

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Ломова Никита Александровича
«Морфологические дескрипторы объектов переменной ширины
на цифровых изображениях»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.13.17 – «Теоретические основы информатики»

Проблематика диссертационной работы. Ряд современных задач компьютерного зрения можно свести к анализу формы плоских объектов. Подобные задачи возникают в оптическом распознавании символов, при анализе поз и жестов, видеонаблюдении, решении проблем кристаллографии, биометрии, минералогии. При этом в отсутствие информации о цвете и текстуре объекта особое значение принимают признаки, характеризующие размеры объекта в различных его частях. Предметом интереса в диссертационной работе выступает понятие ширины объекта, понятное интуитивно, но требующее соответствующего корректного математического формализма, и разработка способов вычисления признаков ширины для произвольной плоской фигуры. Так как объект может иметь различную ширину в различных своих частях, необходим подход, способный обеспечить оценку ширины фигуры в любой её точке. Другим желательным свойством является устойчивость признаков формы не только к простейшим преобразованиям, например, повороту, но и к гибким артикуляциям, то есть изгибам отдельных частей фигуры. Кроме того, растущая популярность систем компьютерного зрения в реальном времени и растущие объёмы данных для них требуют от процедур расчёта дескрипторов ширины вычислительной эффективности при сохранении точности в оценке признаков.

Актуальность темы исследования. Существующие методы вычисления признаков формы объектов, как правило, не обладают всеми перечисленными выше необходимыми достоинствами, и это создаёт потребность в разработке новых математических моделей и алгоритмов для расчёта признаков ширины. Предлагаемый в диссертации подход к оценке ширины объекта основан на определении ширины фигуры в точке как радиуса максимального покрывающего точку круга, целиком вписанного в фигуру. Центры таких кругов лежат на скелете, представляющем собой множество срединных осей изображения, а их размеры задаются радиальной функцией, определённой в точках скелета. При этом существуют высокоэффективные алгоритмы вычислительной геометрии, позволяющие представить скелеты в виде композиции непрерывных линий, однако алгоритмы оценки ширины с помощью непрерывных скелетов до сих пор не были разработаны в достаточной мере. Этот факт определяет актуальность темы и задачи исследования, а также выбранный подход к достижению поставленных целей.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

Во введении обозначена актуальность темы, описаны цели и задачи исследования, дан общий обзор способов описания ширины плоского объекта – набором расстояний между точками контура, на основе принципов математической морфологии, с помощью скелетного представления формы. В результате анализа этих способов намечены контуры подхода к решению поставленных задач.

В первой главе рассматривается общий подход к описанию интегральной ширины плоской фигуры, основанный на последовательном преобразовании фигуры с помощью операций математической морфологии и позволяющий охарактеризовать ширину в каждой точке фигуры. Отмечены проблемы с формализацией морфологических операций при переходе к дискретному представлению формы в виде матриц точек и как решение предлагается описание формы в виде областей, ограниченных непрерывными кривыми, то есть переходом к *непрерывной морфологии*. Сделан обзор методов, работающих с формой в таком представлении с помощью приёмов вычислительной геометрии. Описаны основы непрерывной морфологии бинарных изображений, предложенной Л.М. Местецким, позволяющей обеспечить переход от дискретного представления формы в виде объекта бинарного изображения к непрерывному гранично-скелетному представлению. В конце главы рассмотрен вопрос соответствия существующих методов вычисления ширины по непрерывному скелету принципам гранулометрии, выдвинутым в рамках математической морфологии.

