

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. **Визильтера Юрия Валентиновича**
на диссертационную работу **Ершова Егора Ивановича**
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
на тему: “Быстрое преобразование Хафа как инструмент анализа
двумерных и трехмерных изображений в задачах поиска
прямых и линейной кластеризации” по специальности
05.13.17 - “Теоретические основы информатики”.

При решении многих практических задач требуется автоматически выделять на цифровых изображениях различные объекты или их части. Как правило, объекты искусственного происхождения, в отличие от естественных объектов, ограничены гладкими поверхностями, чаще всего – плоскостями, что порождает на изображениях прямолинейные элементы. В связи с этим автоматическое выделение линейных особенностей в двумерных и трехмерных массивах является значимым направлением компьютерного и технического зрения, начиная с 1950-х гг. За это время для решения подобных задач был предложен целый ряд принципиально различных подходов – от локального прослеживания связных контуров, сборки отрезков, подбора моделей на основе консенсуса случайных подвыборок (RANSAC) до глобальной оптимизации моделей на основе разреза графов и т.п. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от области применения и требований конкретных систем технического зрения, но единой методики поиска линейных особенностей, которая была бы признана оптимальной для всех приложений, до сих пор не создано. В связи с этим разработка новых методов выделения линейных особенностей является несомненно **актуальной задачей.**

В диссертации Ершова Е.И. рассматривается и подробно исследуется

один из таких методов, восходящий к подходам на основе преобразования Радона и преобразования Хафа. При этом особый интерес представляет то, что в центре внимания находится связь между искомыми линейными объектами как непрерывными многообразиями и их дискретными представлениями в виде диадических паттернов (ДП). За счет свойств используемых диадических паттернов автору удается осуществить построение быстрых алгоритмов поиска особенностей заданного класса. Данный подход основан на ранее предложенных идеях, однако Е.И. Ершов последовательно, оригинально и интересно развивает их в своем диссертационном исследовании. Кроме того, он применяет их и к другим классам задач, в которых такие методы ранее не находили применения.

В работе автором получен ряд следующих **новых и оригинальных результатов**:

- получено и обосновано аналитическое (а не рекуррентное, как ранее) выражение для координат ДП;
- установлена зависимость оценки ортогональной ошибки ДП аппроксимации геометрической прямой от размера изображения;
- показано, что для любой пары пикселей на изображении найдется проходящий через них ДП;
- предложены алгоритмы быстрого преобразования Хафа (БПХ) для трёхмерных изображений;
- предложен и исследован метод приближенного вычисления М-оценок с использованием БПХ в задаче ортогональной линейной регрессии;
- предложен и исследован метод линейной бинарной кластеризации с помощью БПХ для обобщённого метода глобальной бинаризации Отсу.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертации обеспечивается корректностью используемых математических формулировок и доказательств, а также согласованностью теоретических выводов и данных численных экспериментов.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения разработанных методов в бортовых системах технического зрения (СТЗ). В частности, при разработке программного обеспечения СТЗ автономных летательных аппаратов, где обработку поступающих видеоизображений требуется вести в реальном времени при жестких ограничениях на используемые вычислительные ресурсы.

Основное содержание диссертации. Во введении указаны актуальность темы работы, ее цель, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость, степень достоверности результатов работы, и краткое содержание глав диссертации. Приведены основные положения, выносимые на защиту, а также список конференций, на которых была произведена апробация работы.

В первой главе содержится обзор алгоритмов вычисления преобразования Хафа и преобразования Радона, а также способов их применения. Изложены подходы к ускорению и увеличению точности стандартного преобразования Хафа, описанного Р. Дудой и П. Хартом. Вводятся понятия «диадический паттерн», «диадическая плоскость» и «диадическая прямая», а также исследуются их свойства. Исследуются свойства быстрого преобразования Хафа для двумерного случая, предлагаются новые алгоритмы быстрого преобразования Хафа для плоскостей и прямых на трёхмерных изображениях. Для всех предложенных алгоритмов приведены подробные описания и реализующий их программный код.

Следует отметить, что содержание первой главы связано с рядом интересных вопросов о связи асимптотических характеристик алгоритмов быстрого вычисления преобразования Радона и структуры соответствующих дискретных паттернов. Помимо этого, в главе поставлен ряд интересных вопросов о свойствах структур диадических паттернов для различных размерностей. Рассмотренный вопрос о полноте системы

паттернов является существенным в плане исследования изменения свойств прямых при переходе от непрерывного случая к дискретному.

Во второй главе описано развитие метода поиска прямых на изображении, предложенного Н. Кирьянти и А. Брукштейном, для поиска прямых и плоскостей в трёхмерном случае. Поиск осуществляется путём вычисления М-оценки на гистограмме с использованием соответствующего быстрого преобразования Хафа. Автор предлагает два различных метода вычисления М-оценки с разной очередностью операции свёртки и вычисления БПХ. Возможность выполнять свёртку с Хаф-образом позволяет адаптивно подбирать параметры аддитивного координатного шума. Для предложенных алгоритмов приведены оценки трудоёмкости и точности вычисления М-оценки.

