

ХМЕЛЁВ Ростислав Викторович

**Обнаружение и анализ объектов  
на бинарных изображениях с использованием  
модификаций расстояния Хаусдорфа  
и полигональной аппроксимации контуров**

Специальность 05.13.18

*Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ*

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении  
высшего профессионального образования  
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. академика С.П. Королева  
и в Учреждении Российской академии наук  
ИНСТИТУТ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАН (г. Самара)

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Казанский Николай Львович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Кузнецов Павел Константинович

кандидат технических наук, доцент  
Гашников Михаил Валерьевич

**Ведущая организация:** ГОУ ВПО Уфимский государственный  
авиационный технический университет

Защита состоится 27 марта 2009 г. в 12 часов

на заседании диссертационного совета Д 212.215.05, созданного при  
ГОУВПО Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева

по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО Самарский госу-  
дарственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

Автореферат разослан 25 февраля 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_ Калентьев А.А.

## Общая характеристика работы

Диссертация посвящена разработке методов обнаружения и анализа объектов на бинарных контурных изображениях, выделяющихся из окружающего контекста благодаря своим геометрическим свойствам. Методы, рассматриваемые в диссертации, сводятся к измерениям геометрических расстояний между точками изображений. Исследуются два основных подхода к решению поставленной задачи – а) обнаружение с помощью модификаций расстояния Хаусдорфа объектов, геометрически близких к произвольным эталонам, задаваемым битовыми масками, и б) построение и анализ полигональных аппроксимаций контура объекта.

**Актуальность проблемы.** С начала эпохи цифровой обработки информации и до наших дней актуальной остается проблема распознавания изображений. Известно, что самая важная информация о форме содержится в контурах объектов. Многие объекты реального мира могут быть узнаны по изображениям их контуров, без использования исходных полутоновых изображений, поэтому алгоритмы распознавания чаще всего ориентированы на работу с контурными изображениями или бинарными изображениями, близкими к контурным (с толщиной линий много меньше размеров исследуемых особенностей).

В последние годы становится все более популярным предложенный в 1993 году Хаттенлохером, Кландерманом и Руклиджем подход к обнаружению объектов, геометрически близких к эталонам, основанный на взаимном отклонении множеств элементов объекта и эталона (модификациях расстояния Хаусдорфа). Серьезный недостаток этого подхода – большой объем вычислений, который осложняет использование модификаций расстояния Хаусдорфа в приложениях реального времени, поэтому актуальной проблемой является оптимизация вычислений. Особенностью метода является возможность геометрического отсечения шума, окружающего объект, однако для решения этого вопроса не было предложено формальных правил, соответственно, актуальной проблемой является также формализация методики построения геометрических отсечений.

Область применения алгоритмов обнаружения эталонов ограничена главным образом распознаванием плоских искусственных объектов с незначительными вариациями формы, в то время как большинство объектов реального мира, во-первых, не являются плоскими, во-вторых, имеют варьруемую форму и, следовательно, могут эффективно распознаваться только методами структурного анализа. Поэтому еще одним актуальным направлением в распознавании образов является выделение *структурных геометрических элементов* изображений, и вторым вопросом, рассматриваемым в диссертации, был анализ геометрии контуров, представляемых в виде контурных цепей.

Большинство объектов реального мира можно отнести к каким-либо классам, причем объекты внутри класса различаются мелкими деталями, а объекты разных классов – крупными, чтобы классифицировать объект, нужно построить его упрощенную модель, состоящую только из крупных деталей. Существует несколько популярных подходов к построению упрощенных моделей контуров, например, основанные на поиске изломов в контуре (Розенфельд, 1973), на аппроксимации фрагментов контура аналитическими кривыми (Хох, 1962, Розенфельд, 1969, Дуда, Харт, 1972) и полигональной аппроксимации (Рэймер, 1972;

Дуглас, Паукер, 1973), в которой варьируется либо количество узлов аппроксимации, либо их положение. Недостатками алгоритмов поиска изломов являются сложность настройки параметров и неискоренимые ошибки – пропуск изломов и/или нахождение ложных изломов, вариация параметров увеличивает количество ошибок либо первого, либо второго рода. Недостатком алгоритмов аналитической аппроксимации фрагментов является то, что реальные контура часто плохо описываются ограниченным набором аналитических функций.

Алгоритмы итеративной полигональной аппроксимации интенсивно исследовались в течение последних 30 лет, и их известно более сотни, но такое их количество говорит скорее о том, что они по разным причинам не устраивают исследователей, в первую очередь, часто пропускают изломы контура.

**Цель работы:** разработка методов обнаружения и анализа объектов на бинарных изображениях с использованием модификаций расстояния Хаусдорфа и полигональной аппроксимации контуров.

