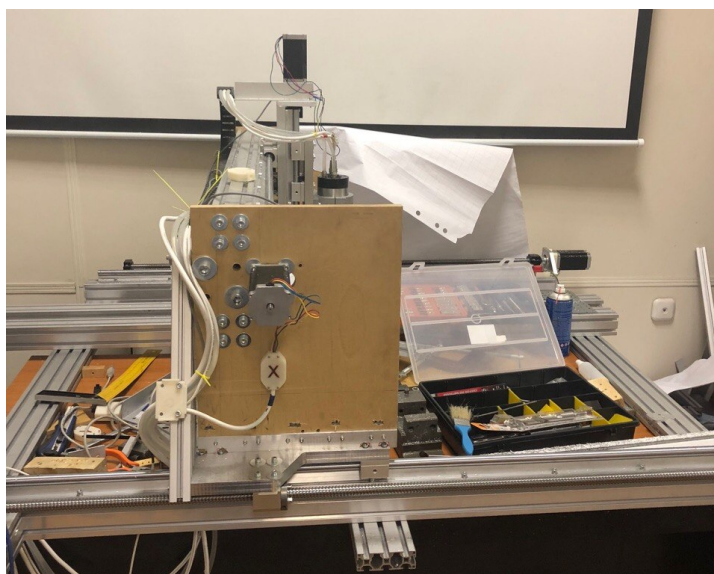
негативно сказаться на результате эксперимента. Исходя из всего этого было принято решение использовать два специальных прожектора со специальными лампами накаливания. Так же следует учесть, что лампа накаливания имеет преобладание красного, желтого и зеленого цветов в спектре, это может негативно сказаться на светочувствительности синего канала, что следует учесть во время анализа результатов эксперимента.

3.2.3. Установка для эксперимента

Для проведения эксперимента по субпиксельному анализу контрастной границы необходимо рассчитать насколько нужно сдвигать камеру, чтобы «разрезать» пиксель.

Для того, чтобы узнать точное расстояние от камеры до мишени использовался лазерный дальномер, оно равно 5250мм. Угол обзора камеры равен 60 градусов. Размер матрицы 1280 пикселей. Исходя из этих данных, при перемещении камеры на 0,25 мм возможно сделать 20 снимков перемещаясь в пределах одного пикселя.

Для получения такой высокой точности передвижения во время съемки было принято решение использовать следующую установку.



3. Рисунок: Экспериментальная установка

Аппаратный стенд представляет собой CNC фрезерный станок в конфигурации router. Неподвижно закрепленная площадка для крепления камеры смонтирована на портале и направлена на удаленную мишень в виде черной полосы на белом фоне.

Стенд позволяет равномерно и прямолинейно перемещать каретку на отрезке расчетной точностью не хуже 0.1мм.

Перемещение портала осуществляется посредством шарико-винтовой передачи с шагом 5мм приводимым во вращение шаговым двигателем с шагом 1.8 градуса. Последний работает в режиме 256 микрошагов. Управление станком осуществляется с помощью интерпретатора G-Code на базе свободного решения grbl. Управляющая прошивка запущена на AtMega168 в составе платы Arduino UNO. Эта программная компонента преобразует команду на перемещение в точку в последовательность сигналов "направление" и "шаг". Ее управляющие сигналы заведены на драйвер шагового двигателя на базе драйвера аналогичного LeadShine DM543 к которому двигатель подключен непосредственно, позиция периодически контролировалась часовым индикатором стрелочного типа на отсутствие люфтов и "мертвого хода" которые составляют не более 0.02мм.

Команды G-Code формируются и съемка производится с помощью специально написанной программы.

Для работы с данной установкой было разработано приложение, которое отправляет необходимые команды такие, как активировать работу, снять защиту и переместиться в нужную координату на последовательный порт ноутбука. Оно было реализовано на высокоуровневом языке программирования C++.

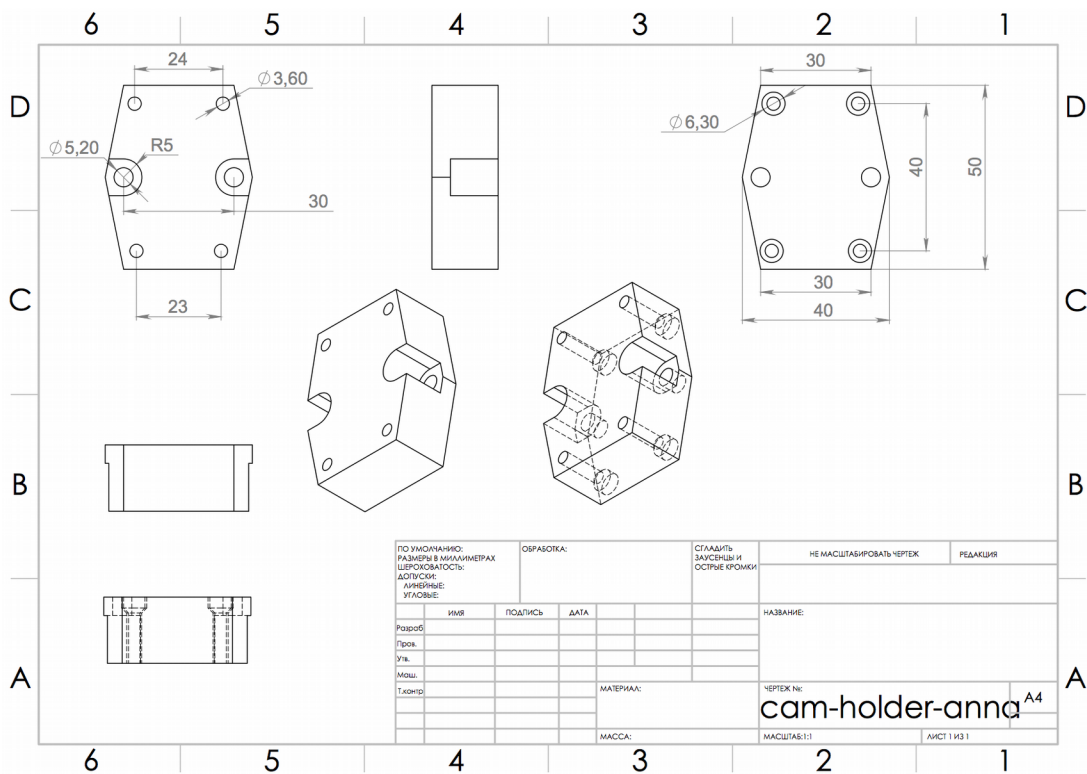
3.2.4. Камера

Для проведения эксперимента было принято решение использовать промышленную камеру Ueye UI-5240CP-C-HQ. Почему выбрана именно эта камера?

Есть возможность сохранять изображения и в raw формате, где изображение записывается в виде сигналов яркости в каждом диоде, то есть в черно-белом виде, не неся никакой цветовой информации, и в RGB формате. В ней применены простые алгоритмы байеризации, использующие информацию для получения цвета субпикселя только от двух соседних субпикселей. Еще одно преимущество данной камеры состоит в том, что на программном уровне с ней легко взаимодействовать, так как имеется хорошая документация. Так же камера имеет небольшой размер, поэтому ее легко крепить на установку для съемки так, чтобы дрожание камеры во время передвижения оказало минимальное влияния на конечный результат.

Для работы с данной камерой было реализовано приложение на высокоуровневом языке программирования C++. Были реализованы захват изображений с камеры, сохранение изображений и изменение настроек фотосъемки таких, как частота пикселизации, кадровая частота и экспозиция. Процесс получения одного кадра занимает доли секунды, что делает процесс съемки комфортным.

Камера закрепляется на каретку экспериментальной установке при помощи детали, чертеж которой приведен ниже.



4. Рисунок: Чертеж детали для прикрепления камеры

3.2.5. Методика понижения степени случайного шума

На фотографиях всегда присутствует цифровой шум. Данный дефект является следствием фотонной природы света и несовершенства технологий. Выделяют следующие причины возникновения шума на изображениях:

1. Вследствие термоэлектронной эмиссии и «туннельного» эффекта при подаче потенциала на электрод в сенсоре возникает «темновой ток», под которым формируется потенциальная яма. Такое название данный ток имеет потому, что складывается из электронов, которые попали в яму при отсутствии светового потока. Данный дефект мы наблюдаем на тёмном фоне в виде светлых точек, поэтому его еще называют белым дефектом. Этот процесс особенно проявляется при больших экспозициях. Основной причиной, по которой возникает темновой ток, является наличие примесей в кремниевой пластине и повреждение кристаллической решётки кремния, поэтому чем чище кремний, тем меньше темновой ток. Температура элементов камеры так же влияет на степень белого дефекта. При увеличении

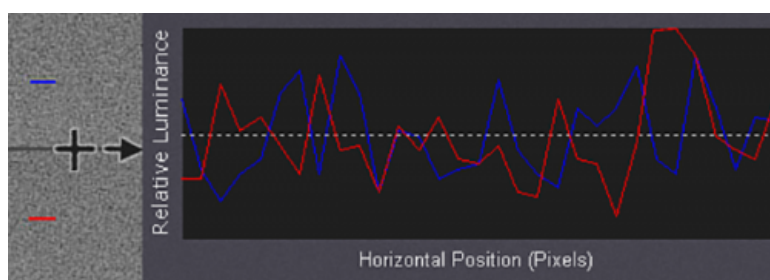
температуры на 6-8 градусов происходит удваивание значения темнового тока.

2. По причине шума, который возникает из-за стохастической природы взаимодействия атомов материала фотодиодов сенсора с фотонами света. При движении фотона внутри кристаллической решётки кремния есть вероятность, что фотон, «попав» в атом кремния, выбьет из него электрон, родив пару электрон-дырка, но сказать точно, сколько фотонов родит пары, а сколько пропадёт с какими-то другими эффектами, нельзя. Электрический сигнал, снимаемый с сенсора, соответствует количеству рождённых пар. Квантовая эффективность — это среднее число рождаемых пар электрон-дырка, именно она и определяет снимаемый сигнал с сенсора при заданных выдержке и диафрагме (интенсивности света).

3. Из-за наличия дефектных (не работающих) пикселей, которые возникают при производстве фотосенсоров. Для устранения их негативного влияния используются математические методы интерполяции. Вместо дефектного «подставляется» либо среднее по прилегающим элементам, либо значение, вычисленное более сложным способом, либо просто соседний элемент. Очевидно, что вычисленное значение отличается от фактического и ухудшает резкость конечного изображения. Этот же дефект вносит интерполяция, корректирующая конечное изображение, при использовании фильтра Байера.

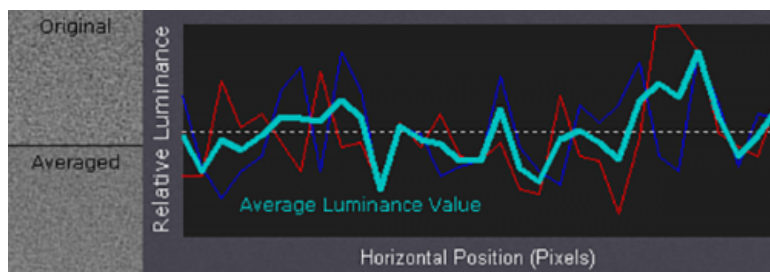
Учитывая причины возникновения цифрового шума на изображения, описанные выше будем считать шум случайным. Во время съёмки используется качественное освещение. Поэтому для уменьшения его влияния будем использовать следующий метод.

Во время процесса съёмки с одного ракурса будем делать не одну фотографию, а 20. Далее получим из 20 изображений одно усредненное. Случайные флуктуации выше и ниже фактических данных изображения исчезнут.



5. Рисунок: Колебания яркостей пикселей

На графике видим колебания яркостей пикселей двух изображений. Пунктирная горизонтальная линия представляет собой среднее значение, или то, как бы выглядел этот участок, если бы уровень шума был равен нулю. Если взять значение пикселя в каждой точке вдоль этой линии, и рассчитать среднее значение для верхнего и нижнего изображения в этой точке, то изменение яркости будет выглядеть следующим образом:



6. Рисунок: Усреднение колебаний яркостей пикселей

Несмотря на то, что график усредненных значений все равно пересекает нулевую отметку, амплитуда максимального отклонения от нее значительно уменьшилась. Визуально, это проявляется в виде сглаживания изображения.

При использовании данной методики, величина шума флуктуации уменьшается на величину, равную корню квадратному из количества усредненных изображений. Таким образом, при использовании 20 изображений мы добьемся уменьшения влияния шума в 5 раз.

Так же стоит учесть, что если только на одном изображении пиксель белый, а на остальных имеет цвет, то будем считать это шумом.

Данный алгоритм был реализован на языке программирования Python.

3.2.6. Погрешности

Рассмотрим, какие процессы могут негативно повлиять на точность эксперимента, и как можно уменьшить их влияние.

Камера во время съемки движется по специальным рельсам, и есть вероятность, что рельсы имеют форму не абсолютно ровной линии. Таким образом, траектория движения камеры может быть искривлена. Как это повлияет на результат?

При анализе результатов считаем, что расстояние от точки в пространстве до камеры всегда одинаковое, однако, если траектория съемки была искривлена, возникнут проблемы с локализацией контрастной границы. Как же проверить, наличие влияния искривления рельс? Если во время экспериментальной фотосъемки «проехать» не один пиксель, а несколько, и проанализировать размеры пикселей, то при их совпадении можно сделать вывод о том, что на участке съемки траектория не искривлена.

Во время передвижения камеры не исключено ее дрожание. Как можно уменьшить влияние данного процесса? Если делать в каждой позиции не один

фотоснимок, а несколько, а потом попиксельно усреднять яркость при преобразовании их в одно изображение, то влияние нестабильности камеры в процессе фотосъемки будет сведено к нулю.

3.2.7. Проведение эксперимента

Исходя из описания разработанного метода, много факторов может повлиять на результат эксперимента, поэтому для обеспечения высокой точности процесс фотосъемки был проведен два раза. Длительность одного эксперимента составила примерно 30 минут.

Изображения были сохранены в RGB формате для того, чтобы во время построения субпиксельно точной математической модели камеры учесть все факторы, влияющие на точность локализации контрастной границы в пространстве. Всего было получено 2000 фотоснимков, по 20 с каждой позиции. После применения алгоритма для уменьшения влияния шума осталось 100 снимков. Исходя из расчетов камера «проехала» 5 пикселей. Полученные данные пригодны для последующего анализа.