В третьей главе описаны методы быстрого линейного бинарного разделения гистограмм на два класса. Подобные методы находят применение в задачах глобальной бинаризации и основаны на использовании техники предварительного подсчета кумулятивных сумм в БПХ, что позволяет вычислять за постоянное время для заданных параметров гиперплоскости значение любого критерия, выразимого через меры, заданные на гистограмме. Предложены оценки трудоёмкости предварительного подсчета, а также метод оценки точности полученного результата при известных входных данных.

В приложении диссертации детально описаны свойства диадических паттернов, приведено доказательство теоремы о верхней оценке ортотропной ошибки аппроксимации непрерывной прямой диадическим паттерном, а также приведен ряд вычислительных экспериментов по оцениванию формы распределения ошибки аппроксимации.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации. Диссертация отвечает требованиям п. 9 “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, утвержденного Постановлениями

Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 и 21.04.2016 №335. Тематика и содержание диссертационного исследования соответствуют паспорту специальности 05.13.17 - «Теоретические основы информатики».

В качестве **замечаний** по содержанию и оформлению данной работы можно указать следующие:

1. Рассматриваемые в работе алгоритмы правильнее было бы называть алгоритмами вычисления дискретного преобразования Радона, а не преобразования Хафа, поскольку преобразование Хафа подразумевает не только использование определенного выходного параметризованного пространства гипотез, но и механизм статистического голосования информативных элементов изображения в пользу этих гипотез по принципу «снизу вверх». Заметим, что в некоторых из рассматриваемых автором задач (например, в третьей главе) интересно было бы рассмотреть именно не Радон-подобные, а Хаф-подобные алгоритмы (скажем, голосование пар точек как диполей разных классов в пользу разделяющей плоскости), но такие алгоритмы в работе не рассматриваются.

2. В первой главе желательно было бы прояснить вопрос о 3-полноте полной системы диадических плоскостей.

3. Во второй главе диссертации при описании зависимости размера носителя ядра свёртки от характеристик аддитивного шума не рассматривается влияние распределения ортотропной ошибки вдоль диадического паттерна. Желательно было бы такой вопрос рассмотреть.

4. Вообще подход, развиваемый автором, настолько потенциально богат, что сразу напрашиваются различные варианты обобщений и модификаций полученных в работе результатов. В частности, крайне интересно было бы исследовать алгоритмы таких преобразований с точки зрения свойств порождающего паттерна. Если сравнить алгоритмы на основе диадических паттернов и остатковые алгоритмы (типа алгоритмов Брезенхема), то можно показать, что классы порождаемых алгоритмов

будут различными. Т.е. свойства порождаемых алгоритмов, видимо, могут быть напрямую выражены через геометрические свойства порождающих паттернов. Причем аналогичные исследования можно произвести не только применительно к прямым/плоскостям, но и применительно к другим семействам кривых и поверхностей (в духе обобщенных и модифицированных преобразований Хафа, развитых Баллардом и Дэвисом).

5. В теоретическом плане возникает вопрос о том, как диадические прямые связаны с диадическими плоскостями. С одной стороны, интересно было бы исследовать, какие аналоги геометрических свойств непрерывных линейных многообразий сохраняются после их представления дискретными паттернами. С другой стороны, это важно в свете упомянутой выше связи между геометрией опорных паттернов и свойствами порождаемых дискретных преобразований. В частности, относительно диадических паттернов желательно было бы прояснить следующее: как соотносятся объединение всех компланарных диадических прямых и соответствующая диадическая плоскость.

6. Также представляется, что в рамках развиваемого подхода можно использовать учет структуры разброса диадического паттерна для улучшения точности вычисляемых М-оценок за счет взвешенного усреднения измерений по ортогональным отклонениям элементов ДП.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы. Работа производит целостное впечатление, выполнена на хорошем научном уровне, содержит решение актуальной задачи и ряд доказанных математических утверждений. Описанные выше оригинальные результаты работы не имеют аналогов в известных оппоненту публикациях, т.е. являются новыми научными результатами. Содержание диссертации в достаточной степени опубликовано в научной печати – в 3 статьях в журналах из перечня ВАК (1

из Web of Science). Результаты работы прошли апробацию на 6 международных конференциях (4 из Web of Science).

В целом диссертационная работа «Быстрое преобразование Хафа как инструмент анализа двумерных и трехмерных изображений в задачах поиска прямых и линейной кластеризации» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне на актуальную тему, содержащую новые научные результаты, имеющие существенное значение для анализа изображений и компьютерного зрения, и отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Ершов Егор Иванович – заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.17 – “Теоретические основы информатики”.

Официальный оппонент,

начальник подразделения ФГУП «ГосНИИАС»,

д.ф.-м.н., профессор РАН

Визильтер Юрий Валентинович

«15» 03 2019 г.

Подпись Визильтера Ю. В. заверяю

Ученый секретарь ФГУП «ГосНИИАС»,

д.т.н., профессор

Мужичек Сергей Михайлович

«15» 03 2019 г.



Визильтер Юрий Валентинович – доктор физико-математических наук по специальности 05.13.17, старший научный сотрудник, профессор РАН, начальник подразделения "Системы интеллектуального анализа данных, технического зрения, улучшенного и синтезированного видения" Федерального государственного унитарного предприятия "Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем" (ФГУП "ГосНИИАС").

г. Москва, ул. Викторенко, 7, тел.: (499) 157-94-98, e-mail: viz@gosniias.ru.