

На правах рукописи



Кушнир Олеся Александровна

Методы и алгоритмы сравнения форм бинарных растровых изображений  
на основе скелетизации

Специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Тула – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

- Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук, доцент Середин Олег Сергеевич
- Официальные оппоненты:** Местецкий Леонид Моисеевич, доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра «Математические методы прогнозирования», профессор
- Ланге Михаил Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН (ФИЦ ИУ РАН), г. Москва, ведущий научный сотрудник
- Ведущая организация:** Государственный научный центр РФ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС), г. Москва

Защита состоится « 25 » декабря 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 и на сайте [http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/Kushnir\\_OA/](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/Kushnir_OA/)

Автореферат разослан « 19 » октября 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Соколова  
Марина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Сравнение двух объектов, представленных на изображениях, является актуальной задачей компьютерного зрения. Для её решения применяется множество подходов, и наиболее подходящий из них выбирается, как правило, индивидуально для каждой прикладной задачи согласно имеющейся априорной информации об объектах, входных данных и требуемого результата. Тем не менее, общей идеей большинства подходов является получение некоторого представления (описания) объектов на изображениях с учётом специфики конкретной задачи и сопоставление не самих объектов, а их представлений. В задачах, где важным дискриминантным признаком объекта является его форма, таким представлением может служить скелет объекта, построенный по его бинарному образу (морфологический скелет).

Распознаванию формы бинарных растровых изображений на основе скелетного описания посвящены многочисленные публикации в области компьютерного зрения, и поиск решений этой задачи ведется на протяжении последних десятилетий. Проблема прямого сравнения двух произвольных бинарных растровых изображений на сегодняшний день однозначно не решена, хотя для систем технического зрения, биоидентификации и распознавания актуальна потребность в таком решении. В качестве его практических приложений можно указать сортировку различных объектов на высокопроизводительных конвейерах, идентификацию личности по силуэту ладони, исследование биологических объектов, определение типа цели в многоканальных телевизионных автоматах. Существующие методы сравнения на основе скелетного описания имеют свои достоинства и недостатки. Как правило, предлагаются эмпирические подходы, основанные либо на формировании вектора фиксированных признаков, либо существенно опирающиеся на априорные предположения о форме сравниваемых объектов. Тем не менее, подходы к распознаванию бинарных растровых изображений, основанные на порождении признаков, сильно зависят от решаемой прикладной задачи и требуют от исследователя определённой доли фантазии в изобретении всё новых и новых характеристик форм. Наиболее перспективными видятся подходы, основанные на вычислении степени похожести (или различия) пары фигур.

**Степень разработанности.** Скелет является одним из наиболее удачных способов описания формы фигуры, представленной бинарным растровым изображением; проблема точного и быстрого построения скелета в значительной мере решена в работах Л.М. Местецкого и его школы. Недостатком скелетного описания формы является чрезвычайная чувствительность скелета к шумам на границе фигуры. Поэтому, для применения в задачах анализа изображений скелет должен быть предварительно регуляризован и аппроксимирован, т.е. в скелете должен быть выделен его базовый подскелет. Методы регуляризации и аппроксимации скелетов известны (работы Л.М. Местецкого, И.А. Рейера, Л.Г. Домахиной, А.А. Рогова и М.Ю. Быстрова), но процедура подбора параметров аппроксимации и регуляризации, необходимых для получения базового скелета класса изображений или одного конкретного изображения, практически не изучены. В данной работе предложен способ автоматического подбора параметров аппроксимации и регуляризации.

Для решения задач интеллектуального анализа данных на бинарных изображениях (в первую очередь, классификации) необходимо уметь сравнивать пару скелетов, представляющих два бинарных изображения. Хотя скелет на плоскости и выглядит как граф, для сравнения скелетов не подходят методы поиска изоморфизма графов, поскольку скелет не является графом в обычном понимании, а является структурой, задающей взаиморасположение частей фигуры. Кроме того, совместно со скелетом задается и его радиальная функция, то есть функция ширины фигуры в соответствующих точках скелета. Поэтому для сравнения скелетов недостаточно выявить их изоморфизм, и зачастую тот факт, что два скелета изоморфны друг другу, совершенно не является доказательством сходства форм сравниваемых фигур.

В зарубежной литературе имеются работы, посвященные сравнению скелетов через вычисление редакционного расстояния для скелетных графов (M. Neuhaus, H. Bunke), построение ядра (функции ядра) на основе кратчайшего пути при обходе графа (F.-X. Dure, L. Brun), вычисление сходства между формами, основанное на поиске кратчайших расстояний между вершинами скелета (M.F. Demirci, X. Bai, L.J. Latecki). В этих работах скелеты интерпретируются преимущественно как графы, а не как описатели формы с шириной.

В российской литературе (Н.А. Ломов, С.В. Сидякин, Ю.В. Визильтер) в качестве дескриптора формы фигуры предлагается использовать скелетно-геодезическую гистограмму толщин-расстояний. Но гистограммный дескриптор не позволяет обратно восстановить форму фигуры, а также возможен такой побочный эффект, что для разных фигур могут получиться похожие гистограммы.

В работах А.А. Рогова и М.Ю. Быстрова был предложен способ кодирования скелета цепочкой примитивов (состоящих из длины ребра и угла между данным ребром и соседним) и построение функции различия пары скелетов на основе сравнения таких цепочек. Такой способ кодирования скелета никак не учитывает радиальную функцию скелета, являющуюся серьезным дискриминантным признаком при решении большого класса задач. Кроме того, сама функция различия пары скелетов не была детально разработана и протестирована. При этом сама идея кодирования скелета цепочкой примитивов представляется многообещающей, поскольку таким образом можно учитывать топологические особенности скелета и, следовательно, более точно кодировать форму. Этот подход и положен в основу данного диссертационного исследования.

**Цели и задачи.** Целью данного исследования является разработка методов и алгоритмов сравнения форм бинарных растровых изображений на основе скелетизации.

Задача исследования – без подбора признаков построить математически корректную процедуру парного сравнения произвольных скелетов. Задача разбивается на следующие подзадачи:

- 1 автоматический подбор адекватных параметров аппроксимации и регуляризации скелета с целью получения базового скелета бинарного растрового изображения,

- 2 описание базового скелета цепочкой примитивов с учетом радиальной функции скелета,

3 вычисление оптимального парного сопоставления (выравнивания) цепочек примитивов и вычисление меры сравнения (различия) двух изображений,

4 программное ускорение сравнения двух изображений посредством технологий распараллеливания.