**Задачи работы:**

1. Разработка информационной технологии обнаружения с помощью модификаций расстояния Хаусдорфа объектов на бинарных изображениях с высоким уровнем шума.
2. Разработка эффективных методов построения полигональных аппроксимаций контура объекта, оптимизируемых для наилучшей локализации изломов контура.
3. Разработка программного комплекса для распознавания номеров в системах технического зрения.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана информационная технология обнаружения объектов на изображениях с высоким уровнем шума, сочетающая использование модификаций расстояния Хаусдорфа и близких к эталону значимых областей, формализована методика построения значимых областей.
2. Разработано две модификации алгоритмов итеративной аппроксимации замкнутых контурных цепей, использующие в качестве критерия оптимизации максимум периметра аппроксимирующего многоугольника.
3. Разработан оригинальный алгоритм слияния по локальным минимумам для итеративной аппроксимации замкнутых контурных цепей, использующий в качестве критерия оптимизации максимум периметра аппроксимирующего многоугольника.
4. На основе алгоритмов слияния и трех алгоритмов локализации изломов контура разработан метод получения оценки соответствия углов аппроксимирующего многоугольника и изломов контура, позволяющий обнаруживать изломы контура с разной степенью детализации.

**Практическая ценность результатов работы.** Разработаны низкоуровневые технологические оптимизации вычисления модификаций расстояния Хаусдорфа, существенно повышающие скорость вычислений. Технология повышения помехоустойчивости может использоваться в реальных задачах обнаружения объектов. Алгоритмы итеративной аппроксимации многоугольников могут использоваться для выявления геометрических структурных элементов в

широком спектре задач анализа контурных изображений. Программный комплекс системы технического зрения для распознавания железнодорожных цистерн внедрен и успешно эксплуатируется с июня 2004 года на предприятии ООО «Самара-терминал», г. Сызрань.

***Основные положения диссертации, выносимые на защиту:***

1. Технология повышения помехоустойчивости обнаружения с помощью модификаций расстояния Хаусдорфа объектов, геометрически близких к эталонам, задаваемым битовыми масками.
2. Семейство алгоритмов итеративной аппроксимации многоугольников, использующих критерий максимума периметра.
3. Метод получения оценок соответствия углов аппроксимирующего многоугольника и изломов контура.
4. Программный комплекс системы технического зрения для распознавания номеров железнодорожных цистерн.

***Реализация результатов работы.*** Технология применения значимых областей, оптимизации вычисления бинарно-целочисленных корреляций, алгоритмы итеративной аппроксимации и метод оценок соответствия углов и изломов применялись в задаче распознавания номеров железнодорожных цистерн.

***Апробация работы.*** Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- 5-я международная конференция «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (РОАИ-5), Самара, 2000.
- Международная конференция "Automation, Control and Information Technology", (АСИТ-2002), Новосибирск, 2002.
- 7-я междунар. конференция «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (РОАИ-7), Санкт-Петербург, 2004.
- 6-ой всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике, Сочи, октябрь 2005.
- Всероссийский семинар по моделированию, дифракционной оптике и обработке изображений, Самара, июль 2006.

***Публикации.*** По теме диссертации опубликовано 12 статей (из них 10 в изданиях, рекомендованных ВАК), 3 тезиса докладов на российских и международных конференциях и 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ. ***Объем и структура диссертации.*** Диссертация состоит из 3 глав, изложена на 118 страницах, содержит 88 рисунков и библиографический указатель из 116 источников.

**Краткое содержание диссертации**

***Первая глава*** диссертации посвящена технологии сравнения бинарных объектов и эталонов, основанной на модификациях расстояния Хаусдорфа, использующих идеологию взаимной близости множеств.

***В пункте 1.1*** описан базовый принцип сравнения объекта и эталона с помощью модификаций расстояния Хаусдорфа (для множеств  $A$  и  $Z$ ):  $H(A, Z) = \max(h(A, Z), h(Z, A))$ , где  $h(A, Z) = \max_{a \in A} \rho(a, Z)$  – направленное расстояние Хаусдорфа от множества  $A$  до множества  $Z$ , а

$\rho(a, Z) = \min_{z \in Z} \rho(a, z)$  – расстояние от точки до множества. Данный принцип в обработке изображений впервые предложен Хаттенлохером, Кландерманом и Руклиджем в 1993 году. В качестве модели распознаваемого объекта используется дискретное бинарное изображение, представляемое как множество точек в двумерном евклидовом пространстве (рис. 1). Классическое расстояние Хаусдорфа в технических задачах используется редко из-за неустойчивости к выбросам, как правило, меняют формулу направленного расстояния  $h(A, Z)$ , в диссертации использовалась среднеквадратическая модификация:  $h_{ck}(A, Z) = \sqrt{\frac{1}{|A|} \sum_{i=0}^{|A|-1} \rho^2(a_i, