

На правах рукописи

Каташевцев Михаил Дмитриевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРНЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЛОЖНОСТЬ ИХ
АНАЛИЗА**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Мартьянов Владимир Иванович

Официальные оппоненты: Данеев Алексей Васильевич
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: Иркутский государственный университет,
Институт Математики, Экономики и Информатики

Защита диссертации состоится «___» декабря 2017г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 24, корпус 9, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Байкальского государственного университета по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, корпус 2, аудитория 101, (<http://www.bgu.ru>).

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан «___» ноября 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, профессор

Т.И. Ведерникова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Разработка эффективных вычислительных методов решения информационных задач является важнейшим направлением развития современных информационных технологий (и в целом, прогресса, так как невозможно представить современную науку, технику и общественную жизнь без использования компьютеров, подключенных к Интернет - пространству).

В идеале, эти методы должны обеспечивать скорость решения ряда важных информационных задач вне зависимости от объема данных. И действительно, есть ряд важных информационных задач, где это возможно.

Наглядным (и очень важным) примером этого являются реляционные базы данных (БД), где вычислимость запросов определенных типов не зависит от объема данных, а только линейно от сложности проекта самой БД.

Практическим подтверждением этого для обывателя является скорость работы банковских систем, использующих сетевые реляционные БД, с их мировыми сетями терминалов и банкоматов, где можно проводить операции с вкладами и денежными средствами в любой точке мира за считанные секунды.

Отметим, что весьма близко к этому классу примыкают задачи поиска данных по ключевым словам в Интернет - пространстве (полно текстовые поисковые системы «Google», «Яндекс» и др.), где скорость поиска не замедляется из-за экспоненциального роста информации в глобальной сети.

Другим важным классом информационных задач являются вопросы распознавания образцов (образов), где при организации данных близкой к таблицам реляционных БД также могут быть получены результаты независимости скорости распознавания образцов от их количества, вернее, верхней границы сложности распознавания одного образца с добавкой только количества образцов (решению данных вопросов в значительной мере посвящена диссертационная работа).

Данное направление исследований (разработка эффективных вычислительных методов решения информационных задач) весьма актуально для современной науки в целом и техники, как в теоретическом, так и практическом плане, где работают крупные транснациональные компьютерные корпорации, реализуются технологии «Big Table», «Big Data» и предполагается получение прорывных результатов в робототехнике, молекулярной биологии, системах искусственного интеллекта и других важных областях, имеющих определяющее значение для прогресса современного общества.

В диссертационной работе рассматриваются вопросы анализа контурных изображений (поиск образцов в изображении), получены оценки алгоритмической сложности такого анализа (близкие к аналогичным результатам для таб-

личной организации данных), созданы программные комплексы решающие прикладные задачи.

Предложенные в диссертационной работе методы и полученные результаты являются продолжением исследований:

- Д.Кнута и др. по эффективной вычислимости запросов для данных, представленных древовидными структурами;
- Э.Кодда и др. по табличной организации данных для реляционных сетевых СУБД (MS SQL Server, Oracle и др., включая технологии «Big Table»).

В принципиальном плане результаты диссертационной работы могут интерпретироваться как возможность получения для технологий «Big Data» по анализу изображений практически таких же эффективных методов, как и в технологии «Big Table» для табличной организации данных.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является построение моделей контурных изображений, которые, хотя и имеют более сложную организацию данных, чем таблицы реляционных БД, но позволяют получить почти аналогичные результаты по вычислительной сложности анализа контурных изображений, включая поиск изоморфных вложений образцов в анализируемое изображение.

Разработка новых методов моделирования объектов и явлений в диссертации представлена результатами по построению моделей контурных изображений, представленных двухосновными алгебраическими системами.

Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий в диссертации представлена результатами по эффективной вычислимости анализа, полученных моделей контурных изображений, включая проверку изоморфной вложимости совокупности контурных изображений (образцы) в исследуемое контурное изображение.

Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента в диссертации представлена результатами по применению комплексов программ для решения конкретных прикладных задач (см. Приложения).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать преобразование раstra контурного изображения в нагруженный граф специального вида.

