

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ИРКУТСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

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»

**Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

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

ИРКУТСК – 2017

Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Введение | 4 |
| 1 Обзор | 10 |
| 1.1 Теория распознавания образа | 10 |
| 1.2 Распознавание текста | 11 |
| 1.3 Распознавание рукописного текста | 13 |
| 1.3.1 Шаблонные методы | 13 |
| 1.3.2 Структурные методы | 14 |
| 1.3.3 Признаковые методы | 15 |
| 1.3.4 Выводы | 16 |
| 1.4 Поисковые системы | 18 |
| 1.4.1 Big Table | 19 |
| 2 Распознавание изображений | 20 |
| 2.1 Базовые понятия | 20 |
| 2.2 Модель контурного изображение | 23 |
| 2.3 Преобразование растрового изображения | 25 |
| 2.3.1 Волновая скелетизация | 26 |
| 2.3.2 Построение модели \mathfrak{M} для графа G | 28 |
| 2.4 Постановка задачи распознавания | 33 |
| 2.5 Интерпретация (оценка сложности анализа изображений) | 35 |
| 2.5.1 Анализа изображений с метрикой | 43 |
| 2.5.2 Масштабные ряды и их примененее | 49 |
| 2.5.3 Анализ изображений, представляющих объекты с наложе- ниями | 58 |

| | |
|--|-----------|
| 3 Приложения | 69 |
| 3.1 Распознавание символов | 69 |
| 3.1.1 Конвертор растровых изображений | 69 |
| 3.1.2 Браузер для БД | 71 |
| 3.1.3 Интерпретатор | 71 |
| 3.2 Оценка устойчивости битумных эмульсий | 71 |
| 3.2.1 Введение | 71 |
| 3.2.2 Анализ эмульсий | 74 |
| 3.2.3 Оценка качества анализа | 76 |
| 3.2.4 Определение среднего размера и дисперсии частиц битумной эмульсии на модифицированном битуме | 78 |
| 3.2.5 Результаты | 79 |
| 3.3 Автоматизация составления ПОДД | 79 |
| 3.3.1 Представление дороги | 80 |
| 3.3.2 Представление правил | 81 |
| 3.3.3 Автоматизация | 82 |
| Заключение | 87 |
| Список рисунков | 88 |
| Список таблиц | 90 |
| Список использованных источников | 91 |
| Приложение А Структура БД | 95 |
| Приложение Б Акты внедрения | 99 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Разработка эффективных вычислительных методов решения информационных задач является одним из важнейших направлений в развитии современных информационных технологий.

Это можно отнести и к прогрессу в целом, сложно представить современную науку, технику и общественную жизнь без использования электронных вычислительных устройств, подключенных к сети Интернет.

В идеале, такие методы обязаны обеспечивать скорость решения ряда важных информационных задач не зависящую от размеров данных. И действительно, есть ряд важных задач, где это достижимо.

Одним из таких примеров (и очень важным) являются реляционные базы данных, где вычислимость запросов определенных типов не зависит от объема данных, а только линейно от сложности проекта самой БД.

Для простого обывателя практическим подтверждением этого является скорость работы банковских систем, с их мировыми сетями терминалов и банкоматов, которые позволяют осуществлять операции с вкладами и денежными средствами в любой точке земного шара за считанные секунды.

Стоит отметить, что достаточно близко к классу таких задач примыкают задачи поиска данных по ключевым словам в сети Интернет (поисковые системы «Google», «Яндекс» и др.), где скорость поиска не замедляется из-за экспоненциального роста информации в глобальной сети.

Еще одним важным классом информационных задач являются вопросы распознавания образцов. Где при организации данных близкой к организации таблиц в реляционных базах данных также могут быть получены результаты доказывающие независимость скорости распознавания образцов от их количества, вернее, верхней границы сложности распознавания одного образца с добавкой только количества образцов (в частности, решению данных вопросов в значительной мере посвящена данная работа).

Данное направление исследований (разработка эффективных вычислительных методов решения информационных задач) весьма актуально для современ-

ной 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 табличной 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 вычислительно-го 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), програмная 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, выполнялось 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. Степень достоверности полученных результатов обеспечивается строгими математическими формулировками определений, а также строгими математическими доказательствами полученных утверждений, лемм и теорем. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами: А.И. Мальцевым [28], Ю.Л. Ершовым [28], С.В. Яблонским [34], А.И. Кокориным [18], А.В. Манциводой [29], Коддом [35], Д. Кнутом [17], В.И. Мартыновым [22], Д.В. Пахомовым [24], В.В. Архиповым [23] и др [3, 4, 10, 21].

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 (см. Приложение Б 3.3.3).
3. Разработан программный комплекс автоматизации составления проектов организации дорожного движения (ПОДД), внедренный в ОГКУ «Дирекция автомобильных дорог» Администрации Иркутской области (см. Приложение Б 3.3.3).

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, ИРНИТУ, ИрГУПС, 2010–17 гг.

5. Межрегиональных конференциях "Платоновские чтения – 2015–17 гг.

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. Мартяновым, 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 11 научных работах [12–16, 23–27, 30], в том числе 8 [13–16, 23, 25–27, 30] работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ [11]. Все вносимые на защиту результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 100 страниц с 29 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 38 наименований.

1 Обзор

В данной работе анализ рассматривается в контексте задачи классификации. Рассмотрим наиболее популярные на момент публикации данной работы методы анализа образов.

1.1 Теория распознавания образа

Теория распознавания образа — раздел информатики и смежных дисциплин, развивающий основы и методы классификации и идентификации предметов, явлений, процессов, сигналов, ситуаций и т. п. объектов, которые характеризуются конечным набором некоторых свойств и признаков. Такие задачи решаются довольно часто, например, при переходе или проезде улицы по сигналам светофора. Распознавание цвета загоревшейся лампы светофора и знание правил дорожного движения позволяет принять правильное решение о том, можно или нельзя переходить улицу.

Необходимость в таком распознавании возникает в самых разных областях — от военного дела и систем безопасности до оцифровки аналоговых сигналов.

Проблема распознавания образа приобрела выдающееся значение в условиях информационных перегрузок, когда человек не справляется с линейно-последовательным пониманием поступающих к нему сообщений и в результате его голова переключается на режим одновременности восприятия и мышления, которому такое распознавание свойственно.

Неслучайно, таким образом, проблема распознавания образа оказалась в поле междисциплинарных исследований — в том числе в связи с работой по созданию искусственного интеллекта, а создание технических систем распознавания образа привлекает к себе всё большее внимание.

Распознавание образов — это отнесение исходных данных к определённому классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные, из общей массы несущественных данных.

Классическая постановка задачи распознавания образов: близка к постановке задачи классификации и предполагает наличие некоторого базового набо-

ра заранее известных классов (набор может расширяться), и образа (не обязательно визуального) которые надо классифицировать.

Наиболее часто в задачах распознавания визуальных образов рассматриваются монохромные изображения, что даёт возможность рассматривать изображение как функцию на плоскости.

Множество же всех возможных функций $f(x, y)$ на плоскости T — есть модель множества всех изображений X . Вводя понятие сходства между образами можно поставить задачу распознавания. Конкретный вид такой постановки сильно зависит от последующих этапов при распознавании в соответствии с тем или иным подходом.

1.2 Распознавание текста

Оптическое распознавание текста является исследуемой проблемой в областях распознавания образов, искусственного интеллекта и компьютерного зрения.

Системы оптического распознавания текста требуют калибровки для работы с конкретным шрифтом; в ранних версиях для программирования было необходимо изображение каждого символа, программа одновременно могла работать только с одним шрифтом. В настоящее время больше всего распространены так называемые «интеллектуальные» системы, с высокой степенью точности распознающие большинство шрифтов. Некоторые системы оптического распознавания текста способны восстанавливать исходное форматирование текста, включая изображения, колонки и другие нетекстовые компоненты.

Точное распознавание латинских символов в печатном тексте в настоящее время возможно только если доступны чёткие изображения, такие как сканированные печатные документы. Точность при такой постановке задачи превышает 99 %, абсолютная точность может быть достигнута только путем последующего редактирования человеком. Проблемы распознавания рукописного «печатного» и стандартного рукописного текста, а также печатных текстов других форматов (особенно с очень большим числом символов) в настоящее время являются предметом активных исследований.

Точность работы методов может быть измерена несколькими способами и поэтому может сильно варьироваться. К примеру, если встречается специализированное слово, не используемое для соответствующего программного обеспечения, при поиске несуществующих слов, ошибка может увеличиться.

Распознавание символов он-лайн иногда путают с оптическим распознаванием символов. Последний — это оффлайн метод, работающий со статической формой представления текста, в то время как он-лайн распознавание символов учитывает движения во время письма. Например, в он-лайн распознавании, используемом PenPoint OS или планшетный ПК, можно определить, с какой стороны пишется строка: справа налево или слева направо.

Он-лайн системы для распознавания рукописного текста «на лету» в последнее время стали широко известны в качестве коммерческих продуктов. Алгоритмы таких устройств используют тот факт, что порядок, скорость и направление отдельных участков линий ввода известны. Кроме того, пользователь научится использовать только конкретные формы письма. Эти методы не могут быть использованы в программном обеспечении, которое использует сканированные бумажные документы, поэтому проблема распознавания рукописного «печатного» текста по-прежнему остается открытой. На изображениях с рукописным «печатным» текстом без артефактов может быть достигнута точность в 80 %–90 %, но с такой точностью изображение будет преобразовано с десятками ошибок на странице. Такая технология может быть полезна лишь в очень ограниченном числе приложений.

Ещё одной широко исследуемой проблемой является распознавание рукописного текста. На данный момент достигнутая точность даже ниже, чем для рукописного «печатного» текста. Более высокие показатели могут быть достигнуты только с использованием контекстной и грамматической информации. Например, в процессе распознания искать целые слова в словаре легче, чем пытаться проанализировать отдельные символы из текста. Знание грамматики языка может также помочь определить, является ли слово глаголом или существительным. Формы отдельных рукописных символов иногда могут не содержать

достаточно информации, чтобы точно (более 98 %) распознать весь рукописный текст.

Для решения более сложных проблем в сфере распознавания используются как правило интеллектуальные системы распознавания, такие как искусственные нейронные сети.

1.3 Распознавание рукописного текста

Распознавание рукописного ввода — это способность компьютера получать и интерпретировать рукописный ввод. Распознавание текста может производиться «оффлайновым» методом из уже написанного на бумаге текста или «онлайновым» методом считыванием движений кончика ручки, к примеру по поверхности планшета.

Эти задачи реализованы такими разработчиками, как Paragon Software group (система Pen Reader), iRex Technologies (система MyScript Notes), ABBYY (система Fine Reader). У каждого из выпущенного ими продукта своя область применения. Например, приложение «Pen Reader» работает только с динамическим вводом рукописного текста, приложение «MyScript Notes» хоть и является более функциональным решением в области распознавания рукописного текста, чем предыдущее, но напротив не распознает текст в режиме реального времени, а лишь конвертирует ранее введенный текст.

Качество распознавания оценивается как вероятность (т. е. частота) ошибки классификации на другом конечном множестве объектов с заранее известными ответами (тестовом множестве). Типичная система оценки каллиграфии включает извлечение признаков, распознавание объекта, принятие решения.

Достаточно полный обзор методов распознавания рукописного текста (да и текста в целом) представлен в [6]. Ниже представлены некоторые выдержки из этого обзора. В целом сами алгоритмы распознавания можно разбить на следующие группы:

1.3.1 Шаблонные методы

Шаблонные методы 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.

1.3.2 Структурные методы

Структурные методы [5, 33] 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. Структурными элементами являются составляющие символ линии. Так, для буквы Ф – это вертикальный отрезок и дуга 1.1. Распознаваемый символ подвергается процедуре скелетизации (утоньшению). Каждый полученный контур скелетного представления описывается в виде последовательного набора особых точек и «цепного» кода, состоящего из точки привязки, числа кодов и массива направлений из текущей точки к следующей [19].

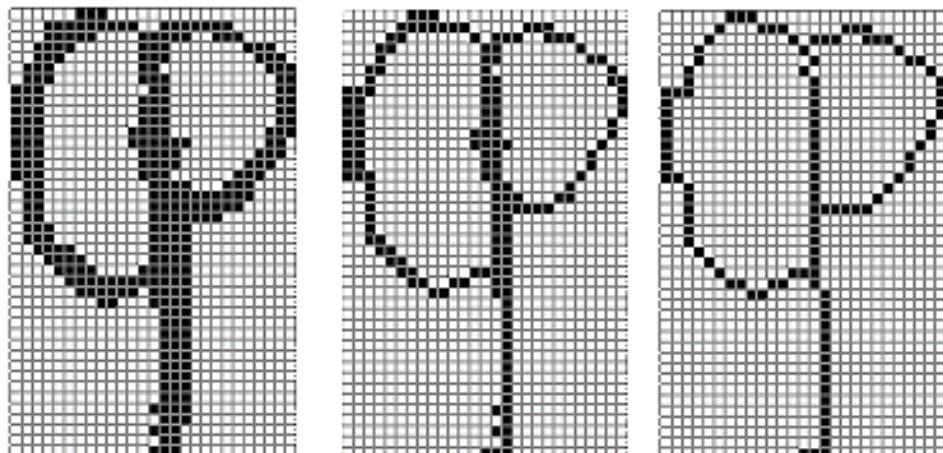


Рисунок 1.1 – Скелетизация

Для каждой особой точки скелетного образа вычисляются следующие признаки:

- нормированные координаты особой точки;
- длина ребра до следующей вершины;
- нормированное направление из данной точки в следующую;
- нормированное направление входа в точку и выхода из точки;
- кривизна дуги, соединяющая особую точку со следующей вершиной.

На рисунке 1.2 условно показаны некоторые из топологических признаков. Граф имеет пять особых точек – a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 . При обходе графа по маршруту $a_0 - a_1 - a_2 - \dots$ в вершине a_1 условно показаны следующие признаки: вектор R_1 – направление входа в точку, вектор R_2 – направление выхода из точки, вектор R_3 – глобальное направление на следующую особую точку. Двунаправленный вектор h показывает величину «левого» отклонения дуги (a_1, a_2) от прямой; «правое» отклонение равно нулю. Как видно из приведенного описания, число признаков равняется восьмикратному числу вершин. Оно различается для разных топологических кодов, и признаки с одинаковым номером для разных топологических кодов могут иметь разный смысл.

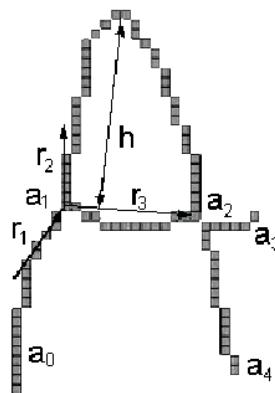


Рисунок 1.2 – Топологии скелета

Обучение метода состоит в построении деревьев распознавания для каждого из определенных заранее (вручную или автоматически) топологических кодов.

1.3.3 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. Задача распознавания, принятия решения о принадлежности образа тому или иному классу, на основании анализа вычисленных признаков, имеет целый ряд строгих математических решений в рамках детерминистического и вероятностного подходов [1, 9]. В системах распознавания символов чаще всего используется классификация, основанная на подсчете евклидова расстояния между вектором признаков распозна-

ваемого символа и векторами признаков эталонного описания. Тип и количество признаков в немалой степени определяют качество распознавания. Формирование вектора производится во время анализа предварительно подготовленного изображения. Данный процесс называют извлечением признаков. Этalon для каждого класса получают путем аналогичной обработки символов обучающей выборки.

Основные достоинства признаковых методов – простота реализации, хорошая обобщающая способность, хорошая устойчивость к изменениям формы символов, низкое число отказов от распознавания, высокое быстродействие. Наиболее серьезный недостаток этих методов – неустойчивость к различным дефектам изображения. Кроме того, признаковые методы обладают другим серьезным недостатком – на этапе извлечения признаков происходит необратимая потеря части информации о символе. Извлечение признаков ведется независимо, поэтому информация о взаимном расположении элементов символа утрачивается.

1.3.4 Выводы

Как видно из приведенного обзора, для всех трех методов свойственна неполнота и ограниченность условий применения. Каждый из описанных методов сам по себе имеет специализированную область применения: шаблонные методы эффективнее использовать для распознавания печатных шрифтов, структурные - рукописных при оффлайн-распознавании, признаковые – рукописных при онлайн-распознавании.

Шаблонные, признаковые и структурные методы распознавания имеют как свои преимущества, так и недостатки. Сравнительный анализ этих методов приведен в таблице 1.1.

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, примером может служить метод структурно-пятенных эталонов компании ABBYY [32].

Таблица 1.1
Сравнение методов распознавания

| Методы | Достоинства | Недостатки |
|-------------|---|--|
| ШАБЛОННЫЕ | <ul style="list-style-type: none"> – высокая скорость распознавания; – простая реализация; – высокая точность распознавания дефектных символов. | <ul style="list-style-type: none"> – необходимость настройки системы на типы и размеры шрифтов; – не может использоваться для описания объектов с высокой степенью изменчивости – может приниматься для распознавания только печатных символов – надежно распознают только те шрифты, шаблоны которых им "известны" – если распознаваемый шрифт хоть немного отличается от эталонного, шаблонные системы могут делать ошибки даже при обработке качественных изображений. – невозможность распознать шрифт, хоть немного отличающийся от заложенного в систему (размером, наклоном или начертанием). |
| СТРУКТУРНЫЕ | <ul style="list-style-type: none"> – применяется для рукописных шрифтов, имеющих, множество вариантов начертания; – данные могут быть представлены в графовой форме, что обеспечивает инвариантность. | <ul style="list-style-type: none"> – высокую чувствительность к дефектам изображения, нарушающим составляющие элементы. – для этих систем до сих пор не созданы эффективные автоматизированные процедуры обучения. – трудность распознавания дефектных символов и медленная работа. – векторизация может добавить дополнительные дефекты. – как только вы представите «разорванную» из-за дефектов печати букву, она уже не подойдет под свое описание |
| ПРИЗНАКОВЫЕ | <ul style="list-style-type: none"> – простота реализации; – хорошая обобщающая способность; – хорошая устойчивость к изменениям формы символов; – высокое быстродействие. | <ul style="list-style-type: none"> – неустойчивость к дефектам изображения; – при вычислении признаков теряется существенная часть информации – трудно гарантировать, что к данному классу удастся отнести только объекты этого класса. |

1.4 Поисковые системы

Процессы компьютеризации деятельности государственных учреждений, предприятий, быстрое развитие глобальной сети (Internet) привели к накоплению большого объема неструктурированной текстовой информации. Возникла потребность в программном обеспечении, реализующем эффективный поиск информации.

Все это привело к созданию полнотекстовых информационно-поисковых систем. Полнотекстовые Поисковые Системы (ПС) строятся на основе информационно-поисковых языков дескрипторного типа. Информационно-технологическая структура полнотекстовых ИС включает:

- хранилище документов;
- глобальный словарь системы;
- инвертированный индекс документов;
- интерфейс ввода документов в систему;
- механизм индексирования;
- интерфейс запросов пользователя;
- механизм поиска документов;
- механизм извлечения найденных документов.

Приведем краткий перечень типов наиболее широко используемых полнотекстовых ПС.

1. Справочно-информационные системы общего назначения, ориентированные на доступ пользователей к нормативно-правовым документам. К этим системам относятся «Консультант Плюс», «Гарант», «Кодекс» и др.

2. Глобальные информационные службы (хост-системы), предоставляющие доступ удаленным пользователям к библиографической, полнотекстовой или другой информации. Крупнейшей в мире коммерческой службой, обеспечивающей доступ к юридической информации, является система LEXIS (США).

3. Системы информационной поддержки деятельности правотворческих органов. Спецификой таких систем является необходимость хранения и поиска

многих версий и редакций нормативно-правовых документов, с учетом вносимых поправок и изменений.

4. Системы автоматизации делопроизводства судов, милиции и других правоохранительных органов.

5. Системы поиска информации в Интернете (Google, Yandex и др.).

Так же стоит отметить, что в настоящее время возможностями полнотекстового поиска обладают все наиболее популярные на сегодняшний день СУБД (SQL, MySQL, Postgres).

Наибольший интерес для нас будет представлять система поиска информации Google, основанная на технологии BigTable, которая более подробно будет рассмотрена в следующем разделе.

1.4.1 Big Table

Big Table – высокопроизводительная СУБД, построенная на основе Google File System (GFS), Chubby Lock Service и других программных продуктах Google. В настоящий момент не распространяется и не используется за пределами Google, хотя клон Bigtable применяется в Агентстве национальной безопасности США.

Технология Big Table является на настоящий момент наиболее мощной реализацией идеологии табличной организации данных и именно она обеспечивает корпорации Google лидирующие позиции на рынке оказания услуг по полнотекстовому поиску информации в глобальной сети, а также в сотрудничестве на коммерческой основе с различными государственными учреждениями США.

Отметим, что индексирование записей в СУБД Big Table не отличается от принятой в промышленных реляционных СУБД, если отбросить возможность масштабирования, т. е. размер индексов, и идеологически родственна представлению узлов в универсуме для изображений из раздела диссертации 2.5. Интерпретация.

2 Распознавание изображений

2.1 Базовые понятия

Определение 2.1.1. *Растровое изображение есть функция*

$$I_{rgb}(x, y) : N \times N \rightarrow ([0, 255], [0, 255], [0, 255])$$

Таким образом каждой точке (x, y) мы сопоставляем тройку (r, g, b) . Первый элемент тройки соответствует красной компоненте цвета в растровом изображении, второй — зеленой и третий — синей. Далее, для краткости, будем использовать следующую запись:

$$\begin{aligned} I_r(x, y) &= I_{rgb}(x, y)_r \text{ — красная компонента} \\ I_g(x, y) &= I_{rgb}(x, y)_g \text{ — зеленая компонента} \\ I_b(x, y) &= I_{rgb}(x, y)_b \text{ — синяя компонента} \end{aligned}$$

Определение 2.1.2. *Определим растровое изображение заданного в оттенках серого как функцию*

$$I_{grey}(x, y) : N \times N \rightarrow [0, 255]$$

Определение 2.1.3. *Введем оператор «обесцвечивания» D , который обеспечивает переход от цветного изображения I_{rgb} к изображению I_{grey} , заданному в оттенках серого:*

$$D(I_{rgb}) = I_{grey}$$

Существует несколько основных способов обесцвечивания изображения:

- Красный канал $D_{red}(I_{rgb}) = I_r$
- Зеленый канал $D_{green}(I_{rgb}) = I_g$
- Синий канал $D_{blue}(I_{rgb}) = I_b$
- Среднее значение (average): $D_{avg}(I_{rgb}) = \frac{I_r + I_g + I_b}{3}$

- Лума (luma), учитывает особенности восприятия цвета человеком:

$$D_{luma}(I_{rgb}) = I_r \cdot 0.3 + I_g \cdot 0.59 + I_b \cdot 0.11$$

Значения коэффициентов, иногда, могут отличаться от приведенных выше, но их сумма всегда равна 1

- Минимум $D_{min}(I_{rgb}) = \min(I_r, I_g, I_b)$
- Максимум $D_{max}(I_{rgb}) = \max(I_r, I_g, I_b)$
- Обесцвечивание (desaturation): $D_{desaturation}(I_{rgb}) = \frac{D_{min}(I_{rgb}) + D_{max}(I_{rgb})}{2}$

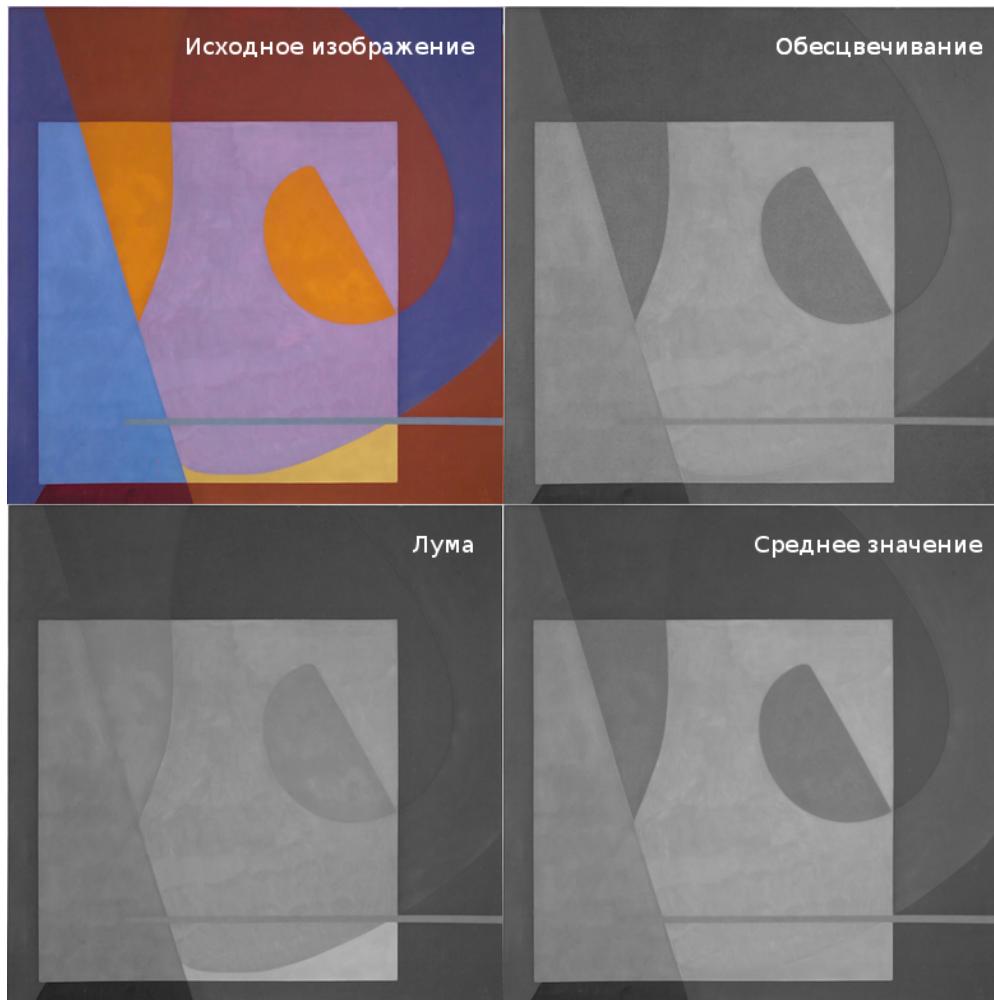


Рисунок 2.1 – Сравнение методов обесцвечивания

Замечание 2.1. Наилучший результат для средне-статистического изображения (с гистограммой близкой к нормальной) получается при использовании 5-го и последнего способов. Под наилучшим результатом понимается сохранение яркости (компоненты *value* в модели HSV) цветов исходного изображения.