**Научная новизна.** В данной работе впервые систематизируются и уточняются сведения о параметрах стабилизации непрерывного скелета: коэффициенте сокращения общего числа ребер (коэффициент регуляризации или «стрижки» скелета), коэффициенте аппроксимации кривизны ветвей скелета и коэффициенте сокращения числа коротких нетерминальных ребер (коэффициент склейки скелета). Разработан алгоритм вычисления диаметра минимальной описанной вокруг скелета окружности, являющегося масштабным множителем для параметров стабилизации скелета. Проводятся экспериментальные исследования влияния регуляризующих коэффициентов на топологию скелета, выдвигаются предложения по определению их адекватных значений для выделения в исходном скелете его базового подскелета, предлагается метод автоматического подбора параметров аппроксимации и регуляризации.

Предлагается дополнить информацией о радиальной функции скелета топологическую информацию, содержащуюся в скелетном примитиве. Радиальная функция скелета (или функция ширины) представляет собой значение радиуса максимальной вписанной в фигуру окружности с центром в каждой из точек скелета. Предлагается: а) простой способ кодирования ширины радиусом в каждой из вершин скелета, адекватный в случае линейного изменения радиальной функции на каждом из ребер скелета (например, скелеты изображений из базы ремесленных инструментов или других простых по форме предметов, изображения с малым разрешением); б) точный способ кодирования ширины в виде вектора коэффициентов интерполяционных многочленов Лежандра, когда закон изменения ширины вдоль ребра более сложен (например, скелет листьев растений).

Разработан новый алгоритм сравнения скелетов бинарных растровых изображений, представленных цепочками примитивов, в основу данного алгоритма положен поиск оптимального выравнивания двух цепочек и последующее вычисление степени различия цепочек. Разработана также параллельная версия такого алгоритма для ускорения работы при решении реальных задач.

**Теоретическая и практическая значимость.** Данное диссертационное исследование расширяет аппарат математической морфологии для исследования свойств бинарных изображений на основе скелетного описания их формы. Разработаны методы и алгоритмы сравнения форм бинарных растровых изображений на основе скелетизации. Результаты работы были использованы при выполнении НИОКТР по гранту РФФИ 14-07-31271 «Методы и алгоритмы беспризнакового анализа скелетных графов бинарных изображений», в котором соискатель являлся руководителем, и по грантам РФФИ 14-07-00527 «Методы комбинирования детекторов в анализе сигналов и изображений», 16-57-52042 «Методы и алгоритмы обнаружения событий, опасных для пожилых людей, на основе видеоанализа в беспроводной системе удаленного мониторинга», 18-07-00942 «Методы и алгоритмы построения математически корректных функций сравнения бинарных изображений на основе скелетной морфологии».

Предложенные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса сравнения бинарных растровых изображений на основе скелетного описания формы, представленного цепочками примитивов. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Написаны Windows- и консольные программные приложения для автоматизации проверки гипотез и получения результатов исследований. Проведены экспериментальные исследования разработанных методов сравнения бинарных растровых изображений для решения прикладных задач детектирования человеческой ладони в видеопотоке и классификации листьев растений. Продемонстрировано высокое качество детектирования и классификации, что позволяет предположить возможность использования разработанных методов для широкого круга приложений.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационного исследования использовались методы математического моделирования, численные методы решения задач, методы интеллектуального анализа данных, распознавания образов, компьютерного зрения и компьютерной графики. Исследование базируется на методе описания формы фигуры специальной математической моделью в парадигме морфологического подхода к анализу данных – морфологическим скелетом. Одной из задач исследования является моделирование формы объекта цепочкой примитивов на основе скелетного описания.

Более конкретно стоит отметить, что при решении задачи описания радиальной функции скелета использовался метод аппроксимации функции ортогональными многочленами Лежандра; а для решения задачи сравнения и вычисления степени различия форм фигур был разработан метод, основанный на парном выравнивании цепочек примитивов, кодирующих скелеты. Идея парного выравнивания берет начало в биоинформатике, где применяется для цепочек символов, кодирующих последовательности аминокислот. Оптимальное парное выравнивание вычисляется при помощи численного метода динамического программирования, для которого в данной работе определены оптимизационные критерии сходства цепочек примитивов.

При решении всех задач диссертационного исследования применялись системы имитационного моделирования MathCAD и Wolfram Mathematica. Программный комплекс методов и алгоритмов сравнения форм бинарных растровых изображений реализован на языке программирования высокого уровня C++ в соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования и принципом свободной последовательности подпрограмм, управляемых событиями, что позволяет расширять существующий функционал в связи с перспективами дальнейшей разработки темы. Для ускорения работы программного комплекса был предложен параллельный алгоритм вычисления функции парного сравнения цепочек примитивов, для реализации которого применялись технологии параллельного программирования OpenMP и библиотеки для работы с потоками C++11.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1 метод автоматического подбора адекватных параметров аппроксимации и регуляризации скелета с целью получения базового скелета бинарного растрового изображения,

2 метод беспризнакового описания базового скелета цепочкой примитивов с учетом радиальной функции скелета,

3 алгоритм вычисления оптимального парного выравнивания цепочек примитивов и построение функции сравнения двух изображений,

4 параллельный алгоритм вычисления оптимального парного выравнивания цепочек примитивов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных конференциях, семинарах и международных стажировках в 2012 – 2018 гг.

Конференции:

«Интеллектуализация обработки информации»: 9-я международная конференция (Черногория, г.Будва, 2012 г.), 10-я международная конференция (Греция, о.Крит, 2014 г.), 11-я международная конференция (Испания, г.Барселона, 2016 г.);

«Техническое зрение в системах управления» (г.Москва, 2013, 2014, 2015 гг.);

Conference of the International Federation of Classification Societies IFCS-2013 (г.Тилбург, Нидерланды, 2013 г.);

«Математические методы распознавания образов»: 16-я всероссийская конференция (г. Казань, октябрь 2013 г.), 17-я всероссийская конференция с международным участием (г. Светлогорск, Калининградская область, 2015 г.), 18-я всероссийская конференция с международным участием (г. Таганрог, 2017 г.);

Международная конференция по анализу сигналов и изображений International Conference on Image and Signal Processing ICISP-2014 (г.Шербур, Франция, 2014г.);

«Анализ изображений, сетей и текстов – АИСТ (“Analysis of Images Social Networks and Texts”-AIST)»: международная конференция (Россия, г.Екатеринбург, 2015, 2016 г.);

7-я международная конференция приложений и методов распознавания образов (7th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods ICPRAM 2018, г.Фуншал, о.Мадейра, Португалия, 2018 г.);

Международная конференция «СРТ-2015» (г.Пушино, Московская область, 2015 г.);

«Ломоносов-2013»: XX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (г.Москва, МГУ, 2013 г.);

Региональная молодёжная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодёжные инновации» (г.Тула, 2013, 2015 гг.);

XXI Региональная заочная магистерская конференция (г.Тула, ТулГУ, 2017 г.).