2. Разработать преобразование нагруженных графов специального вида в математические модели, представленные многоосновными алгебраическими системами, где контурные изображения сведены к ориентированным дугам, связям дуг и их численным характеристикам в градусном измерении и относительных размеров длины дуг.
3. Исследовать алгоритмическую сложность анализа контурных изображений, включая проверку изоморфных вложений образцов в анализируемое изображение, где контурные изображения сведены к ориентированным дугам, связям дуг и их численным характеристикам в градусном измерении и относительных размеров длины дуг.
4. Разработать масштабные ряды контурных изображений и процедуры сжатия на основе относительных размеров дуг.
5. Исследовать возможность использования изоморфного вложения сжатого образца в сжатое изображение для уменьшения алгоритмической сложности построения изоморфного вложения исходного образца в исходное изображение.
6. Исследовать анализ плоских контурных изображений, представляющих объекты с наложениями.
7. Исследовать возможность использования полученных математических методов, математических моделей представления данных, алгоритмов и комплексов программ для решения прикладных задач:
 - распознавания рукописных символов;
 - оценки устойчивости битумных эмульсий;
 - автоматизации составления проектов организации дорожного движения (ПОДД).

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются плоские контурные изображения, представленные дугами, имеющими градусную меру и относительную длину. Предмет исследования – математические модели плоских контурных изображений, оценки сложности их анализа (поиск образцов в анализируемом изображении), программная реализация анализа изображений и применение для решения прикладных задач.

Методология и методы исследования. Для задания основных свойств плоских контурных изображений и их построения из растровых изображений использовался принцип математического моделирования. Исследование принятых моделей, представленных двухосновными алгебраическими системами, вы-

полнялось на основе численных методов построения нагруженных графов, представленных дугами, имеющими градусную меру и относительную длину, а также связями дуг, имеющими градусную меру. Разработка авторских комплексов программ проводилась в среде Borland C++ Builder.

Достоверность результатов обеспечивается строгими математическими формулировками определений, а также строгими математическими доказательствами полученных утверждений, лемм и теорем.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Построены математические модели контурных изображений, представленных ориентированными дугами, связям дуг и их численными характеристиками в градусном измерении, а также относительными размерами длин дуг.
2. Показано, что математические модели контурных изображений, хотя и имеют более сложную организацию данных, чем таблицы реляционных БД, но позволяют получить почти аналогичные результаты по алгоритмической сложности анализа контурных изображений, включая проверку изоморфных вложений образцов в анализируемое изображение.
3. Проведены исследования по использованию масштабных рядов контурных изображений и процедуры сжатия на основе относительных размеров дуг, которые можно использовать для повышения эффективности анализа исходных изображений.
4. Исследован анализ плоских контурных изображений, представляющих объекты с наложениями.

Практическая значимость работы.

1. Разработан программный комплекс распознавания рукописных символов.
2. Разработан программный комплекс оценки устойчивости битумных эмульсий, внедренный в технопарке ИРНИТУ.
3. Разработан программный комплекс автоматизации составления проектов организации дорожного движения (ПОДД), внедренный в ОГКУ «Дирекция автомобильных дорог» Администрации Иркутской области.

Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами: А.И.Мальцевым, Ю.Л.Ершовым, С.В.Яблонским, А.И.Кокориным, А.В.Манциводой, Е.Коддом, Д.Кнутом, В.И.Мартьяновым, Д.В.Пахомовым, В.В.Архиповым и др.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. ежегодных научно-теоретических конференциях аспирантов и студентов: Иркутский гос. университет, ИМЭИ, 2010-13 гг.
2. 3-ей Российской школе – семинаре «Синтаксис и семантика логических систем». Иркутск, 2010.
3. 4-ой Международной конференции «Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО'11), Улан-Удэ, 2011.
4. семинарах кафедр ИГУ, ИРНТУ, ИрГУПС, 2010-17гг.
5. межрегиональных конференциях "Платоновские чтения – 2015-17гг."