Определение 2.1.4. *Растровое монохромное изображение есть функция*

$$I_m(x, y) : N \times N \rightarrow \{0, 1\}$$

Переход от изображения заданного в оттенках серого к монохромному изображению осуществляется через операцию отсечения. Операция отсечения реализуется через оператор отсечения T , для некоторого фиксированного $t \in [0, 255]$

Определение 2.1.5. *Оператор отсечения T есть:*

$$T(t, I_{grey}) = \begin{cases} 1 & , I_{grey} < t \\ 0 & , \text{иначе} \end{cases}$$

Таким образом монохромное изображение есть $I_m = T(t, I_{grey})$

Замечание 2.2. *Значение t определяется опытном путем и зависит от исходного изображения. Для рукописного текста написанного черной ручкой на офисной бумаге берутся значения близкие к 100 (чем меньше значение, тем темнее изображение).*

Замечание 2.3. *В данной работе не рассматриваются методы адаптивного отсечения, в силу их медленной производительности излишней в данном контексте точности.*

Определение 2.1.6. *Точки (x, y) для которых верно $I(x, y) = 1$ будем называть **заполненными**.*

Определение 2.1.7. *Точки (x, y) для которых верно $I(x, y) = 0$ будем называть **пустыми**.*

Множество заполненных точек образует множество связных областей

$$\{K_1, K_2 \dots K_n\},$$

таких что:

1. $\forall (x_1, y_1) \forall (x_2, y_2) (|x_1 - x_2| > 1 \wedge |y_1 - y_2| > 1)$, где $(x_1, y_1) \in K_i$, $(x_2, y_2) \in K_j$ и $i \neq j$

2. $\forall(x_1, y_1) \exists(x_2, y_2) (|x_1 - x_2| \leq 1 \wedge |y_1 - y_2| \leq 1)$, где $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \in K_i$ и $(x_1, y_1) \neq (x_2, y_2)$
3. $|K_i| \geq 2$

Определение 2.1.8. Всякую связную область K_i будем называть контуром

Определение 2.1.9. Растворное изображение I содержащие по крайней мере один контур будем называть растровым контурным изображением

Замечание 2.4. Не исключая общности, далее будут рассматриваться только растровые изображения содержащие один контур, а под растровым контурным изображением будет пониматься растровое изображение содержащие только один контур.

2.2 Модель контурного изображение

В качестве математической модели представления растрового контурного изображения будем использовать четырех-основную алгебраическую систему вида.

Определение 2.2.1. Контуровое изображение (далее, изображение) есть система вида

$$\mathfrak{M} = \langle A, R, V, M; Sector, Angle, Metric, Relation \rangle \quad (2.1)$$

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.

Замечание 2.5. Важно отметить, что в этом представлении все множества являются конечными, и, если множества A и R являются фиктивными (чисто техническими элементами) данной модели, и определяются через функции, то множество $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ – есть конечное множество чисел, с максимальным v_{max} и минимальным v_{min} элементами, разбитое шагом δ на $n + 1$ элементов, где

$$n = \frac{v_{max} - v_{min}}{\delta}$$

$$v_0 = v_{min}$$

$$v_i - v_{i-1} = \delta, \forall i = 1, n$$

$$v_n = v_{max}$$

Замечание 2.6. Множество M также как и V конечно. Но выбор верхней границы для M не настолько очевиден, так как есть вероятность того, что разница в размерах между двумя дугами может быть достаточно велика (в тысячи а то и миллионы раз). Однако, в рамках рассматриваемой области применения (распознавание символов), когда в качестве «эталонного наблюдателя» выступает человеческий глаз, разница что в тысячу что в миллион раз едва различима, и поэтому ей можно пренебречь, используя в качестве максимального какое-нибудь фиксированное значение (например 10000), а в качестве шага например одну десятую процента. Используя такой подход можно добиться чтобы в рамках используемой модели всякая дуга была бы как большие так и меньшие любой дуги не более чем в 1000 раз.

Для наших целей важно всегда работать только с конечными множествами, что достигается рассмотрением конечных множеств A , R , а также предположением о наличии минимального шага возрастания количественных характеристик дуг и связей дуг.

Таким образом контурное изображение будет представлять собой систему дуг и связей дуг. Где всякая дуга определяется через ее градусную меру и через

относительную (в данном контуре) длину дуги. А всякая связь определяется через угол связи и пару дуг которые она связывает.

2.3 Преобразование растрового изображения

Преобразование растрового контурного изображения в "изображение" осуществляется в два этапа. Первый этап — это волновая скелетизация. С помощью этой методики по растровому изображению строится граф (скелет), который визуально близко соответствует рассматриваемому растровому изображению.

Пусть I — растровое контурное изображение и K — есть его контур.

Определение 2.3.1. Точку $q(x_1, y_1)$ будем называть соседом точки $p(x, y)$ если $|x - x_1| \leq 1$ и $|y - y_1| \leq 1$ и $p \neq q$. Введем отношение соседства $N(p, q)$, которое истинно если p сосед q .

Очевидно что точка p не может иметь более 8 соседей. Обозначим через N_K^p множество всех соседей точки $p(x, y)$ лежащих контуре K :

$$N_K^p = \{q | q \in K \wedge N(p, q)\}$$

Согласно определению контура (2.1.8) очевидно, что K не имеет изолированных точек т. е.

$$\forall p \exists q : N(p, q)$$

$$p, q \in K$$

Замечание 2.7. Скелетом I будем называть граф $G(V, E)$, «интуитивно адекватно отражающий» исходное изображение.

Определение 2.3.2. Волной w будем называть конечное множество точек $\{p_j\}$.

Определение 2.3.3. Множество волн $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ будем называть подволнами волны w если:

$$\bigcup_{i=1,n} w_i = w$$

$$w_i \cap w_j = \emptyset, i, j = \overline{1, n}, i \neq j;$$

и для любых двух точек $p \in w_i, g \in w_j$, где $i \neq j$ верно $\neg N(p, g)$.

Введем функцию вычисляющую центр масс точек волны

$$g(w) = \frac{\sum_{p \in w} p}{|w|}$$

2.3.1 Волновая скелетизация

Опишем алгоритм построения скелета растрового контурного изображения. В качестве основы был взят алгоритм предложенный в статье [19], и доработан для получения более точного скелета используя идеи предложенные в [38].

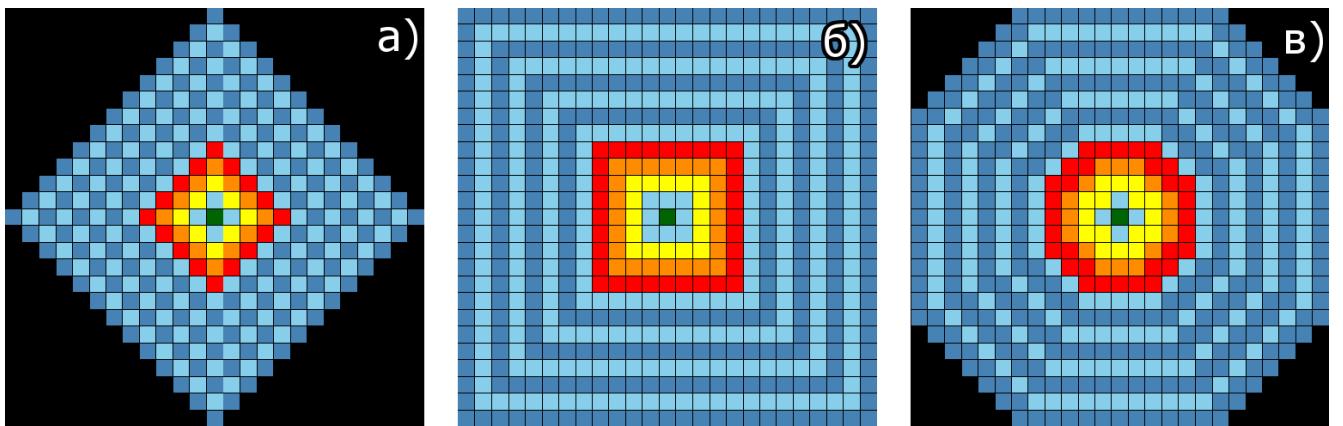


Рисунок 2.2 – Распространение волны: а)–ромбовидная, б)–квадратная, в)–сферическая

Сферическая волна получается путем чередования волн вида а) и б) при обходе изображения

Сформируем начальные условия. Для формирование точек первой волны подойдет любая точка из F . В результате имеем:

$w_0^0 = \{p\}, p \in K$ – начальная волна,

$W_0 = \{w_0^0\}$ – множество волн,

$F_0 = K$ – состояние заполненной области,

$G_0(V_0, E_0), V_0 = \{p\}, E_0 = \emptyset$ – начальное состояние скелета.

Определим n -ый шаг итерации следующим образом. Для всякой i -ой волны $w_i^{k_i-1}$ из W_{n-1} (k_i – соответствует k_i -ой итерации w_i):

$$w_i^{k_i} = \bigcup_{p \in w_i^{k_i-1}} N_{F_{n-1}}^p \setminus \bigcup_{j < i} w_j^{k_j-1} \quad (2.2)$$

Если u_1, \dots, u_m есть подволны волны $w_i^{k_i}$, тогда

$$W_n^i = \{w_{l+1}, \dots, w_{l+m}\}$$

где

$$w_{l+j} = u_j, j = \overline{1, m}$$

$$l = |W_{n-1}| + \sum_{j < i} |W_n^j|.$$

Ребра графа образуют отрезки, связывающие центры масс полученных подволн с центром массы $w_i^{k_i-1}$

$$E_n^i = \{(v_i^{k_{i-1}}, v_{l+j}^{k_i})\}, j = \overline{1, m}$$

$$V_n^i = \{v_{l+j}^{k_i}\}, j = \overline{1, m}$$

$$v_i^j = g(w_i^j)$$

Если же волна $w_i^{k_i}$ является цельное и не имеет разрывов, а также $w_i^{k_i} \neq \emptyset$, то

$$W_n^i = \{w_i^{k_i}\}$$

$$E_n^i = \{(v_i^{k_{i-1}}, v_i^{k_i})\}$$

$$V_n^i = \{v_i^{k_i}\}$$

Если $w_i^{k_i} = \emptyset$

$$W_n^i = \emptyset, E_n^i = \emptyset, V_n^i = \emptyset$$

Таким образом, при $s_n = |W_{n-1}|$:

$$W_n = \{W_n^i\}, i = \overline{1, s_n}$$

$$V_n = V_{n-1} \bigcup_i V_n^i, i = \overline{1, s_n}$$

$$E_n = E_{n-1} \bigcup_i E_n^i, i = \overline{1, s_n}$$

$$F_n = F_{n-1} \setminus P_{n-1},$$

$$P_{n-1} = \{p : p \in w, w \in W_{n-1}\}$$

Если $|F_n| = 0$ то алгоритм останавливается, а граф

$$G = (V_n, E_n)$$

является скелетом исходного изображения f .

Утверждение 2.3.1. Алгоритм «волновая скелетизация» остановится на всяком контуре мощности m

Доказательство. Пусть $m = 1$, тогда

$$|F_1| = |F_0 \setminus \{p : p \in w, w \in W_0\}| = |\{p\} \setminus \{p : p \in w_0\}| = |\{p\} \setminus \{p\}| = \emptyset$$

таким образом алгоритм останавливается а граф $G = (V_1, E_1) = (\{p\}, \emptyset)$ является скелетом изображения.

Пусть $m > 2$. От противного: допустим, что существует такое l что для всякого $k < l$, $|F_k| < |F_{k-1}|$ и $|F_l| = |F_{l-1}|$, тогда $P_{n-1} = \emptyset$, отсюда следует, что $\{p : p \in w, w \in W_{n-1}\} = \emptyset$, а это возможно только в двух случаях:

1. Если W_{n-1} пусто, тогда, в силу 2.2 и в силу отсутствия изолированных точек, $F_{n-2} = \emptyset$, получаем противоречие с условием остановки.

2. Если $\forall w \in W : |w| = 0$, тогда, опять же в силу 2.2 и в силу отсутствия изолированных точек, получаем что $F_{n-2} = \emptyset$, снова получаем противоречие с условием остановки.

Следовательно такого l не существует, и алгоритм сходится для всякой непустой заполненной области без изолированных точек. \square

2.3.2 Построение модели \mathfrak{M} для графа G

Рассмотрим схему разбиения графа особыми точками

1. Для каждого простого пути запускаем:

(а) Разбиение пути по точкам смены направления обхода

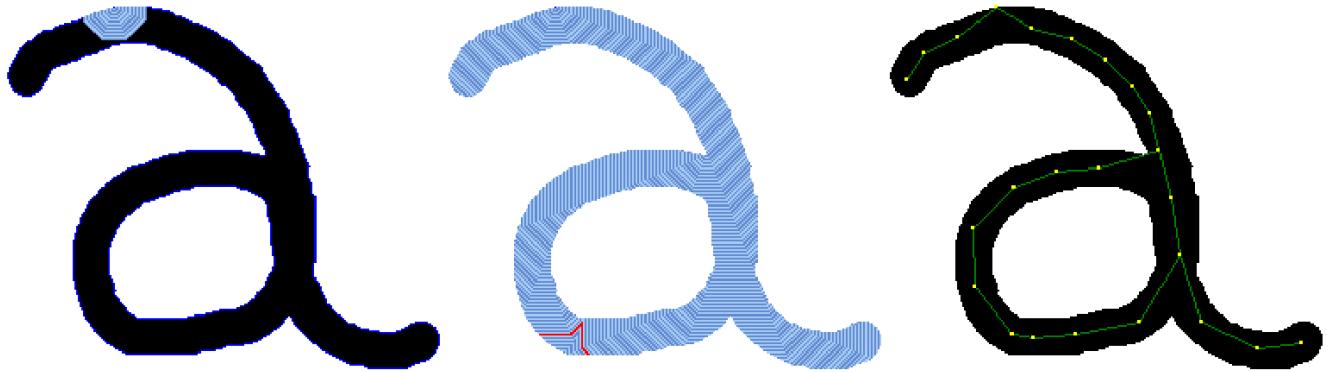


Рисунок 2.3 – Распространение волны по области, на последнем изображении представлен полученный график

На первом изображении видно как начинает распространяться волна, на втором видно какой рисунок формирует волна при обходе всего изображения (красной линией отмечено место столкновения двух подволн), ну и на последнем виден непосредственно график наложенный на исходное изображение

- (b) Для каждого разбиения выполняются
 - i. Разбиение спиралей. Чтобы определить закручен ли путь по спирали, надо проверить пересекает ли хорда путь. Если пересечение есть, то необходимо разбить путь точками пересечения
 - ii. Для каждого разбиения выполняется:
 - A. Разбиение по точкам перегиба. Точками перегиба будем считать такие точки, что угол между образующими дуг порожденными этими точками отклоняется от угла идеального соединения на некоторую дельту (значение допустимого отклонения подбирается эмпирическим путем). Угол γ идеального соединения двух дуг градусной меры α и β :

$$\gamma = 2\pi - (\alpha + \beta)$$

2. Результатом выполнения пункта 1 является порожденное множество путей. Каждый путь из этого множества затем переводится в дугу. Градусная мера дуги вычисляется с использованием формулы Гюйгенса. Для определения направления обхода дуги мы используем положение наиболее удаленной точки пути от хорды стягивающей путь. Если точка располагается слева

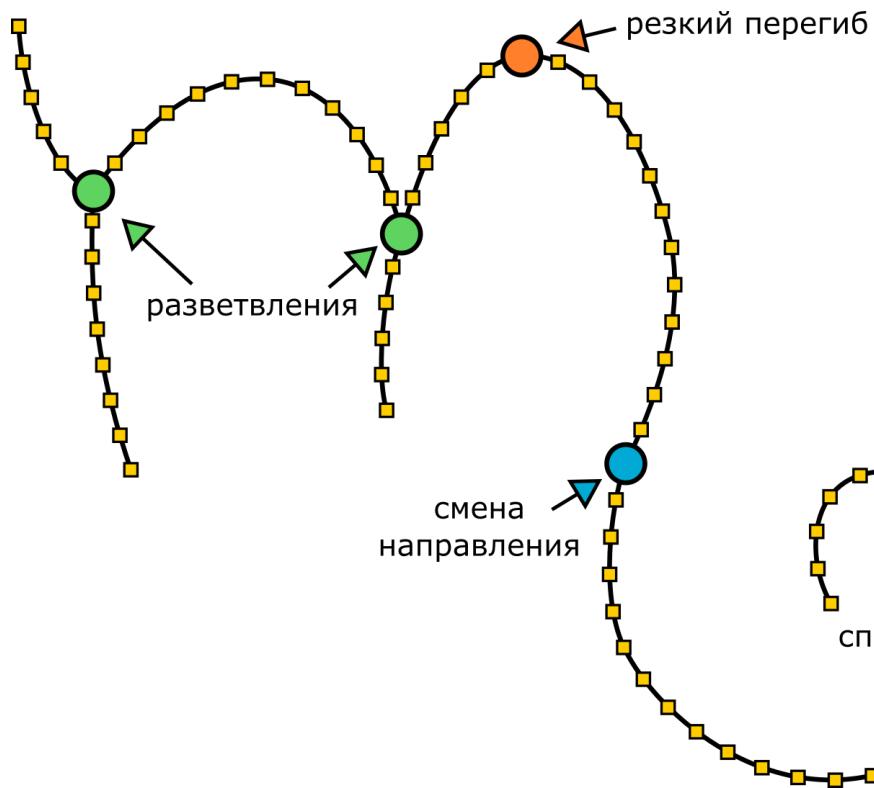


Рисунок 2.4 – Схема разбиения графа «особыми» точками

от вектора направленного от точки начала к точке конца пути, то обход ведется по часовой стрелке, если точка находится справа то считаем что обход ведется против часовой стрелки, если же точка лежит на прямой, то считаем ситуацию неопределенной.

3. Расчет связей дуг. Будем говорить что две дуги имеют связь если пути их порождающие имеют общие вершины. А угол связи дуг рассчитывается, как угол между стягивающими их хордами

Замечание 2.8. На практике разбиение на дуги, удобнее выполнять на интерполированном (сглаженном) графе в котором часть узлов удалена.

Замечание 2.9. Также стоит отметить что, хотя разбиение и может быть использовано как есть, на практике имеет смысл добавлять возможность вариации параметров, например, допускать возможность некоторого отклонения от угла идеального соединения, а для точек смены направления варьировать параметр определяющий минимально/максимально допустимое отклонение от вектора при проверки на смену направления обхода.

Пусть $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ — множество простых цепей графа $G = (V, E)$ таких что:

1. $P_i = v_1^i, v_2^i, \dots, v_{n_i}^i$
2. $\forall v \in P_i \forall u \in P_j (v \neq u)$, где $i \neq j$
3. $d(v_1^i) \neq 2$ и $d(v_{n_i}^i) \neq 2$
4. $\forall j \notin \{1, n_i\} [d(v_j^i) = 2]$
5. $\bigcup_i P_i = V$

Определение 2.3.4. Пусть $r(p, v)$ — есть расстояние от точки p до вектора v со знаком

Определение 2.3.5. Будем говорить что в узле v_i меняется направление обхода простого

$$\{v_1, \dots, v_{i-1}, v_i, v_{i+1}, \dots, v_n\}$$

в окрестности $\varepsilon \in \{2, 3, \dots\}$, если

$$\text{Sign}\left(\sum_{j=i-\varepsilon} r(v_j, h)\right) \neq \text{Sign}\left(\sum_{j=i+\varepsilon} r(v_j, h)\right)$$

где $h = (v_{i-\varepsilon}, v_{i+\varepsilon})$

Если соотношение выполняется для $\varepsilon = 2$ будем просто говорить, что в точке v_i меняется направление обхода.

Пусть множество точек $\{v_{j_1^i}, \dots, v_{j_{k_i}^i}\}$ множество точек смены направления обхода цепи P_i . Определим множество индексов задающих разбиение пути $P_i = v_1, \dots, v_n$ по направлению обхода

$$I_{P_i}^{dev} = \{j_1^i, \dots, j_{k_i}^i\} \cup \{1, n\}$$

$$j_k^i < j_{k+1}^i$$

Тогда следующие семейство множеств узлов определяют разбиение пути P_i на подпути:

$$S_{P_i}^{dev} = \bigcup_{l \in I_{P_i}^{dev}} \{\{v_t \mid t \in \{j \mid i_l \leq j \leq i_{l+1}\}\}\}$$

Каждому множеству узлов можно однозначно сопоставить подпуть P_i

Определение 2.3.6. *Определим множество индексов узлов задающие разбиение подпути $P = v_1, \dots, v_n$ закрученного в спираль следующим образом*

$$I_P^{spir} = \left\{ \min_{|r(h, v_i)|} (i, i+1) \mid \text{Sign}(r(h, v_i)) \neq \text{Sign}(r(h, v_{i+1})) \wedge i = 1, n-1 \right\}$$

$$h = (v_1, v_n)$$

Определение 2.3.7. *Определим множество индексов узлов задающие разбиение подпути $P = v_1, \dots, v_n$ по резкости угла перегиба.*

Определение 2.3.8. *Разбиением пути P на характеристические подпути будем считать разбиение определенное следующим образом:*

$$S_{P_i} = \bigcup_{j \in I_P^{spir}, P \in S_{P_i}^{dev}} \{\{v_t \mid t \in \{j \mid i_l \leq j \leq i_{l+1}\}\}\}$$

Определение 2.3.9. *Пусть $P = v_1, \dots, v_n$ простой путь тогда:*

1. $f_{begin}(P) = v_1$ — начало пути
2. $f_{end}(P) = v_n$ — конец пути
3. $h_P = v_n - v_1$ — вектор хорды стягивающей путь

Определение 2.3.10. *Пусть задано разбиение графа $G = (V, E)$ на характеристические подпути $S = \{P_1, \dots, P_m\}$, где $P_i = v_1^i, \dots, v_{n_i}^i$, будем говорить что алгебраическая система*

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

соответствует графу G если выполняются следующие условия:

1. $\text{Sector}(a_i) = 2l + \frac{1}{3}(2l - L)$, где $l = |v_1^i - v_m^i|$, $i_m = \frac{n_i}{2}$, а $L = |h_{P_i}|$
2. $\text{Metric}(a_i) = \frac{a_i}{a_1}$
3. $\text{Relation}(r_{ij}) = (a_i, a_j)$, где $i \neq j$ и неопределено в противном случае

$$4. \ Angle(r_{ij}) = \begin{cases} (-\hat{h_{P_i}}, -\hat{h_{P_j}}) & f_{begin}(P_i) = f_{end}(P_j) \\ (-\hat{h_{P_i}}, \hat{h_{P_j}}) & f_{begin}(P_i) = f_{begin}(P_j) \\ (\hat{h_{P_i}}, \hat{h_{P_j}}) & f_{end}(P_i) = f_{begin}(P_j) \\ (\hat{h_{P_i}}, -\hat{h_{P_j}}) & f_{end}(P_i) = f_{end}(P_j) \\ \text{неопределено, если } r_{ij} \text{ — неопределено} & \end{cases}$$

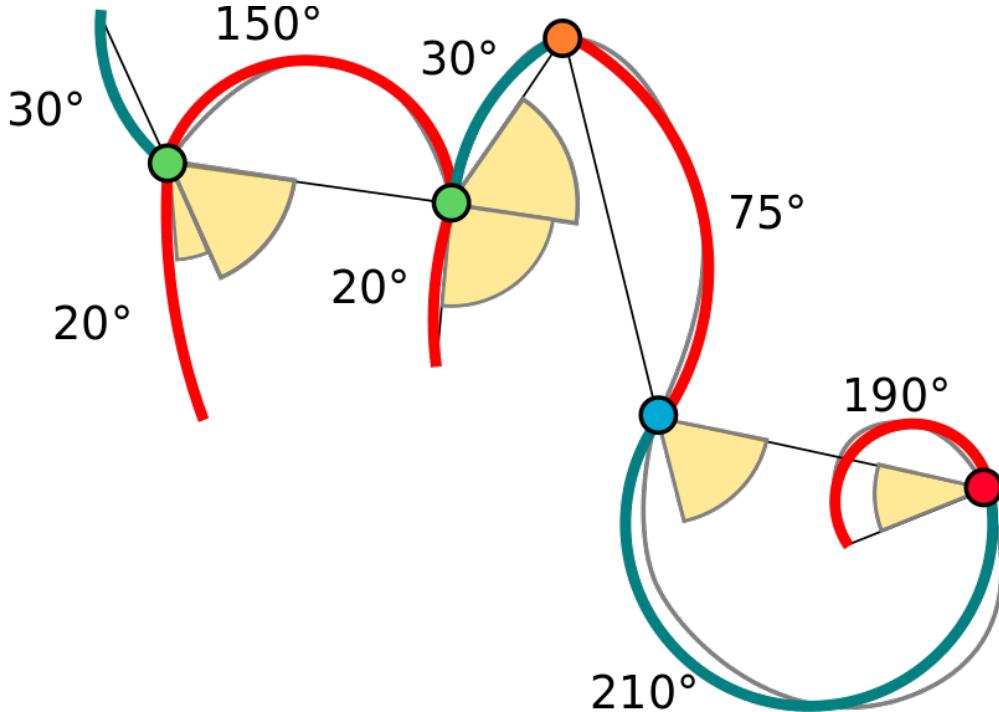


Рисунок 2.5 – Геометрическая интерпретация модели \mathfrak{M}

На изображении видно как каждая дуга имеет определенную градусную меру дуги и как дуги связаны между собой под углами соединения определяемые хордами

2.4 Постановка задачи распознавания

Пусть изображение есть модель следующего вида:

$$\mathfrak{M} = \langle A, R, V; Sector, Angle, Relation \rangle \quad (2.3)$$

$$M_{ini} = \langle A_1, \dots, A_s; f_1, \dots, f_n; p_1, \dots, p_k \rangle \quad (2.4)$$

где A_i — основные множества, f_i — операции (функции) на основных множествах, p_i — предикаты (отношения) на основных множествах, в конечную (финальную) M_{fin} , удовлетворяющую ограничениям R_1, R_2, \dots, R_m .

В качестве аналогов таких преобразований можно рассматривать допустимое управление для задачи динамического программирования [3] (без оптимизи-

зации значений целевого функционала), где R_1, R_2, \dots, R_m есть фазовые ограничения.

Алгебраическая система 2.4 при программной реализации рассматривается как реляционная база данных. А поиск последовательности преобразований для построения финальной алгебраической системы удовлетворяющей ограничениям, как вариант комбинаторной задачей высокой сложности.

В данном параграфе ограничимся исследованием сложности проверки выполнимости ограничений R_1, R_2, \dots, R_m на математических моделях вида 2.3 с позиции обеспечения независимости скорости проверки от числа ограничений.

Проверка выполнимости ограничений сводится к проверке вложимости обобщенных изображений (образцов) в анализируемое изображение 2.3.

Рассмотрим формальное описание плоских контурных изображений при проверки выполнимости ограничений более подробно.

В качестве элементов составляющих образцы и анализируемые изображения будем считать дуги и связи дуг. В качестве их численных характеристики будем использовать количество минимальных шагов возрастания для дуги (связи дуг) — градусные меры дуг, имеющие минимальное и максимальное значения.

При таком подходе, вместо одноместной функции $Sector : Arc \rightarrow V$ будем рассматривать одноместную же функцию $Sector : Arc \rightarrow V \times V$, и, соответственно, вместо одноместной функции $Angle : Rel \rightarrow V$ можно будет рассматривать $Angle : Rel \rightarrow V \times V$.

Замечание 2.10. *В принципиальном плане добавление таких максимальных и минимальных значений ничего нового не дает (между максимальным до минимальным значением всегда конечное множество элементов), но это позволяет нам более компактно задавать исходные образцы. Далее, в целях упрощения технических деталей будем считать, что для анализируемых изображений функции $Sector$ и $Angle$ имеют одинаковое минимальное и максимальное значение*

Пусть многоосновные а.с.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \langle Arc_1, Rel_1, V; Sector, Angle, R \rangle \\
 R_2 &= \langle Arc_2, Rel_2, V; Sector, Angle, R \rangle \\
 &\dots \\
 R_m &= \langle Arc_m, Rel_m, V; Sector, Angle, R \rangle
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

задают искомые в анализируемом изображении 2.3 образцы .

Анализ изображения 2.3 будет заключаться в поиске всех возможных изоморфных вложений $\mu_{i,j}$ многоосновных алгебраических систем R_1, R_2, \dots, R_m в многоосновную алгебраическую систему M 2.3, то есть изоморфное вложение $\mu_{i,j} : R_i \rightarrow M$ будет состоять из инъективных отображений следующего вида

$$\mu_{i,j} : Arc_i \rightarrow Arc; \mu_{i,j} : Rel_i \rightarrow Rel \tag{2.6}$$

такие, что:

- a) 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 $v_1 \leq v_3 \leq v_4 \leq v_2$;
- b) 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 $v_1 \leq v_3 \leq v_4 \leq v_2$;
- c) если $R(Re, Ar_1, Ar_2)$, где $Re \in Rel_i$, $Ar_1 \in Arc_i$, $Ar_2 \in Arc_i$, то $R(\mu_{i,j}(Re), \mu_{i,j}(Ar_1), \mu_{i,j}(Ar_2))$.

2.5 Интерпретация (оценка сложности анализа изображений)

В работе [22] были получены результаты для достаточно простой организации данных, практически не отличающейся (если абстрагироваться от специфики предметных задач сетевого планирования) от задачи проверки принадлежности кортежа (a_1, a_2, \dots, a_n) отношениям H_1, H_2, \dots, H_k , которые определены на некоторых конечных множествах A_1, A_2, \dots, A_n . Для такой постановки соответствующий результат работы [22] может быть сформулирован следующим образом

Теорема 2.5.1. *Теорема A. Верхняя граница сложности проверки принадлежности кортежса (a_1, a_2, \dots, a_n) отношениям H_1, H_2, \dots, H_k не превышает $O(n)$.*

Для упрощения понимания главной идеи доказательства, рассмотрим доказательство теоремы 2.5.1. Основой его является представление декартова произведения конечных множеств.

$$A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$$

в древовидной форме Tree (Рисунок 2.6).

Определим более точно конечные множества

$$\begin{aligned} A_1 &= \{a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{1,m_1}\}; \\ A_2 &= \{a_{2,1}, a_{2,2}, \dots, a_{2,m_2}\}; \\ &\dots \\ A_n &= \{a_{n,1}, a_{n,2}, \dots, a_{n,m_n}\}; \end{aligned} \tag{2.7}$$

Понятно, что таблица 1 является универсумом для любых таблиц реляционной БД с доменами A_1, A_2, \dots, A_n . Т.е представление отношения H в таблице состоит в пометке вершин n -го этажа, если путь от корня дерева до этой вершины n -го этажа, дает кортеж из отношения H .

Проверка принадлежности кортежа (a_1, a_2, \dots, a_n) , где $a_1 \in A_1, a_2 \in A_2, \dots, a_n \in A_n$, отношению H производится за n шагов в таблице 1(этот процесс в дальнейшем будем называть интерпретацией кортежа (a_1, a_2, \dots, a_n) на дереве Tree). Действительно, a_1 позиционируется на 1-ом этаже за 1 шаг, a_2 позиционируется на 2-ом этаже за 1 шаг и так далее, a_n позиционируется на n -ом этаже

| # | Значения вершин дерева | | | | | | | | | | | | |
|-----|------------------------|-----------|---------|-------------|-----------|-----------|---------|-------------|---------|-----------|-----------|---------|-------------|
| 0 | Корень дерева | | | | | | | | | | | | |
| 1 | $a_{1,1}$ | | | | $a_{1,2}$ | | | | \dots | | | | |
| 2 | $a_{2,1}$ | $a_{2,2}$ | \dots | a_{2,m_2} | $a_{2,1}$ | $a_{2,2}$ | \dots | a_{2,m_2} | \dots | $a_{2,1}$ | $a_{2,2}$ | \dots | a_{2,m_2} |
| ... | | | | | | | | | | | | | |
| n | $a_{n,1}$ | $a_{n,2}$ | \dots | a_{n,m_n} | $a_{n,1}$ | $a_{n,2}$ | \dots | a_{n,m_n} | \dots | $a_{n,1}$ | $a_{n,2}$ | \dots | a_{n,m_n} |

Рисунок 2.6 – Схема 1. Дерево Tree

за 1 шаг, где и определяется принадлежность кортежа (a_1, a_2, \dots, a_n) отношению H .

Таким образом, проверка осуществляется за n шагов. Для доказательства теоремы достаточно пометить вершины n -го этажа на принадлежность отношениям H_1, H_2, \dots, H_k . Тогда в результате интерпретации кортежа (a_1, a_2, \dots, a_n) за n шагов на дереве $Tree$ получим вершину n -го этажа пометки которой покажут принадлежность (или не принадлежность) отношениям H_1, H_2, \dots, H_k .

Оценка $O(n + k)$, а не $O(n)$, получается из-за необходимости пройти по списку отметок n -го этажа, что и дает добавку $O(k)$.

Замечание 2.11. Результат теоремы 2.5.1 типичный, так называемый обмен памяти на эффективность [21]. Конечно, задание декартово произведения деревом увеличивает необходимый объем памяти, но скорость выполнения операций предельно ускоряется. Следует отметить также, что на практике универсум (схема 1) не строится, а строится только его часть, состоящая из кортежей отношений H_1, H_2, \dots, H_k . Вообще говоря, это замедляет скорость интерпретации, но незначительно не более, чем на $\ln(m)$, где $m = \max\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ (это связано с необходимостью перебора "частичного" дерева, что, в силу упорядоченности, можно реализовать с помощью бинарного поиска).

Прежде, чем перейти к изложению основного результата, определим универсум для изображений, имеющих не более n дуг, и k вариантов дуг и связей дуг, т. е. множество V имеет k элементов, а минимальный сектор дуги или угол пересечения дуг равен $(360/k)$ градусов.

Пусть $Arc_1, Arc_2, \dots, Arc_n$ – множества дуг всех характеристик (образцов), т. е.

$$\begin{aligned} Arc_1 &= \{ar_{1,1}, ar_{1,2}, \dots, ar_{1,m_1}\}; \\ Arc_2 &= \{ar_{2,1}, ar_{2,2}, \dots, ar_{2,m_2}\}; \\ &\dots \\ Arc_n &= \{ar_{n,1}, ar_{n,2}, \dots, ar_{n,m_n}\}; \end{aligned} \tag{2.8}$$

Далее пусть $Rel_1, Rel_2, \dots, Rel_{n-1}$ – множества связей дуг всех характеристик, т. е.

$$\begin{aligned}
 Rel_1 &= \{re_{1,1}, re_{1,2}, \dots, re_{1,k_1}\}; \\
 Rel_2 &= \{re_{2,1}, re_{2,2}, \dots, re_{2,k_2}\}; \\
 &\dots \\
 Rel_{n-1} &= \{re_{n-1,1}, re_{n-1,2}, \dots, re_{n-1,k_{n-1}}\};
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

$$Angle(re_{i,j}) = (j, j)$$

Дерево *TreeImage* (универсум (схема 2, Рисунок 2.7) для всех изображений, имеющих не более n дуг, и k вариантов дуг и связей дуг) строится по аналогии с деревом *Tree* для декартова произведения

$$Arc_1 \times Rel_1 \times Arc_2 \times Rel_2 \times \dots \times Rel_{n-1} \times Arc_n$$

Соглашения по представлению элементов схемы 2 следующие:

1. для элемента $\alpha_{\mu,\chi}^{\theta}$ – число θ является позицией на этаже схемы (номер клетки в строке); $\alpha_{\mu,\chi}^{\theta}$ является χ -ым элементом из множества Arc_{μ} или Rel_{μ} ;
2. числа m_i , где i – номер этажа, равны $k^i - k$; число $t = k^{2n-1} - k$, отметим, что данные числа имеют чисто технический характер и уменьшают громоздкость выражений, стоящих в конце строк схемы 2.

Очевидно, что схема 2 содержит все изображения, имеющие не более n дуг, и k вариантов дуг и связей дуг. Структуру дерева на схеме 2 будем задавать отношениями $Par_{arc}(x, y)$, $Brot_{arc}(x, y)$ для дуг, и $Par_{rel}(x, y)$ для связей дуг.

Отношение $Par_{arc}(x, y)$ задает отношение «родитель-потомок» на декартовом произведении $Arc \times Rel$, например, $Par_{arc}(ar_{i,j}^2, re_{i,w}^{k(j-1)+w})$, где $1 \leq w \leq k$. От-

| # | Значения вершин дерева | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----|---------------------------------|-----|--|--|-----|--|--|--|--|
| 0 | Корень дерева | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | ar _{1,1} ¹ | | | | ar _{1,2} ² | | | | ... | | | | ar _{1,m₁} ^{m₁+k-1} | | | |
| 2 | re _{1,1} ¹ | re _{1,2} ² | ... | re _{1,k} ^k | re _{1,1} ^{k+1} | re _{1,2} ^{k+2} | ... | re _{1,k} ^{2k} | ... | re _{1,1} ^{m₂} | re _{2,2} ^{m₂+1} | ... | a _{2,k} ^{m₂+k-1} | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2n - 1 | ar _{n,1} ¹ | ar _{n,2} ² | ... | ar _{n,k} ^k | ar _{n,1} ^{k+1} | ar _{n,2} ^{k+2} | ... | ar _{n,k} ^{2k} | ... | ar _{n,1} ^t | ar _{n,2} ^{t+1} | ... | ar _{n,k} ^{t+k-1} | | | |

Рисунок 2.7 – Схема 2. Дерево TreeImage

ношение $Par_{arc}(x, y)$ связывает элементы, расположенные на соседних этажах, и может быть определено строго математически, а именно, $Par_{arc}(\alpha_{\mu,\chi}^\theta, \beta_{\zeta,\eta}^\gamma)$ тогда и только тогда, когда

1. $\mu = \zeta$ или $\mu + 1 = \zeta$
2. $(\theta - 1)k \leq \zeta \leq (\theta - 1)k + k - 1$

Отношение $Brot_{arc}(x, y)$ задает отношение «быть братом» на декартовом произведении $Arc \times Arc$. Отношение $Brot_{arc}(x, y)$ связывает элементы, расположенные на одном этаже и связанные с одним элементом верхнего этажа отношением «родитель-потомок», и может быть определено строго математически, а именно, $Brot_{arc}(\alpha_{\mu,\chi}^\theta, \beta_{\zeta,\eta}^\gamma)$ тогда и только тогда, когда

1. $\alpha = \beta$;
2. $\mu = \zeta$;
3. $\theta < \zeta$ и $\theta - \zeta < k$, а также $[\theta/k] > 0$, где операция $[\cdot]$ остаток от деления.

Отношение Par_{rel} задается по аналогии, на декартовом произведении $Rel \times Arc$.

Интерпретация ξ произвольного связного изображения 2.3 (в дальнейшем термин «изображение» будет означать только «изображение, имеющие не более n дуг, и k вариантов дуг и связей дуг», если, конечно, не оговорено противное), где

$$Arc = \{ar_1, ar_2, \dots, ar_w\}, w \leq n, Rel = \{re_1, re_2, \dots, re_t\} \quad (2.10)$$

на дереве $TreeImage$ производиться по следующей схеме

Основание индукции. Пусть $i = 1$ и $Sector(ar_1) = (j, j)$ и

$$Rrel_1 = \{re_i \mid R(re_i, Ar_1, Ar_2), Ar_1 = ar_1 \vee Ar_2 = ar_1\}$$

$$Arr_1 = \{aar_i \mid R(re_i, Ar_1, Ar_2), re_i \in Rrel_1,$$

$$(Ar_1 = ar_1 \wedge Ar_2 = aar_i) \vee (Ar_2 = ar_1 \wedge Ar_1 = aar_i)\}.$$

Тогда полагаем $\xi(ar_1) = ar_{1,j}^j$, $\xi(re_i) = re_{1,v}^{(j-1)*k+v}$, где $re_i \in Rrel_1$, $Angle(re_i) = Angle(re_{1,v}) = v$. Если $aar_i \in Arr_1$, то

$$\xi(aar_i) = ar_{2,e}^{(d-1)*k+e},$$

где d – позиция элемента $\xi(re_i)$ (т. е. $d = (j-1)*k + v$, $Sector(aar_i) = (e, e)$).

Отметим, что $Par_{arc}(\xi(ar_1), \xi(re_i))$, $Par_{rel}(\xi(re_i), \xi(aar_i))$, а также для любых aar_i и aar_j из Arr_1 выполняется $Brot_{arc}(\xi(aar_i), \xi(aar_j))$.

Интерпретация ξ продолжается для множества дуг

$$Arc_1 = Arc \setminus (\{ar_1\} \cup Arr_1),$$

множества связей дуг

$$Rel_1 = Rel \setminus Rrel_1.$$

Замечание 2.12. Важнейшим моментом построения отношений $Par_{arc}(x, y)$, $Brot_{arc}(x, y)$ и $Par_{rel}(x, y)$ на схеме 2 является их конструктивизм (эффективная вычислимость за один шаг) и это свойство сохраняется при построении интерпретации ξ , как для основания индукции (так и для индукционного шага, что будет показано ниже).

Индукционный шаг. Пусть после i -го шага получены непустые множества дуг $Arr_i = \{ar_{i_1}, ar_{i_2}, \dots, ar_{i_w}\}$, $Arc_i = Arc_{i-1} \setminus Arr_i$, множества связей дуг $Rrel_i$, $Rel_i = Rel_{i-1} \setminus Rrel_i$, причем по аналогии с основанием индукции, дуги из множества $\xi(Arr_i)$ располагаются на $2*i+1$ этаже схемы 2, связи дуг из множества $\xi(Rrel_i)$ располагаются на $2*i$ этаже схемы 2.

По алгоритму основания индукции будем проводить построения для каждой дуги $ar_\alpha \in Arr_i$ такой, что ar_α не принадлежит объединению $\{ar_1\} \cup Arr_1 \cup \dots \cup Arr_{i-1}$. Пусть $Sector(ar_\alpha) = (j, j)$ и

$$Rrel_{i+1,\alpha} = \{re_s \mid R(re_s, Ar_1, Ar_2), re_s \in Rel_i, Ar_1 = ar_\alpha \vee Ar_2 = ar_\alpha\}$$

$$Arr_{i+1,\alpha} = \{aar_u \mid R(re_s, Ar_1, Ar_2),$$

$$(Ar_1 = ar_\alpha \wedge Ar_2 = aar_u) \vee (Ar_2 = ar_\alpha \wedge Ar_1 = aar_u)\}$$

Пусть $\xi(ar_\alpha) = ar_{i+1,j}^\beta$. Тогда $\xi(re_s) = re_{i+1,v}^{(\beta-1)*k+v}$, где $re_s \in Rrel_{i+1\alpha}$,

$$Angle(res) = Angle(re_{i+1,v}^{(\beta-1)*k+v}) = v.$$

Если $aar_u \in Arr_{i+1,\alpha}$, то $\xi(aar_u) = ar_{2,e}^{(d-1)*k+e}$, где d – позиция элемента $\xi(re_s)$ (т. е. $d = (\beta - 1)*k + v$), $Sector(aar_u) = (e, e)$

Отметим, что $Par_{arc}(\xi(ar_\alpha), \xi(re_s))$, $Par_{rel}(\xi(re_s), \xi(aar_u))$, а также для любых aar_i и aar_j из $Arr_{i+1\alpha}$ выполняется $Brot_{arc}(\xi(aar_i), \xi(aar_j))$.

Полагаем множество дуг Arr_{i+1} равным объединению всех $Arr_{i+1\alpha}$, где ar_α произвольная дуга из множества Arr_i такая, что ar_α не принадлежит объединению $\{ar_1\} \cup Arr_1 \cup \dots \cup Arr_{i-1}$, также множество связей дуг $Rrel_{i+1}$ полагаем равным объединению всех $Rrel_{i+1\alpha}$, соответствующие произвольным дугам ar_α из множества Arr_i (смотри, выше).

Интерпретация ξ продолжается для множества дуг

$$Arc_{i+1} = Arc_i \setminus Arr_i,$$

и для множества связей дуг

$$Rel_{i+1} = Rel_i \setminus Rrel_{i+1}.$$

Так как по условию интерпретируемое изображение 2.10 является связным, то процесс интерпретации ξ будет закончен не более, чем за w шагов индукции, где w – количество дуг.

Отметим, что соответствие при построении интерпретации ξ для любой дуги или связи дуг изображения 2.10 производится за один шаг, так как «связывание», соответствующего элемента схемы 2, производится вычислением одной арифметической формулы. Таким образом, доказана

Лемма 2.5.1. *Верхняя граница сложности построения интерпретации ξ для связного изображения 2.3 не превышает $O(w+t)$, где w — количество дуг, t — связей дуг.*

Теорема 2.5.2. *Пусть каждая из многоосновных а.с. R_1, R_2, \dots, R_m 2.5 имеет не более n дуг и представляет связное изображение. Тогда анализ связного изображения 2.3 имеет верхнюю границу сложности не превышающую $O((w+t)*w) + m$, где w — количество дуг (t — количество связей дуг) изображения 2.3, причем множества дуг и связей дуг представлены выражениями 2.10.*

Доказательство. Построим интерпретации всех многоосновных а.с. R_1, R_2, \dots, R_m на универсуме схема 2 для всех изображений, имеющих не более n дуг, и k вариантов дуг и связей дуг (сложность этой процедуры, конечно, не входит в оценку доказываемой теоремы).

Далее, пометим все вершины схемы 2 номерами многоосновных а.с., чьи элементы соответствуют этим вершинам. Каждой многоосновной а.с. R_i сопоставим пару чисел (a_i, b_i) , где a_i — количество помеченных вершин 2, соответствующих дугам, b_i — количество помеченных вершин схемы 2, соответствующих связям дуг (конечно, помеченных номером i).

Построим совокупность интерпретаций $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_w$ на схеме 2 (с помеченными вершинами), которые отличаются выбором первой дуги для основания индукции. А именно, интерпретация ξ_1 начинается традиционно с дуги ar_1 , интерпретация ξ_2 начинается с дуги ar_2 , и так далее. Последняя интерпретация ξ_w начинается, соответственно, с дуги ar_w .

Введем для каждой интерпретации ξ_i множество пар

$$(a_{i_1}, b_{i_1}), (a_{i_2}, b_{i_2}), \dots, (a_{i_m}, b_{i_m}) \tag{2.11}$$

где $a_{i_j}(b_{i_j})$ — количество помеченных j вершин схемы 2, соответствующих дугам (соответственно, связям дуг), полученных для интерпретации ξ_i . Если пара (a_{i_j}, b_{i_j}) равна паре (a_j, b_j) , то, таким образом, найдено изоморфное вложение j -го изображения (образца) в анализируемое изображение .

В силу леммы 2.5.1, построение каждого отображения ξ_i требует не более $w+t$ шагов и, таким образом, верхняя граница сложности поиска всех изоморфных вложений не более $O(((w+t)*w) + m)$, где «добавка» $O(m)$ возникает из-за необходимости сравнивать пары 2.11 с парами (a_j, b_j) . \square

Замечание 2.13. *Как и в случае для базовой постановки задачи, на практике универсум (схема 2) не строится а строится только его часть, состоящая из дуг и связей дуг многоосновных а.с. R_1, R_2, \dots, R_m 2.5.*

2.5.1 Анализа изображений с метрикой

Изображения с метрикой расширяют базовую постановку задачи и предполагает введение дополнительной характеристики дуги: относительный размер. Сама характеристика задается на некотором множестве M .

Как и множество V , множество M счетно и конечно, и ограничено сверху и снизу. Однако выбор верхней границы для M не столь очевиден, так как, не исключена возможность того что разница в размерах между двумя дугами может быть весьма существенна (например в несколько миллионов раз). Однако, практика показывает, что в рамках нашей области применения (распознавание символов), когда в качестве эталона выступает человеческий глаз, разница что в 1000, что в 1000000 раз почти неразличима, и поэтому ей вполне можно пренебречь, выбрав в качестве максимального значения например 100000 процентов, а в качестве шага одну десятую процента. Таким образом всякая дуга может быть как больше так и меньше любой дуги не более чем в 1000 раз.

Преобразование растрового изображения

Согласно [1] переход от растрового изображения к модели 2.1, осуществляется в два этапа:

1. При помощи волновой скелетизации по бинарной матрице строится граф, который «интуитивно адекватно» соответствует символу на изображении.
2. Граф особым образом разбивается на множество простых путей

$$W = \{(v_1^i, v_2^i, \dots, v_{n_i}^i)\}$$

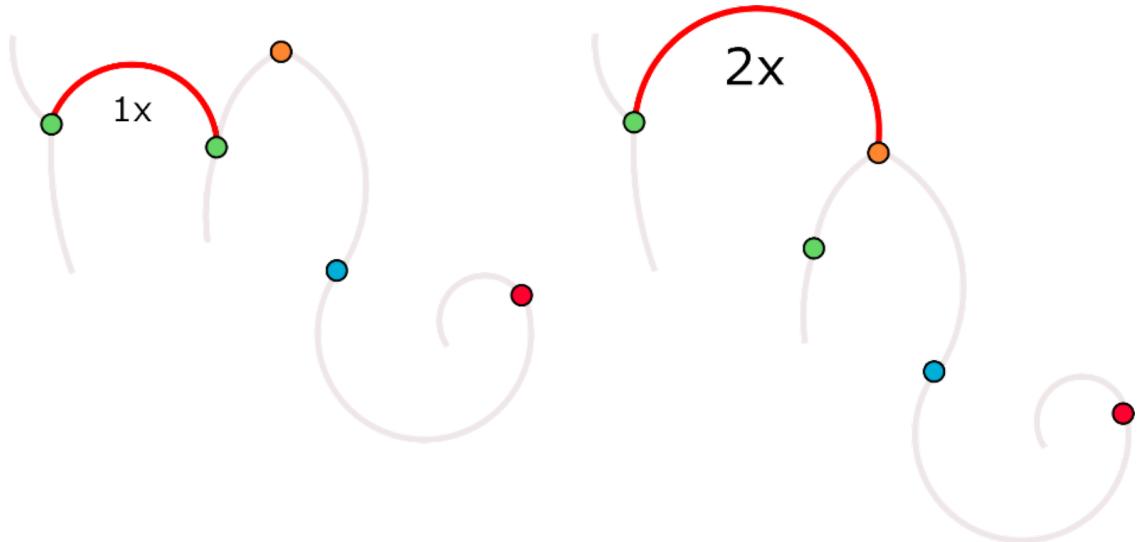


Рисунок 2.8 – Геометрическая интерпретация изображений с метрикой
На изображении видно как меняется геометрическое представление изображения, если меняется относительная длина дуги (красная дуга)

$$v_j^i = (x_j^i, y_j^i) — \text{точка в пространстве.}$$

3. по множество W строится множество A_1 — дуг и R_1 — связей дуг, однозначно определяющее данное изображение.

Определим функцию $L(w_i)$ которая вычисляет длину пути w_i .

$$L(w_i) = \sum_{j=1}^{n_i-1} |v_{j+1} - v_j|$$

Теперь зная длину дуги мы без труда можем вычислить относительный размер каждой дуги. В качестве ключевой дуги можно взять например 1-ую дугу. Сопоставим каждому простому w_i пути дугу a_i . Тогда функция *Metric* будет иметь следующий вид:

$$\text{Metric}(a_i) = C \cdot \frac{L(w_i)}{L(w_1)}$$

где C — некоторая константа, как отмечалось выше C может например равняться 1000

Замечание 2.14. На практике полезнее в качестве ключевой дуги использовать какую-нибудь дугу обладающую уникальным свойством (например в качестве свойства взять кол-во дуг с которыми она имеет соединения). Это позволяет избежать лишних пересчетов относительных длин.

Интерпретация изображения с метрикой

Пусть многоосновные а.с.

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{R}_1 &= < A_1, R_1, V, M; Sector, Angle, Metric, Relation > \\
 \mathfrak{R}_2 &= < A_2, R_2, V, M; Sector, Angle, Metric, Relation > \\
 &\quad \dots \\
 \mathfrak{R}_m &= < A_m, R_m, V, M; Sector, Angle, Metric, Relation >
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

задают искомые образцы в анализируемом изображении 2.1.

Анализ изображения 2.1 состоит в поиске всех изоморфных вложений $\mu_{i,j}$ многоосновных а.с. $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_m$ в многоосновную а.с. \mathfrak{M} 2.1, т. е. изоморфное вложение $\mu_{i,j} : \mathfrak{R}_i \rightarrow \mathfrak{M}$ состоит из инъективных отображений

$$\mu_{i,j} : A_i \rightarrow A$$

$$\mu_{i,j} : R_i \rightarrow R$$

таких, что:

а) если $\mu_{i,j}(a') = a$, где $a' \in A_i, a \in A$ и

$$Sector(a') = [c'_{min}, c'_{max}],$$

$$Sector(a) = [c_{min}, c_{max}],$$

то $[c_{min}, c_{max}] \in [c'_{min}, c'_{max}]$;

б) если $\mu_{i,j}(a') = a$, где $a' \in A_i, a \in A$ и

$$Metric(a') = [c'_{min}, c'_{max}],$$

$$Metric(a) = [c_{min}, c_{max}],$$

то $[c_{min}, c_{max}] \in [c'_{min}, c'_{max}]$;

в) если $\mu_{i,j}(r') = r$, где $r' \in R_i$, $r \in R$ и

$$\text{Angle}(r') = [c'_{min}, c'_{max}],$$

$$\text{Angle}(r) = [c_{min}, c_{max}],$$

то $[c_{min}, c_{max}] \in [c'_{min}, c'_{max}]$;

г) если $\text{Relation}(r, a_1, a_2)$, где $r \in R_i$, $a_1, a_2 \in A_i$, то

$$\text{Relation}(\mu_{i,j}(r), \mu_{i,j}(a_1), \mu_{i,j}(a_2))$$

Определим универсум для изображений, имеющих не более n дуг, и не более k связей дуг (это ограничение ни сколько не повлияет на результат, но немножко упростит нам форму записи).

Пусть A_1, A_2, \dots, A_m – множества дуг всех характеристик (образцов), т. е.

$$\begin{aligned} A_1 &= \{a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{1,n}\}; \\ A_2 &= \{a_{2,1}, a_{2,2}, \dots, a_{2,n}\}; \\ &\dots \\ A_m &= \{a_{m,1}, a_{m,2}, \dots, a_{m,n}\}; \end{aligned} \tag{2.13}$$

Далее пусть R_1, R_2, \dots, R_{m-1} – множества связей дуг всех характеристик, т. е.

$$\begin{aligned} R_1 &= \{r_{1,1}, r_{1,2}, \dots, r_{1,k}\}; \\ R_2 &= \{r_{2,1}, r_{2,2}, \dots, r_{2,k}\}; \\ &\dots \\ R_{n-1} &= \{r_{n-1,1}, r_{n-1,2}, \dots, r_{n-1,k}\}; \end{aligned} \tag{2.14}$$

Теперь же каждая дуга определяется двумя параметрами, следовательно появляется новый промежуточный слой. С точки зрения модели этот слой не добавляет ни каких новых элементов в объект изображения, поэтому мы оформим его в виде набора поддеревьев, у которых каждый узел 2-го уровня (т. е. $m_1, m_2, \dots, m_{|M|}$) порождает дополнительный набор элементов связей дуг. Таким

образом наше дерево соответствует следующему декартову произведению:

$$G_1 \times M_1 \times V_1 \times G_2 \times M_2 \times \dots \times V_{n-1} \times G_1 \times M_1 \quad (2.15)$$

где

$$\begin{aligned} G_i &= \{Angle(a_{i,1}), Angle(a_{i,2}), \dots, Angle(a_{i,n})\} \\ M_i &= \{Metric(a_{i,1}), Metric(a_{i,2}), \dots, Metric(a_{i,n})\} \\ V_i &= \{Sector(r_{i,1}), Sector(r_{i,2}), \dots, Sector(r_{i,k})\} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Очевидно, что 2.15 содержит все изображения, имеющие не более n дуг, и k связей дуг. Каждый уровень дерева представляет собой набор узлов, значения которых принадлежат одному из множеств: V_{arc} , M либо V_{rel} , где $V_{arc} \subseteq V$ — множество допустимых значений секторов дуг, $V_{rel} \subseteq V$ — множество допустимых углов соединения связей дуг. У всякого дерева изображений значения узлов первого уровня принадлежат V_{arc} , значения узлов последнего уровня принадлежат M .

Однако работать с таким деревом достаточно сложно, намного удобнее редуцировать третий уровень и использовать «двух-слойную» (состоящую из двух основных множеств) модель дерева. Так как множества значения углов и относительных величин ограниченно, мы можем упорядочить множества дуг следующим образом.

Пусть $A = \{a_1, \dots, a_k, \dots, a_n\}$ — множество всевозможных дуг

$$Sector(a_k) = g_i, 0 < i < |V|, V = \{g_0, \dots, g_{|V|-1}\}$$

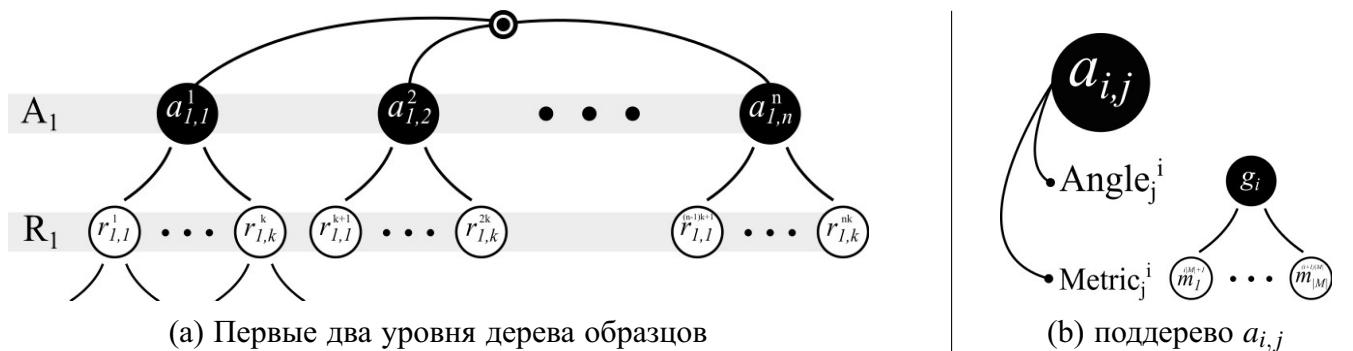


Рисунок 2.9 – Элементы дерева образцов

$$\text{Metric}(a_k) = m_j, 0 < j < |M|, M = \{m_0, \dots, m_{|M|-1}\}$$

тогда $k = i * |M| + j$.

Таким образом мы сможем оперировать двумя основными множествами: множеством дуг A и множеством связей R .

$$|A| = |V_{rel}| * |M|$$

$$|R| = |V_{arc}|$$

$$V_{rel}, V_{arc} \subseteq V$$

Для всякого i , уровни $3i+1, 3i+2, 3i+3$ имеют следующий вид соответственно:

$$\begin{aligned} & g_{i,1}^1 \dots g_{i,n}^n, g_{i,1}^{n+1} \dots g_{i,n}^{2n}, \dots g_{i,1}^{n^{3i+1}-n} \dots g_{i,n}^{n^{3i+1}} \\ & m_{i,1}^1 \dots m_{i,n}^n, m_{i,1}^{n+1} \dots m_{i,n}^{2n}, \dots m_{i,1}^{n^{3i+2}-n} \dots m_{i,n}^{n^{3i+2}} \\ & v_{i,1}^1 \dots v_{i,n}^n, v_{i,1}^{n+1} \dots v_{i,n}^{2n}, \dots v_{i,1}^{n^{3i+3}-n} \dots v_{i,n}^{n^{3i+3}} \end{aligned}$$

Пусть дерево изображений имеет следующий вид:

| # | Значения вершин дерева | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----|---------------------------------|-----|--|--|-----|--|
| 0 | Корень дерева | | | | | | | | | | | | |
| 1 | ar _{1,1} ¹ | | | | ar _{1,2} ² | | | | ... | | | | ar _{1,m₁} ^{m₁+k-1} |
| 2 | re _{1,1} ¹ | re _{1,2} ² | ... | re _{1,k} ^k | re _{1,1} ^{k+1} | re _{1,2} ^{k+2} | ... | re _{1,k} ^{2k} | ... | re _{1,1} ^{m₂} | re _{2,2} ^{m₂+1} | ... | a _{2,k} ^{m₂+k-1} |
| ... | | | | | | | | | | | | | |
| 2n - 1 | ar _{n,1} ¹ | ar _{n,2} ² | ... | ar _{n,k} ^k | ar _{n,1} ^{k+1} | ar _{n,2} ^{k+2} | ... | a _{n,k} ^{2k} | ... | ar _{n,1} ^t | a _{n,2} ^{t+1} | ... | a _{n,k} ^{t+k-1} |

Рисунок 2.10 – Дерево изображений

тогда верна следующая теорема:

Теорема 2.5.3. Пусть каждая из многоосновных а.с. $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_m$ имеет не более n дуг и представляет связное изображение. Тогда анализ связного изображения 2.1 имеет верхнюю границу сложности не превышающую $O((w+t)*w+m)$, где w – количество дуг (t – количество связей дуг) изображения 2.1.

Выводы

1. Мы показали, что добавление новой характеристики ни как не влияет на скорость распознавания. Связано это с тем, что в качестве «ключевого» отношения выступает отношение $Relation(r, a_1, a_2)$, которое обеспечивает связь двух дуг. Это отношение построено на декартовом произведении $R \times A \times A$. Новая характеристики ни как не влияет на вычислимость отношения, и лишь увеличивает количество возможных комбинаций параметров дуг.

2. Этот результат позволяет утверждать, что добавление любого конечного количества дополнительных характеристик как к дугам так и к связям дуг никак не повлияет на сложность алгоритма распознавания, хотя и существенно увеличит объем используемой памяти для хранения объектов предобработки, что, в принципе, весьма закономерно.

3. Стоит отметить, что в данном параграфе не был рассмотрен случай, когда относительная мера дуги равна нулю. Очевидно, что такая ситуация означала бы отсутствие дуги как таковой, в анализируемом изображении. На практике получить такое изображение невозможно. Однако, стоит отметить, что если хранить в дереве образцов значения относительных мер дуг в виде промежутков (так же как это сейчас делается для значений секторов и углов связей), можно реализовать уровни детализации образца в дереве. При таком представлении мы сможем уменьшать кол-во деталей в образце, отбрасывая дуги, чья относительная мера меньше некоторого порогового значения. Один из возможных вариантов реализации такой процедуры (процедуры откidyvания дуги, не нарушая целостности образца) — это использование в качестве меры нулевого значения. Более подробно этот момент будет изложен в следующем разделе.

2.5.2 Масштабные ряды и их применение

Расширим базовую формализацию, добавив в качестве основного вполне упорядоченное множество $ScaleLine$, 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

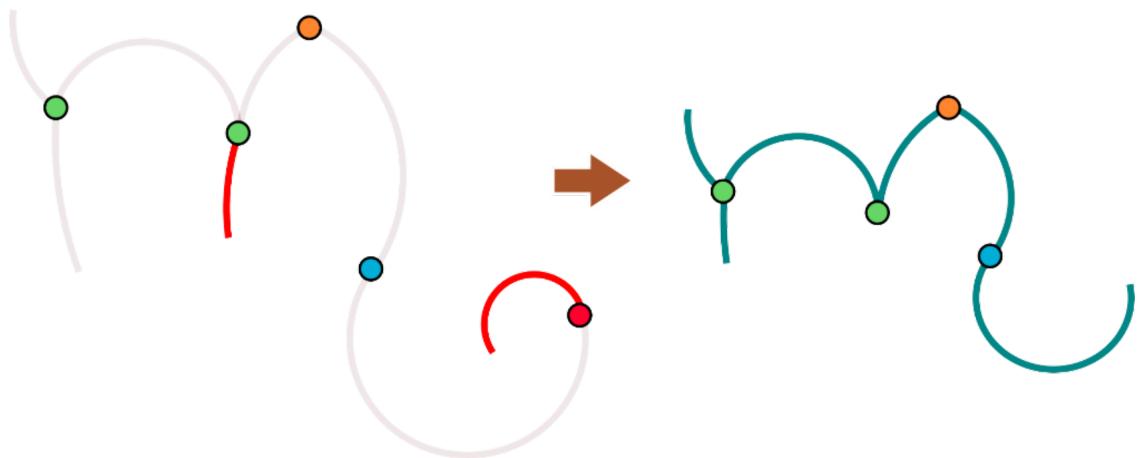


Рисунок 2.11 – Геометрическая интерпретация отмасштабированного изображения

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

изображения, т. е. при переходе к следующему (большему на единицу) элементу масштабного ряда.

При практической реализации удобно считать вполне упорядоченное множество *ScaleLine* отрезком натуральных чисел $[1, \dots, n]$ (это представление будет использоваться в статье для упрощения обозначений). В частности, поэтому будем использовать ниже конструкции вида: $s1 = s2 - 1$ и $s2 = s1 + 1$, где $s1, s2$ принадлежат множеству *ScaleLine*.

Предполагаем, что анализируемое изображение и образцы имеют представления для всех элементов масштабного ряда *ScaleLine*. Таким образом, совокупность всех дуг A четырехосновной а.с.2.1 может быть представлено в виде

$$A = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n \quad (2.17)$$

где множества A_i состоят из дуг, относящихся к i -му элементу масштабного ряда.

Определение 2.5.1. В дальнейшем множества дуг A_i будем называть i -ой компонентой изображения.

Замечание 2.15. Для общего подхода, охватывающего все варианты сжатия изображения, включая рассмотрение под углом (что, конечно, не соответствует генерализации для топографических карт, где используется орто-

гональная проекция, но весьма важно для практики, достаточно вспомнить о зрении живых организмов, где обрабатываются зрительные образы правого и левого глаза), представление масштабного ряда *ScaleLine* отрезком натуральных чисел $[1, \dots, n]$ или даже частично упорядоченными множествами недостаточно. В дальнейшем для формализации масштабных рядов будут использоваться многоосновные а.с., включающие частично упорядоченные множества и дополнительные множества с определенными на них отношениями.

Первое отношение

$$\text{Scale} : \varsigma \in A \times \text{ScaleLine}$$

определяет принадлежность дуги отрезку масштабного ряда *ScaleLine*, т. е.

$$(\text{Scale}(a, s_1) \wedge \text{Scale}(a, s_2) \wedge s_1 \leq s \leq s_2) \rightarrow \text{Scale}(a, s)$$

Как отмечалось выше, отношение *Scale* обладает следующим основным свойством. Пусть

$$A_i = \{arc_1, arc_2, \dots, arc_r\}$$

совокупность всех дуг i -го множества из объединения 2.17. Тогда всегда $\text{Scale}(arc_k, i)$ для всех k .

Другим основным свойством отношения *Relation* является следующее: *Relation* может связывать только дуги, принадлежащие одному элементу масштабного ряда, т. е., если $\text{Relation}(rel, a_1, a_2)$, то существует элемент s из *ScaleLine* такой, что $\text{Scale}(a_1, s)$, $\text{Scale}(a_2, s)$.

Второе отношение

$$\text{Include} : \varsigma \in A \times A$$

определяет вложение дуги a_1 в дугу a_2 большего элемента масштабного ряда, т. е., если $\text{Include}(a_1, a_2)$, то существует s из *ScaleLine* такой, что $\text{Scale}(a_2, s)$, $\text{Scale}(a_1, s)$ и $\text{Scale}(a_1, s - 1)$.

Определим основные свойства отношения вложения *Include*, которые математически формулируются следующим образом:

1. $(Include(a_1, a_2) \wedge Include(a_1, a_3)) \rightarrow a_2 = a_3;$
2. $(s_1 = s_2 - 1 \wedge Scale(a_1, s_1)) \rightarrow \exists a_2 : Scale(a_2, s_2) \wedge Include(a_1, a_2);$
3. $(s_1 = s_2 - 1 \wedge Scale(a_1, s_2)) \rightarrow \exists a_2 : Scale(a_2, s_1) \wedge Include(a_2, a_1);$

Переформулируем основные свойства отношения вложения *Include* более понятным образом, через отображения F_i определяемые отношением вложения *Include* из множеств A_i в множества A_{i+1} . Определим последовательность функций сжатия $F_i : A_i \rightarrow A_{i+1}$ следующим образом:

$$F_i(arc1) = arc2 \leftrightarrow Include(arc_1, arc_2) \quad (2.18)$$

где дуга arc_1 из множества A_i , а дуга arc_2 из множества A_{i+1} .

Лемма 2.5.2. *Функция сжатия F_i , заданная формулой 2.18, всюду определена, однозначна (т. е. отображение) и является эпиморфизмом. Доказательство следует из определения отношения *Include*, и свойств 1,2,3 отношения *Include*.*

Замечание 2.16. В силу леммы 2.5.2 в дальнейшем во многих случаях вместо отношения *Include* будем использовать совокупность отображений F_i , которые будем называть сжатиями при переходе от i -го к $i+1$ -ому элементу масштабного ряда, где $i \geq 1$ и $i < n$.

