

На правах рукописи

Абраменко

АБРАМЕНКО АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ

**Разработка и исследование методов
обнаружения и распознавания объектов
на основе алгебраических моментов**

05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Каркищенко Александр Николаевич,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»
(г. Таганрог)

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Сергеев Владислав Викторович,
ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследова-
тельский университет имени академика С.П. Коро-
лева», директор института информатики, математи-
ки и электроники (г. Самара)

кандидат физико-математических наук,
Вишняков Борис Ваисович,
ФГУП «ГосНИИАС», начальник лаборатории ана-
лиза динамических сцен (г. Москва)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный универси-
тет»

Защита состоится «14» февраля 2020 г. в 16⁰⁰ на заседании объединённого дис-
сертационного совета Д 999.065.02, созданного на базе ФГАОУ ВО «ЮФУ»
и ФГБОУ ВО «ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова», по адресу: 347928, г. Та-
ганрог, пер. Некрасовский, 44, ауд. Д-406.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке
ЮФУ по адресу 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21-ж и на сайте
<https://hub.sfedu.ru/diss/announcement/728cbfa4-aa07-4d7e-842b-a4de9292e0be/>.

Автореферат разослан «____» декабря 2019 г.

Просим Вас присылать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный
гербовой печатью учреждения, по адресу: 347928, г. Таганрог, пер. Некрасов-
ский, 44, ауд. Г-144, учёному секретарю диссертационного совета Д 999.065.02.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 999.065.02
доктор технических наук, профессор



А.Н. Целых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Моменты широко и успешно используются на протяжении сотен лет в статистике для описания плотности вероятности, а также в классической механике твёрдого тела. Моменты также используются в обработке изображений и компьютерном зрении, но, несмотря на это, поиск и исследование различных применений моментов в современных задачах компьютерного зрения остаётся актуальным.

Одной из главных целей компьютерного зрения является интерпретация окружающего пространства (сцены). Методы выделения границ и углов играют важную роль, так как они используются в качестве начального этапа обработки данных в большинстве задач компьютерного зрения. Даже учитывая то обстоятельство, что вопрос обнаружения углов и границ хорошо исследован, до сих пор остаётся актуальной разработка методов обнаружения, позволяющих получать результат с высокой точностью при больших уровнях зашумления. Для решения задач компьютерного зрения используют данные с датчиков технического зрения. Наиболее распространёнными из таких сенсоров являются лидары и камеры. Актуальной задачей компьютерного зрения становится задача точного определения взаимного расположения (взаимной калибровки) нескольких датчиков. Эта задача может быть решена различными способами, один из которых основан на поиске соответствий угловых и граничных точек в данных с этих сенсоров. Ещё одной активной областью исследования в компьютерном зрении является распознавание объектов. Задача распознавания заключается в том, чтобы правильно идентифицировать объекты, находящиеся на сцене, а также определить их положение и ориентацию. Обнаружение и распознавание объектов на основе лидарных облаков точек активно исследуются, однако до сих пор данная задача остаётся нетривиальной из-за зашумлённости, различной плотности и большого объёма этих данных.

В диссертационной работе для решения обозначенных задач предлагается использовать интегральные характеристики, а именно алгебраические моменты. Основное научное предположение, которое породило тему данного исследования, состоит в том, что использование таких характеристик позволит получить высокоточные методы, которые будут устойчивы к шуму и смогут применяться как для изображений, так и для облаков точек.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является развитие и исследование методов качественного и эффективного обнаружения углов, границ и объектов на изображениях и в облаках точек.

В связи с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать и исследовать высокоточные методы обнаружения углов и границ, основанные на использовании алгебраических моментов;
- 2) разработать и исследовать метод калибровки взаимного расположения датчиков технического зрения, основанный на высокоточном обнаружении угловых и граничных точек;

- 3) разработать основанный на алгебраических моментах метод получения информативных признаков облака точек, пригодных для обнаружения и распознавания объектов.

Методы исследований основываются на алгебре, аналитической геометрии, теории вероятностей, методах оптимизации, теории распознавания образов, компьютерном моделировании и других.

Научная новизна. При решении поставленных в диссертационной работе задач получены следующие новые научные результаты:

- на основе алгебраических моментов *разработан метод субпиксельного обнаружения границ на изображении*, который отличается от известных тем, что использует линейную модель границы сколь угодно большого размера, что позволяет находить с высокой точностью координаты и другие параметры границы даже на изображениях высокого разрешения;
- на основе алгебраических моментов *разработан метод высокоточного обнаружения углов и границ на изображении и в облаке точек*, отличающийся использованием угловой модели границы сколь угодно большого размера и ясными критериями верификации модели границы, что позволяет достичь высокой точности обнаружения координат и других параметров углов и границ, а также применять метод к изображениям большого разрешения и облакам точек различной плотности;
- *разработан метод определения взаимного расположения датчиков технического зрения*, который отличается тем, что использует информацию сразу с двух камер стереокамеры, простой в изготовлении калибровочный щит и высокоточные методы обнаружения углов и границ на основе моментов, что позволяет осуществлять калибровку различных датчиков с высокой точностью, избавиться от ограничений на место проведения калибровки и необходимости в громоздком дополнительном оборудовании;
- *разработан метод получения информативных признаков облака точек*, отличающийся способом регуляризации облака точек и использованием инвариантных к различным преобразованиям моментов, что позволяет получить признаки, пригодные для распознавания объектов с помощью различных методов.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты *соответствуют пункту 7* «Разработка методов распознавания образов, фильтрации, распознавания и синтеза изображений, решающих правил. Моделирование формирования эмпирического знания» паспорта специальности 05.13.17.