Личный вклад. Автором получены самостоятельно результаты основных положений 1, 2, 6, выносимых на защиту. Результаты основных положений 3, 4, 5, выносимых на защиту, получены в нераздельном соавторстве с В.И. Мартьяновым, которому принадлежит начальное определение масштабных рядов контурных изображений и предложение их использования для уменьшения вычислительной сложности анализа контурных изображений.

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах, в том числе 9 работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Все вносимые на защиту результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 105 страниц с 29 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 40 наименований.

Содержание работы

Во введении показана актуальность и практическая значимость представленных в настоящей работе исследований, приведена информация о внедрении и апробации работы.

Первая глава содержит описание современного состояния теории распознавания образов, работы поисковых систем, а так же описание основных используемых методов и технологий. Глава состоит из 4 разделов.

Первый раздел называется «Теория распознавания образа» и содержит основные понятия теории, классическую постановку задачи, и базовую модель.

Второй раздел называется «Распознавание текста» и конкретизирует обобщенную постановку задачи указанную в предыдущем параграфе. В тексте

делается упор на описание наиболее популярных систем распознавания печатного текста, их эффективность а также упоминаются две основных постановки задачи как задача офлайн распознавания текст (как распознавание текста на статическом изображении) и задача онлайн распознавания текста (так называемое распознавание «на лету», когда система имеет возможность отслеживать процесс написания символов).

В третьем разделе рассматривается задача распознавания рукописного текста. Рассмотрены основные системы распознавания рукописного текста, их возможности и эффективность. Приведены основные подходы используемые для решения поставленной задачи, которые включают в себя

1. «Шаблонные методы» – которые преобразуют изображение отдельного символа в растровое представление, сравнивают его со всеми шаблонами, имеющимися в базе и выбирают шаблон с наименьшим количеством точек, отличных от входного изображения.
2. «Структурные методы» – Структурные методы [6, 27] представляют объект как граф, узлами которого являются элементы входного объекта, а дугами – пространственные отношения между ними. Методы, реализующие подобный подход, обычно работают с векторными изображениями.
3. «Признаковые методы» – Признаковые методы базируются на том, что изображению ставится в соответствие N-мерный вектор признаков. Распознавание заключается в сравнении его с набором эталонных векторов той же размерности.

Делается заключение о неполноте и ограниченности применения каждого метода по отдельности. В современных системах распознавания обычно используются все три типа классификаторов, но основным является структурный. Два других служат для ускорения и повышения качества распознавания. Комбинация различных методов распознавания приводит к наилучшим результатам. Параграф содержит таблицу сравнения методов.

Последний раздел содержит описание технологии BigTable.

Вторая глава посвящена методам решению задачи распознаванию контурных изображений в различных вариациях и содержит описание математической модели.

Глава в целом построена в соответствии со схемой используемой при распознавании изображения.

Первый раздел содержит базовые определения необходимые при анализе растрового изображения.

Второй раздел содержит описание модели растрового изображения, которое представляет собой алгебраическую систему следующего вида:

$$\mathfrak{M} = \langle A, R, V, M; Sector, Angle, Metric, Relation \rangle \quad (1)$$

где

A – множество всевозможных дуг,

R – множество связей дуг,

$V \subset Z$ – множество допустимых углов (например от 0 до 360 градусов),

$M \subset Z$ – множество относительных мер,

$Sector : A \rightarrow V$ – задает градусную меру дуги,

$Metric : A \rightarrow M$ – функция сопоставляющая каждой дуге ее относительную величину,

$Angle : R \rightarrow V$ – задает угол соединения двух дуг

$Relation : R \rightarrow A \times A$ – сопоставляет каждой связи дуги, те дуги, которые она соединяет.

Третий раздел посвящен описанию «Волнового» алгоритма позволяющего осуществить преобразование растрового бинарного изображения в соответствие с моделью 1. Идея алгоритма заключается в генерации волны в одной из заполненных точек растрового изображения, которая проходит по изображению и позволяет построить граф (скелет) который визуально соответствует заполненной области (Рис. 1a). Далее этот граф разбивается на простые пути по узлам особого вида. И на конечном этапе простые пути аппроксимируются дугами, а между дуг уже рассчитываются углы соединения дуг (Рис. 1b)

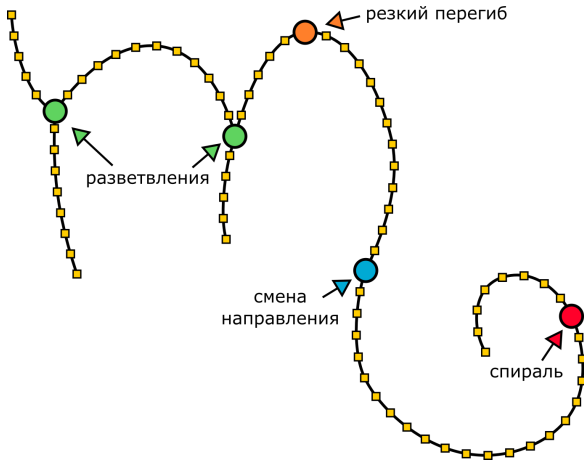
Следующий раздел содержит базовую постановку задачи распознавания, которая может быть представлена следующим образом. Пусть изображение есть модель следующего вида:

$$\mathfrak{M} = \langle A, R, V; Sector, Angle, Relation \rangle \quad (2)$$

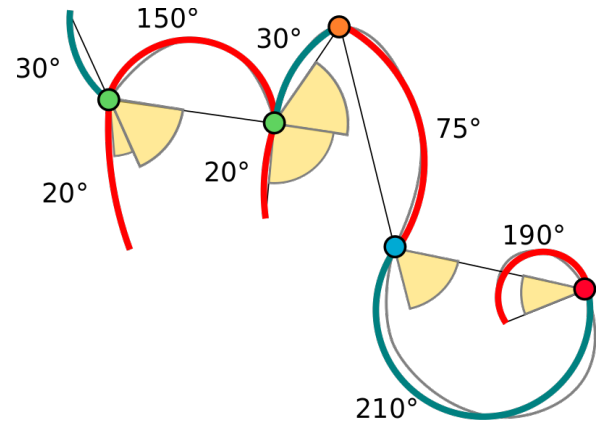
$$M_{ini} = \langle A_1, \dots, A_s; f_1, \dots, f_n; p_1, \dots, p_k \rangle \quad (3)$$

Пусть многоосновные а.с.

$$\begin{aligned} R_1 &= \langle Arc_1, Rel_1, V; Sector, Angle, R \rangle \\ R_2 &= \langle Arc_2, Rel_2, V; Sector, Angle, R \rangle \\ &\dots \\ R_m &= \langle Arc_m, Rel_m, V; Sector, Angle, R \rangle \end{aligned} \quad (4)$$



(a) Схема разбиения графа «особыми» точками



(b) Геометрическая интерпретация модели \mathfrak{M}

Рис. 1: Представление изображения

задают искомые образцы в анализируемом изображении 2.

Анализ изображения 2 состоит в поиске всех изоморфных вложений $\mu_{i,j}$ многоосновных а.с. R_1, R_2, \dots, R_m в многоосновную а.с. \mathfrak{M} 2, т.е. изоморфное вложение $\mu_{i,j} : R_i \rightarrow \mathfrak{M}$ состоит из инъективных отображений

$$\mu_{i,j} : Arc_i \rightarrow Arc; \mu_{i,j} : Rel_i \rightarrow Rel \quad (5)$$

такие, что:

- а) если $\mu_{i,j}(Ar) = Arr$, где $Ar \in Arc_i$, $Arr \in Arc$, $Sector(Ar) = (v_1, v_2)$, $Sector(Arr) = (v_3, v_4)$, то $v_1 \leq v_3 \leq v_4 \leq v_2$;
- б) если $\mu_{i,j}(Re) = Ree$, где $Re \in Rel_i$, $Ree \in Rel$, $Angle(Re) = (v_1, v_2)$, $Angle(Ree) = (v_3, v_4)$, то $v_1 \leq v_3 \leq v_4 \leq v_2$;
- в) если $R(Re, Ar_1, Ar_2)$, где $Re \in Rel_i$, $Ar_1 \in Arc_i$, $Ar_2 \in Arc_i$, то $R(\mu_{i,j}(Re), \mu_{i,j}(Ar_1), \mu_{i,j}(Ar_2))$.