Следующее основное свойство определяет сохранение отношения связности *Relation* дуг при сжатии,

$$\begin{aligned} (F_i(arc_1) = arc_3 \wedge F_i(arc_2) = arc_4 \wedge arc_3 \neq arc_4 \wedge Relation(rel, arc_1, arc_2)) \\ \rightarrow Relation(rel, arc_3, arc_4) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Определение 2.5.2. Подмножество дуг $B = \{b_1, b_2, \dots, b_s\}$ и компоненты A_i 2.17 назовем связным, если для любых двух дуг b_i, b_j , существует последовательность дуг c_1, c_2, \dots, c_u из B такая, что каждая пара дуг c_v, c_{v+1} являются связанными, $c_1 = b_i$, $c_u = b_j$.

Прежде всего, необходимо доказать, что прообраз и образ связного множества остается связным, что и показывает следующая

Лемма 2.5.3. *Пусть подмножество дуг $B = \{b_1, b_2, \dots, b_s\}$ i -компоненты A_i 2.17 является связным, причем $i > 1$. Далее, пусть B_1 (B_2) подмножества дуг $i - 1$ компоненты A_{i-1} (соответственно, $i + 1$ компоненты A_{i+1}), которые будем называть прообразом (соответственно, образом) подмножества дуг B относительно функций сжатия 2.18, которые строго определим следующим образом:*

$$B_1 = \{b \mid b \in A_{i-1}, F_{i-1}(b) \in B\}$$

$$(соответственно, B_2 = \{b \mid b \in A_{i+1}, b = F_i(b_j) b_j \in B\})$$

Тогда подмножество дуг B_1 (соответственно, B_2) является связным.

Доказательство. Пусть d_1, d_2 произвольные дуги из B_1 (соответственно, B_2). Тогда по определению B_1 (соответственно, B_2) в подмножестве дуг B существуют дуги b_l, b_k такие, что $F_{i-1}(d_1) = b_l, F_{i-1}(d_2) = b_k$ (соответственно, $F_i(b_l) = d_1, F_i(b_k) = d_2$).

Так как подмножество дуг B является связным, то существует последовательность дуг c_1, c_2, \dots, c_u из B такая, что каждая пара дуг c_v, c_{v+1} являются связанными, $c_1 = b_l, c_u = b_k$.

Определим последовательность дуг e_1, e_2, \dots, e_u из B_1 (соответственно, B_2) следующим образом:

1. $e_1 = d_l, e_u = d_2$, отметим, что $F_{i-1}(e_1) = c_1, F_{i-1}(e_u) = c_u$ (соответственно, $F_i(c_1) = e_1, F_i(b_k) = d_2$)
2. $F_{i-1}(e_j) = c_j$ (соответственно, $F_i(c_j) = e_j$) для всех j из отрезка $[2, u - 1]$.

Тогда последовательность дуг e_1, e_2, \dots, e_u из B_1 (соответственно, B_2) такая, что каждая пара дуг e_v, e_{v+1} являются связанными по основному свойству отношения $Relation(rel, arc_1, arc_2)$, и $e_1 = d_l, e_u = d_2$, что показывает связность подмножеств дуг B_1 (соответственно, B_2). \square

Важным является следующее

Следствие. Прообраз подмножества, состоящего из одной дуги, относительно функций сжатия F_i 2.18, является связным.

Теперь можем приступить к доказательству основной цели: того, что, если сжатый образец изоморфно вложен в сжатое изображение (предполагается, что образцы и изображения используют один и тот же масштабный ряд), то исходный образец может быть изоморфно вложен в исходное изображение, тогда и только тогда, когда прообраз каждой дуги образца может быть изоморфно вложен в прообраз соответствующей дуги изображения.

Во избежание громоздкого «всегообщего случая» будем рассматривать изоморфное вложение одного образца, представленного многоосновной а.с.

$$S = \langle A_s, R_s, V_s, M_s; Sector, Angle, Relation \rangle, \quad (2.20)$$

в изображение, представленное многоосновной а.с.

$$W = \langle A_w, R_w, V_w, M_w; Sector, Angle, Relation \rangle \quad (2.21)$$

$$A_s = A_{s_1} \cup A_{s_2} \cup \dots \cup A_{s_n} (A_w = A_{w_1} \cup A_{w_2} \cup \dots \cup A_{w_n}) \quad (2.22)$$

где множества A_{s_j} (соответственно, A_{w_j}) состоят из дуг, относящихся к j -му элементу масштабного ряда 2.1. Будем считать, что последовательность функций вложения

$$F_i : A_i \rightarrow A_{i+1} \quad (2.23)$$

определенна на множествах дуг A_s и A_w . Тогда совокупность дуг A_{s_2} (соответственно, A_{w_2}) является сжатием совокупности дуг A_{s_1} (соответственно, A_{w_1}) и $F_1(A_{s_1}) = A_{s_2}$ (соответственно, $F_1(A_{w_1}) = A_{w_2}$).

Определение 2.5.3. Пусть $\zeta : A_{s_2} \rightarrow A_{w_2}$ произвольное отображение. Отображение $\xi : A_{s_1} \rightarrow A_{w_1}$ назовем экстраполяцией отображения ζ , если для любой дуги arc из A_{s_1} выполняется: пусть $\xi(arc) = arc_1$, тогда $\zeta(F_1(arc)) = F_1(arc_1)$.

Теорема 2.5.4. Пусть $\zeta : A_{s_2} \rightarrow A_{w_2}$ изоморфное вложение сжатой совокупности дуг A_{s_2} из S 2.20 в сжатую совокупность дуг A_{w_2} из W 2.21. Тогда изоморфное вложение ζ может быть экстраполировано до изоморфного вло-

жения $\xi : A_{s_1} \rightarrow A_{w_1}$ тогда и только тогда, если для любой дуги arc из A_{s_2} прообраз (относительно функции сжатия F_1) дуги arc может быть изоморфно вложен в прообраз (относительно функции сжатия F_1) дуги $\zeta(arc)$.

Доказательство. Предположим, что прообраз каждой дуги $F_{i-1}(arc)$ образца A_{s_2} может быть изоморфно вложен в прообраз соответствующей дуги изображения $F_{1-1}(\zeta(arc))$ изображения A_{w_2} . Обозначим через ξ_{arc} такое изоморфное вложение, т. е. $\xi_{arc} : F_{1-1}(arc) \rightarrow F_{1-1}(\zeta(arc))$. Положим вложение $\xi = \xi_{arc_1} \cup \xi_{arc_2} \cup \dots \cup \xi_{arc_L}$, где $A_{s_2} = \{arc_1, arc_2, \dots, arc_L\}$. Тогда ξ является изоморфным вложением, причем экстраполированным с изоморфным вложением

$\zeta : A_{s_2} \rightarrow A_{w_2}$ (следует из того, что $\xi_{arc} : F_{1-1}(arc) \rightarrow F_{1-1}(\zeta(arc))$) и достаточность для теоремы доказана. Докажем необходимость. Пусть $\zeta : A_{s_1} \rightarrow A_{w_1}$ является изоморфным вложением из совокупности дуг образца A_{s_1} в совокупность дуг изображения A_{w_1} экстраполированным с изоморфным вложением $\zeta : A_{s_2} \rightarrow A_{w_2}$. Тогда ограничение вложения ζ на $F_{1-1}(arc)$ будет изоморфным вложением в $F_{1-1}(\zeta(arc))$ для всех дуг arc из совокупности A_{s_2} . \square

Замечание 2.17. Конечно, программная реализация масштабных рядов и обеспечение эффективной работы функций сжатия F_i 2.23 (а также обратных функций F_{i-1}) требует значительных усилий, которые должны быть «вознаграждены» повышением эффективности поиска изоморфных вложений образцов, что и будет показано во второй части данного параграфа.

В качестве исходных результатов будем использовать теорему 2.5.2.

Пусть многоосновные а.с.

$$S_h = \langle A_{s_h}, R_s, V_s, M_s; Sector, Angle, Relation \rangle \quad (2.24)$$

$$W_h = \langle A_{w_h}, R_w, V_w, M_w; Sector, Angle, Relation \rangle \quad (2.25)$$

получены из многоосновной а.с. S 2.20 (соответственно, W 2.21) уменьшением множества дуг до относящихся только к h -му элементу масштабного ряда 2.22, где h изменяется от 1 до n . Положим также, что количество дуг в множестве A_{w_h} равно d_h .

Для наших целей будет удобна теорема А в следующей формулировке.

Теорема 2.5.5. (*Теорема Б*) *Построение изоморфного вложения многоосновной а.с. S_h 2.24 в многоосновную а.с. W_h 2.25 имеет верхнюю границу сложности не превышающую $O((d_h + t) * d_h)$, где $d_h(t)$ – количество дуг (соответственно, связей дуг) многоосновной а.с. W_h 2.25.*

Замечание 2.18. *Возможность использования одной и той же совокупности связей R_s (R_w) для всей совокупности многоосновных а.с. S_h (соответственно, W_h) следует по основному свойству (*), которое сохраняет отношение связности Relation дуг при сжатии. Хотя, конечно, при сжатии некоторые связи дуг могут становиться ненужными и учет этого, улучшил бы оценку теоремы Б.*

Определение 2.5.4. *Коэффициентом сжатия i -го вложения $F_i : A_i \rightarrow A_{i+1}$ (12) будем называть отношение количества дуг множеств A_i и A_{i+1} и будет обозначаться в дальнейшем E_i .*

Теорема 2.5.6. *Пусть $\zeta : A_{s_2} \rightarrow A_{w_2}$ изоморфное вложение сжатой совокупности дуг A_{s_2} из S (2.20) в сжатую совокупность дуг A_{w_2} из W (2.21). Тогда построение изоморфного вложения $\xi : A_{s_1} \rightarrow A_{w_1}$, экстраполированного с ζ , имеет верхнюю границу сложности не превышающую $O((E_1 + t) * d_2)$, где $d_2(t)$ – количество дуг (соответственно, связей дуг) многоосновной а.с. W_2 (2.20).*

Доказательство. В силу Теоремы 2.5.4 необходимо проверить для любой дуги arc из A_{s_2} (дает коэффициент d_2) изоморфное вложение ее прообраза в прообразы дуги $\zeta(arc)$ (дает коэффициент $(E_1 + t)$). Умножив данные коэффициенты, получим оценку теоремы. \square

Замечание 2.19. *Оценка сложности вычислена с большим запасом, т.к., например, в качестве коэффициента d_2 можно было взять количество дуг именно A_{s_2} , а не количество дуг A_{w_2} .*

Замечание 2.20. *Совмещение деревьев интерпретаций многоосновных а.с. S_1 и S_2 существенно улучшило бы оценки последней теоремы, но имеет большие технические трудности и не может быть представлена в этой работе.*

Теорема 2.5.7. *Использование изоморфного вложения сжатого образца, представленного многоосновной а.с. S_2 , уменьшает сложность построения изоморфного вложения исходного образца, представленного многоосновной а.с. S_1 .*

Доказательство. Прямое применение оценок теоремы 2.5.5 дает верхнюю границу сложности изоморфного вложения исходного образца, представленного многоосновной а.с. S_1 не превышающую $O((d_1 + t) * d_1)$, где $d_1 = d_2 * E_1$, а верхняя граница сложности изоморфного вложения исходного образца, представленного многоосновной а.с. S_1 с использование изоморфного вложения сжатого образца, представленного многоосновной а.с. S_2 дает оценку $O((d_2 + t) * d_2) + O((E_1 + t) * d_2) = O((d_2 + E_1 + 2 * t) * d_2)$ заведомо меньшую, так как коэффициент сжатия на практике для более или менее сложных изображений всегда более 10. \square

Таким образом:

1. Программная реализация предложенного подхода будет иметь существенно большую эффективность, чем приведенные оценки Теоремы 2.5.7. Это связано с тем, что использование изоморфного вложения сжатых образцов предполагает:

- Совмещение деревьев интерпретаций для всего масштабного ряда образов, что существенно облегчает проверку изоморфной вложимости образов дуг относительно функций сжатия F_i .
- Исключение «лишних» дуг при сжатии, т. е. параметр t оценок эффективности для сжатых образов (а тем более для прообразов дуг) будет заведомо меньшим.

2. Полученные результаты могут иметь практическое значение для автоматизации обработки видеорядов диагностических дорожных лабораторий. Автоматизации обработки видеорядов диагностических дорожных лабораторий имеет большое практическое значение, так как камеральная обработка видеорядов весьма дорогостоящая и длительная процедура, приводящая к многочисленным ошибкам (человеческий фактор).

2.5.3 Анализ изображений, представляющих объекты с наложениями

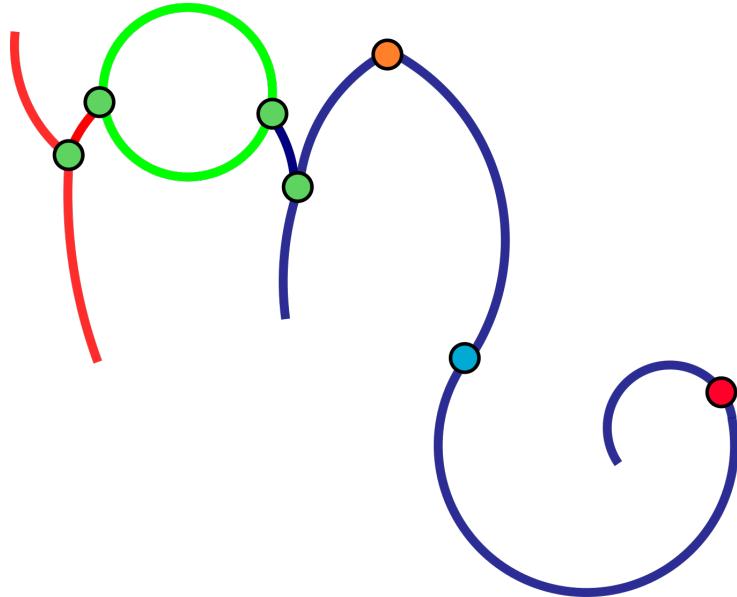


Рисунок 2.12 – Геометрическая интерпретация изображения с наложением

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

В данном параграфе рассмотрены вопросы анализа плоских контурных изображений, представляющих объекты с наложениями. т. е. предполагается 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.

Более точно, будут даны оценки сложности поиска изоморфного вложения в анализируемое изображение объектов (образцов) первого плана, далее, второго и т. д. Отметим, что оценки сложности вложения для объектов (образцов) первого плана получены в статье [14], но здесь вложения будут строиться по более сложной технической схеме, что дает, соответственно, большую алгоритмическую сложность.

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.

Конечно, образцы третьего плана уже используют понятие: лежать внутри совокупности образцов первого и второго плана и т. д.

Вопрос о сложности проверки «лежать внутри объединения образцов» может быть решен на основе геометрического представления универсума на декартовой плоскости в полярной системе координат, где сложность проверки лежать внутри области будет иметь точное математическое решение.

Геометрическое представление универсума на декартовой плоскости в полярной системе координат в данной работе не будет доведено здесь до строгих математических формализаций, так как это приведет к значительному увеличению статьи, а громоздкие формулы затруднят понимание основных идей и результатов. Поэтому геометрическая интерпретация дуг, связей дуг и универсума на декартовой плоскости в полярной системе координат будет дана ниже в замечаниях.

Результаты получены в предположении, что все объекты, отображенные на изображении, а также образцы, представлены в одинаковом масштабе. Кроме того, точка съемки объектов не дает искажений, связанных с объемом объектов (3d) и углом съемки, что с нашей точки зрения, не уменьшает значения результатов на данном этапе исследований.

Формализация

Математические модели образцов S_1, S_2, \dots, S_m и анализируемого изображения P будут представлены четырехосновными алгебраическими системами (а.с.) [13, 18] вида

$$P = \langle A, R, V, M; Sector, Angle, Metric, Relation \rangle \quad (2.26)$$

где основное множество A — совокупность дуг; основное множество R — совокупность связей дуг; основное множество V — совокупность допустимых углов или секторов окружности (например, от 0 до 360 градусов или долей градусов, представленная начальным отрезком натуральных чисел от 0 до D); M — множество относительных мер длины дуг, представленное начальным отрезком натуральных чисел от 1 до E , одноместная функция $Sector : A \rightarrow V$, которая опре-

деляет количество градусов (или долей градуса) дуги, как сектора окружности; одноместная функция $\text{Angle} : R \rightarrow V$, которая определяет количество градусов (или долей градуса в соответствии с заданием множества V) угла пересечения дуг; одноместная функция $\text{Metric} : A \rightarrow M$, сопоставляющая каждой дуге ее относительную величину; трехместное отношение Relation соединяет связь дуг rel с соответствующими дугами, т. е. Relation — подмножество декартова произведения $R \times A \times A$, причем, если $\text{Relation}(rel, a, b)$ и $\text{Relation}(rel, a_1, b_1)$, то $a = a_1$ и $b = b_1$.

Замечание 2.21. *Дуги на декартовой плоскости будут представляться секторами окружностей, определенных радиусов, которые здесь не будут точно определяться, причем связи дуг соответствуют наличию двух дуг, имеющих общую точку для своих концов.*

Пусть образцы представлены совокупностью а.с.

$$\begin{aligned} S_1 &= < A_1, R_1, V, M; \text{Sector}, \text{Angle}, \text{Metric}, \text{Relation} > \\ S_2 &= < A_2, R_2, V, M; \text{Sector}, \text{Angle}, \text{Metric}, \text{Relation} > \\ &\quad \dots \\ S_m &= < A_m, R_m, V, M; \text{Sector}, \text{Angle}, \text{Metric}, \text{Relation} > . \end{aligned} \tag{2.27}$$

Анализируемое изображение P представлено а.с. (2.26). В дальнейшем будем считать, что а.с. P, S_1, S_2, \dots, S_m представляют связные изображения. Следуя [2] построим универсум \mathfrak{Y} для изображений, имеющих не более n дуг и не более k связей дуг. Без ограничения общности можно считать, что n равно k , а также, что максимальное количество дуг и связей дуг в а.с. (2.26), (2.27) не превосходят n .

Определим универсум как а.с.

$$\mathfrak{Y} = < AA, RR, V, M; \text{Sector}, \text{Angle}, \text{Metric}, \text{Relation} > \tag{2.28}$$

где совокупность дуг $AA = \{ aa_{\alpha,k} \mid \text{индексы дуг } \alpha \in U = U0, U1, \dots, Un, \text{ целочисленный параметр } k \text{ принимает значения от } 0 \text{ до } n \text{ (причем, если } \alpha \in U_i, \text{ то } i \leq k\}$,

другие пояснения по использованию параметра k будут даны ниже), индуктивное определение множеств U_i будет дано ниже };

совокупность связей дуг $RR = \{ rr_{\alpha,\beta} \mid \alpha, \beta, U, \text{ ограничения на индексы дуг } \alpha, \beta \text{ будут даны ниже } \}$,

определения функций *Sector, Angle, Metric*, а также, отношения *Relation* будут также даны ниже.

Основание индукции. Множество

$U_0 = \{ (v, m, r, d) \mid v, m, r, d \text{ причем } m = 1, \text{ множество направлений обхода дуги} = \{0, 1\}, \text{ где } 0 \text{ соответствует обходу «по солнцу», } 1 \text{ соответствует обходу «против солнца»} \}$.

Замечание 2.22. Дуги, имеющие индексы из множества U_0 , будем обозначать

$$AA_{0,0} = \{ aa_{\alpha} \mid \text{индексы дуг } \alpha \in U_0 \}.$$

При геометрической интерпретации на декартовой плоскости дуг ранга 0, все они связаны своим началом с центром полярной системы координат, причем параметр r для дуги $aa(v, m, r, d)$ определяет угол между осью абсцисс и касательной к рассматриваемой дуги.

Параметр d для дуги $aa(v, m, r, d)$ определяет ее вогнутость (при $d = 0$) или выпуклость (при $d = 1$). В частности, если ось абсцисс является касательной рассматриваемой дуги, (т. е. параметр r равен нулю) при $d = 0$ дуга $aa(v, m, r, d)$ располагается ниже оси абсцисс, а при $d = 1$, соответственно, выше.

Индукционный шаг. Пусть $i > 0$.

$$U_i = \{ (v_0, m_0, r_0, d_0), \dots, (v_i, m_i, r_i, d_i) \mid v_j \in V, m_j \in M, r_j \in V, d_j \in D, m_j = 1 \}$$

Тогда

$$U_{i+1} = \{(v_0, m_0, r_0, d_0), \dots, (v_i, m_i, r_i, d_i), (v_{i+1}, m_{i+1}, r_{i+1}, d_{i+1}) |$$

$$v_j \in V, m_j \in M, r_j \in V, d_j \in D \text{ причем } m_j = 1\}$$
(2.29)

Замечание 2.23. Дуги, имеющие индексы из множества U_{i+1} , будем обозначать $AA_{i+1,i+1}$. При геометрической интерпретации на декартовой плоскости дуги aa_α ранга $i+1$, где $\alpha = \beta(v, m, r, d)$ она связана своим началом с концом некоторой дуги aa_β из $AA_{i,i}$, причем параметр r для дуги aa_α определяет угол между касательными этих рассматриваемых здесь дуг.

Все определенные выше дуги из совокупности $BB = AA_{0,0} \cup AA_{1,1} \cup \dots \cup AA_{n,n}$ имеют длину равную 1. Дуги произвольной длины представлены в множествах $AA_{i,j}$, где $i < j$ и $n \geq j$, которое определяется следующим образом

$$AA_{i,j} = \{aa_{\alpha,\beta} | \alpha \in U_i, \beta \in U_j,$$

$$\text{причем, если } \alpha = \alpha_1(v, m, r, d),$$

$$\text{то } \beta = \alpha(v_1, m_1, r_1, d_1) \dots (v_s, m_s, r_s, d_s),$$

$$s = j - i, \quad (2.30)$$

$$v_1 = \dots = v_s = v,$$

$$r_1 = \dots = r_s = 0,$$

$$d_1 = \dots = d_s = d\}$$

Отметим, что так определенные дуги $aa_{\alpha,\beta}$ имеют длину $j - i + 1$, т. е. $Metric(aa_{\alpha,\beta}) = j - i + 1$, сектор окружности дуги $aa_{\alpha,\beta}$ равен $v * (j - i + 1)$, т. е. $Sector(aa_{\alpha,\beta}) = v * (j - i + 1)$.

Совокупность дуг AA универсума \mathfrak{Y} (2.28) в соответствии с (2.29) и (2.30) может быть определена следующей формулой $AA = AA_{i,j}$, где $i \leq j \leq n$, одноместные функции *Sector*, *Metric* определены выше.

Для определения совокупностей связей дуг RR упростим способ обозначения дуг из множеств $AA_{i,j}$, а именно, для дуги длины 1 (случай $i = j$) вместо aa_α будем писать $aa_{\alpha,1}$; при $k > 1$ вместо $aa_{\alpha,\beta}$ будем использовать обозначение $aa_{\alpha,k}$.

Для уменьшения громоздкости обозначений и решения некоторых других технических задач введем совокупности дуг AA_0, AA_1, \dots, AA_n , где $AA_i = \{aa_{\alpha,k} \mid \alpha \in U_{i,k} \text{ — целое число от 1 до } n\}$. Дуги из совокупности AA_i будем называть ранга i . Очевидно, что совокупности дуг попарно не пересекаются и $AA = AA_0 \cup AA_1 \cup \dots \cup AA_n$. Основная проблема из-за которой необходим ввод совокупностей AA_i состоит в том, что иначе невозможно вложение дуг длины больше 1 в совокупность дуг 0-го ранга AA_0 при формировании основания индукции. Отметим также, что иногда будем пользоваться и совокупностями дуг с обозначением $AA_{i,j}$.