Практическая значимость. Разработанные в рамках диссертационной работы методы обнаружения углов и границ на изображениях и в облаках точек могут быть использованы во многих задачах компьютерного зрения, в частности, в задачах, связанных с автоматическим распознаванием объектов, сегментацией, реконструкцией. Разработанный в рамках диссертационной работы метод калибровки может успешно применяться для взаимной калибровки датчиков технического зрения на различных платформах. Метод получения ин-

формативных признаков облака точек востребован при решении задач распознавания.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: • Научно-техническая конференция с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (г. Москва, 2014 – 2019); • Международная научно-практическая молодёжная конференция «Робототехника и системный анализ» (г. Пенза, 2015); • Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных, аспирантов и студентов «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности», (г. Таганрог, 2015 – 2017); • Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных, аспирантов, магистрантов и студентов «Информационные системы и технологии: фундаментальные и прикладные исследования», (г. Таганрог, 2017).

Практические и теоретические результаты диссертации использовались при выполнении научно-исследовательских проектов: • Разработка прототипа беспилотного автомобиля в составе объединенной команды НКБ ВС, НПК БИС, ЮФУ, ЮЗГУ; • Грант РФФИ №17-20-02017 «Распознавание и мониторинг состояния отдельных объектов инфраструктуры на основе лазерных данных»; • Грант РФФИ №16-07-00648 «Развитие методов анализа и восстановления инвариантных свойств изображений на основе алгебраических и теоретико-числовых подходов»; • Грант РФФИ №13-07-13112 «Разработка и исследование методов и алгоритмов реконструкции объектов железнодорожной инфраструктуры по изображениям и данным лазерного сканирования»; • Грант РФФИ №13-07-00327 «Разработка алгебраических методов анализа симметрии цифровых изображений».

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 19 печатных работах, из них 3 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) метод субпиксельного обнаружения границ на изображении;
- 2) метод высокоточного обнаружения углов и границ на изображении и в облаке точек;
- 3) метод взаимной калибровки датчиков технического зрения;
- 4) метод получения информативных признаков облака точек.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 тематических глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём основного текста — 154 страницы, включая 45 рисунков и 3 таблицы. Список литературы изложен на 22 страницах и содержит 179 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований по теме диссертационной работы, сделан обзор современных методов, в частности, методов обнаружения углов и границ, методов калибровки, методов распознавания объектов

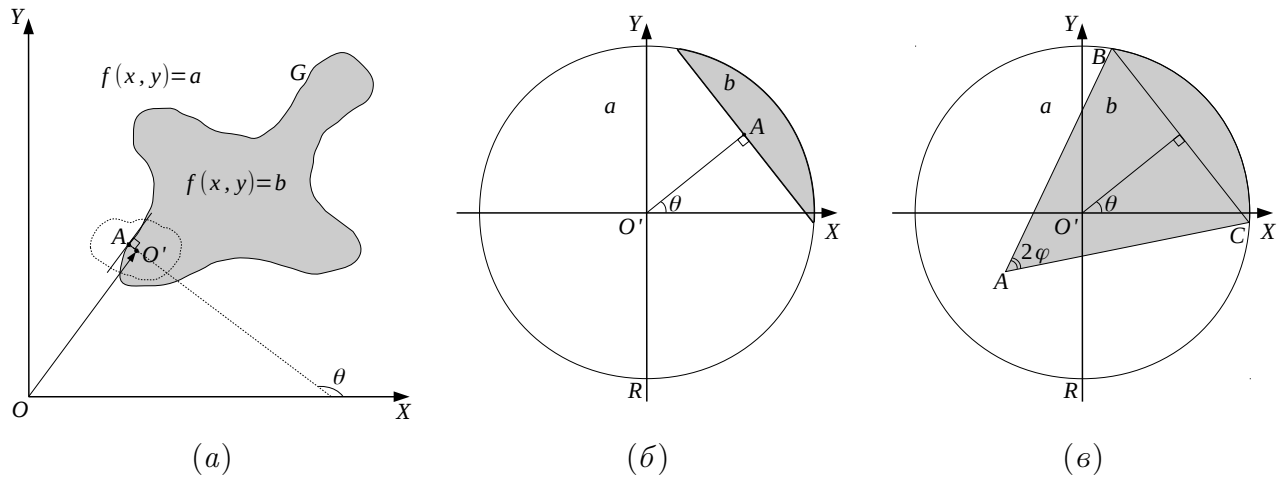


Рис. 1. Модели границы: (а) окрестность некоторой точки; (б) и (в) система координат, связанная с круговой окрестностью S в случае линейной и угловой границы соответственно.

в облаке точек; сформулированы цель и задачи исследования, выделены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе разрабатывается и исследуется метод субпиксельного обнаружения границ на изображении при помощи алгебраических моментов функции яркости полутонового изображения с использованием линейной модели границы. *Субпиксельное обнаружение* означает определение положения и ориентации границы даже внутри пикселя изображения.

Поиск границ осуществляется исходя из предположения, что в небольшой окрестности граница может быть аппроксимирована прямой линией. Под *изображением* понимается двумерная кусочно-постоянная функция $f(x, y)$ на ограниченной прямоугольной области в \mathbb{R}^2 , заданная в некоторой ортогональной системе координат (СК) XOY .

Определение 1. *Линейной моделью границы* называется окрестность S с отрезком прямой линии, разделяющей области изображения с различными значениями яркости: a и b . Длина отрезка определяется размерами окрестности в направлении предполагаемой границы (рис. 1, а). Точки, лежащие на отрезке, называются *точками границы*.

Алгебраический момент порядка $p + q$ функции двух переменных $f(x, y)$ в области S определяется следующим образом: $m_{pq} = \iint_S x^p y^q f(x, y) dx dy$. Учитывая то, что аналитическое вычисление моментов упрощается в круговой области, далее предполагается, что $S = \{(x, y) : (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \leq R^2\}$ — *круговая окрестность* в точке (x_0, y_0) , представляющая собой круг радиуса R (рис. 1, б). С каждой круговой окрестностью S связывается некоторая СК $XO'Y$ так, что её начало совпадает с центром круга, а оси параллельны соответствующим осям исходной СК XOY .