Стажировки:

Институт обработки изображений и прикладной информатики (IBaI) (г.Лейпциг, Германия, 2013 г.);

Тайбэйский национальный технологический университет (г.Тайбей, Тайвань, 2014 г.);

Международная летняя школа по компьютерному зрению (International Computer Vision Summer School – ICVSS, о. Сицилия, Италия, 2014, 2016 гг.).

Семинары:

Миддлсекский университет (г. Лондон, Великобритания, 2015 г.).

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором. В публикациях, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежат основные результаты, либо результаты исследований соискателя используются как составная часть более общего метода.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, 4 статьи в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus, 3 статьи и 12 публикаций тезисов докладов в сборниках трудов международных, всероссийских и региональных конференций, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, выполнен 1 отчёт о НИОКТР.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 90 наименований. Общий объем диссертации составляет 129 страниц машинописного текста, содержит 56 рисунков, 8 таблиц и 1 приложение.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность задачи сравнения форм бинарных растровых изображений на основе скелетизации, оценена степень разработанности темы, кратко сформулированы цель и задачи исследовательской работы, отмечены её научная новизна и практическая значимость, а также приведена структура диссертации.

В **первой главе** дается понятие скелетизации бинарного растрового изображения, перечисляются достоинства непрерывного подхода к скелетизации, обозначается проблема неустойчивости скелетного описания, подробно описываются способы его стабилизации – регуляризация, аппроксимация и склейка. На рисунке 1 показаны стадии процесса получения устойчивого скелета изображения.

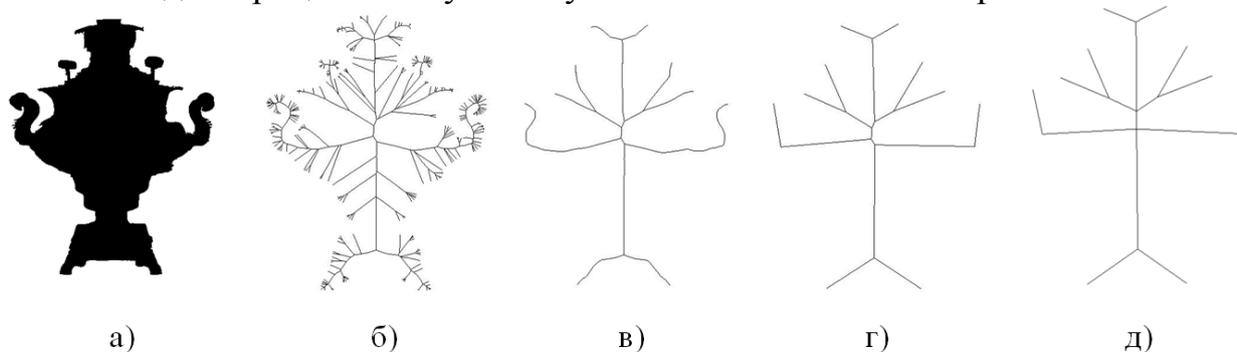


Рисунок 1 – Исходное изображение (а), его скелет (б), скелет после регуляризации (в), регуляризованный скелет после аппроксимации (г), аппроксимированный скелет после склейки (д)

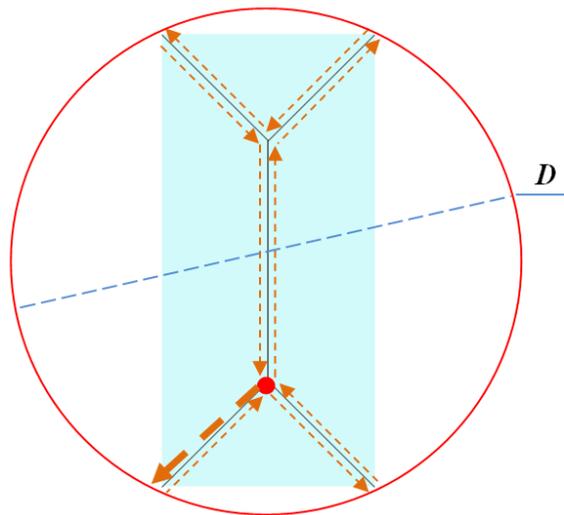
Приводится анализ существующих и предлагаются новые алгоритмы вычисления диаметра минимальной описанной около скелета окружности, который является масштабным множителем стабилизирующих скелет коэффициентов.

Во **второй главе** выполнен обзор существующих методов автоматического подбора коэффициента регуляризации скелета, приводятся достоинства и недостатки этих методов. Предлагается новый алгоритм вычисления диаметра минимальной описанной вокруг скелета окружности, являющегося масштабным множителем для параметров стабилизации скелета. Описываются разработанные в данной диссертации методы подбора коэффициентов регуляризации и аппрокси-

мации скелета на основе его ключевых характеристик: автоматический подбор набора коэффициентов и выбор одного коэффициента из целого множества.

**Третья глава** посвящена решению основных задач данного диссертационного исследования. Приводится краткий обзор существующих методов сравнения форм бинарных изображений, на основе которого делается вывод об актуальности данного исследования. Ставится главная задача исследования – без подбора признаков построить математически корректную процедуру парного сравнения скелетов.

Скелет фигуры может быть описан как цепочка примитивов, получаемая при обходе скелетного графа против часовой стрелки. Каждый примитив  $\omega$  представляет ребро скелета в процессе обхода и состоит минимум из двух нормированных значений:  $l$  – длины ребра скелета и  $\alpha$  – угла между текущим и следующим ребрами. Нормировка длины производится на диаметр минимальной окружности, описанной вокруг скелета, а нормировка угла – на  $2\pi$ . Таким образом, каждый примитив является двухкомпонентным вектором  $\omega = \{l, \alpha\}$ . Рисунок 2 наглядно иллюстрирует перечисленные выше понятия.



$\{0,29; 1\} \{0,29; 0,25\} \{0,29; 1\} \{0,29; 0,38\} \{0,48; 0,38\} \{0,29; 1\}$   
 $\{0,29; 0,25\} \{0,29; 1\} \{0,29; 0,38\} \{0,48; 0,38\}$

Рисунок 2 – Бинарное изображение, его скелет, множитель нормировки – диаметр минимальной описанной окружности, направление обхода скелета и цепочка примитивов

Описанный принцип кодирования скелета цепочкой двухкомпонентных примитивов не учитывает радиальную функцию скелета. Однако, если скелетная топология у изображений разных классов одинакова, например, их аппроксимированный скелет состоит всего из одного ребра, то такие изображения имеют совершенно одинаковое описание в рамках предложенной модели кодирования формы. Выдвигается предположение, что учет радиальной функции скелета должен стать ключом для решения этой проблемы и значительно повысить качество их дальнейшей классификации.