*7. Рисунок:
Фотография
контрастного
перехода*

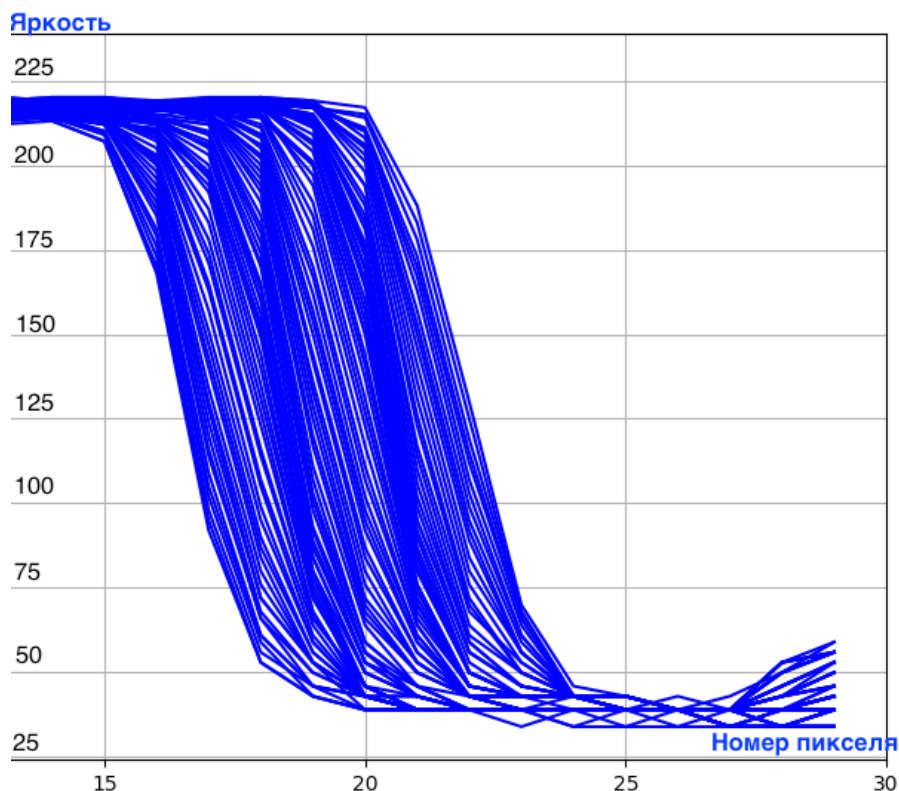
4. Анализ результатов

Весь программный код, необходимый для анализа изображений был написан на языке Python.

4.1. Проверка пригодности данных для обработки

Для уверенности в том, что в ходе эксперимента были выполнены все условия, и данные пригодны для субпиксельного расчета локализации контрастной границы, необходимо построить графики перехода от белого цвета к черному на изображениях в цветовом режиме grayscale. В данном режиме серая шкала использует на каждый пиксель изображения один байт (8 бит) информации. Такая шкала передаёт 256 оттенков (градаций) серого цвета, или яркости (значение 0 представляет чёрный цвет, а значение 255 — белый). Яркость Y пикселя в режиме grayscale формируется следующим образом $Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$, где R , G , B — это яркости красного, синего и зеленого каналов соответственно.

Значения коэффициентов имеют значения связанные с цветовосприятием человеческого глаза и устройством цветофильтра на матрице фотокамеры.

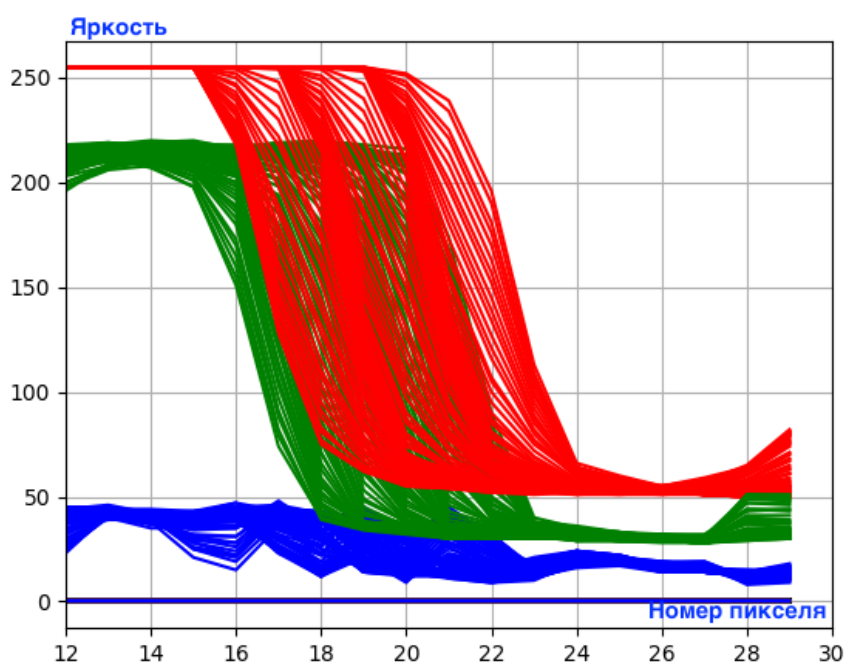


8. Рисунок: График контрастной границы на всех полученных изображениях

Как следует интерпретировать данный результат? На графике абсолютно точно наблюдается группирование линий в области 5 пикселей. Расчет размеров пикселей показали, что в области съемки рельсы имели траекторию в виде прямой линии.

4.2. Работа с цветовыми каналами RGB

Изображения в цветовом режиме градаций серого не подходят для дальнейшего анализа из-за искусственно введенных коэффициентов. Поэтому построим аналогичные изображения для каждого цветового канала.

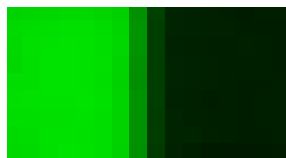


9. Рисунок: График контрастной границы в разных цветовых каналах

В цветофильтре Байера красных и синих элементов в два раза меньше, чем зеленых. Для того, чтобы узнать цветовые составляющие для каждого субпикселя применяется алгоритм интерполяции по двум соседям. Именно по этой причине в красном канале мы видим только три пикселя, данные с этого канала не пригодны для дальнейшего анализа.

Синий канал является очень шумным, это связано с фотонной природой света и тем, что для освещения использовались лампы накаливания с преобладанием красного спектра.

Данные с зеленого канала пригодны для дальнейшего анализа.



10. Рисунок:
Фотография
шаблона в зеленом
канале

4.3. Интерполирование данных для получения передаточной функции

Необходимо получить передаточную функцию пикселя. Передаточная функция является способом математического описания динамической системы. Используется в основном в теории управления, связи и цифровой обработке сигналов. Представляет собой дифференциальный оператор, выражающий связь между входом и выходом линейной стационарной системы. Зная входной сигнал системы и передаточную функцию, можно восстановить выходной сигнал.

Известна яркость в каждом пикселе, но для субпиксельного уточнения локализации контрастной границы этого недостаточно. Необходимо получить сведения о промежуточных значениях. Применим алгоритм интерполяции.

Одной из основных задач численного анализа является задача об интерполяции функций. Пусть на отрезке $[a, b]$ задана сетка $w = \{x_i : x_0 = a < x_1 < \dots < x_i < \dots < x_n = b\}$ и в её узлах заданы значения функции $y(x)$, равные $y(x_0) = y_0, \dots, y(x_i) = y_i, \dots, y(x_n) = y_n$. Требуется построить *интерполянту* — функцию $f(x)$, совпадающую с функцией $y(x)$ в узлах сетки:

$$f(x_i) = y_i, i = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

Основная цель интерполяции — получить быстрый (экономичный) алгоритм вычисления значений $f(x)$ для значений x , не содержащихся в таблице данных.

Интерполирующие функции $f(x)$, как правило строятся в виде линейных комбинаций некоторых элементарных функций:

$$f(x) = \sum_{k=0}^N c_k \Phi_k(x), \quad \text{где } \{\Phi_k(x)\} \text{ — фиксированный линейно независимые}$$

функции, c_0, c_1, \dots, c_n — не определенные пока коэффициенты.

Из условия (1) получаем систему из $n+1$ уравнений относительно коэффициентов $\{c_k\}$:

$$f(x) = \sum_{k=0}^N c_k \Phi_k(x_i) = y_i, i=0,1,\dots,n.$$

Предположим, что система функции $\{\Phi_k(x)\}$ такова, что при любом выборе узлов $a < x_1 < \dots < x_i < \dots < x_n = b$ отличен от нуля определитель системы:

$$\Delta(\Phi) = \begin{vmatrix} \Phi_0(x_0) & \Phi_1(x_0) & \dots & \Phi_n(x_0) \\ \Phi_0(x_1) & \Phi_1(x_1) & \dots & \Phi_n(x_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Phi_0(x_n) & \Phi_1(x_n) & \dots & \Phi_n(x_n) \end{vmatrix}$$

Тогда по заданным $y_i (i=1,\dots,n)$ однозначно определяются коэффициенты $c_k (k=1,\dots,n)$.