Последний раздел содержит описание алгоритма интерпретации изображения в базовой постановке задачи его оценки, а так же расширенные постановки задачи (по степени усложнения постановки).

Содержит основную теорему об оценке сложности интерпретации изображения в базовой постановке задачи:

Теорема 2.5.2 Пусть каждая из многоосновных а.с. R_1, R_2, \dots, R_m 4 имеет не более n дуг и представляет связное изображение. Тогда анализ связного изображения 2 имеет верхнюю границу сложности не превышающую

$O(((w + t) * w) + m)$, , где w – количество дуг (t – количество связей дуг) изображения 2.

В разделе также присутствует несколько расширяющих постановок задачи распознавания, которые включают в себя:

1. **Анализ изображений с метрикой** – изображения с метрикой расширяют базовую представление модели и предполагает введение дополнительной характеристики дуги: относительного размера. Сама характеристика задается на некотором конечном множестве M . Как и множество V , множество M счетно и конечно, и ограничено сверху и снизу. Новая модель имеет следующий вид:

$$\mathfrak{M} = \langle A, R, V, M; Sector, Angle, Metric, Relation \rangle .$$

В разделе доказывается, что введение новой характеристики никак не влияет на сложность интерпретации, и остается такой же как и в базовой постановке задачи.

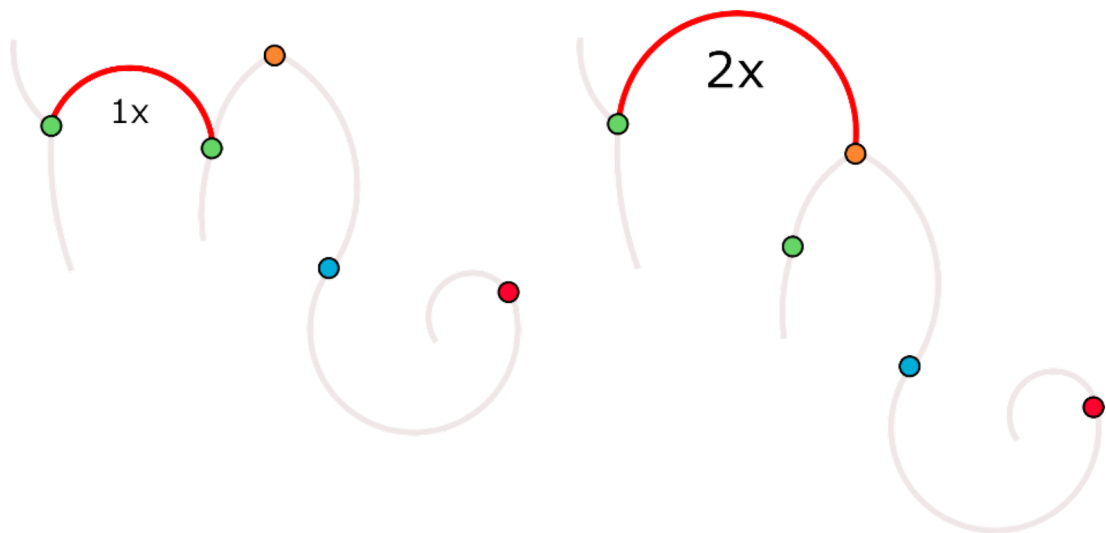


Рис. 2: Геометрическая интерпретация изображений с метрикой

На изображении видно как меняется геометрическое представление изображения, если меняется относительная длина дуги (красная дуга)

2. **Анализ изображения с использованием масштабных рядов** – введение масштабных рядов предполагает введение вполне упорядоченного множества $ScaleLine$, которое соответствует масштабному ряду (аналог масштабного ряда топографических карт 1:500, 1:1000 и т.д.), а также два дополнительных отношения: $Scale$, которое связывает дуги с элементами $ScaleLine$ и $Include$ которое связывает дугу arc с ее образом arc_1 при сжатии изображения, т.е. при переходе к следующему (большему на единицу) элементу масштабного ряда.