Простое решение проблемы состоит в учете радиальной функции только в вершинах скелета, но оно дает хороший результат только для изображений, у которых закономерность изменения ширины вдоль ребра не может быть интерпретирована как линейная. Для более сложных случаев предлагается метод, основанный на интерполяции радиальной функции скелета при помощи многочленов Лежандра, поскольку расстояние между радиальными функциями, заданными коэф-

коэффициентами Лежандра в ортогональном базисе интерполяционных функций, можно напрямую вычислять как евклидово расстояние между векторами их коэффициентов. Суть метода схематично проиллюстрирована на рисунке 3.

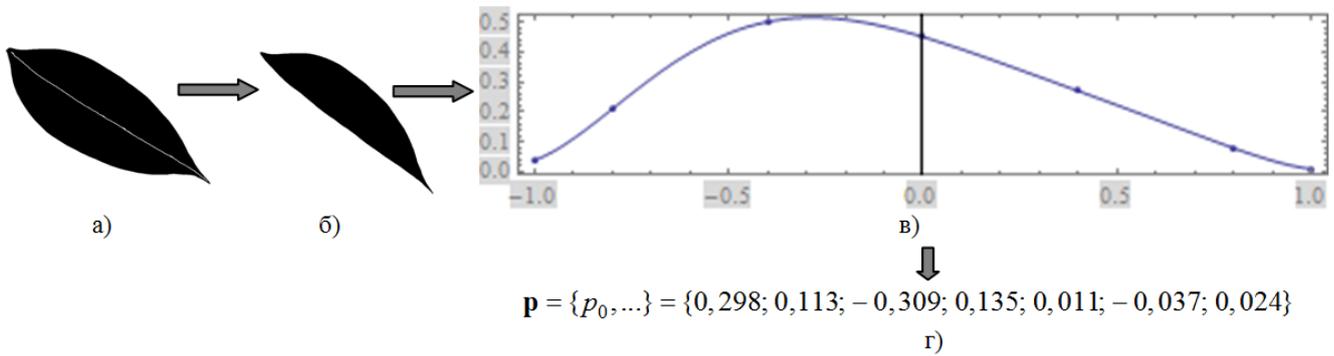


Рисунок 3 – Иллюстрация процедуры получения параметрического описания радиальной функции скелета: а) форма, б,в) инцидентный ребру при обходе контур, г) вектор коэффициентов Лежандра

Перед этапом аппроксимации скелета используем информацию о значении радиальной функции в каждой вершине скелетной ветви для интерполяции функции ширины и получения коэффициентов при полиномах Лежандра, либо (если количество вершин очень велико) оставляем только некоторое количество вершин, равномерно удаленных друг от друга. Предварительным этапом интерполяции функции ширины является масштабное отображение каждой ветви на интервал  $[-1,1]$ . В итоге, каждому ребру после аппроксимации будет сопоставлен вектор коэффициентов Лежандра фиксированной длины  $\mathbf{p} = \{p_0, \dots, p_{n-1}\}$  (обычно достаточно 4-7 коэффициентов), а в скелетный примитив вектор коэффициентов Лежандра войдет как третий компонент  $\omega = \{l, \alpha, \mathbf{p}\}$ .

Для вычисления меры различия между двумя цепочками, которые в общем случае могут состоять из разного количества примитивов, необходимо решить задачу поиска их оптимального парного выравнивания. Основным методом поиска оптимальных значений выравнивания является процедура динамического программирования, которая позволяет за известное минимальное количество вычислений получить требуемый результат.

Опишем суть парного выравнивания (элайнмента, англ. *alignment*) и способ его построения. Пусть задано множество примитивов  $\Omega$ . Пусть каждый примитив является, например, трехкомпонентным вектором  $\omega = \{l, \alpha, \mathbf{p}\}$ , где  $l$  – нормированная длина текущего ребра скелета,  $\alpha$  – нормированный угол между текущим и следующим ребрами,  $\mathbf{p}$  – вектор коэффициентов Лежандра. Пусть также имеются две последовательности примитивов (соответствующие двум скелетам), в общем случае разной длины, между которыми надо найти различие. Назовем одну из них базовой  $\mathbb{B}$ , вторую – ссылочной  $\mathbb{R}$ . Будем обозначать элементы базовой цепочки как  $b_1, \dots, b_N \in \Omega$ , а ссылочной – как  $r_1, \dots, r_K \in \Omega$ , где  $N$  – число элементов в последовательности  $\mathbb{B}$ ,  $K$  – число элементов в последовательности  $\mathbb{R}$ :

$$\mathbb{B} : b_1, \dots, b_N = \{l_1, \alpha_1, \mathbf{p}_1\} \{l_2, \alpha_2, \mathbf{p}_2\} \dots \{l_N, \alpha_N, \mathbf{p}_N\} \in \Omega,$$

$$\mathbb{R} : r_1, \dots, r_K = \{l_1, \alpha_1, \mathbf{p}_1\} \{l_2, \alpha_2, \mathbf{p}_2\} \dots \{l_K, \alpha_K, \mathbf{p}_K\} \in \Omega.$$

Примеры базовой и ссылочной цепочек для скелетов изображений, приведенных в таблице 1 (базовая соответствует скелету первого изображения, ссылочная – второго, длина векторов коэффициентов Лежандра равна 4):

– базовая цепочка  $\mathbb{B}$

$\{0.210, 1, (0.048, -0.407, 0.037, -0.021)\}$   $\{0.210, 0.477, (0.048, 0.407, 0.037, 0.021)\}$   
 $\{0.792, 1, (0.071, -0.172, -0.054, 0.054)\}$   $\{0.792, 0.477, (0.071, 0.172, -0.054, -0.054)\}$   
 $\{0.076, 1, (0.060, -0.956, 0.011, 0.0)\}$   $\{0.076, 0.141, (0.060, 0.956, 0.011, 0.0)\}$

– ссылочная цепочка  $\mathbb{R}$

$\{0.315, 1, (0.089, -0.300, -0.133, -0.016)\}$   $\{0.315, 0.563, (0.089, 0.300, -0.133, 0.016)\}$   
 $\{0.702, 1, (0.063, -0.187, -0.007, 0.022)\}$   $\{0.702, 0.437, (0.063, 0.187, -0.007, -0.022)\}$