Угол поворота θ изображения в окрестности выбирается так, чтобы отрезок границы приобрёл положение, удобное для аналитических вычисле-

ний, т.е. при котором линия границы будет параллельна оси $O'Y$. Доказано, что такой угол θ может быть вычислен по определённой формуле, которая приводится в диссертационной работе. Положение функции $f(x, y)$ в круговой окрестности S , при котором $\theta = 0$, называется *каноническим положением*, а моменты, вычисленные для канонического положения, — *каноническими моментами* и обозначаются M_{pq} . Показано, что канонические моменты M_{pq} выражаются через обычные моменты m_{pq} : $M_{pq} = (m_{01}^2 + m_{10}^2)^{-\frac{p+q}{2}} \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q \binom{p}{i} \binom{q}{j} (-1)^{q-j} m_{10}^{p-i+j} m_{01}^{q+i-j} m_{p+q-i-j, i+j}$.

В каноническом положении точка A (рис. 1, б) будет лежать на оси $O'X$, значит, будет иметь координаты $(t, 0)$. Поскольку в работе для локализации границ используются двумерные моменты разных порядков, то далее получены *рекуррентные соотношения*, позволяющие быстро последовательно вычислять канонические моменты любых порядков в случае линейной модели: $M_{pq} = \frac{q-1}{p+1} M_{p+2, q-2} - \frac{2(b-a)}{(p+1)(q+1)} t^{p+1} (R^2 - t^2)^{\frac{q+1}{2}}$ и $M_{p+2, 0} = \frac{p+1}{p+4} R^2 M_{p0} + \frac{2(b-a)}{p+4} t^{p+1} (R^2 - t^2)^{\frac{3}{2}}$, где $p = 0, 1, 2, \dots$, $q = 2, 4, 6, \dots$. Таким образом, зная явные выражения для M_{00} и M_{10} , можно рекуррентно вычислить все остальные канонические моменты любого порядка.

Для отыскания *параметров линейной модели* t , a и b достаточно знать три канонических момента, например, M_{00} , M_{10} и M_{20} . Для этого находятся аналитические выражения моментов M_{00} , M_{10} и M_{20} через параметры t , a и b . Так как численные значения моментов могут быть рассчитаны непосредственно по изображению, то полученные аналитические выражения могут быть рассмотрены как система уравнений относительно параметров t , a и b . Решение такой системы позволяет выразить эти параметры через канонические моменты: $t = \frac{4M_{20} - R^2 M_{00}}{3M_{10}}$, $b = \frac{M_{00}}{\pi R^2} + 3M_{10} \frac{\pi R^2 + 2t\sqrt{R^2 - t^2} + 2R^2 \arcsin \frac{t}{R}}{4\pi R^2 (R^2 - t^2)^{\frac{3}{2}}}$, $a = b - \frac{3M_{10}}{2(R^2 - t^2)^{\frac{3}{2}}}$. Если (x, y) — координаты точки O' (рис. 1, б), субпиксельные координаты граничной точки (\hat{x}, \hat{y}) в СК XOY могут быть вычислены следующим образом: $\hat{x} = x + t \cos \theta$, $\hat{y} = y + t \sin \theta$. Координаты с пиксельной точностью получаются в результате округления субпиксельных координат до целых чисел.

Поиск граничных точек предполагает многократное вычисление моментов m_{pq} разных порядков внутри окрестности S . Для быстрого вычисления моментов предлагается использовать заранее заготовленные маски. В этом случае нахождение моментов сводится к вычислению свёртки изображения с соответствующей маской. По этой причине целесообразно получить общий способ построения масок для быстрого вычисления моментов в круговом окне.

Пусть центр круговой окрестности S всегда находится в центре некоторого пикселя изображения, который принят за начало СК $XO'Y$, а диаметр окрестности является целым нечётным числом. При этом за единицу длины берётся длина стороны *квадратного пикселя*. Под *координатами пикселя* понимаются координаты (i, j) его центра, которые являются целыми числами, т.е. $i, j \in \mathbb{Z}$. Под *вершинами пикселя* понимаются точки пресечения сторон этого пикселя.

Определение 2. Матрица $(m_{pq}^{i,j})_{i,j=-[R],\dots,[R]}$ называется маской для быстрого вычисления моментов m_{pq} в окрестности S радиуса R . Здесь $[\cdot]$ — округление к меньшему целому, а $m_{pq}^{i,j} = \iint_{A_{i,j}} x^p y^q \chi(x, y) dx dy$, где $A_{i,j}$ — множество точек (i, j) -го пикселя; $\chi(x, y) = 1$, если $x^2 + y^2 \leq R^2$, в противном случае $\chi(x, y) = 0$.

Показано, что справедливы следующие равенства: $m_{pq}^{-i,j} = (-1)^p m_{pq}^{i,j}$, при $i, j \in \mathbb{Z}$ и $i \neq 0$; $m_{pq}^{i,-j} = (-1)^q m_{pq}^{i,j}$, при $i, j \in \mathbb{Z}$ и $j \neq 0$; $m_{pq}^{-i,-j} = (-1)^{p+q} m_{pq}^{i,j}$, при $i, j \in \mathbb{Z}$ и $i, j \neq 0$. Таким образом, достаточно вычислить моменты $m_{pq}^{i,j}$ для $i, j \geq 0$, а остальные моменты восстанавливаются в силу симметрии. Также доказано, что границы круговых окрестностей S с диаметром равным нечётному числу никогда не пересекают вершины пикселей. Это означает, что для классификации пикселей с помощью координат их вершин можно использовать только строгие неравенства. Данные результаты используются для доказательства следующего утверждения, где для удобства вводятся следующие обозначения: $i_- = i - \frac{1}{2}$, $i_+ = i + \frac{1}{2}$, $j_- = j - \frac{1}{2}$, $j_+ = j + \frac{1}{2}$.

Утверждение 1. Пусть $i, j \geq 0$, $(i, j) \neq (0, R - \frac{1}{2})$, $(i, j) \neq (R - \frac{1}{2}, 0)$. Тогда:

- 1) если $(i - \frac{1}{2})^2 + (j - \frac{1}{2})^2 > R^2$, то $m_{pq}^{i,j} = 0$;
- 2) если $(i + \frac{1}{2})^2 + (j + \frac{1}{2})^2 < R^2$, то $m_{pq}^{i,j} = \frac{i_+^{p+1} - i_-^{p+1}}{p+1} \cdot \frac{j_+^{q+1} - j_-^{q+1}}{q+1}$;
- 3) в остальных случаях моменты определяются следующим образом:

- если $\sqrt{R^2 - i_-^2} \in (j_-, j_+)$ и $\sqrt{R^2 - j_-^2} \in (i_-, i_+)$, то $m_{pq}^{i,j} = \frac{1}{q+1} I(i_-, \sqrt{R^2 - j_-^2}) - \frac{j_-^{q+1}}{(p+1)(q+1)} \left((R^2 - j_-^2)^{\frac{p+1}{2}} - i_-^{p+1} \right)$;
- если $\sqrt{R^2 - i_-^2} \in (j_-, j_+)$ и $\sqrt{R^2 - i_+^2} \in (j_-, j_+)$, то $m_{pq}^{i,j} = \frac{1}{q+1} I(i_-, i_+) - \frac{j_-^{q+1}}{(p+1)(q+1)} (i_+^{p+1} - i_-^{p+1})$;
- если $\sqrt{R^2 - j_-^2} \in (i_-, i_+)$ и $\sqrt{R^2 - j_+^2} \in (i_-, i_+)$, то $m_{pq}^{i,j} = \frac{1}{q+1} I(\sqrt{R^2 - j_+^2}, \sqrt{R^2 - j_-^2}) + \frac{1}{(p+1)(q+1)} \left(j_+^{q+1} \left((R^2 - j_+^2)^{\frac{p+1}{2}} - i_-^{p+1} \right) - j_-^{q+1} \left((R^2 - j_-^2)^{\frac{p+1}{2}} - i_-^{p+1} \right) \right)$;
- если $\sqrt{R^2 - j_+^2} \in (i_-, i_+)$ и $\sqrt{R^2 - i_+^2} \in (j_-, j_+)$, то $m_{pq}^{i,j} = \frac{1}{q+1} I(\sqrt{R^2 - j_+^2}, i_+) + \frac{1}{(p+1)(q+1)} \left(j_+^{q+1} \left((R^2 - j_+^2)^{\frac{p+1}{2}} - i_-^{p+1} \right) - j_-^{q+1} (i_+^{p+1} - i_-^{p+1}) \right)$;
- $m_{pq}^{0, R-\frac{1}{2}} = \frac{1}{q+1} I(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) - \frac{(R-1)^{q+1}}{(p+1)(q+1)2^{p+1}} (1 - (-1)^{p+1})$;
- $m_{pq}^{R-\frac{1}{2}, 0} = \frac{(1 - (-1)^{q+1})}{q+1} \left(I\left(\sqrt{R^2 - (\frac{1}{2})^2}, R\right) + \frac{(R^2 - (\frac{1}{2})^2)^{\frac{p+1}{2}} - (R-1)^{p+1}}{(p+1)2^{q+1}} \right)$;

$$\text{где } I(\alpha, \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} x^p (R^2 - x^2)^{\frac{q+1}{2}} dx.$$

Данное утверждение даёт выражения для расчёта масок, которые можно использовать при вычислении произвольных моментов в окрестности любого нечётного диаметра. С учётом всего вышесказанного, в конце первой главы сформулирован алгоритм вычисления параметров линейной модели. Результаты вычислительных экспериментов демонстрируют успешное применение пред-

лагаемого метода для обнаружения границ на изображении с субпиксельной и пиксельной точностью. Показано, что в некоторых случаях (например, резкого излома границы) используемая линейная модель границы оказывается неадекватной. В связи с этим необходимо использовать более сложную модель границы (например, угловую), а также иметь критерии, позволяющие в процессе нахождения границы провести верификацию используемой модели.

Результаты первой главы опубликованы в работах [1, 14], а также использовались в работе [10] для выделения контуров объектов на изображениях.

Во второй главе описан метод субпиксельного обнаружения угловых и граничных точек на изображении и в облаке точек, основанный на угловой модели границы. Демонстрируется, как предложенный метод может быть расширен и применён к обнаружению угловых и граничных точек в трёхмерном облаке.

Определение 3. *Угловой моделью границы* называется круговая окрестность S с отрезками прямых линий AB и AC , аппроксимирующими угловую границу, находящуюся в окрестности некоторой точки O' (рис. 1, в). Причём $AB = AC$ и по обе стороны от аппроксимированной прямыми линиями угловой границы изображение имеет постоянные яркости: a и b . Точки на отрезках AB и AC называются *точками границы*, а точка A — *угловой точкой*.

При повороте на угол θ угловая модель будет находиться в каноническом положении, точка A будет лежать на оси $O'X$ и иметь координаты $(p, 0)$, а отрезок BC будет параллелен $O'Y$ и пресекать $O'X$ в точке с координатами $(t, 0)$. Восстановление параметров углового участка границы сводится к отысканию координат p, t и интенсивностей a, b . Аналогично случаю, рассмотренному в первой главе, неизвестные параметры угловой модели границы можно аналитически выразить через канонические моменты M_{pq} . Так, параметр $p = \frac{H+J}{2M_{10}}$, где $H = 4M_{20} - R^2 M_{00}$, $J = 4M_{02} - R^2 M_{00}$. Аналитические выражения для параметров t, a, b, φ также получены в работе. Очевидно, что частным случаем ($p = t$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$) угловой модели границы является линейная модель. Это обстоятельство позволяет использовать угловую модель как для обнаружения угловых точек, так и для обнаружения граничных точек. По известным параметрам p и θ легко получить координаты угловой точки с субпиксельной точностью. Если (x, y) — координаты точки O' , то субпиксельные координаты угловой точки (\hat{x}, \hat{y}) вычисляются следующим образом: $\hat{x} = x + p \cos \theta$, $\hat{y} = y + p \sin \theta$.

Граница может быть аппроксимирована угловой моделью, когда существует решение в поле действительных чисел для параметров p, t , такое, что $|p| < R$, $|t| < R$. Однако существование решения не означает то, что граница на самом деле является угловой. Во-первых, на значения моментов будут оказывать влияние шумы на изображении. Во-вторых, модель границы, положенная в основу теоретического предположения, может плохо соотноситься с реальным изображением внутри области S . По этой причине в диссертации разработаны критерии, позволяющие осуществить проверку адекватности используемой модели.

Критерии основываются на мерах, характеризующих границу. *Мера однородности области* $M_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}$ характеризует однородность яркости внутри S . *Мера симметрии* $M_s = 1 - \frac{\sum_{(x,y) \in S} |f(x,y) - f_{ref}(x,y)|}{\pi R^2 |a-b|}$ характеризует симметричность относительно предполагаемой оси симметрии, где под *предполагаемой осью симметрии* понимается прямая, образующая угол θ с осью $O'X$, а $f_{ref}(x,y)$ — изображение, полученное в результате отражения $f(x,y)$ от предполагаемой оси симметрии. *Мера нелинейности границы* $M_l = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (w_i - \bar{w})^2}}{R}$ характеризует линейность границы в S , где $w_1 = \frac{H}{3M_{10}}$, $w_2 = -\frac{J}{M_{10}}$, $w_3 = \frac{H-J}{4M_{10}}$, $\bar{w} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 w_i$. *Мера принадлежности к границе* $M_e = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (v_i - \bar{v})^2}}{R}$ характеризует расположение центра рассматриваемой окрестности S относительно границы на изображении, где $v_1 = \frac{2}{3} \frac{H}{M_{10}}$, $v_2 = -\frac{2}{3} \frac{J}{M_{10}}$, $v_3 = \frac{H-J}{3M_{10}}$, $\bar{v} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 v_i$. *Мера угловой границы* $\widehat{M}_c = M_l \cdot M_e$ и *мера линейной границы* $\widehat{M}_e = [1 - M_l] \cdot M_e$. На основе введённых мер предлагаются *критерии верификации* используемой модели: 1) если $M_c > h_c$, то в окрестности S имеется граница; 2) если $M_s > h_s$, то граница в окрестности хорошо согласуется с используемой моделью; 3) если $M_l > h_l$, то граница в окрестности является линейной; 4) если $M_e > h_e$, то центр окрестности находится вблизи линии границы; 5) большее значение \widehat{M}_c или \widehat{M}_e позволяет с большей уверенностью говорить о том, что точка (\hat{x}, \hat{y}) является угловой или граничной соответственно. Параметры h_c, h_s, h_l, h_e — пороговые значения, которые определяются экспериментальным путём.

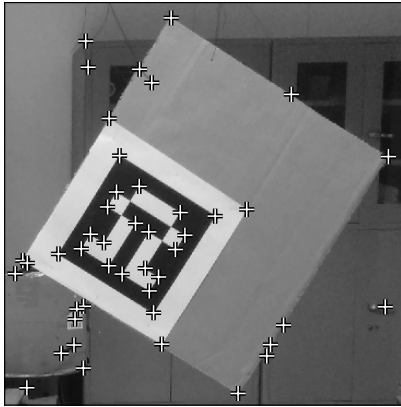


Рис. 2. Обнаружение углов на реальном изображении предложенным методом.

Далее приводятся алгоритмы, которые основаны на изложенных выше результатах. В частности, алгоритм вычисления параметров угловой модели границы, алгоритмы верификации угловых и граничных точек, а также последовательность действий, необходимых для уточнения пиксельных координат угловых и граничных точек на изображении. Идея уточнения состоит в том, что сначала осуществляется поиск угловых или граничных точек с помощью любого метода, например метода Харриса (С. Harris, 1988), а затем найденные точки уточняются с помощью описанного в работе метода. Все выводы подтверждаются многочисленными вычислительными экспериментами (см. рис. 2).

Во второй части главы показано как адаптировать предложенный метод обнаружения угловых и граничных точек на изображении для применения к трёхмерному облаку. Под *облаком точек* понимается конечное множество $Q = \{\mathbf{q}_i : \mathbf{q}_i = (x_i, y_i, z_i)^T, i = 1, 2, \dots, N\}$, заданное в прямоугольной СК, где N — количество точек в облаке. Особенностью облаков является то, что в отличие от изображений, они не обладают регулярной струк-

турой, т.е. совокупность точек в них не упорядочена. Данное обстоятельство усложняет работу с ними. Преимущество использования моментов заключается в том, что для их вычисления не требуется регулярной структуры данных.

Окрестностью S_n n -ой точки облака $\mathbf{q}_n \in Q$ называется шар радиуса R с центром в этой точке. Множество точек $Q_n = \{\mathbf{q}_i : \|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_n\|_2 < R^2, i = 1, 2, \dots, N\}$ лежит внутри окрестности S_n . Пример облака изображен на рис. 3. Попавшие в окрестность точки выделены тёмным цветом, а в качестве центра окрестности используется точка O .

Основная идея заключается в том, что облако Q_n может быть представлено в виде дискретной функции $f(x, y)$. Для получения такого представления вводятся *локальная и смещённая СК* окрестности S_n , которые определяются на основе собственных векторов ковариационной матрицы облака Q_n . Важное свойство этих СК состоит в том, что они определяются формой облака Q_n и не зависят от того, в какой *глобальной СК* облако задано изначально.

Матрицей преобразования T называется матрица 4×4 , которая переводит точки из одной СК в другую. Далее будут использоваться индексы G, L_n, SL_n и др. для уточнения какое именно преобразование осуществляется. Так матрицы $T_G^{L_n}, T_{L_n}^{SL_n}$ осуществляют преобразования из глобальной СК в локальную СК окрестности S_n и из локальной в смещённую СК окрестности S_n соответственно. Для того чтобы явно указать в какой СК задана переменная, используется верхний левый индекс перед обозначением, например $^{SL_n}Q_n$.

После того, как облако Q_n с помощью матриц преобразования $T_{L_n}^{SL_n}, T_G^{L_n}$ преобразовано в смещённую СК, оно представляется с помощью дискретной функции двух переменных $f(x, y) = \min_i z_i$, если $\exists q_i = (x, y, z_i) \in ^{SL_n}Q_n$, а в остальных случаях $f(x, y) = 0$. Функцию $f(x, y)$ можно рассматривать как изображение и, следовательно, применить методы, аналогичные описанным ранее, но адаптированные к особенностям изображений, построенных по облаку точек. К числу таких особенностей можно отнести то, что предположение о постоянстве значений функции $f(x, y)$ по разные стороны от границы не выполняется из-за недостаточной плотности точек в облаке, и то, что для отображения найденной точки в трёхмерном пространстве необходимо знать третью координату вдоль оси аппликат. На основе полученных результатов формулируются: алгоритм вычисления параметров угловой модели границы и алгоритмы верификации угловых и граничных точек в облаке. В конце главы приведены результаты экспериментов на реальных данных, которые подтверждают корректность использования угловой модели для определения угловых и граничных точек в облаке с помощью предложенного метода.

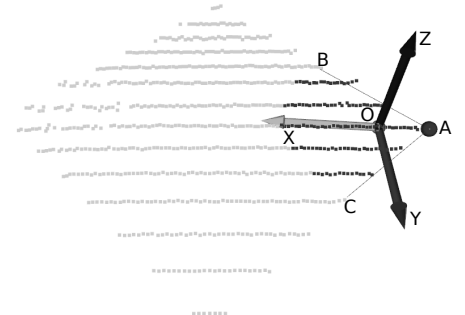


Рис. 3. Обнаружение угла в облаке точек с использованием предложенного метода.

Результаты второй главы опубликованы в работах [2, 12, 13, 15] и использованы в работах [5, 11] для выделения контуров объектов на изображениях и в облаках точек.

Третья глава посвящена разработке метода, позволяющего решать задачу определения взаимного расположения (калибровки) датчиков технического зрения, в частности, лидара и камер. Метод основан на обнаружении соответствующих угловых и граничных точек в данных, получаемых с датчиков.

Описание метода происходит на примере калибровки лидара и стереокамеры (двух камер с перекрывающимися полями зрения). Для нахождения взаимного расположения камеры и лидара предлагается использовать два набора трёхмерных координат угловых точек калибровочного щита. *Калибровочный щит* (см. рис. 2) представляет собой плоский прямоугольник с закреплёнными на нём ArUco-маркерами (Garrido-Jurado S., 2014).

Индексами B , D , C_1 , C_2 обозначаются СК щита, лидара и камер соответственно (см. рис. 4). Для определённости предполагается, что осуществляется взаимная калибровка лидара D и камеры C_1 , т.е. необходимо найти матрицу преобразования $T_D^{C_1}$. Весь процесс калибровки можно разделить на несколько этапов: 1) сбор данных, 2) нахождение соответствий, 3) вычисление калибровки.

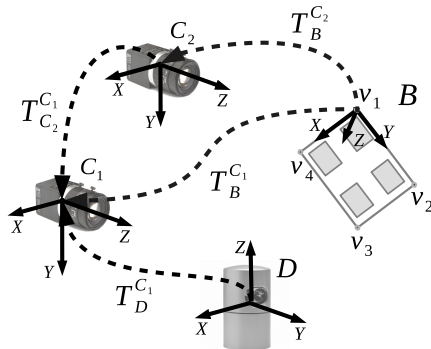


Рис. 4. Схема оборудования.

Сбор данных предполагает размещение одного или нескольких калибровочных щитов в поле зрения сенсоров с последующим получением набора изображений с камер и облаков точек с лидара.

Нахождение соответствий. Осуществляется вычисление трёхмерных координат ${}^{C_1}\mathbf{v}_k$ угловых точек калибровочного щита по изображению в СК камеры C_1 и вычисление соответствующих координат ${}^D\mathbf{v}_k$ по облаку точек в СК лидара D .