Таким образом, совокупность всех дуг A четырехосновной а.с.1 может быть представлено в виде

$$A = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n \quad (6)$$

где множества A_i состоят из дуг, относящихся к i -му элементу масштабного ряда. Подраздел включает некоторые оценки для частных случаев задачи в данной постановке.

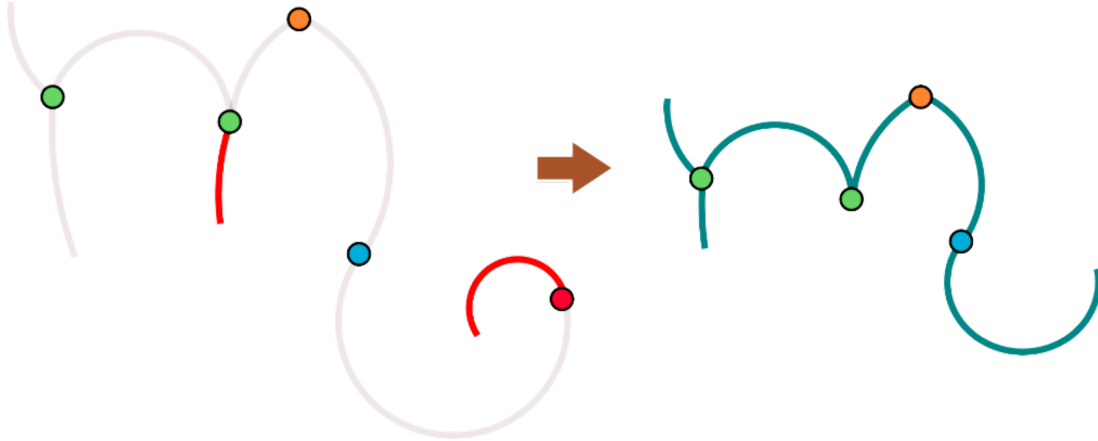


Рис. 3: Геометрическая интерпретация отмасштабированного изображения

На изображении видно как одно и тоже изображение в разном масштабе может иметь разное количество дуг (незначимые в определенном масштабе дуги исчезают)

3. **Анализ изображений, представляющих объекты с наложениями** – предполагает наличие объектов первого плана, отображенных на изображении без каких-либо искажений, а также объектов второго и других планов, которые в той или иной степени закрыты более близко стоящими к точке съемки объектами. Схема поиска образцов второго плана состоит в проверке, что частично отображенные части каких-то образцов могут быть дополнены до всего образца дугами дерева решений (универсума), лежащими внутри совокупности (объединения) образцов первого плана. В разделе доказывается следующая теорема:

Теорема 2.5.13 Сложность поиска образцов первого, второго и любых других планов имеет верхнюю границу сложности не превышающую

$$O((n + n) * n + m + n + (\psi * n * m) * n) \quad (7)$$

где ψ – константа, соответствующая сложности проверки нахождения дуг изнутри образов найденных образцов (построенных изоморфными вложениями $\Sigma_1 = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_h\}$), где n – верхняя граница на количество дуг и связей дуг у изображения и образцов, m – количество образцов S_1, S_2, \dots, S_m .