Чтобы иметь возможность обозначать в выравнивании операции вставки и удаления, ссылочная цепочка расширяется путем введения дополнительных символов  $g = "-"$ , т.е. пропусков (gap), которые являются вспомогательными элементами, принадлежащими множеству  $\Omega$ ,  $g \in \Omega$ . В результате получаем расширенную ссылочную цепочку  $\mathbb{E}$  длиной  $\bar{K}$ , состоящую из элементов  $e_1, \dots, e_{\bar{K}} \in \Omega$ :

$$\mathbb{E} : g, r_1, g, r_2, g, \dots, g, r_k, g = e_1, \dots, e_{\bar{K}} =$$

$$= \{-\} \{l_1, \alpha_1, \mathbf{p}_1\} \{-\} \{l_2, \alpha_2, \mathbf{p}_2\} \{-\} \dots \{-\} \{l_k, \alpha_k, \mathbf{p}_k\} \{-\} \in \Omega.$$

В парном выравнивании каждый элемент базовой цепочки ссылается на один элемент расширенной ссылочной цепочки. Несколько элементов базовой цепочки могут ссылаться на один и тот же элемент расширенной ссылочной цепочки. *Вектором ссылок* будем называть вектор  $\mathbf{z} = \{z_t\}$ ,  $t = 1, \dots, N$ , где  $N$  – число элементов в базовой последовательности. Значение  $z_t \in \{1, \dots, \bar{K}\}$ , где  $\bar{K}$  – количество элементов расширенной ссылочной цепочки, будет определять номер элемента расширенной ссылочной цепочки, на который ссылается  $t$ -й элемент базовой последовательности.

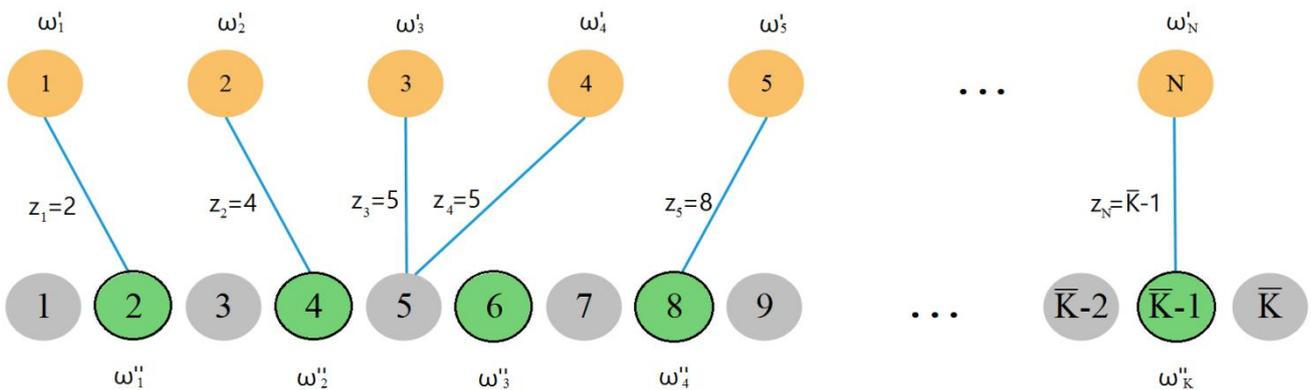


Рисунок 4 – Иллюстрация выравнивания базовой и расширенной ссылочной цепочек (элементы ссылочной цепочки выделены черным контуром)

Иллюстрация варианта выравнивания базовой и расширенной ссылочной цепочек, обозначенного вектором абсолютных ссылок  $\mathbf{z}$ , показана на рисунке 4. Верхний ряд элементов схематично обозначает пронумерованные примитивы базовой цепочки, нижний – примитивы расширенной ссылочной. Если какой-то элемент базовой цепочки ссылается на пропуск в расширенной ссылочной, это означает, что в выравнивании напротив элемента базовой цепочки становится пропуск.

Такая ситуация показана для элементов  $\omega'_3$  и  $\omega'_4$  на рисунке 4. Появление в выравнивании пропуска в базовой цепочке определяется ситуацией, когда на некоторый элемент расширенной ссылочной цепочки, не равный  $g$ , нет ни одной ссылки из базовой. Тогда в выравнивании напротив такого элемента ссылочной цепочки становится пропуск, как для элемента  $\omega''_3$  на рисунке 4.

Очевидно, что задачу поиска *оптимального выравнивания* можно представить как задачу поиска вектора абсолютных ссылок  $\hat{\mathbf{z}}$ , доставляющего минимум некоторой критериальной функции  $J(\mathbf{z})$ . Введем узловую функцию для двух примитивов из  $\Omega$ , которая отражает лишь взаимное различие между отдельными элементами последовательностей примитивов (ее узлами) и никак не регулирует их взаимного расположения. Такая функция  $d(\omega', \omega'')$  в случае, когда в примитивах не учитывается радиальная функция скелета, может иметь вид

$$d(\omega', \omega'') = (l' - l'')^2 + (\alpha' - \alpha'')^2.$$

В случае, когда радиальная функция скелета учитывается введением в примитив радиуса вписанной окружности с центром в соответствующей вершине скелета,  $d(\omega', \omega'')$  примет вид

$$d(\omega', \omega'') = (l' - l'')^2 + (\alpha' - \alpha'')^2 + (p' - p'')^2.$$

Если же радиальная функция скелета параметризуется векторами коэффициентов Лежандра в примитиве, различие ширины скелетных ребер будет выражаться через их коэффициенты как

$$f(\mathbf{p}', \mathbf{p}'') = \sum_{i=0}^{n-1} (p'_i - p''_i)^2,$$

а узловая функция  $d(\omega', \omega'')$  примет вид

$$d(\omega', \omega'') = (l' - l'')^2 + (\alpha' - \alpha'')^2 + f(\mathbf{p}', \mathbf{p}'').$$

Отметим, что все величины в выражениях  $d(\omega', \omega'')$  нормированы, и нет необходимости вводить дополнительные взвешивающие коэффициенты между слагаемыми. Хотя, возможно, в некоторых задачах будет разумно в большей степени учитывать, например, различие длин ребер, чем различие углов.

Применяя понятие абсолютной ссылки, функцию  $d(\omega', \omega'')$  можно представить как

$$\psi_t(z_t) = d(\omega'_t, \omega''_{z_t}),$$

где  $t \in \{1, \dots, N\}$ ,  $z_t \in \{1, \dots, \bar{K}\}$ .