Для нахождения координат ${}^{C_1}\mathbf{v}_k$ вначале осуществляется поиск угловых точек ArUco-маркеров на изображении, которые затем уточняются до субпиксельной точности с помощью метода, предложенного во второй главе диссертации. Далее уточнённые координаты используются для вычисления матрицы преобразования $T_B^{C_1}$ с помощью PnP алгоритма (Lepetit V., 2009). Аналогичным образом вычисляется матрица $T_B^{C_2}$. Так как используется стереокамера, то известна матрица преобразования $T_{C_2}^{C_1}$. Различные ошибки, возникающие, например, в процессе обнаружения ArUco-маркеров или на этапе взаимной калибровки камер, могут приводить к тому, что равенство $T_B^{C_1} = T_{C_2}^{C_1} T_B^{C_2}$ не выполняется. В работе предлагается получить *уточнённую матрицу* $\bar{T}_B^{C_1}$ за счёт использования информации со второй камеры: $\bar{T}_B^{C_1} = \arg \min_{T_B^{*C_1}} \sum_{m=1}^M \left\| T_B^{*C_1} \begin{pmatrix} {}^B\mathbf{a}_m \\ 1 \end{pmatrix} - T_{C_2}^{C_1} T_B^{C_2} \begin{pmatrix} {}^B\mathbf{a}_m \\ 1 \end{pmatrix} \right\|_2$, где $\|\cdot\|_2$ — евклидова норма, $\mathbf{a}_m = (a_x, a_y, a_z)^T$ — координаты угловых точек маркеров на щите, M — их ко-

личество. Координаты угловых точек ${}^B\mathbf{v}_k$ считаются известными, т.к. они легко могут быть измерены линейкой на самом щите. Поэтому легко получить координаты ${}^{C_1}\mathbf{v}_k$, используя матрицу $\overline{T}_B^{C_1}$.

Найти координаты ${}^D\mathbf{v}_k$ угловых точек v_k калибровочного щита в СК лида можно помощью полуавтоматического подхода, который потребует участия оператора на начальном этапе для выделения точек щита в облаке. Выбор в пользу полуавтоматического подхода сделан для повышения стабильности и точности выделения щита. Трёхмерные координаты ${}^D\mathbf{v}_k$ могут быть найдены как пересечение смежных прямых, аппроксимирующих границы щита. Параметры таких прямых вычисляются по облаку точек с помощью метода, описанного во второй главе.

Вычисление параметров взаимной калибровки сенсоров по найденным трёхмерным соответствиям осуществляется с помощью решения следующей оптимизационной задачи: $T_D^{C_1} = \arg \min_{T_D^{*C_1}} \sum_{i=1}^{K \cdot E} \left\| T_D^{*C_1} \begin{pmatrix} {}^D\mathbf{q}_i \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} {}^{C_1}\mathbf{q}_i \\ 1 \end{pmatrix} \right\|_2$, где ${}^{C_1}\mathbf{q}_i \in {}^{C_1}P$, ${}^D\mathbf{q}_i \in {}^DP$, P — множество угловых точек калибровочных щитов, E и K — количество щитов и угловых точек на каждом щите соответственно.

Показано, что предложенный в диссертационной работе метод может быть адаптирован для взаимной калибровки нескольких лидаров, нескольких стереокамер или камер. Сформулирована методика калибровки. Для получения экспериментальной оценки погрешностей калибровки была проведена серия модельных экспериментов в симуляторе VREP. Результаты показывают, что метод обладает точностью, сравнимой с погрешностью датчиков. Предложенный метод был апробирован на реальных данных при калибровке различных датчиков на мобильной робототехнической платформе и беспилотном автомобиле.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [3, 19].

Четвёртая глава посвящена разработке метода получения информативных признаков облака точек, который основан на использовании алгебраических моментов. Практическое применение разработанных признаков демонстрируется на задаче распознавания объектов железнодорожной инфраструктуры по данным мобильного лазерного сканирования.

Начало главы посвящено описанию структуры данных лазерного сканирования. Отмечены характеристики, полезные при решении задачи распознавания. В самой задаче распознавания можно выделить три этапа: 1) предобработка данных, 2) сегментация на отдельные объекты, 3) распознавание.

Предобработка данных. В диссертации предлагается способ выделения области интереса в облаке точек, основанный на определении траектории движения лидара при сканировании. Описан способ выделения точек земной поверхности, основанный на свойстве множественного отражения лазерных импульсов. Также предложен способ предварительной сегментации точек земной поверхности, растительности и вытянутых объектов, основанный на ковариационных характеристиках облака точек.

Сегментация. Проведён краткий обзор существующих методов сегментации. Отмечены наиболее перспективные из них, подходящие для последующего решения задачи распознавания.

Распознавание. В рамках работы используется стандартный подход к задаче распознавания, когда необходимо выделить отдельные сегменты, затем определить значения их признаков и с помощью базы эталонных объектов провести классификацию. В диссертации предлагается метод получения информативных признаков. Предлагаемый метод позволяет получить информативные признаки облака точек, инвариантные к преобразованиям сдвига, масштабирования, вращения и отражения.

Для независимости формируемых признаков от СК, в которой изначально задано облако точек, вводится так называемая *независимая СК*, основанная на собственных векторах ковариационной матрицы облака точек. Далее осуществляется регуляризация облака точек, в результате которой облако описывается шестью дискретными функциями. Каждая из таких функций рассматривается как изображение, и для неё вычисляются семь инвариантов с помощью мометов (Ну М.-К., 1962). На основе вычисленных инвариантов формируется дескриптор, который содержит информативные признаки облака точек. Введена мера близости облаков точек в пространстве дескрипторов. Описан порядок действий, необходимых для классификации и распознавания объектов с помощью полученных признаков. Проведённые вычислительные эксперименты демонстрируют, что введённые информативные признаки могут быть успешно использованы при решении задачи распознавания объектов по облаку точек.