Интерполяция кубическими сплайнами является частным случаем кусочно-полиномиальной интерполяции. В этом специальном случае между любыми двумя соседними узлами функция интерполируется кубическим полиномом. Его коэффициенты на каждом интервале определяются из условий сопряжения в узлах:

$$f_i = y_i, f'(x_i-0) = f'(x_i+0), f''(x_i-0) = f''(x_i+0), i=1,2,\dots,n-1.$$

Кроме того, на границе при $x=x_0$ и $x=x_n$ ставятся условия

$$f''(x_0) = 0, f''(x_n) = 0 \quad (2)$$

Будем искать кубический полином в виде

$$f(x) = a_i + b_i(x - x_{i-1}) + c_i(x - x_{i-1})^2 + d_i(x - x_{i-1})^3, x_{i-1} \leq x \leq x_i \quad (3)$$

Из условия $f_i = y_i$ имеем

$$f(x_{i-1}) = a_i = y_{i-1}, f(x_i) = a_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3 = y_i, h_i = x_i - x_{i-1}, i=1,2,\dots,n-1 \quad (4)$$

Вычислим производные:

$$f'(x) = b_i + 2c_i(x - x_{i-1}) + 3d_i(x - x_{i-1})^2, f''(x) = 2c_i + 6d_i(x - x_{i-1}), x_{i-1} \leq x \leq x_i$$

$$f'(x) = b_i + 2c_i(x - x_{i-1}) + 3d_i(x - x_{i-1})^2, f''(x) = 2c_i + 6d_i(x - x_{i-1}), x_{i-1} \leq x \leq x_i$$

и потребуем их непрерывности при $x=x_i$:

$$b_{i+1} = b_i + 2c_i h_i + 3d_i h_i^2, c_{i+1} = c_i + 3d_i h_i, i=1,2,\dots,n-1. \quad (5)$$

Общее число неизвестных коэффициентов, очевидно, равно $4n$, число уравнений (4) и (5) равно $4n-2$. Недостающие два уравнения получаем из условия (2) при $x=x_0$ и $x=x_n$:

$$c_1=0, c_n+3d_n h_n=0.$$

Выражение из (5) $d_i=\frac{c_{i+1}-c_i}{3}h_i$, подставляя это выражение в (4) и исключая $x_i=y_{i-1}$, получим

$$b_i=\left[\frac{y_i-y_{i-1}}{h_i}\right]-\frac{1}{3}h_i(c_{i+1}+2c_i), i=1,2,\dots,n-1, b_n=\left[\frac{y_n-y_{n-1}}{h_n}\right]-\frac{2}{3}h_n c_n.$$

Подставив теперь выражения для b_i, b_{i+1} и d_i в первую формулу (5), после несложных преобразований получаем для определения c_i разностное уравнение второго порядка

$$h_i c_i + 2(h_i + h_{i+1})c_{i+1} + h_{i+1}c_{i+2} = 3\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i-y_{i-1}}{h_i}\right), i=1,2,\dots,n-1. \quad (6)$$

С краевыми условиями

$$c_1=0, c_{n+1}=0. \quad (7)$$

Условие $c_{n+1}=0$ эквивалентно условию $c_n+3d_n h_n=0$

и уравнению $c_{i+1}=c_i+d_i h_i$. Разностное уравнение (6) с условиями (7) можно решить методом прогонки, представив в виде системы линейных алгебраических уравнений вида $A*x=F$, где вектор x соответствует вектору $\{c_i\}$, вектор F поэлементно равен правой части уравнения (6), а матрица A имеет следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} C_1 & B_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ A_2 & C_2 & B_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & A_3 & C_3 & B_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & B_{n-1} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & A_n & C_n \end{pmatrix},$$

где $A_i=h_i, i=2, \dots, n, B_i=h_{i+1}, i=1, \dots, n-1$ и $C_i=2(h_i+h_{i+1}), i=1, \dots, n$.

Метод прогонки, основан на предположении, что искомые неизвестные связаны рекуррентным соотношением:

$$x_i = a_{i+1}x_{i+1} + b_{i+1}, i=1, \dots, n-1 \quad (8)$$

Используя это соотношение, выразим x_{i-1} и x_i через x_{i+1} и подставим в i -е уравнение:

$$(A_i a_i a_{i+1} + C_i a_{i+1} + B_i)x_{i+1} + A_i a_i b_{i+1} + A_i b_i + C_i b_{i+1} - F_i = 0,$$

где F_i - правая часть i -го уравнения. Это соотношение будет выполняться независимо от решения, если потребовать

$$A_i a_i a_{i+1} + C_i a_{i+1} + B_i = 0$$

$$A_i a_i b_{i+1} + A_i b_i + C_i b_{i+1} - F_i = 0$$

Отсюда следует:

$$a_{i+1} = \frac{-B_i}{A_i a_i + C_i}$$

$$a_{i+1} = \frac{F_i - A_i b_i}{A_i a_i + C_i}$$

Из первого уравнения получим:

$$a_2 = \frac{-B_1}{C_1}$$

$$b_2 = \frac{F_1}{C_1}$$

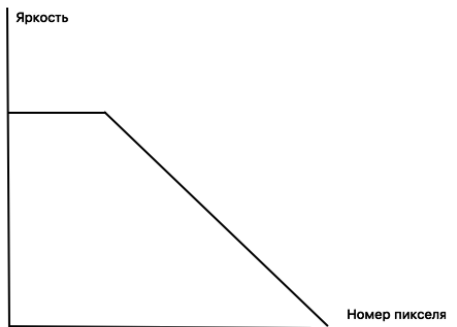
После нахождения прогоночных коэффициентов a и b , используя уравнение (1), получим решение системы. При этом,

$$x_n = \frac{F_n - A_n b_n}{C_n + A_n a_n}$$

4.4. Локализация контрастной границы

Можно сделать предположение, что граница проходит ровно посередине перехода от белого цвета к черному, который показан на графике. Однако, это не всегда так.

Есть несколько вариантов того, как будет выглядеть график отклика яркости пикселя в зависимости от того, как происходит переход яркости.

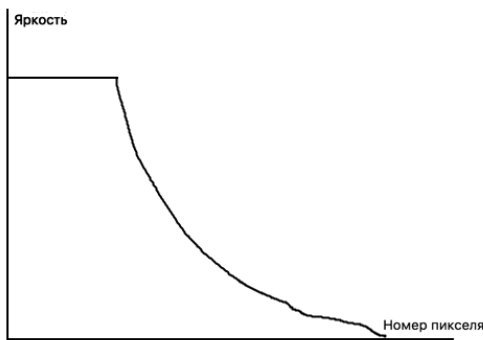


12. Рисунок: График перехода

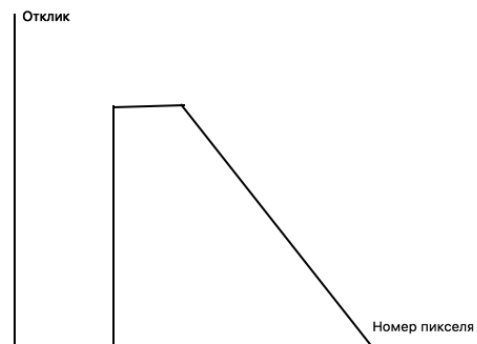


11. Рисунок: Отклик пикселя

На графиках показан линейный переход, в природе этот вариант почти невозможен, однако, в данном случае можно будет сказать, что контрастная граница пройдет посередине перехода.

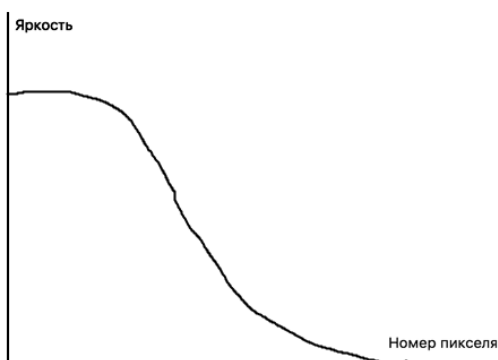


14. Рисунок: График перехода

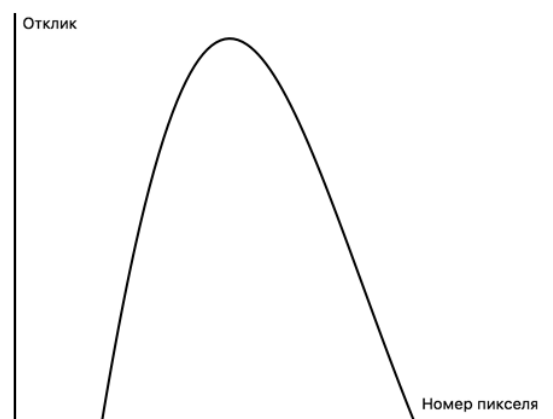


13. Рисунок: Отклик пикселя

В данном случае контрастная граница будет смещена.



16. Рисунок: График перехода



15. Рисунок: Отклик пикселя

В случае, показанном на данных графиках контрастная граница тоже может быть смещена.

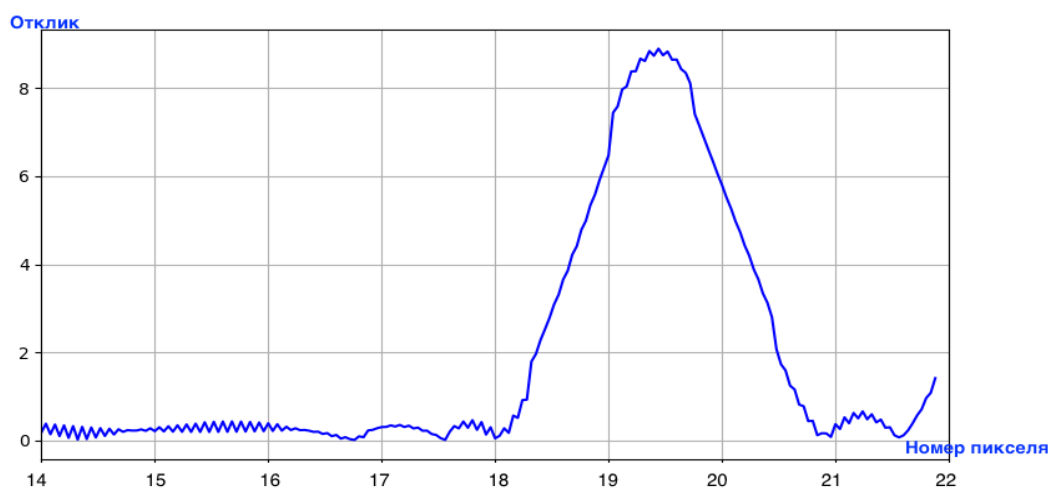
Получим локализацию контрастной границы в нашем случае.