Во второй главе диссертации вводится понятие дискового покрытия (объединения всех вписанных кругов фигуры достаточно большого размера) и функции морфологической ширины, выражающей зависимость площади покрытия от размера диска. Принцип анализа формы дискового покрытия основан на рассмотрении бициклов – множеств, получающихся в результате объединения кругов с центрами на одном и том же ребре скелета. Показано, что площадь дискового покрытия представляется в виде объединения собственных областей бициклов (подобластей диаграммы Вороного) и секторов концевых кругов бициклов с радиусом, равным радиусу покрытия. Так как в худшем случае общее число пересечений между секторами может расти по числу рёбер экспоненциально, возникает задача поиска «существенных» пересечений, учёт которых достаточен при вычислении площади покрытия. Такие пересечения создаются смежными бициклами, которые определяются на основе понятия «опорного» пути, соединяющего в скелете центры их меньших концевых кругов. Для оценки числа смежных бициклов в дисковом покрытии доказана теорема, заключающая, что их число не превышает числа локальных минимумов радиальной функции по скелету. Оценка числа локальных минимумов, в свою очередь, производится на основе анализа свойств скелета с монотонными рёбрами как ориентированного графа и как двойственного графа диаграммы Вороного множества сегментов границы фигуры. Так как тройных существенных пересечений между секторами не возникает, структуру пересечений можно представить в виде графа. Предложены два альтернативных алгоритма построения искомого графа – в результате последовательного локального перестроения в окрестности вершин скелета и построения «с нуля» как подграфа триангуляции Делоне центров концевых кругов. Эти алгоритмы в сочетании с доказательством достаточности учёта только смежных бициклов представляют собой основной результат главы.

Третья глава посвящена разработке модификаций дескриптора морфологической ширины. Выделяются классы задач, для решения которых использование площади дискового покрытия оказывается неоправданным. Для каждого из них предлагается обобщение модели дискового покрытия, позволяющее добиться вычисления признаков ширины при дополнительных условиях. Среди результатов главы стоит выделить теорему о монотонности преобразования дискретной сцены к эквивалентной ей непрерывной, позволяющую заключить, что такое преобразование сохраняет вложенность множеств. Эта теорема имеет значение не только для данного исследования, но и для расширения

принципов непрерывной морфологии на случай не только бинарных, но и полутоновых изображений. Также следует отметить простой и эффективный метод вычисления Distance Transform, основанный на том свойстве, что линии скелета разбивают внутренность фигуры на ячейки Вороного сайтов границы. Предложен метод измерения дискового покрытия в виде вычисления его моментов, отражающих распределение ширины объекта в пространстве, для всех примитивных областей, вносящих вклад в вычисление момента, получены точные аналитические формулы. Представлены способы нормализации моментов дискового покрытия, обеспечивающие инвариантность к параллельному переносу, масштабированию и повороту.

В заключительной, **четвёртой, главе** представлены примеры решения практических задач на основе разработанных методов – распознаванию компьютерных шрифтов из обширной базы и компьютерной морфометрии плоских червей-планарий. Предложен метод идентификации шрифта по изображению текста, основанный на вычислении линейной комбинации расстояний от диаграмм ширины отдельных букв на изображении-запросе до эталонных диаграмм. Для решения задач использована модель дискового покрытия, предложенная в главе 1, а также дескрипторы морфологических моментов и частной морфологической ширины, описанные в главе 2, что позволяет сделать вывод – в рамках практических задач может оказаться полезной как основной дескриптор, так и его модификации, что оправдывает идею разработки дескрипторов формы, «производных» от дискового покрытия. Приведены оценки быстродействия методов, согласующиеся с теоретическими оценками, данными в предыдущих главах и демонстрирующие значительный выигрыш в скорости от использования полностью непрерывного подхода к описанию форм.

В заключении подводятся итоги работы и отмечаются перспективы дальнейших исследований.

Основные результаты диссертации и их научная новизна. В диссертации предложена и исследована модель дискового покрытия многоугольной фигуры, позволяющая описать объединение бесконечного множества вписанных кругов фигуры с помощью простых геометрических областей, связанных с отдельными рёбрами скелета. Впервые предложен алгоритм точного расчёта площади покрытия, показано, что хотя расчётную задачу нельзя полностью свести к вычислению площадей отдельных примитивных областей, анализ пересечений может быть значительно упрощён и сведён к анализу парных пересечений областей рёбер, в некотором смысле ближайших. Определён критерий для выявления таких пар рёбер и предложены два алгоритма их поиска.