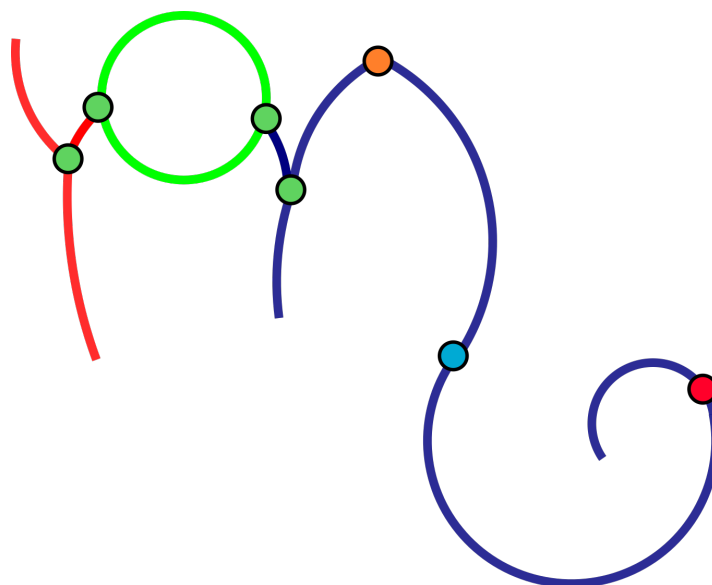


Рис. 4: Геометрическая интерпретация изображения с наложением

На изображении видно как наложенное изображение первого плана (зеленое) разбивает исходный символ на два новых изображения второго плана

Третья глава посвящена использованию разработанных алгоритмов на практике и в производстве. Глава состоит из трех разделов.

В первом разделе описывается использование разработанного ПО для тестирования разработанных алгоритмов. Система состоит из трех модулей: конвертора растровых изображений (используется для наполнения БД тестовыми образцами), интерпретатор (для тестирования алгоритмов) и браузер базы данных. Программа написана на С++ и использует в качестве GUI Borland VCL.

Второй раздел посвящен применению разработанных алгоритмов в задаче оценки устойчивости битумных эмульсий. В отличие от задачи распознавания символов, здесь нет необходимости анализировать скелет изображения. Куда более важную роль играет внешний контур. Разбивая контур на дуги мы можем классифицировать частицы по уровню распада:

1. одиночные
2. слипшиеся
3. распавшиеся

Большое количество распавшихся частиц является свидетельством того что смесь является неустойчивой, а следовательно некачественной.

В разделе описывается работа разработанной системы оценки морфологических характеристик частиц в битумных эмульсиях, а также построения распределений по этим данным.

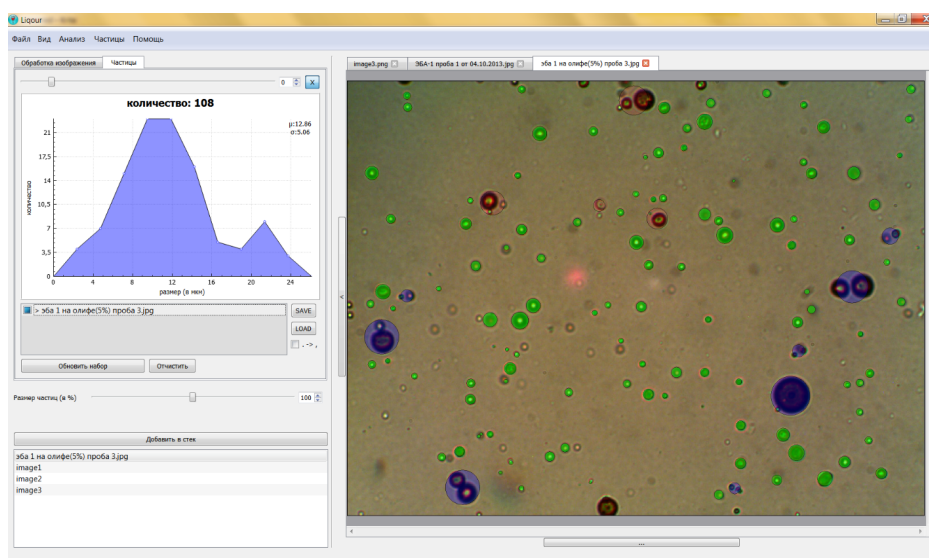


Рис. 5: ЭБА-1 на битуме разжиженном олифой (5%)

Таблица 1: Распределение частиц на рис.5

Среднее значение, мкм.	Ср.кв. отклонение, мкм.	Всего частиц
12.86	5.06	108

На рисунке 5 представлен интерфейс программы, а в таблице 1 также сравнение полученных результатов с реальными результатами.