Положим совокупность связей дуг

$$\begin{aligned} RR = \{rr_{a_1, a_2} \mid a_1 = aa_{\alpha_1, k_1}, a_2 = aa_{\alpha_2, k_2}, \alpha_1 = \beta(v_1, m_1, r_1, d_1), \\ \alpha_2 = \beta(v_2, m_2, r_2, d_2)\}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Тогда $Relation(rr_{a_1, a_2}, a_1, a_2), Angle(rr_{a_1, a_2}) = r_1 - r_2$. Таким образом, универсум \mathfrak{Y} (2.28) полностью определен.

Основные результаты.

Теорема 2.5.8. Любой а.с. вида (2.26), имеющая не более n дуг и связей дуг может быть изоморфно вложена в универсум \mathfrak{Y} (2.28).

Доказательство. Доказательство следует из построения универсума \mathfrak{Y} (2.28) по выше определенным формулам (2.29), (2.30) и (2.31). \square

Пусть отображения а.с. $\zeta_1 : S_1 \rightarrow \mathfrak{Y}, \zeta_2 : S_2 \rightarrow \mathfrak{Y}, \dots, \zeta_m : S_m \rightarrow \mathfrak{Y}$ являются изоморфными вложениями, существование которых обеспечивает Теорема 2.5.8,

причем образы каких-то дуг образцов S_1, S_2, \dots, S_m принадлежат совокупности дуг 0-го ранга AA_0 , т. е.

$$\zeta_1(S_1) \cap AA_0 \neq \emptyset, \zeta_2(S_2) \cap AA_0 \neq \emptyset, \dots, \zeta_m(S_m) \cap AA_0 \neq \emptyset. \quad (2.32)$$

Положим, что совокупность дуг изображения P (2.28) имеет вид $A = \{a_1, a_2, \dots, a_w\}$ и $\rho_1 : P \rightarrow \mathfrak{Y}, \rho_2 : P \rightarrow \mathfrak{Y}, \dots, \rho_w : P \rightarrow \mathfrak{Y}$ изоморфные вложения, где дуги a_1, a_2, \dots, a_w отображаются в совокупность дуг 0-го ранга AA_0 , т. е.

$$\rho_1(a_1) \in AA_0, \rho_2(a_2) \in AA_0, \dots, \rho_w(a_w) \in AA_0. \quad (2.33)$$

Рассмотрим совокупность Σ частичных инъективных отображений

$$\Sigma = \{\zeta_{\rho_i, j} | \zeta_{\rho_i, j} : S_i \rightarrow P, \text{ где } \zeta_{\rho_i, j} \text{ композиция } \zeta_i : S_i \rightarrow \mathfrak{Y}, (\rho_j) - 1 : \mathfrak{Y} \rightarrow P\}. \quad (2.34)$$

Теорема 2.5.9. *Пусть ξ изоморфное вложение образца S_i в изображение P (2.26). Тогда в совокупности Σ существует отображение $\zeta_{\rho_i, j}$ такое, что для любой дуги $a \in S_i$ выполнено: $\xi(a) = \zeta_{\rho_i, j}(a)$. Таким образом, все изоморфные вложения образцов S_i в изображение P (2.26) представлены в совокупности Σ .*

Доказательство. будем вести в предположении, что любая дуга может быть единственным образом изоморфно вложена в AA_0 . Пусть $\zeta_i : S_i \rightarrow \mathfrak{Y}$ изоморфное вложение, существование которого обеспечивает Теорема 2.5.8, причем дуга $a \in S_i$ такая, что $\zeta_i(a) = b$ и $b \in AA_0$. Пусть $\xi(a) = c$, где $c \in P$ (2.26). Положим (согласно формулам (2.32) и (2.33)) изоморфное вложение $\rho_j : P \rightarrow \mathfrak{Y}$ такое, что $\rho_j(c) = b$. Тогда композиция $\zeta_i : S_i \rightarrow \mathfrak{Y}$, $(\rho_j) - 1 : \mathfrak{Y} \rightarrow P$ будет совпадать с изоморфным вложением ξ по правилам конструкции универсума \mathfrak{Y} (формулировки (2.29), (2.30) и (2.31)). \square

Непосредственным следствием Теоремы 2.5.9 является

Теорема 2.5.10. *Сложность поиска образцов первого плана имеет верхнюю границу сложности не превышающую $O((w+t)*w+m)$, где w – количе-*

ство дуг (t — количество связей дуг) изображения P (2.26), m — количество образцов.

Доказательство. Универсум (схема 2) статьи [14] ни чем не отличается от универсума \mathfrak{Y} , рассматриваемого здесь, который построен на гораздо более строгом математическом уровне. Поэтому данная Теорема 2.5.10 является полным аналогом Теоремы 3 из статьи [14]. \square

Отметим, что по сформированным выше ограничениям параметры t и w меньше или равны n , поэтому ограничения на верхнюю границу сложности можно переформулировать, как не превышающую

$$O((n+n)*n+m) \quad (2.35)$$

Перейдем к вопросу оценки сложности поиска в изображении P (2.26) образцов 2-го и дальнейших планов, что, конечно, увеличивает оценку сложности (2.35). Отметим, что при поиске изоморфных вложений совокупность Σ частичных инъективных отображений оказывается построенной полностью.

Пусть $\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$, где $\Sigma_1 = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_h\}$ — состоит из всех изоморфных вложений, а $\Sigma_2 = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r\}$ — состоит из частичных инъективных вложений, совокупность Σ определена формулой (2.34).

Без ограничения общности можно считать, что уже построено изоморфное вложение $\chi : P \rightarrow \mathfrak{Y}$ и образы композиций частичных инъективных вложений $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r\}$ и изоморфного вложения χ дополнены до полных копий множества дуг A_1, A_2, \dots, A_m соответствующих образцов S_1, S_2, \dots, S_m . Предположим, что частичное инъективное вложение $\theta_i : S_j \rightarrow P$ и множество дуг $A_{j_1} = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ образ композиции отображений θ_i и χ . Пусть далее, $A_j = A_{j_1} \cup A_{j_2}$, где $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ дуги не имеющие прообразов из-за частичности отображения θ_i .

Таким образом, сложность поиска образцов 2-го плана зависит от:

1. Построения совокупности дуг $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$.
2. Проверки нахождения дуг из внутри образов отображений $\Sigma_1 = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_h\}$.

Теорема 2.5.11. Сложность поиска образцов второго плана имеет верхнюю границу сложности не превышающую $O(n + \psi * n * m)$, где ψ — константа, соответствующая сложности проверки нахождения дуг из $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ внутри 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 .

Доказательство. Сложность построения совокупности дуг $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ пункта 1), очевидно, не превышает n .

Общее количество дуг из объединения совокупностей $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ пункта 2), очевидно, не превышает $n * m$.

Если ψ — константа, соответствующая сложности проверки нахождения дуг из $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ внутри образов найденных образцов, то $O(n + \psi * n * m)$ верхняя граница сложности для пункта 2) и теорема доказана. \square

Замечание 2.24. Оценки Теоремы 2.5.11 принципиально хуже других оценок работ [14, 25, 26], так как здесь появляется мультипликативная зависимость от количества образцов m (в оценках работ [14, 25, 26] количество образцов m увеличивало оценку сложности только аддитивно). В качестве позитивного момента отметим, что количество образцов m увеличивает сложность только линейно, что позволяет надеяться на эффективную реализацию при решении практически значимых задач большой размерности.

Результаты Теоремы 2.5.11 позволяют получить в целом оценку сложности поиска в анализируемом изображении образцов первого, второго и произвольного i -го планов, если учитывать, что при переходе к произвольному $i + 1$ — му плану, объединение совокупностей $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ только уменьшается, что

Теорема 2.5.12. Сложность поиска образцов первого, второго и любых других планов имеет верхнюю границу сложности не превышающую

$$O((n + n) * n + m + n + (\psi * n * m) * n) \quad (2.36)$$

где ψ — константа, соответствующая сложности проверки нахождения дуг из внутри 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 .

Доказательство. Первая часть оценки $O((n + n) * n + m)$ соответствует поиску образцов первого плана (Теорема 2.5.8).

Вторая часть оценки $O(n)$ соответствует оценки сложности построения совокупностей дуг $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ (Теорема 2.5.11), как отмечалось уже выше, этих совокупностей достаточно для поиска объектов произвольного $i+1$ -го плана.

Третья часть оценки $O((\psi * n * m) * n)$ соответствует итерациям проверок нахождения дуг из совокупностей $A_{j_2} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ внутри образов отображений $\Sigma_1 \cup \Sigma_2 \cup \dots \cup \Sigma_i$. (Теорема 2.5.11), где Σ_i добавляются за счет найденных образцов дальнейших i -ых планов. Отметим, что итераций не может быть больше n . □

Замечание 2.25. *Оценки основной Теоремы 2.5.12 не хуже оценок Теоремы 2.5.11, что показывает отсутствие усложнения поиска образцов дальнейших i -ых планов после второго плана, что, вообще говоря, естественно, так как принципиальным является переход к рассмотрению частичных вложений образцов, которые все генерируются после построения изоморфных вложений образцов первого плана.*

Выводы

1. Результаты данного параграфа существенно развиваются и уточняют подход, описанных в предыдущих параграфах, предлагают методы способные решать задачи анализа изображений в реальных условиях, когда изображение может иметь какие-то искажения. Причем не надо думать, что эти искажения могут быть только от наложения искомых образцов друг на друга. Предложенные технические решения могут быть адаптированы для гораздо более сложных случаев, например, при аппаратных сбоях или искажениях при передаче видеорядов по линиям связи и пр.

2. В Замечании 2.24 указывается, что в отличии результатов работ [14, 25, 26], в Теореме 2.5.11 (и в Теореме 2.5.12, также, формула 2.36) количество

образцов m ухудшает оценку сложности мультиплексивно относительно общего ограничения n на количество дуг и связей дуг. Кроме соображений, что это ухудшение только линейное, следует учитывать возможность применения методов оптимизации переборов, предлагаемых в работах [23, 36], которые при специальной настройке на прикладные задачи конкретных прикладных задач способны эффективно решать и NP-трудные задачи [4, 21], (например, сетевого планирования).

3 Приложения

3.1 Распознавание символов

В рамках разработки алгоритмов распознавания была спроектирована база данных для хранения информации об образцах и разработан комплекс программ для проверки практической применимости разработанных методов.

База реализована с использованием СУБД MSSQL. Проект БД приведен в приложении А. 3.3.3

Комплекс ПО состоит из трех программ:

- Конвертор растровых изображений
- Браузер для базы данных
- Интерпретатор

Все три программы написаны на языке C++. В качестве GUI используется Borland VLC. Программы используют общую базу данных, доступ к которой осуществляется через ODBC, что позволяет использовать любую совместимую СУБД.

3.1.1 Конвертор растровых изображений

Осуществляет преобразование растрового изображения в а.с. вида 2.1. В программе присутствует простой графический редактор.

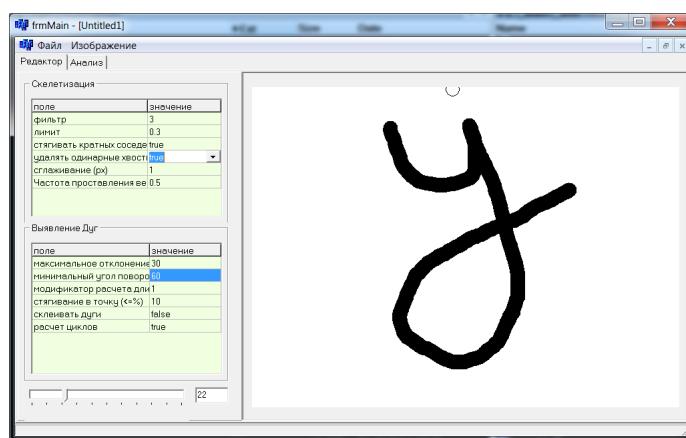
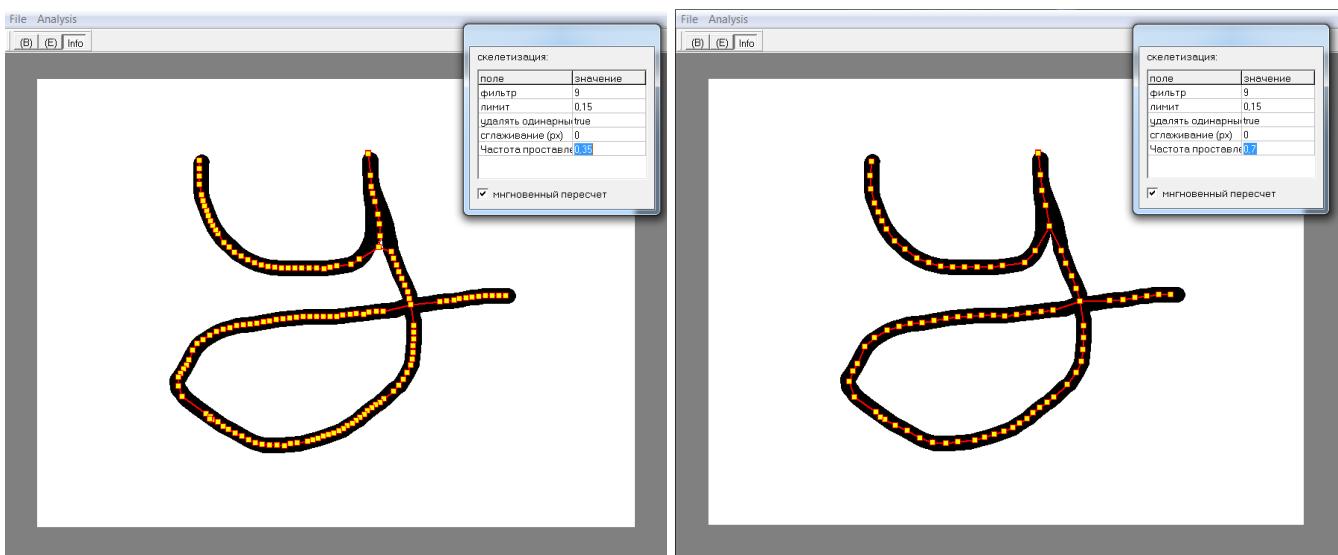


Рисунок 3.1 – Графический редактор

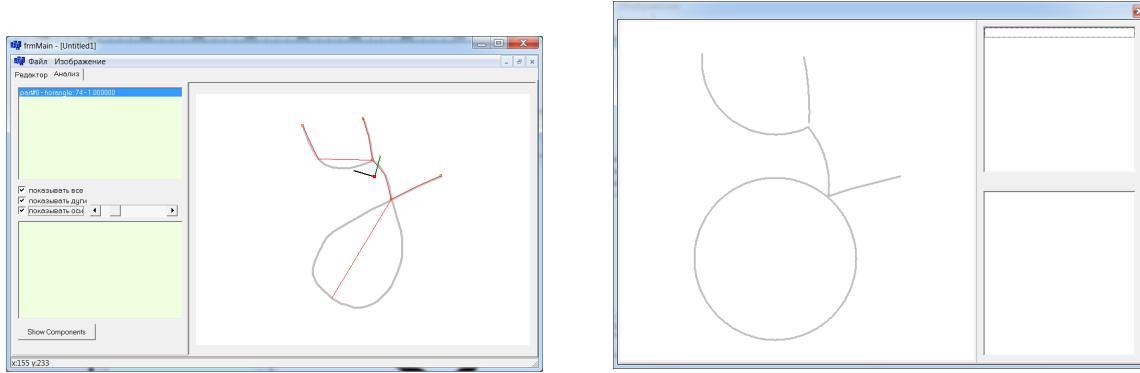
Нарисованное изображение можно преобразовать в систему дуг и связей дуг.



(a) шаг: 0.35 от ширины волны

(b) шаг: 0.75 от ширины волны

Рисунок 3.2 – Разный шаг аппроксимации графа



(a) Преобразованное изображение, нарисованное поверх исходного

(b) Преобразованное изображение, нарисованное по набору дуг и связей между ними

Рисунок 3.3 – Преобразованное изображение

В систему встроена система простого обучения. Обучение осуществляется путем сопоставления соответствующих дуг. Как результат обучения в БД в качестве изображения отправляется система, где всякой дуге сопоставляется не конкретное значение сектора, а некий промежуток значений.

Преобразованное изображение можно сохранить в БД в качестве нового образца.

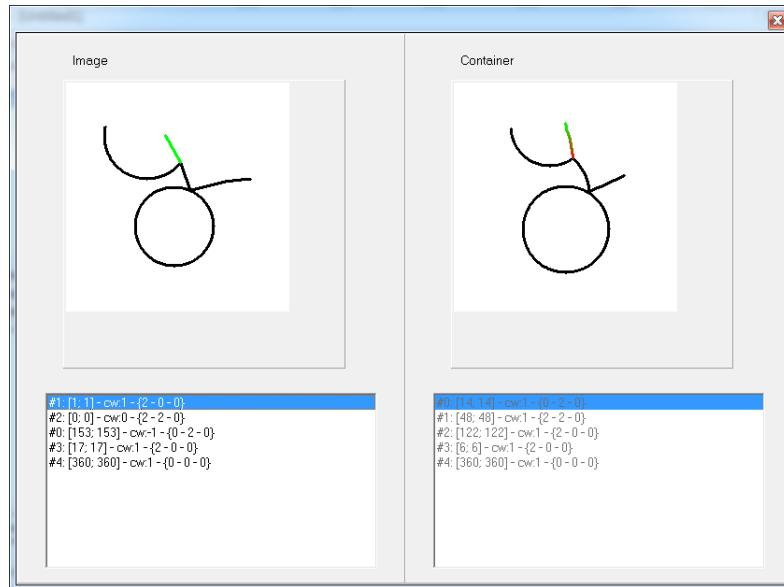


Рисунок 3.4 – Обучение системы

3.1.2 Браузер для БД

Используется для просмотра образцов хранящихся в БД. Наглядно отображает связи в изображении, и умеет пересчитывать их относительно выбранной дуги. Интерфейс программы можно посмотреть на Рисунок 3.5.

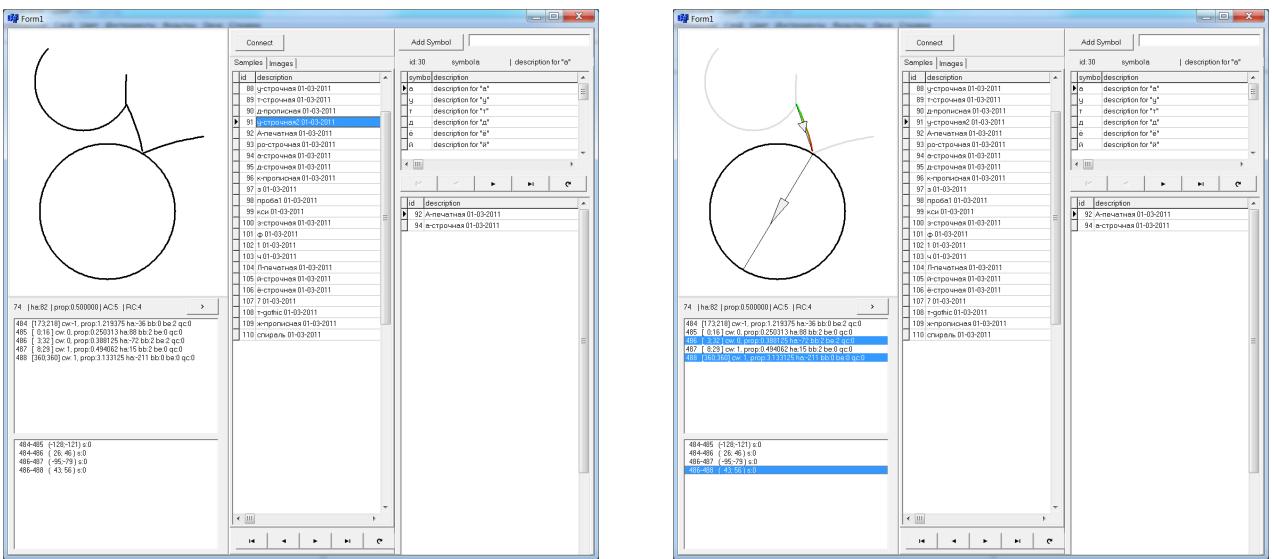
3.1.3 Интерпретатор

Предназначен для сопоставления анализируемого изображения с анализируемым образцом. В интерпретаторе реализованы алгоритмы, рассмотренные в параграфе 2.5. Программа считывает данные из БД образцов в локальную БД и осуществляет сопоставление обработанного изображениями с образцами хранящимися в БД. Интерфейс изображение представлен на Рисунок 3.6.

3.2 Оценка устойчивости битумных эмульсий

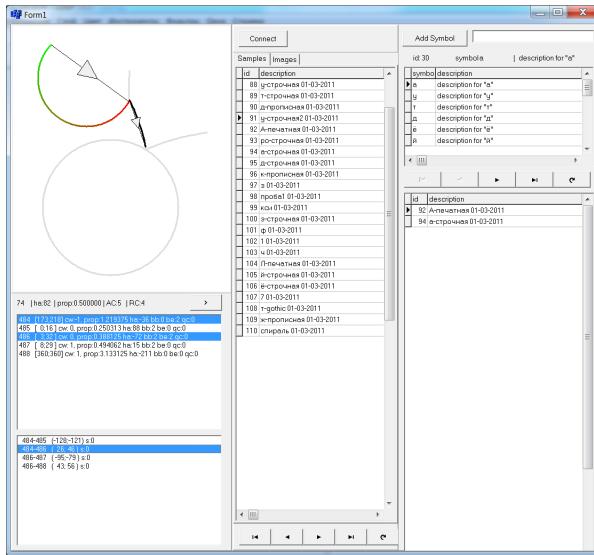
3.2.1 Введение

В настоящее время трудно назвать область строительства, где бы не применялись эмульсии. Они используются в дорожном и в гражданском строительстве в качестве связующих с различными наполнителями, а также в качестве гидроизоляционных и лакокрасочных материалов. При любых технологиях использования эмульсий мы сталкиваемся с одними и теми же проблемами, касающимися подбора состава, приготовления, определения физико-механических ха-



(a) Изображение построенное по набору дуг и связей между ними

(b) Связь между дугой и круговой дугой (360 градусов)



(c) Связь между двумя дугами

Рисунок 3.5 – Преобразованное изображение

рактеристик, стабильности, контроля распада эмульсий и получения продукции с необходимыми свойствами [31]. Далее мы будем рассматривать только прямые битумные и битумно-латексные эмульсии, которые являются наиболее крупнотоннажным продуктом: мировое использование составляет миллионы тонн в год

Традиционные методы оценки свойств битумных эмульсий включают: определение содержания вяжущего с эмульгатором, определение устойчивости эмульсии при перемешивании, определение остатка на сите, определение условной вязкости, определение устойчивости при хранении, определение адгезии эмульсий с поверхностью наполнителей, определение устойчивости при транс-

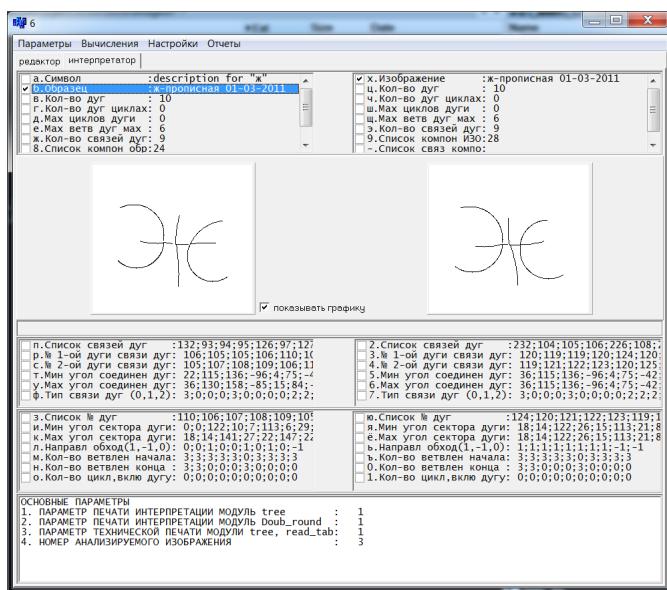


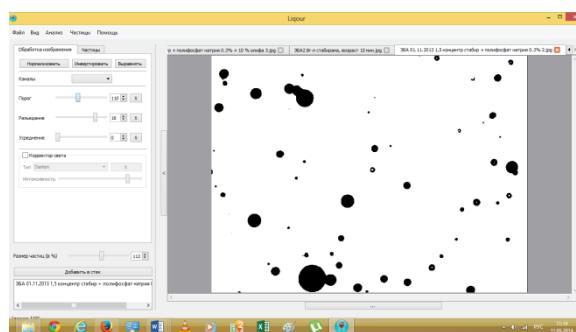
Рисунок 3.6 – Интерфейс интерпретатора

портировки и т.п.. Наряду с традиционными методами изучения качества эмульсии, во многих приложениях желательно знать более тонкие характеристики, например: функцию распределения по размерам. Эта характеристика является одним из важнейших параметров и позволяет предсказывать большинство свойств эмульсии. Обычно размер частиц оценивают с помощью определения остатка на сите с заданным размером ячейки, но такой метод позволяет оценивать только верхний предел размеров частиц эмульсии. Полная картина распределения частиц по размеру может быть измерена с использованием таких технических приёмов как рассеяние света, микроскопия с анализом изображений, или же с помощью техники электроозонирования («техники Культера» — Coulter). Точный анализ размеров частиц битумной эмульсии может решить многие проблемы, которые в настоящее время являются актуальными в сфере производства битумных эмульсий:

1. Влияние эмульгатора и его концентрации на размер битумных частиц эмульсии.
2. Влияние модифицирующих битум добавок на качество получаемой эмульсии.
3. Корректировка технологической схемы производства эмульсии.