Предложены модели и алгоритмы для определения локальных характеристик ширины объекта, позволяющие описать ширину сегмента фигуры и ширину фигуры в точке. Предложена модель системы дисковых покрытий многоугольной фигуры, представляющая собой набор вложенных дисковых покрытий и позволяющая описать ширину объектов полутонного изображения. Разработан алгоритм вычисления моментов дискового покрытия, основанный на аналитическом интегрировании полиномиальных и тригонометрических функций по примитивным областям покрытия.

Разработаны оригинальные методы решения практических задач – распознавания компьютерных шрифтов по образцу текста и, оценки степени регенерации плоских червей-планарий, использующие предложенные методы оценки ширины.

Общую новизну результатов обеспечивает представление всех объектов интереса и алгоритмов их преобразования в терминах непрерывной математической морфологии многоугольных фигур.

Теоретическая значимость работы заключается в формализации понятий переменной ширины объекта сложной формы, сегмента и точки объекта, соответствующих традиционным требованиям математической морфологии, и позволяющие представить результаты морфологических преобразований формы с помощью её медиального представления. Предложенные определения ширины согласованы между собой. Разработаны математические модели для описания ширины многоугольной фигуры на базе введённого формализма, позволяющие свести вычисление признаков ширины к реализации точных аналитических формул. Исследованы свойства предложенных моделей, обеспечивающие создание высокоэффективных алгоритмов вычисления признаков ширины и позволяющие избежать избыточных вычислений.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечивается корректностью постановок задач исследования и строгим доказательством теорем, лежащих в основе разработанных методов и алгоритмов. Выбранные подходы к решению поставленных задач обоснованы глубокой проработкой литературы по теме исследования. Заявленные свойства методов, включая оценки вычислительной сложности, подтверждаются экспериментальной проверкой как на модельных данных, так и в ходе решения реальных практических задач.

Практическая значимость работы состоит в получении программной реализации всех разработанных методов и их применения для решения реальных практических задач компьютерного зрения. Разработанные методы значительно превосходят существующие аналоги по быстродействию и могут быть использованы для обработки больших массивов изображений в системах компьютерного зрения реального времени. Предложен ряд модификаций основной модели, позволяющих вычислять дескрипторы ширины в различных условиях в случае различных постановок задач – работать как с бинарными, так и с полутоновыми входными данными, учитывать при необходимости пространственное распределение ширины и т.д. Это позволяет при практическом применении методов подбирать их свойства в зависимости от требований задачи и разрабатывать новые дескрипторы формы на их основе, например, на основе мультимодального подхода.

Замечания к работе. К замечаниям по работе можно отнести недостаточную разработанность раздела о мультимодальных дескрипторах формы (Раздел 3.3). Явно не подтверждена асимптотика предложенных алгоритмов, приведена только оценка для худшего случая, также отсутствует экспериментальное подтверждение асимптотики предложенных методов построения графа смежных рёбер. При общем высоком качестве текста диссертации встречаются незначительные опечатки и недочёты (напр., стр. 157, отсутствует закрывающаяся скобка в формуле без номера внизу стр.147), на рис. 4.7 неочевидное обозначение изменяющихся с ростом планарии величин – радиуса и площади, отсутствует явная ссылка на Таблицу 4.

По результатам диссертации опубликованы 12 работ, 5 из которых соответствуют требованиям п. 12 Положения о присуждении учёных степеней. Результаты работы неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях и научных семинарах. Автореферат диссертации, опубликованные статьи и тезисы докладов с достаточной полнотой отражают содержание диссертационной работы.

Работа полностью соответствует требованиям ВАК РФ (п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.17 – «Теоретические основы информатики», а сам автор заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры информационной безопасности
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Тульский государственный университет»
<http://tsu.tula.ru/>

Адрес: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92
Тел.: +7-4872-25-79-40, +7-910-942-81-96
E-mail: oseredin@yandex.ru

Calvin

26 ноября 2020 г.

Подпись Середина О.С. заверяю



Ученый секретарь
Ученого совета ТулГУ Лосева Л.И.