Третий раздел посвящен применению методов интерпретации для задачи автоматизации составления проекта организации дорожного движения. В тексте предложена реализацию надстройки над базой данных, которая позволяет решать проверку удовлетворения расположения объекта на линейном графике набору ограничений, который в данном случае представленны формализованными ГОСТами.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем: На качественном уровне: для данных, организованных более сложно, чем таблицы реляционных баз данных, доказаны очень близкие результаты по вычислительной сложности их анализа. Более точно, основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. На основе анализа плоских контурных изображений разработана формализация, представленная ориентированными дугами, связями дуг и их численными характеристиками в градусном измерении и относительными размерами длины дуг.

2. Исследования показали, что вычислительная сложность анализа плоских контурных изображений, представленных ориентированными дугами, связями дуг и их численными характеристиками в градусном измерении и относительными размерами длины дуг, почти не зависит от количества образцов.
3. Для подтверждения теоретических результатов на практике были созданы комплексы программ для решения задач.

Список основных работ по теме диссертации

1. Каташевцев, М.Д. Обзор приложений логико-эвристических методов решения комбинаторных задач высокой сложности / В.И. Мартьянов, В.В. Архипов, М.Д. Каташевцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2010. — Т. №4(28). — С. 61–67.
2. Каташевцев, М.Д. Комбинаторные задачи высокой сложности и анализ плоских контурных изображений / В.И. Мартьянов, М.Д. Каташевцев // Известия Иркутского Государственного Университета серия «Математика». — 2013. — Т. №4. — С. 31–47.
3. Каташевцев, М.Д. Масштабные ряды плоских контурных изображений и их применение. / В.И. Мартьянов, М.Д. Каташевцев // Вестник ИрГТУ. — 2016. — Т. №5(99). — С. 121–129.
4. Каташевцев, М.Д. Анализ плоских контурных изображений, представляющих объекты с наложениями. / В.И. Мартьянов, М.Д. Каташевцев // Вестник ИрГТУ. — 2017. — Т. №1(120). — С. 63–71.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011618417 / М.Д. Каташевцев, В.И. Мартьянов // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.- Москва. — 2010. (авторский объем – 66%).
6. Каташевцев, М.Д. Волновая скелетизация / М.Д. Каташевцев // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. — 2013. — Т. №7. — С. 89–92.
7. Каташевцев, М.Д. Анализ плоских контурных изображений с метрикой / М.Д. Каташевцев // Известия Иркутского Государственного Университета серия «Математика». — 2014. — Т. №9. — С. 39–48.

8. Каташевцев, М.Д. Автоматизированная технология создания проектов организации дорожного движения / М.Д. Каташевцев, В.И. Мартьянов, Степаненко А.А. // Вестник ИрГТУ. — 2012. — Т. №10(69). — С. 150–155.
9. Каташевцев, М.Д. Исследование гранулометрического состава эмульсий с помощью оптического микроскопа и методом автоматизированного распознавания объектов на цифровой фотографии / М.Д. Каташевцев, В.В. Алексеев, Д.В. Воронов // Вестник ИрГТУ. — 2015. — Т. №2. — С. 99–103.
10. Каташевцев, М.Д. Автоматизация создания проектов организации дорожного движения для автомобильных дорог / Д.В. Пахомов, М.Д. Каташевцев, В.И. Мартьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2010. — С. 56–61.

Публикации в других изданиях

11. Каташевцев, М.Д. Логико-эвристические методы анализа плоских изображений / М.Д. Каташевцев, В.И. Мартьянов // Известия Иркутского университета: ежегод. науч.-теорет. конф. аспирантов и студентов: материалы. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, . — 2010. — С. 175–177.
12. Каташевцев, М.Д. [и др.]; Обзор приложений логико-эвристических методов решения комбинаторных задач / В.И. Мартьянов, В.В. Архипов, М.Д. Каташевцев // Материалы 3-ей Российской школы – семинара «Синтаксис и семантика логических систем».- Иркутск. — 2010. — С. 60–64.

Подписано в печать 07.10.2017. Формат 60 × 90 /16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ 241. Поз. Плана 8н.

Отпечатано в типографии издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.