4. Влияние размера битумных частиц на основные физические свойства эмульсии.

Оптическая микроскопия, как способ распределения частиц по размерам, является наиболее удобным и точным. Например, если в способе «рассеяние света» могут возникнуть проблемы с отражением света от черных поверхностей, какими являются частицы битума, то в способе микроскопии, при высоком контрасте черного цвета, напротив, можно отличить частицы от среды, в которой они находятся.



Очевидно изображения такого вида являются одним из примеров растровых контурных изображений, с несколькими контурами. 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:

- одиночные;
- слипшиеся;
- распавшиеся.

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

3.2.2 Анализ эмульсий

В рамках сотрудничества с кафедрой «Автомобильных дорог» НИ ИрГТУ была разработана программа для первичной оценки качества битумных эмульсий

На снимке программы (Рисунок 3.7), видно, что в проходящем свете частицы легко отличить друг от друга, но для получения такого изображения

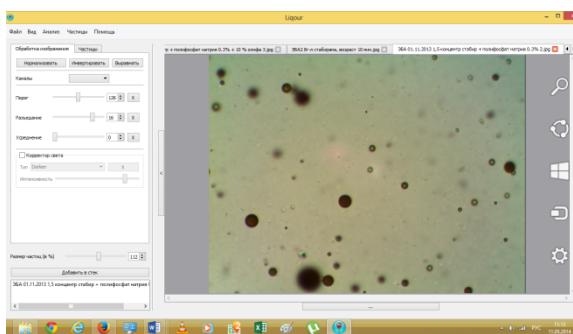


Рисунок 3.7 – Скриншоты программы «анализ изображений»

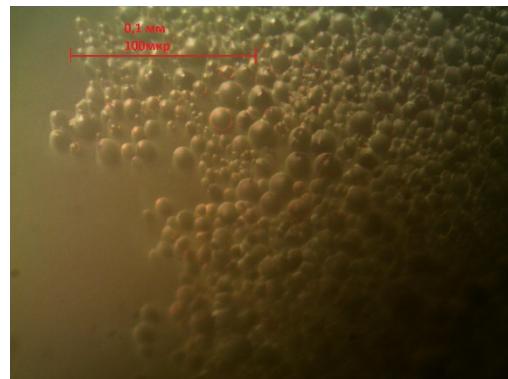


Рисунок 3.8 – Концентрированная битумная анионная эмульсия в отраженном свете

необходимо создать некоторое пространство между ними, в противном случае изображение получается как на Рисунок 3.8. Поэтому перед микроскопическими исследованиями образцы эмульсии распределяют небольшим количеством (концентрация от 1:100–1:50) в специальном стабилизирующем растворе. Необходимость данной процедуры объясняется тем что, частицы битума могут слипаться под стеклышком и отсутствие сцепления между ними осуществляется за счет pH среды, в которой они находятся. Для анионных эмульсий это pH-щелочной, для катионных pH-кислотный.

Гибкость настроек программы позволяет редактировать изображение вручную, убирая «мнимые частицы», затемненные области и другие недочеты фотосъемки. После чего происходит автоматический подсчет частиц и построение графика функции распределения по размерам, Рисунок 3.11.

Для данной программы не требуется специализированного оборудования. Достаточно оптического микроскопа с возможностью подключения цифровой камеры и компьютер с ОС (Windows, Linux, OS).

3.2.3 Оценка качества анализа

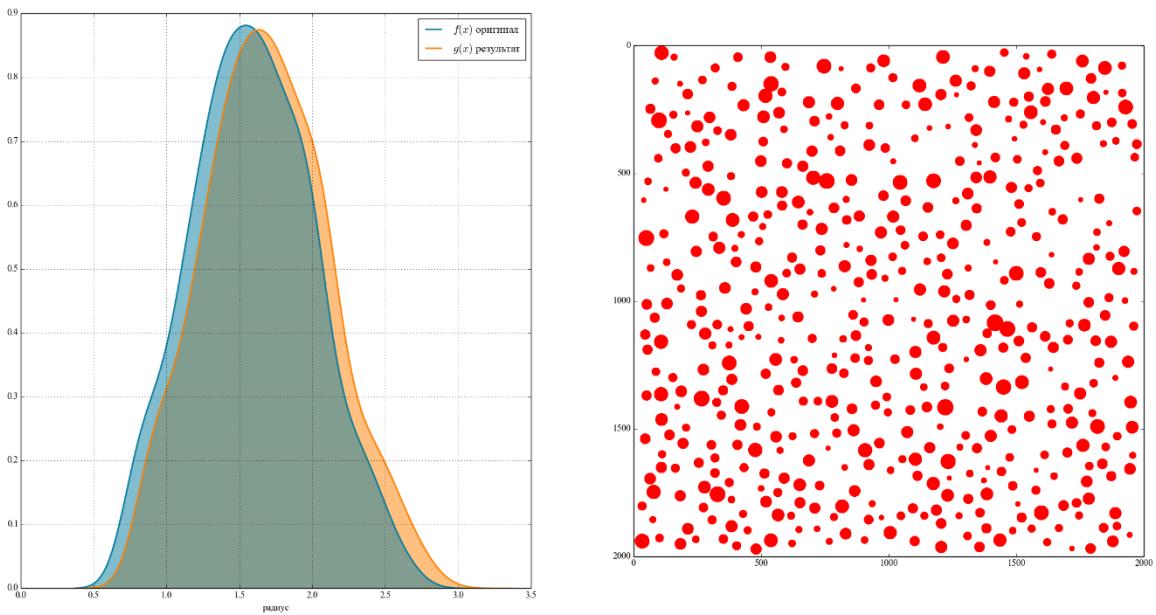


Рисунок 3.9 – Результат работы программы на искусственно сгенерированных данных

На рисунке (Рисунок 3.9) приведены два графика: тот что сильнее смещен влево — соответствует исходным авто-сгенерированным данным, смещенный вправо соответствует распознанным данным. Формы графиков практически идентичны. Смещение, как правило, вызвано ошибками округления при распознавании объектов.

Таблица 3.1
Анализ распределения частиц на Рисунке 3.9

| График | мин. размер частиц, мкм. | макс. размер частиц, мкм. | Среднее значение, мкм. | Ср.кв. от- клонение, мкм. | Всего частиц |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Исходный | 0.87 | 2.87 | 1.69 | 0.42 | 500 |
| Распознан- ный | 0.87 | 2.69 | 1.59 | 0.41 | 493 |

Вторым фактором (первый — ошибки округления) отрицательно влияющим на качество распознавания является наличие слипшихся частиц. На Ри-

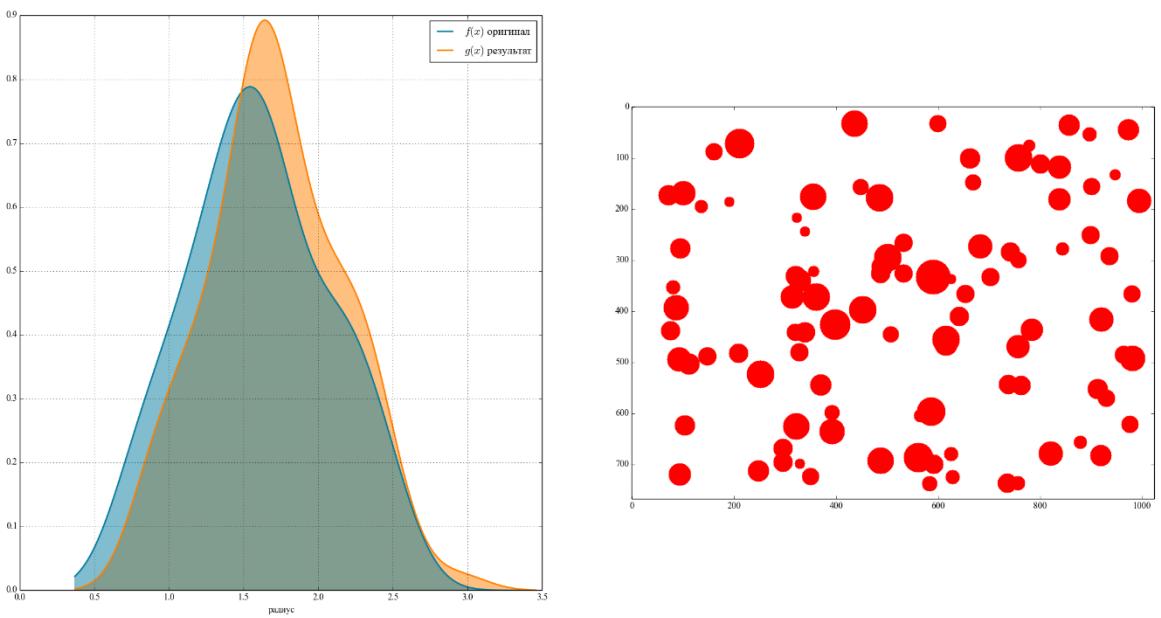


Рисунок 3.10 – Проверка работы программы при наличии слипшихся частиц

сунок3.10 приведены два графика исходного (тот что более сплющен) и распознанного распределения частиц (тот что повыше). Сильное различие между графиками обусловлено тем что, при распознавании слипшиеся объекты не учитываются.

Таблица 3.2
Распределение частиц на Рисунке 3.10

| График | мин. размер частиц, мкм. | макс. размер частиц, мкм. | Среднее значение, мкм. | Ср.кв. от- клонение, мкм. | Всего частиц |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Исходный | 0.87 | 2.98 | 1.71 | 0.44 | 100 |
| Распознан- ный | 0.87 | 2.52 | 1.6 | 0.46 | 57 |

Из таблицы 3.2 видно, что, не смотря на то, что почти половина частиц не была распознана, характеристики распределения были определены достаточно точно к исходным, и погрешность составила около 4–5 %.

Получение высококачественной, долговечной битумной эмульсии зависит в основном от вязкости битума поступающего в диспергатор вместе с раствором

ПАВ, а так же от скорости вращения и вида диспергирующих элементов. После выхода готовой эмульсии из диспергатора необходимо оценить её качество.

Внешние признаки распада эмульсии видны невооруженным глазом, но если речь идет о количественном сравнении двух визуально схожих эмульсий, то в таком случае применение программы для анализа размера частиц будет весьма кстати.

3.2.4 Определение среднего размера и дисперсии частиц битумной эмульсии на модифицированном битуме

Стабильность эмульсии в большой степени определяется размером частиц, который в свою очередь зависит от вязкости исходного битума. Во многих практических ситуациях необходимо получать мелкие (1-5 мкм) частицы эмульсии, это даёт очень хорошую стабильность при хранении и хорошее обволакивание заполнителей. Для получения таких эмульсий необходимо специализированное дорогостоящее оборудование.

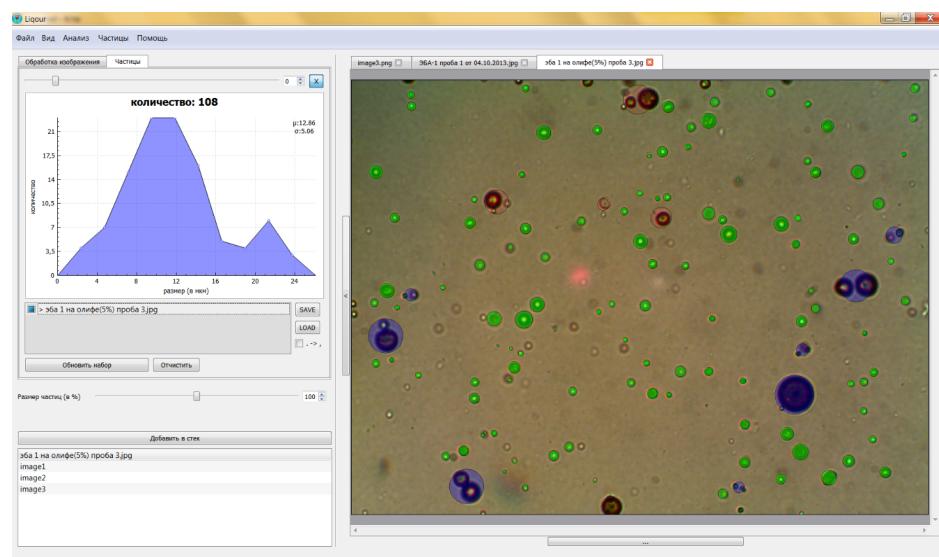


Рисунок 3.11 – ЭБА-1 на битуме разжиженном олифой (5 %)

Таблица 3.3
Распределение частиц на Рисунке 3.11

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

Стандартные диспергаторы на которых дорожники производят битумные эмульсии позволяют получать средний размер частиц примерно 10 -20 мкм. Одним из возможных способов уменьшения размеров частиц эмульсии может являться понижение вязкости битума.

3.2.5 Результаты

Разработанный программный комплекс, показал что изложенные выше алгоритмы отлично справляются с задачей классификации объектов по контуру.

3.3 Автоматизация составления ПОДД

Работая с базой данных (БД) автомобильных дорог (далее а/д), было замечено, что большинство свойств а/д, можно отразить следующей схемой (Рисунок 3.12, серая область).

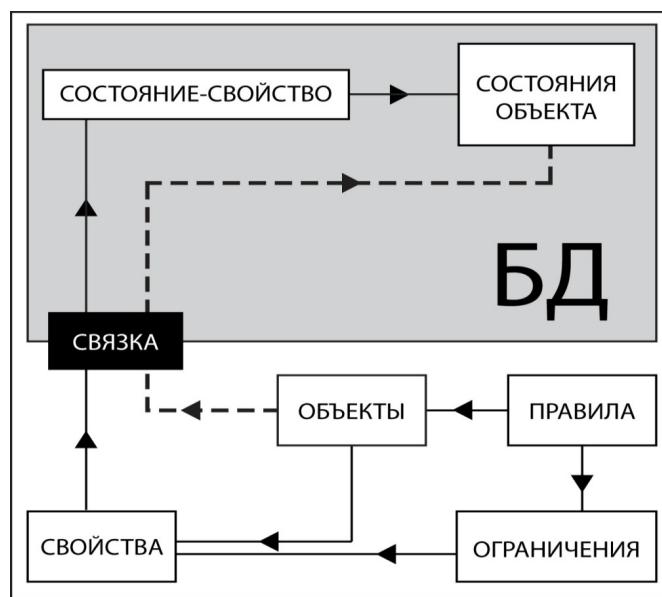


Рисунок 3.12 – Схема представления свойств автомобильной дороги

где состояние — это некоторый участок АД, а свойство — это функция, протяженная на этом участке и соответствующая некоторому свойству дороги (причем в качестве свойств может выступать наличие на участке трубы, дорожного знака, съезда и т. д.). Стоит отметить, что в БД функция представлена, как правило, набором аппроксимирующих точек.

В соответствии с таким подходом, было решено разработать надстройку над БД, представляющую собой набор фиксированных таблиц, и осуществляющую связь с основной БД, через таблицу «связка». Таблица «связка» имеет

ключевое значение в схеме. За счет неё организуется «безболезненная» связь между основной БД и надстройкой.

Таблица 3.4
Таблица связи

| id | имя таблицы в связи | имя поля содержащего значение в таблице связи |
|----|---------------------|---|
| # | состояние-свойство | значение |

Так как схема разрабатывалась для общего случая автоматизация размещения подобъектов (т. е. в нашем случае дорожных ограждений, сигнальных устройств и т. д.) на протяженном объекте (а/д), то стоит разъяснить значения некоторых таблицы.

Таблица «объекты» хранит все возможные протяженные объекты, на которых будут размещаться подобъекты. В нашем случае, в таблице будет только одна строка, соответствующая АД. Таблица «состояния объекта» хранит всевозможные участки АД (т. е. например Иркутск-Листвянка, Братск-Усть-Илимск и т. д.).

Таблица «состояние-свойство» хранит множество функций-свойств (высота насыпи, тип покрытия и т. д.) для каждого конкретного глобального участка (состояния) АД. Об особенностях представления правил будет сказано ниже.

3.3.1 Представление дороги

Для представления а/д, заданной на промежутке, используется система функций:

$$Road = \begin{cases} g_1(x), x \in [a, b] \\ g_2(x), x \in [a, b] \\ \dots \\ g_n(x), x \in [a, b] \end{cases}$$

где $g_i(x)$ соответствует i -му свойству. Если свойство есть некоторая постоянно изменяющиеся величина (например «высота насыпи»), то функция имеет вид

Таблица 3.5
Таблица правил

| id правила | id объекта | наименование | id списка ограничений |
|------------|------------|--------------|-----------------------|
| # | # | ГОСТ # | # |

непрерывной кривой и при технической реализации представляет собой набор аппроксимирующих точек. Если же свойство представляет собой величину, которая может принимать значения только из строго заданного набора (например «тип покрытия»), то функция имеет ступенчатый вид.

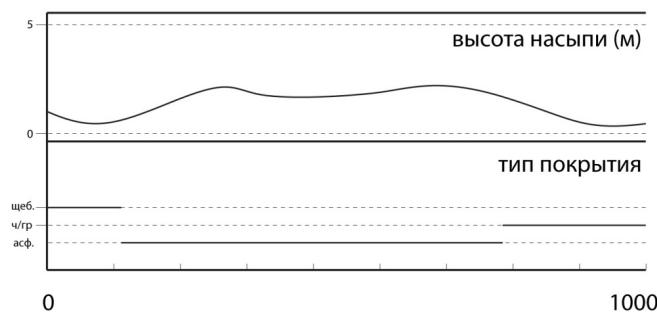


Рисунок 3.13 – графики свойств

3.3.2 Представление правил

В отличие от данных а/д, информацию о правилах в БД хранить не принято. Связанно это с тем что, при составлении ПОДД, вся ответственность о корректности расположения тех или иных объектов на дороге ложится на плечи проектировщика, который прекрасно владеет правилами, и в случае необходимости обращается к ГОСТам. С другой стороны, чтобы научить машину расставлять объекты на плане в соответствии с ГОСТАми в автоматическом режиме, мы должны эти ГОСТы положить в БД.

Таблица 3.6
Таблица ограничений

| id ограничения | id свойства | значение |
|----------------|-------------|----------|
| # | # | асфальт |

Тут мы сталкиваемся с первой проблемой: с формальным представлением правила (т. е. как нам представить правило, чтобы его можно было хранить в БД). Так как каждое правило это есть некоторый набор конкретных значений свойств АД, то мы и будем представлять правило просто как набор значений:

$$P_j = (p_{j_1}, \dots, p_{j_n})$$

где каждая p_{j_i} есть константа и соответствует i -му свойству j -го правила. В более сложных случаях, например, когда значение свойства может принимать значения из некоторого заданного промежутка, можно заменить константы векторами:

$$P_j = (\overline{p_{j_1}}, \dots, \overline{p_{j_n}})$$

где $\overline{p_{j_i}} = (a_{j_i}, b_{j_i})$ и соответствует i -му свойству j -го правила. Оба варианта легко реализуются в рамках СУБД.

Вторая проблема заключается в том, как ГОСТ привести к формальному виду. Рассмотрим решение данной проблемы на примере ГОСТ 52289 пункта 8, правила применения дорожных ограждений и направляющих устройств. Так как постановка задачи требует от нас найти корректное расположение для некоторого объекта на АД, то можно пренебречь некоторыми правилами определяющими качественное представление объекта (напр.: кол-во направляющих устройств, удерживающая способность и т. д.).

В качестве наглядного представления формализованного правила удобно использовать блок-схемы.

На Рисунок 3.14. приведена часть схемы для расстановки сигнальных устройств на АД. Каждый возможный «путь» в этой схеме будет соответствовать одной строке в таблице правил БД.

3.3.3 Автоматизация

Разработанная система представления, позволяет нам реализовать схему автоматизированного расставления объектов на плане АД. Для начала рассмотрим простой пример, который позволит нам лучше разъяснить принцип работы.

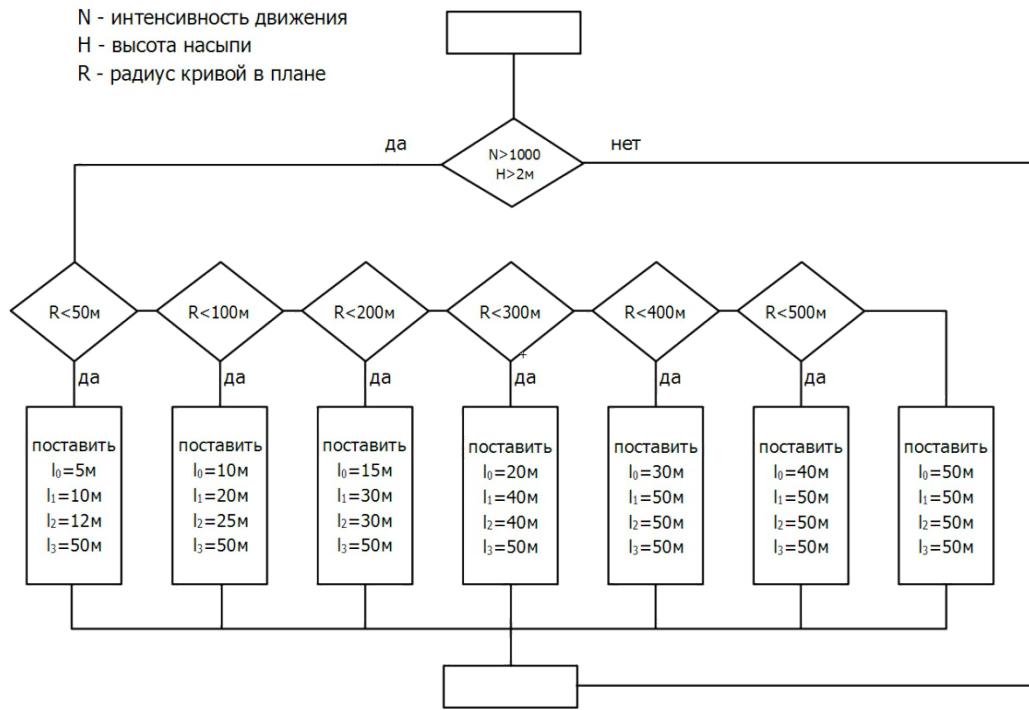


Рисунок 3.14 – Блок схема определяющая ГОСТ 52289 пункта 8

Пусть АД определена в базе двумя функциями-свойствами A и B и задано два правила:

$$P_1 = [(a_1, a_2), b_1]$$

$$P_2 = [(a_2, a_3), b_2]$$

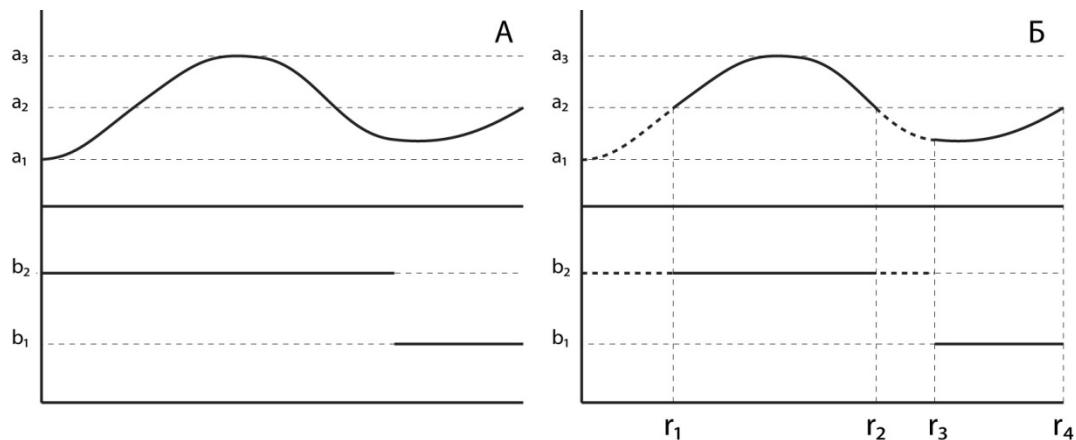


Рисунок 3.15 – Объединенные графики свойств

На Рисунок 3.15 А представлены графики функций-свойств A (верхний) и B (нижний) на некотором участке дороги. Наша задача найти промежутки удо-

влетворяющие заданным выше правилам. Мы разбиваем участок на под-участки точками пересечения функций $A(x)$ и $B(x)$ с прямыми $y = a_1$, $y = a_2$, $y = a_3$ и $y = b_1$, $y = b_2$ соответственно.