Далее введем функцию связи между элементами цепочки примитивов. Критерий  $J(\mathbf{z})$  зависит от значений переменных вектора ссылок. Каждая такая ссылка должна обязательно указывать на некий существующий элемент в ссылочной цепочке. Это значит, что переменные  $z_t$  могут принимать значения из некоторого ограниченного диапазона целых чисел, который определяется длиной расширенной ссылочной цепочки:  $z_t \in \{1, \dots, \bar{K}\}$ .

Кроме того, ссылки не должны пересекаться, то есть не должны нарушать порядок следования элементов. Если ссылка указывает на некоторый элемент ссылочной последовательности, то последующая ссылка должна обязательно указы-

вать на этот или любой последующий элемент, но ни в коем случае на предыдущий:  $z_t \leq z_{t+1}$ .

Равенство  $z_t = z_{t+1}$  может быть только в том случае, если обе ссылки указывают на пропуск в расширенной ссылочной цепочке. Пропуск штрафуются положительной величиной  $c$ . Случаи нарушения вышеперечисленных условий будем штрафовать величиной, равной  $\infty$ .

Таким образом, функция связи примет вид

$$\gamma_t(z_{t-1}, z_t) = \begin{cases} \infty, & z_t < z_{t-1}, \\ \infty, & (z_t = z_{t-1}) \wedge (e_{z_t} \neq g), \\ c, & (z_t = z_{t-1}) \wedge (e_{z_t} = g), \\ c, & (z_t - z_{t-1} = 1) \wedge (e_{z_t} = g), \\ \sum_{j=z_{t-1}+1}^{z_t-1} c \cdot I(e_j \neq g), & \end{cases}$$

где  $t \in \{2, \dots, N\}$ ,  $I(\cdot)$  – индикаторная функция, возвращающая 1, если значение ее аргумента истинное, и 0 в обратном случае.

Дополнительно необходимо ввести еще две функции, которые штрафуют элементы ссылочной цепочки в начале и в конце выравнивания, которым противопоставлены пропуски, то есть элементы ссылочной цепочки, расположенные до первой ссылки (а также случай, когда первая ссылка указывает на пропуск) и после последней ссылки:

$$\gamma_1^*(z_1) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{z_1-1} c \cdot I(e_j \neq g) \\ c, & e_{z_1} = g \end{cases}, \quad \gamma_N^*(z_N) = \sum_{j=z_N}^{\bar{K}} c \cdot I(e_j \neq g).$$

Парно-сепарабельная целевая функция будет иметь следующий вид:

$$J(\mathbf{z}) = \sum_{t=1}^N \psi_t(z_t) + \sum_{t=2}^N \gamma_t(z_{t-1}, z_t) + \gamma_1^*(z_1) + \gamma_N^*(z_N).$$

Необходимо найти такой аргумент-вектор  $\hat{\mathbf{z}}$ , который минимизировал бы эту функцию  $\hat{\mathbf{z}} = \arg \min J(\mathbf{z})$ , для чего используется специальная процедура динамического программирования для минимизации парно-сепарабельных функций.

Чтобы построить функцию сравнения изображений, инвариантную к повороту, необходимо вычислить оптимальное выравнивание базовой цепочки и каждого из вариантов циклического сдвига ссылочной цепочки длины  $K$ , которое определяется вектором ссылок  $\hat{\mathbf{z}}^i$ , и соответствующее значение критерия  $J(\hat{\mathbf{z}}^i)$ ,  $i = 1, \dots, K$ . В качестве наилучшего варианта сравнения цепочек будет выбрано выравнивание, соответствующее минимальному значению критерия по всем полученным в результате циклических сдвигов ссылочной цепочки. На его основе вычисляется функция парного сравнения цепочек примитивов, а следовательно, и скелетов:

$$D(\mathbb{B}, \mathbb{R}) = \sqrt{\frac{1}{N+K} \min \{J(\hat{\mathbf{z}}^1), \dots, J(\hat{\mathbf{z}}^K)\}}.$$

Значение критерия нормируется на сумму длин базовой и ссылочной цепочек.

В случае максимального сходства сравниваемых цепочек функция парного сравнения дает значение  $D_{\min}(\mathbb{B}, \mathbb{R}) = 0$ . Такой случай возможен только для цепочек одинаковой длины ( $N = K$ ). Можно получить формулу для общего случая, чтобы оценить минимально возможное значение функции парного сравнения, которое может быть достигнуто для произвольных цепочек длины  $N$  и  $K$  при величине штрафа, равной  $c$ :

$$D_{\min_{NK}}(\mathbb{B}, \mathbb{R}) = \sqrt{\frac{1}{N+K} \cdot c \cdot |N-K|}.$$

В наихудшем же случае, если в сравниваемых цепочках ни один примитив не сопоставлен другому, функция будет давать значение, равное

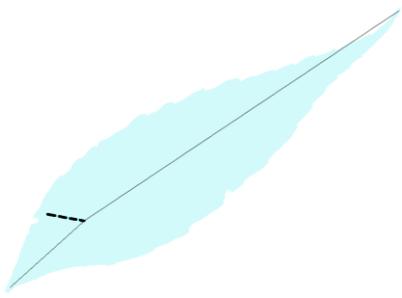
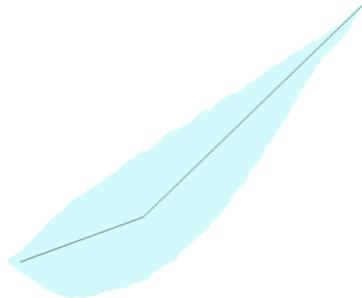
$$D_{\max}(\mathbb{B}, \mathbb{R}) = \sqrt{\frac{1}{N+K} \cdot c \cdot (N+K)} = \sqrt{c}.$$

Таким образом, максимально возможное для пары цепочек значение функции сравнения зависит только от величины применяемого в критерии штрафа на пропуск элементов в цепочке, следовательно, различие между сравниваемыми скелетами по предлагаемой мере никогда не превысит  $\sqrt{c}$ .

Экспериментальные исследования показывают, что при некоторых значениях штрафа  $c$  предложенная выше функция сравнения цепочек примитивов приобретает свойства метрики.

В таблице 1 приведен пример бинарных изображений листьев со скелетами, цепочки примитивов, кодирующие эти скелеты, оптимальное выравнивание цепочек, а также иллюстрация различий между скелетами согласно полученному выравниванию. Пропуски в ссылочной цепочке противопоставляются примитивам ребра скелета первого изображения, отсутствующего в скелете второго (на рисунке выделено пунктиром).