Передаточная функция была восстановлена методом интерполяции. Получены значения яркости не только в целочисленных координатах пикселей.

Получены передаточные функции для 20 позиций камеры внутри пикселя. Подставим значения 50 координат в каждую полученную функцию. Для получения функции отклика пикселя, по которой установлена субпиксельно точное расположение контрастной границы, необходимо было из данных о яркости пикселей на переходе получить локализацию перехода. Для этого по координатно рассчитали модули разностей яркостей. Соединили данные всех позиций камер.

Получили субпиксельно точное местоположение контрастной границы. График ниже иллюстрирует результат.

Главной поставленной задачей была разработка метода для локализации контрастной границы. Метод, разработанный в ходе выполнения выпускной квалификационной работы эффективен и готов к внедрению в проект LPS.



17. Рисунок: Субпиксельно точное расположение контрастной границы

5. Заключение

В ходе данной работы были получены следующие результаты.

- Проведен обзор существующих решений построения субпиксельно точных математических моделей камер: моделирование физических характеристик КМОП матриц, уменьшение влияния атмосферной среды, понижение хроматической абберации, использование субпиксельно точных алгоритмов для детекции границ объектов, усовершенствование алгоритмов байеризации. Сделан вывод, о необходимости разработки собственного метода.
- Разработан метод оценки параметров передаточной функции: спроектирована мишень для анализа, обоснован выбор камеры для эксперимента, создана методика подавления шума, построена кинематическая модель экспериментальной установки и произведен расчет возможных погрешностей. Проведен эксперимент для оценки параметров передаточной функции: разработка C++ приложения для проведения экспериментов с камерой Ueye, выполнена необходимая инженерная работа.
- Выполнен анализ полученных результатов: оценены параметры передаточной функции, получена субпиксельно точная локализация контрастной границы и принято решение об использовании данного метода в проекте LPS.

6. Список литературы

- [1] Serena Rizzolo, Member, IEEE, Vincent Goiffon, Member, IEEE, Magali Estribeau Member, IEEE, Olivier Marcelot Member, IEEE, Philippe Martin-Gonthier Member, IEEE, Pierre Magnan, Member, IEEE , Influence of Pixel Design on Charge Transfer Performances in CMOS Image Sensors, 2017
- [2] David H. Marimont, Brian A. Wandell Matching color images: the effects of axial chromatic aberration, 1994,
<http://scarlet.stanford.edu/~brian/papers/color/MarimontWandell1994.pdf>
- [3] P. Mikulastik, R. Höver, O. Urfalioglu. Error analysis of subpixel edge localization, Signal Processing for Image Enhancement and Multimedia Processing, Multimedia Systems and Applications Series Volume 31, 2008, pp 103-113.
- [4] James R Andrews, Ph D , Low-Pass Risetime Filters for Time Domain Applications, 1999
- [5] Алексей Потапов, Системы компьютерного зрения: современные задачи и методы, 2014
- [6] Сайт компании по производству панорамных камер Trimble V10,
<http://www.trimble.com/survey/trimble-v10-imaging-rover.aspx>
- [7] Дэвид Форсайт, Жан Понс, Компьютерное зрение современный подход, издательский дом «Вильямс», 2004
- [8] HeeChul Han, SeungKi Cho Hyunseok, Jingu Jeong, Post exposure correction for bayer CFA Image, 2011
- [9] Мураховский В. И., Симонович С.В. « Большая книга цифровой фотографии», 2006, 320с.
- [10] R. Szeliski «Computer Vision: Algorithms and Applications», 2010, 812p.
- [11] Щербинина Н.В. «Разработка метода и алгоритмов восстановления изображений земной поверхности по спутниковым снимкам», 2015
- [12] Heiko Hirschmuller, Stefan Gehrig «Stereo Matching in the Presence of Sub-Pixel Calibration Errors», 2009
- [13] Wikipedia. Bayer filter. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter.
- [14] Wikipedia. Spline (mathematics). — URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spline_\(mathematics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Spline_(mathematics)).