В результате обнаруживаем (Рисунок 3.15 Б), что промежуток $[r_1, r_2]$ удовлетворяет правилу P_2 , а промежуток $[r_3, r_4]$ удовлетворяет правилу P_1 . После того как промежутки найдены, остается подобрать объекты для которых выполнение любого из правил P_1 и P_2 достаточно для того, чтобы их расположение соответствовало правилам ГОСТ, и поставить их на плане АД.

Формально автоматизацию можно описать следующим образом. Дорога представлена системой функций

$$Obj = \begin{cases} g_1(x), x \in [a, b] \\ g_2(x), x \in [a, b] \\ \dots \\ g_n(x), x \in [a, b] \end{cases}$$

заданной в двумерном пространстве на промежутке $[a, b]$. Функции $g_i(x)$ будем называть свойствами объекта. Функции $g_1(x)$ являются непрерывными по X на промежутке $[a, b]$. Требуется найти промежутки из $[a, b]$, на которых объект удовлетворяет ограничениям. Пусть A_i как области значений функций определяющих ограничение:

$$A_i = E(f_i(x)), i = \overline{1, n}$$

где $f_i(x)$ — функции заданные на некотором промежутке. Ограничения будем представлять следующим образом:

$$R_j = \begin{cases} f_1(x_j) \\ f_2(x_j) \\ \dots \\ f_n(x_j) \end{cases}, j = \overline{1, m}$$

Этап 1. Сведение объекта к новому объекту заданному ступенчатыми функциями.

$$Obj_2 = \begin{cases} h_1(x), x \in [a, b] \\ h_2(x), x \in [a, b] \\ \dots \\ h_n(x), x \in [a, b] \end{cases} \quad h_i = \{x \mid f_i(x_{j_1}) \leq g_i(x) < f_i(x_{j_2})\}$$

Оценка: сложность осуществления перехода порядка $O(m)$.

Этап 2. Разбиение объекта на множество подобъектов $\{obj_k\}$. Данний шаг позволяет нам перейти от объекта заданного системой функций к множеству подобъектов, каждый из которых определен системой констант. Такое разбиение позволяет нам реализовать методы проверки ограничений, который подробно были рассмотрены в предыдущих работах [3].

Пусть s_i — кол-во точек разрыва у функции $h_i(x)$ на $[a, b]$. $S = \sum_i s_i$ — это общее кол-во точек разрыва на $[a, b]$ у всех функций $h_i(x)$ вместе взятых.

Пусть $\{x_1, \dots, x_S\}$ — упорядоченное по возрастанию множество точек разрыва. Тогда наше множество подобъектов будет задано следующим образом:

$$obj_i = \begin{cases} h_1^+(x_i), x \in [x_i, x_{i+1}] \\ h_2^+(x_i), x \in [x_i, x_{i+1}] \\ \dots \\ h_n^+(x_i), x \in [x_i, x_{i+1}] \end{cases} \quad \text{при } i < S - 1$$

и

$$obj_i = \begin{cases} h_1^+(x_i), x \in [x_i, b] \\ h_2^+(x_i), x \in [x_i, b] \\ \dots \\ h_n^+(x_i), x \in [x_i, b] \end{cases} \quad \text{при } i = S - 1$$

Отметим что $x_1 = a, x_s = b$. Сложность построения нового множества объектов порядка $O(S)$.

Программное обеспечение разработанное на базе предложенной системы успешно применяется на кафедре автомобильных дорог ИрНИТУ для автоматизации составления проектов организации дорожного движения по государственным контрактам (включающих в себя проектирования центральных улиц города Иркутска, трассы Иркутск-Листвянка, и других дорог Иркутской и Бурятской областей).

Заключение

Основные результаты работы 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 было созданы комплексы программ для решения задач.

Полученные в диссертационной работе результаты соответствуют общей тенденции развития математических методов решения информационных задач для больших массивов данных.

Список рисунков

| | |
|--|----|
| 1.1 Скелетизация | 14 |
| 1.2 Топологии скелета | 15 |
| 2.1 Сравнение методов обесцвечивания | 21 |
| 2.2 Распространение волны: а)–ромбовидная, б)–квадратная, в)–сферическая | 26 |
| 2.3 Распространение волны по области, на последнем изображении представлен полученный граф | 29 |
| 2.4 Схема разбиения графа «особыми» точками | 30 |
| 2.5 Геометрическая интерпретация модели \mathfrak{M} | 33 |
| 2.6 Схема 1. Дерево Tree | 36 |
| 2.7 Схема 2. Дерево TreeImage | 38 |
| 2.8 Геометрическая интерпретация изображений с метрикой | 44 |
| 2.9 Элементы дерева образцов | 47 |
| 2.10 Дерево изображений | 48 |
| 2.11 Геометрическая интерпретация отмасштабированного изображения | 50 |
| 2.12 Геометрическая интерпретация изображения с наложением | 58 |
| 3.1 Графический редактор | 69 |
| 3.2 Разный шаг аппроксимации графа | 70 |
| 3.3 Преобразованное изображение | 70 |
| 3.4 Обучение системы | 71 |
| 3.5 Преобразованное изображение | 72 |
| 3.6 Интерфейс интерпретатора | 73 |
| 3.7 Скриншоты программы «анализ изображений» | 75 |

| | |
|--|----|
| 3.8 Концентрированная битумная анионная эмульсия в отраженном свете | 75 |
| 3.9 Результат работы программы на искусственно сгенерированных данных | 76 |
| 3.10 Проверка работы программы при наличии слипшихся частиц | 77 |
| 3.11 ЭБА-1 на битуме разжиженном олифой (5 %) | 78 |
| 3.12 Схема представления свойств автомобильной дороги | 79 |
| 3.13 графики свойств | 81 |
| 3.14 Блок схема определяющая ГОСТ 52289 пункта 8 | 83 |
| 3.15 Объединенные графики свойств | 83 |

Список таблиц

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Сравнение методов распознавания | 17 |
| 3.1 | Анализ распределения частиц на Рисунке 3.9 | 76 |
| 3.2 | Распределение частиц на Рисунке 3.10 | 77 |
| 3.3 | Распределение частиц на Рисунке 3.11 | 78 |
| 3.4 | Таблица связки | 80 |
| 3.5 | Таблица правил | 81 |
| 3.6 | Таблица ограничений | 81 |

Список использованных источников

1. Абрамов Е. С. Моделирование систем распознавания изображений (На примере печатных текстов) : дис. ... канд. техн. наук / Е. Абрамов ; СПб., 2006. — 140 с.
2. Афонасенко А. В. Обзор методов распознавания структурированных символов / А. В. Афонасенко // Доклады ТУСУРа / А. В. Афонасенко, А. И. Елизаров. — Томск, 2008. — Т. №2(18). — С. 83–88.
3. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. — М. : Изд-во иностранной литературы, 1960.
4. Гери М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гери, Д. Джонсон. — М. : Мир, 1982.
5. Горлов Д. В. Распознавание изображений на основе признаков, инвариантных к сдвигу, вращению, масштабированию : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Горлов. — Красноярск, 2002. — 20 с.
6. Демин А. А. Обзор интеллектуальных систем для оценки каллиграфии / А. А. Демин // Инженерный вестник — Москва: издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
7. Демин А. А. Адаптивная обработка каллиграфической информации, представленной в виде рукописных символов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / А. А. Демин. ; Москва, 2014.
8. Демин А. А. Интеллектуальная интерактивная обучающая система «Электронная пропись» / А. А. Демин // INTELS'2012 Сборник трудов десятого международного симпозиума : сб. науч. тр. / Волгоградский государственный технический университет. — Волгоград, 2012. — С. 20–23.
9. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен. / Р. Дуда, П. Харт. — М. : Мир, 1989. — 510 с.
10. Еремин Д. М. Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления. / Д. М. Еремин, И. Б. Гарцеев. — М. : МИРЭА, 2004. — 75 с.
11. Каташевцев М. Д. Программа обработки и интерпретации контурных изображений / М. Д Каташевцев, В. И. Мартынов // Свидетельство о государ-

- ственной регистрации программы для ЭВМ №2011618417. — Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. — Москва, 2010.
12. 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: сб. науч. тр / Иркутск: Изд-во Иркут. гос.ун-та, 2010. — С. 175–177.
 13. Каташевцев М. Д. Волновая скелетизация / М. Д. Каташевцев // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. — 2013. — Т. №7. — С. 89–92.
 14. Каташевцев М. Д. Анализ плоских контурных изображений с метрикой / М .Д. Каташевцев // Известия Иркутского Государственного Университета серия «Математика». — 2014. — Т. №9. —С. 39–48.
 15. Каташевцев М. Д. Автоматизированная технология создания проектов организации дорожного движения / М. Д. Каташевцев [и др.] // Вестник ИрГТУ. — 2012. — Т. №10(69). — С. 150–155.
 16. Каташевцев М. Д. Исследование гранулометрического состава эмульсий с помощью оптического микроскопа и методом автоматизированного распознавания объектов на цифровой фотографии / М.Д. Каташевцев [и др.] // Вестник ИрГТУ. — 2015. — Т. №2. — С. 99–103.
 17. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Сортировка и поиск / Д. Кнут. — М. : Мир, 1978. — 848 с.
 18. Кокорин А. И. Вопросы разрешимости расширенных теорий / А. И. Кокорин, А. Г. Пинус // УМН — 1978. — Т. №2. — С. 49–84.
 19. Распознавание скелетных образов [Электронный ресурс]: Распознавание образов и искусственный интеллект / Котович Н. В., Славин О. А. Режим доступа: <http://ocrai.narod.ru>. (1 января 2017).
 20. Котович Н. В. Алгоритмы распознавания шрифтов в печатных документах / Котович Н. В., Славин О. А. // Труды ИСА РАН. — 2008. — С. 252–271.

21. Лорье Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта / Ж.-Л. Лорье. — М.: Мир, 1991.
22. Мартынов В. И. Логико-эвристические методы сетевого планирования и распознавание ситуаций / В. И. Мартынов // Труды Международ. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара. — 2001. — Т. №13(6). — С. 203–215.
23. Мартынов В. И. Обзор приложений логико-эвристических методов решения комбинаторных задач высокой сложности / В. И. Мартынов [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2010. — Т. №4(28). — С. 61–67.
24. Мартынов В. И. Обзор приложений логико-эвристических методов решения комбинаторных задач / В. И. Мартынов[и др.] // Материалы 3-ей Российской школы – семинара «Синтаксис и семантика логических систем». — Иркутск, 2010. — С. 60–64.
25. Мартынов В. И. Комбинаторные задачи высокой сложности и анализ плоских контурных изображений / В.И. Мартынов, М. Д. Каташевцев // Известия Иркутского Государственного Университета серия «Математика». — 2013. — Т. №4. — С. 31–47.
26. Мартынов В. И. Масштабные ряды плоских контурных изображений и их применение. / В. И. Мартынов, М. Д. Каташевцев // Вестник ИрГТУ. — 2016. — Т. №5(99). — С. 121–129.
27. Мартынов В. И. Анализ плоских контурных изображений, представляющих объекты с наложениями. / В. И. Мартынов, М. Д. Каташевцев // Вестник ИрГТУ. — 2017. — Т. №1(120). — С. 63–71.
28. Мальцев А. И. Алгебраические системы / А. И. Мальцев. — М. : Наука., 1967.
29. Манцивода А. В. О р-преобразованиях формул / А. В. Манцивода. // Тез. докл. 7-й Всесоюз. конф. по мат. логике. : сб. науч. тр / ИМ СО АН СССР — Новосибирск, 1984.

30. Пахомов Д. В. Автоматизация создания проектов организации дорожного движения для автомобильных дорог / Д.В. Пахомов [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. – 2010. – С. 56–61.
31. Петухов И. Н. Дорожные эмульсии: Энциклопедия / И. Н. Петухов. – ЕАРЕ, 1988. – Т. 1
32. Телков А. Ю. Экспертные системы: Учебное пособие. / А. Ю. Телков. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2007. – 81 с.
33. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. / К. Фу. – М. : – Мир, 1977. – 320 с.
34. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику / С. В. Яблонский. – М. :Наука, 1979. – С. 272.
35. E. F. Codd. The Relational Model For Database Management Version 2 / Codd E. F. – Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1990.
36. Hentenrick van P. Constraint Satisfaction in Logic Programming / van P. Hentenrick. – The MIT Press. Cambrige, 1989. – 365 p.
37. Marcos D. Assuncao. Big Data Computing and Clouds: Challenges, Solutions, and Future Directions / Assuncao Marcos D [и др.] // Technical Report CLOUDS-TR-2013-1, Cloud Computing and Distributed Systems Laboratory, The University of Melbourne. – 2013.
38. Polina Golland. Fixed Topology Skeletons / Golland Polina, Grimson W. Eric. L. // Massachusetts Institute of Technology – CVPR, 2000. – Р. 10–17.

Приложение А

Структура БД

ОБРАЗЦЫ

Таблица **Smpl_Arc**, задающая совокупность дуг образца

1. id идентификатор дуги (int 4);
2. min_sector минимально возможный угол сектора дуги (int 4);
3. max_sector максимально возможный угол сектора дуги (int 4);
4. clockwise направление обхода (1 – по солнцу; -1 – против солнца; 0 – неопределенno) (int 4);
5. bran_beg кол-во ветвлений на начале
6. bran_end кол-во ветвлений на конце
7. quan_circle кол-во циклов, включающих дугу

Таблица **Smpl_Arcs_Lists**, задающая идентификаторы списков дуг образца

1. id идентификатор списка дуг (int 4);

Таблица **Smpl_Arcs_Lists_Arcs**, задающая списки дуг образца

1. id_arcslist идентификатор списка дуг (int 4);
2. id_arc идентификатор дуги (int 4);
3. proportion относительная величина дуги

Таблица **Smpl_Relations**, задающая совокупность связей дуг образца

1. id идентификатор связи двух дуг (int 4);
2. id_arc1 идентификатор первой дуги (int 4);
3. id_arc2 идентификатор второй дуги (int 4);
4. min_angle минимально возможный угол пересечения дуг (int 4);
5. max_angle максимально возможный угол пересечения дуг (int 4);
6. type тип связи (0: конец – начало, 1: конец – конец, 2: начало - начало)

Таблица **Smpl_Relations_Lists**, задающая идентификаторы списков связей дуг образца

1. id идентификатор списка связей дуг (int 4);

Таблица **Smpl_Relations_Lists_Relations**, задающая списки связей дуг образца

1. id_relationslist идентификатор списка связей дуг (int 4);
2. id_relation идентификатор связи двух дуг (int 4);

Таблица **Smpl_Parts**, задающая части образца

1. id идентификатор части образца (int 4);
2. id_arcslist идентификатор списка дуг для исследуемого изображения (int 4);
3. id_relationslist идентификатор списка связей дуг для исследуемого изображения (int 4);
4. hor_angle угол к горизонту для первой дуги в списке id_arcslist (int 4);

5. proportion пропорция (float 8)

Таблица Smpl_Parts_Relations, задающая связи частей образца

1. id идентификатор символа (int 4);
2. id_part1 идентификатор части образца (int 4);
3. id_part2 идентификатор части образца (int 4);
4. min_pos_angle (int 4);
5. max_pos_angle (int 4);
6. min_central_angle (int 4); не использовать пока
7. max_central_angle (int 4); не использовать пока
8. type тип связи(0 – снаружи; 1 – внутри) (int 4);

Таблица Smpl_Parts_Lists, задающая идентификаторы списков частей образца

1. id идентификатор списка частей образца (int 4);

Таблица Smpl_Parts_Lists_Parts, задающая списки частей образца

1. id_partslist идентификатор списка частей образца (int 4);
2. id_part идентификатор части образца (int 4);

Таблица Smpl_Parts_Relations_Lists, задающая идентификаторы списков связей частей образца

1. id идентификатор символа (int 4);

Таблица Smpl_Parts_Relations_Lists_Parts_Relations, задающая списки связей частей образца

1. id_partsrelationslist идентификатор списка частей образца (int 4);
2. id_partsrelation идентификатор части образца (int 4);

Таблица Smpl_Samples, задающая совокупность образцов

1. id идентификатор образца (int 4);
2. id_partslist идентификатор списка частей для исследуемого изображения (int 4);
3. id_partsrelationslist идентификатор списка связей частей для исследуемого изображения (int 4);
4. presentation графическое описание образца (image 16);
5. description описание образца (char 250);

СИМВОЛЫ

Таблица Smb1_Symbols, задающая совокупность символов

1. id идентификатор символа (int 4);
2. symbol имя символа (char 250);
3. description описание символа (char 250);
4. presentation графическое описание символа (image 16);
5. id_sampleslist идентификатор списка образцов, представляющих образец (int 4);

Таблица Smb1_Samples_Lists, задающая идентификаторы списков образцов

1. id идентификатор списка символов (int 4);

Таблица Smb1_Samples_Lists_Samples, задающая списки образцов

1. id_sampleslist идентификатор списка образцов(int 4);
2. id_sample идентификатор образца (int 4);

ИЗОБРАЖЕНИЯ

Таблица Img_Arc, задающая совокупность дуг изображения

1. id идентификатор дуги (int 4);
2. min_sector минимально возможный угол сектора дуги (int 4);
3. max_sector максимально возможный угол сектора дуги (int 4);
4. clockwise направление обхода (1 – по солнцу; -1 – против солнца; 0 – неопределенно) (int 4);
5. bran_beg кол-во ветвлений на начале
6. bran_end кол-во ветвлений на конце
7. quan_circle кол-во циклов, включающих дугу

Таблица Img_Arcs_Lists, задающая идентификаторы списков дуг изображения

1. id идентификатор списка дуг (int 4);

Таблица Img_Arcs_Lists_Arcs, задающая списки дуг изображения

1. id_arcslist идентификатор списка дуг (int 4);
2. id_arc идентификатор дуги (int 4);
3. proportion относительная величина дуги

Таблица Img_Relations, задающая совокупность связей дуг изображения

1. id идентификатор связи двух дуг (int 4);
2. id_arc1 идентификатор первой дуги (int 4);
3. id_arc2 идентификатор второй дуги (int 4);
4. min_angle минимально возможный угол пересечения дуг (int 4);
5. max_angle максимально возможный угол пересечения дуг (int 4);
6. type тип связи (0: конец – начало, 1: конец – конец, 2: начало – начало)

Таблица Img_Relations_Lists, задающая идентификаторы списков связей дуг изображения

1. id идентификатор списка связей дуг (int 4);

Таблица Img_Relations_Lists_Relations, задающая списки связей дуг изображения

1. id_relationslist идентификатор списка связей дуг (int 4);
2. id_relation идентификатор связи двух дуг (int 4);

Таблица Img_Parts, задающая части изображения

1. id идентификатор части изображения (int 4);
2. id_arcslist идентификатор списка дуг для исследуемого изображения (int 4);

3. id_relationslist идентификатор списка связей дуг для исследуемого изображения (int 4);
4. hor_angle угол к горизонту для первой дуги в списке id_arcslist (int 4);
5. proportion пропорция (float 8)

Таблица Img_Parts_Lists, задающая идентификаторы списков частей изображения

1. id идентификатор списка частей образца (int 4);

Таблица Img_Parts_Lists_Parts, задающая списки частей изображения

1. id_partslist идентификатор списка частей образца (int 4);
2. id_part идентификатор части образца (int 4);

Таблица Img_Parts_Relations, задающая связи частей изображения

1. id идентификатор символа (int 4);
2. id_part1 идентификатор части образца (int 4);
3. id_part2 идентификатор части образца (int 4);
4. min_pos_angle (int 4);
5. max_pos_angle (int 4);
6. min_central_angle (int 4); не использовать пока
7. max_central_angle (int 4); не использовать пока
8. type тип связи(0 – снаружи; 1 – внутри) (int 4);

Таблица Img_Parts_Relations_Lists, задающая идентификаторы списков связей частей изображения

1. id идентификатор символа (int 4);

Таблица Img_Parts_Relations_Lists_Parts_Relations, задающая списки связей частей изображения

1. id_partsrelationslist идентификатор списка частей образца (int 4);
2. id_partsrelation идентификатор части образца (int 4);

Таблица Img_Samples, задающая совокупность изображений

1. id идентификатор образца (int 4);
2. id_partslist идентификатор списка частей для исследуемого изображения (int 4);
3. id_partsrelationslist идентификатор списка связей частей для исследуемого изображения (int 4);
4. presentation графическое описание образца (image 16);
5. description описание образца (char 250);

Приложение Б

Акты внедрения

| | | |
|--|--|---|
| | СПРАВКА | |
| | о внедрении результатов диссертационной работы программиста ИРНИТУ М.Д. Каташевцева МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЛОЖНОСТЬ ИХ АНАЛИЗА. | |
| | <p>Настоящим подтверждаем, что программный комплекс «Автоматизированного распознавания объектов цифровых фотографий эмульсий оптического микроскопа» (автор М.Д. Каташевцев) используется в технопарке ИРНИТУ для анализа устойчивости гранулометрического состава эмульсий, применяемых в дорожном и гражданском строительстве, а также для исполнения государственных контрактов кафедры автомобильных дорог ИРНИТУ по анализу качества материалов дорожного покрытия и тротуаров.</p> | |
| | <p>Зав. кафедрой автомобильных дорог ИрНИТУ доцент</p> <p>Начальник управления научной деятельностью ИрНИТУ</p> |  <p>В.Б.Балабанов</p> <p>С. В. Захаров</p> |

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы программиста ИРНИТУ М.Д. Каташевцева **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЛОЖНОСТЬ ИХ АНАЛИЗА.**

Настоящим подтверждаем, что программный комплекс «**Система мониторинга и поддержки управления дорожной сетью Иркутской области**» (созданный Иркутским национальным исследовательским техническим университетом), включающий компоненту составления проектов организации дорожного движения (ПОДД) с элементами автоматизации (автор М.Д. Каташевцев), используется в производственной деятельности **ОГКУ «Дирекция по строительству и эксплуатации автомобильных дорог Иркутской области»** для решения информационных, организационных и иных задач.

Заместитель директора по ремонту и содержанию автодорог

А.В.Зорин

А.В.Зорин

Начальник отдела по содержанию автомобильных дорог

Е.Н.Егунова