Результаты четвёртой главы опубликованы в работах [4, 6—9, 16—18].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При решении поставленных в диссертационной работе задач получены следующие теоретические и прикладные результаты:

- 1) Разработан и исследован метод субпиксельного обнаружения границ на изображении на основе алгебраических моментов с использованием линейной модели границы.
- 2) Разработан и исследован метод высокоточного обнаружения углов и границ на изображении и в облаке точек на основе алгебраических моментов с использованием угловой модели границы, разработаны критерии верификации используемой модели границы.
- 3) Разработан и исследован метод калибровки взаимного расположения камер, стереокамер и лидаров, основанный на обнаружении углов и границ, осуществлена экспериментальная оценка точности метода.
- 4) Разработан метод получения информативных признаков, основанный на моментах, и продемонстрировано применение полученных признаков для распознавания объектов с помощью различных методов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. *Abramenko A. A., Karkishchenko A. N.* Applications of algebraic moments for edge detection for locally linear model // Pattern Recognition and Image Analysis. — 2017. — Vol. 27, no. 3. — P. 433–443.
2. *Abramenko A. A., Karkishchenko A. N.* Applications of algebraic moments for corner and edge detection for locally angular model // Pattern Recognition and Image Analysis. — 2019. — Vol. 29, no. 1. — P. 58–71.
3. *Абраменко А. А.* Калибровка взаимного расположения стереокамеры и трехмерного сканирующего лазерного дальномера // Компьютерная оптика. — 2019. — Т. 43, вып. 2. — С. 220–230.

Материалы и тезисы конференций, статьи в сборниках

4. Сегментация объектов инфраструктуры по данным лазерного сканирования / А. Н. Каркищенко, В. Б. Мнухин, А. А. Абраменко [и др.] // Материалы IV междунар. науч.-практ. конф. "Интеллект-Транс-2014". — 2014. — С. 134–141.
5. Распознавание объектов железнодорожной инфраструктуры по данным лазерного сканирования / А. Н. Каркищенко, В. Б. Мнухин, А. А. Абраменко [и др.] // Труды III науч.-техн. конф. с междунар. участием "ИСУЖТ-2014". — 2014. — С. 193–196.
6. *Абраменко А. А.* Распознавание объектов по 3D данным с мобильных робототехнических систем // Труды междунар. науч.-практ. молодежной конф. "Робототехника и системный анализ". — 2015. — № 1. — С. 51–58.
7. Распознавание железнодорожных объектов и инженерных сооружений по облаку точек на основе алгебраических инвариантов / А. А. Абраменко, А. Н. Каркищенко, В. Б. Мнухин, С. П. Левашев // Труды IV науч.-техн. конф. с междунар. участием "ИСУЖТ-2015". — 2015. — С. 168–171.
8. *Абраменко А. А., Левашев С. П.* Распознавание объектов по данным мобильного лазерного сканирования на основе метода моментов // Сборник статей I всеросс. науч.-техн. конф. "Фундамент. и прикладные аспекты комп. технологий и инф. безопасности (ФиПАКТиБ-2015)". — 2015. — С. 12–15.
9. *Левашев С. П., Абраменко А. А.* Распознавание и анализ объектов по данным лазерного сканирования // Сборник тезисов "Неделя науки 2015". — Ростов-на-дону, Издательство ЮФУ. — 2015. — С. 565–567.
10. *Левашев С. П., Абраменко А. А.* Анализ изображений сравнением замкнутых контуров с помощью Фурье-дескрипторов // Сборник статей I всеросс. науч.-техн. конф. "ФиПАКТиБ-2015". — 2015. — С. 37–40.
11. Использование Фурье-дескрипторов для идентификации объектов инфраструктуры по данным лазерного сканирования / С. П. Левашев, А. Н. Каркищенко, В. Б. Мнухин, А. А. Абраменко // Труды IV науч.-техн. конф. с междунар. участием "ИСУЖТ-2015". — 2015. — С. 178–181.
12. *Абраменко А. А.* Метод обнаружения краёв для трёхмерных данных // Сборник статей II всеросс. науч.-техн. конф. "ФиПАКТиБ-2016". — 2016. — С. 12–13.

13. *Абраменко А. А., Каркищенко А. Н.* Детекция границ объектов железнодорожной инфраструктуры для решения задачи сегментации данных лазерного сканирования // Труды V науч.-техн. конф. с междунар. участием "ИСУЖТ-2016". — 2016. — С. 180—183.
14. *Абраменко А. А.* Детекция границ на полутоновых изображениях с помощью алгебраических моментов // Сборник статей III всеросс. науч.-техн. конф. "ФиПАК-ТиБ-2017". — 2017. — С. 243—246.
15. *Абраменко А. А.* Обнаружение углов и восстановление их параметров на цифровых изображениях с помощью моментов // Сборник статей III всеросс. науч.-техн. конф. "ФиПАКТиБ-2017". — 2017. — С. 247—250.
16. *Абраменко А. А.* Предварительная сегментация точек лазерного сканирования на основе ковариационных характеристик // Сборник статей II всеросс. науч.-практ. конф. "Информационные системы и технологии: фундаментальные и прикладные исследования". — 2017. — С. 60—63.
17. *Абраменко А. А.* Определение параметров мобильного лазерного сканирования и предварительная сегментация облака точек в полосе отвода // Труды VI науч.-техн. конф. с междунар. участием "ИСУЖТ-2017". — 2017. — С. 193—196.
18. *Абраменко А. А.* Автоматическое определение геометрических параметров объектов железнодорожной инфраструктуры // Труды VII науч.-техн. конф. с междунар. участием "ИСУЖТ-2018". — 2018. — С. 171—174.
19. *Абраменко А. А.* Калибровка видеокамер и лазерного дальномера при совместном применении для мониторинга железнодорожной инфраструктуры // Труды VIII науч.-техн. конф. с междунар. участием "ИСУЖТ-2019". — 2019.

Личный вклад автора в работах опубликованных в соавторстве:

[1] исследование метода обнаружения границ на изображении с помощью линейной модели и моментов, метод быстрого вычисления моментов, вычислительные эксперименты; [5, 10, 11] исследование методов выделения контуров объектов; [2, 13] исследование метода обнаружения углов и границ на изображении и в облаке точек с помощью угловой модели и моментов, разработка критериев верификации типа границы, вычислительные эксперименты; [4] вычислительные эксперименты по моделированию мобильного лазерного сканирования; [7—9] разработка метода получения информативных признаков облака точек на основе моментов.

Абраменко