Таблица 1 – Изображения, их скелеты и парное выравнивание цепочек примитивов

	
<b>Базовая цепочка примитивов</b>	<b>Ссылочная цепочка примитивов</b>
{0.792; 1;(0.071, -0.172, -0.054, 0.054)}	{0.702; 1; (0.063, -0.187, -0.007, 0.022)}
{0.792; 0.477;(0.071, 0.172, -0.054, -0.054)}	{0.702; 0.437; (0.063, 0.187, -0.007, -0.022)}
{0.076; 1;(0.060, -0.956, 0.011, 0.0)}	-
{0.076; 0.141;(0.060, 0.956, 0.011, 0.0)}	-
{0.210; 1; (0.048, -0.407, 0.037, -0.021)}	{0.315; 1; (0.089, -0.300, -0.133, -0.016)}
{0.210; 0.477; (0.048, 0.407, 0.037, 0.021)}	{0.315; 0.563; (0.089, 0.300, -0.133, 0.016)}

Значение целевой функции, полученное для рассматриваемых фигур при  $c = 0, 2$ , равно  $D(\mathbb{B}, \mathbb{R}) = 0, 232$ .

В четвертой главе приведен вариант ускорения алгоритма сравнения скелетов путем распараллеливания. Обозначена проблема необходимости выполнения ряда циклических сдвигов одной из цепочек для получения наилучшего из возможных

выравниваний между ними, что обеспечивает инвариантность метода к повороту. Описан метод ускорения поиска наилучшего из выравниваний путем распараллеливания циклических сдвигов цепочки примитивов: для цепочки длиной  $K$  примитивов должно быть выполнено  $K - 1$  циклических сдвигов, при этом все  $K$  независимых операций сравнения цепочек должны быть распределены между несколькими параллельными ветвями (процессами или потоками) программы; внутри каждой из ветвей операции сравнения вариантов выполняются последовательно. Обоснован выбор наиболее подходящих методов распараллеливания с использованием технологии OpenMP и библиотек для работы с потоками стандарта языка программирования C++11.

В **пятой главе** излагаются результаты экспериментальных исследований разработанных методов и алгоритмов. Проведены экспериментальные исследования разработанных методов сравнения бинарных растровых изображений для модельных данных и для решения прикладных задач детектирования человеческой ладони в видеопотоке и классификации листьев растений. Экспериментальные исследования на базе листьев Flavia показали значительный прирост классификационной способности метода сравнения на основе функции с использованием коэффициентов Лежандра. Качество распознавания составило в среднем 82%, что является хорошим результатом для такой сложной базы листьев. В среднем сравнение двух бинарных фигур из базы Flavia занимает около 20 мс на современном компьютере, при этом базовые скелеты листьев растений большинства классов достаточно простые (состоят из 2–10 примитивов). Распараллеливание алгоритма сопоставления цепочек примитивов на современном стандартном персональном компьютере позволяет получить трехкратное ускорение процедуры сравнения для более сложных скелетов.

**В заключении** дана общая характеристика результатов работы.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В ходе исследования получены следующие основные теоретические и практические результаты:

1 систематизированы знания о параметрах регуляризации, аппроксимации и склейки скелетов изображений, разработан алгоритм автоматического подбора адекватных параметров аппроксимации и регуляризации скелета с целью получения базового скелета бинарного растрового изображения;

2 разработан и реализован метод описания базового скелета цепочкой примитивов, учитывающий радиальную функцию скелета. Предложено два способа учета радиальной функции скелета: а) только в узлах скелета и б) основанный на интерполяции радиальной функции ортогональными многочленами Лежандра. Полученное описание обладает свойством инвариантности к масштабу изображения и позволяет восстанавливать исходное изображение;

3 разработан и реализован алгоритм вычисления оптимального парного выравнивания цепочек примитивов и вычисления меры сравнения (различия) двух изображений. Поиск оптимального парного выравнивания ведется методом динамического программирования, для реализации которого предложены варианты узловой функции и функции связи в парно-сепарабельном критерии оптимальности. Реализована операция циклического сдвига одной из сравниваемых цепочек при-

митивов, благодаря которой целевая функция становится инвариантной к повороту фигуры;

4 разработаны и реализованы параллельные версии алгоритма парного выравнивания цепочек примитивов, позволяющие до трёх раз ускорить программную реализацию предложенного метода сравнения двух изображений на современном стандартном персональном компьютере.

Все полученные результаты прошли апробацию на научных и научно-технических конференциях и семинарах, как всероссийских, так и международных, с 2012 по 2018 гг. Они являются новыми и успешно применяются при решении ряда задач, таких как детектирование руки человека в видеопотоке и поиск зеркальной симметрии на бинарном изображении.

Предложенные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса сравнения бинарных растровых изображений на основе скелетного описания формы, представленного цепочками примитивов. Для программного комплекса было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Области применения программного комплекса могут являться: системы распознавания листьев растений по форме в обучающих приложениях, системы автоматической сортировки объектов на производственном конвейере, системы контроля доступа на предприятиях на основе идентификации личности по форме ладони.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Метод сравнения скелетов бинарных изображений опирается на процедуру парного выравнивания цепочек примитивов. Однако образуемая функция парного сравнения, хотя и является метрикой, не обеспечивает свойств более узкого класса метрик, а именно, так называемых евклидовых метрик (вложимых в линейное пространство) и не может быть напрямую использована в алгоритмах параметрического распознавания образов, например методе опорных векторов. Необходима разработка методов обучения распознаванию образов в случае произвольной метрики и апробация их в задачах сравнения бинарных растровых изображений, представленных скелетными описаниями. Таким образом, несмотря на значительный задел, задачу построения функции беспризнакового парного сравнения бинарных растровых изображений нельзя назвать полностью решенной.

Помимо объектов на изображениях, имеющих только внешний контур, существуют и такие морфологически сложные объекты, которые имеют не только внешний контур, но и содержат дыры, то есть имеют внутренние контуры. Скелет фигур с дырами содержит в себе циклы. Задача кодирования скелетов с циклами при помощи цепочек примитивов открыта и требует решения. Соответственно, и задача разработки алгоритма сравнения цепочек примитивов для скелетов с циклами и произвольных цепочек (описывающих как скелеты с циклами, так и без), остается открытой.

Представляет интерес задача анализа эволюционных морфологических изменений фигур (изменение размеров частей одной из сравниваемых фигур, появление новых деталей контура и пр.) и учет этих изменений (то есть эволюционной морфологической иерархии скелетов) в процедуре сравнения. Например, корректное сравнение фигур с шумовыми выступами скелета и таких же фигур без выступов: шумовые выступы разрывают ребро, из которого вырастают, на подребра. Таким образом, принятую сейчас стратегию сопоставления «примитив - прими-

тив» необходимо дополнить возможностью сопоставления «примитив - подцепочка примитивов».

Описание скелета цепочкой примитивов представляет собой, по сути, циклическую структуру, поскольку, независимо от точки начала обхода, формируется цепочка, которую можно преобразовать в цепочку с другим началом обхода посредством операции циклического сдвига. Столь, казалось бы, незначительная особенность организации структур данных приводит к многократному увеличению вычислительных затрат, необходимых для сравнения пары цепочек. С этой точки зрения задача существенно отличается от задач локального или локально-глобального строкового (линейного) выравнивания, решаемых обычно в биоинформатике. Поэтому остается актуальной задача разработки таких структур данных и/или методов работы с ними, которые позволяли бы осуществлять циклическое выравнивание цепочек, а не линейное выравнивание для каждого из вариантов циклического сдвига.

### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В 26-ТИ ПЕЧАТНЫХ РАБОТАХ, ОСНОВНЫМИ ИЗ КОТОРЫХ ЯВЛЯЮТСЯ:**

1. *Кушнир О.А., Середин О.С.* Функция парного сравнения скелетных графов, заданных цепочками примитивов // Известия Тульского государственного университета. Техн. науки. Вып. 2. Тула Изд-во ТулГУ, 2013. С. 197–207.

2. *Кушнир О.А.* Параметрическое описание радиальной функции скелета бинарного изображения для задачи сравнения форм // Вестник компьютерных и информационных технологий, № 2, 2016. С. 3–12.

3. *Копылов А.В., Середин О.С., Кушнир О.А., Грачева И.А., Ларин А.О.* Устойчивое детектирование ладони на изображениях на основе комбинирования информации о цвете и форме // Известия Тульского государственного университета. Техн. науки. Вып.11. Ч.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С.24–40.

4. *Федотова С.А., Середин О.С., Кушнир О.А.* Алгоритмы уточнения оси зеркальной симметрии, найденной методом сравнения подцепочек скелетных примитивов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып.11. Ч.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С.99–111.

5. *Кушнир О.А., Середин О.С.* Параллельные реализации алгоритма сравнения бинарных изображений на основе описания скелетов цепочками примитивов // Вестник компьютерных и информационных технологий, № 1, 2018. С. 24 – 33.

6. *Кушнир О.А.* Сравнение формы бинарных растровых изображений на основе скелетизации // «Машинное обучение и анализ данных», том 1, №3. М.: Вычислительный центр им. А.А.Дородницына РАН, 2012. С. 128–140.

7. *Кушнир О.А., Середин О.С.* Процедура оптимального парного выравнивания для сравнения скелетных графов, заданных цепочками примитивов // Интеллектуализация обработки информации: 9-я международная конференция. Черногория, г. Будва, 2012 г. Москва: ТОРУС ПРЕСС, 2012. С. 437–440.

8. *Кушнир О.А.* Вычисление меры парного различия скелетных графов посредством выравнивания цепочек примитивов // Ломоносов–2013: XX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых; секция «Вычис-

лительная математика и кибернетика»: Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013 г. : Сб. тезисов. М.: МАКС Пресс, 2013. С. 50–52.

9. *Kushnir O., Seredin O.* Parametric Description of Skeleton Radial Function by Legendre Polynomials for Binary Images Comparison // A. Elmoataz et al. (Eds.): ICISP 2014, LNCS 8509, Springer International Publishing Switzerland, 2014. P. 520–530.

10. *Кушнир О.А., Середин О.С., Степанов А.В.* Экспериментальное исследование параметров регуляризации и аппроксимации скелетных графов бинарных изображений // Машинное обучение и анализ данных. 2014. Т. 1, № 7. С. 817–827.

11. *Степанов А.В., Середин О.С., Кушнир О.А.* Автоматический подбор адекватных значений параметров регуляризации, аппроксимации и склейки скелетных графов бинарных изображений // Интеллектуализация обработки информации: 10-я международная конференция. Греция, о. Крит, 4–11 октября 2014 г.: Тезисы докладов. Москва: ТОРУС ПРЕСС, 2014. С. 156–157.

12. Методы и алгоритмы беспризнакового анализа скелетных графов бинарных изображений: отчет о НИОКТР (заключ.) / ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»; рук. Кушнир О.А. – Тула, 2015. – 19 с. – Исполн.: Кушнир О.А. – № ГР 01201454718.

13. *Kushnir O., Seredin O.* Shape Matching Based on Skeletonization and Alignment of Primitive Chains. // Analysis of Images, Social Networks and Texts. Fourth International Conference, AIST 2015, Yekaterinburg, Russia, April 9-11, 2015, Revised Selected Papers. Communications in Computer and Information Science, Vol. 542, Springer, pp. 123–136 (2015).

14. *Зенин Д.Г., Середин О.С., Кушнир О.А., Ларин А.О.* Детектирование кисти руки на основе одноклассовой цветовой сегментации и сравнения скелетов бинарных изображений // Техническое зрение в системах управления–2015, тезисы научно-технической конференции, Москва, ИКИ РАН, 17-19 марта, 2015 г., с. 97–98.

15. *Зенин Д.Г., Середин О.С., Кушнир О.А., Ларин А.О.* Комбинирование одноклассовой цветовой сегментации и скелетизации бинарных изображений для детектирования кисти руки // Математические методы распознавания образов: Тезисы докладов 17-й Всероссийской конференции с международным участием, г. Светлогорск, 2015 г. М.: Торус Пресс, 2015. С.176–177.

16. *Кушнир О.А., Середин О.С.* Определение зеркальной симметрии фигур на основе цепочек скелетных примитивов // Математические методы распознавания образов: Тезисы докладов 17-й Всероссийской конференции с международным участием, г. Светлогорск, 2015 г. М.: Торус Пресс, 2015. С.180–181.

17. *Kushnir O., Fedotova S., Seredin O., Karkishchenko A.* Reflection Symmetry of Shapes Based on Skeleton Primitive Chains // Fifth International Conference, AIST 2016, CCIS, Vol. 661. Springer, Cham, 2016. P. 293–304.

18. *Кушнир О.А., Середин О.С.* Программа сравнения бинарных растровых изображений на основе скелетного описания формы, представленного цепочками примитивов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611213, 25.01.2018.

19. *Kopylov, A., Seredin, O., Kushnir, O., Gracheva, I. and Larin, A.* Background-Invariant Robust Hand Detection based on Probabilistic One-Class Color Segmentation and Skeleton Matching // Proceedings of the 7th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM 2018). P. 503–510.



Подписано в печать 03.10.2018.  
Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 021А.  
Тульский государственный университет 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.  
Отпечатано в Издательстве ТулГУ 300012, г. Тула, пр. Ленина, 97, а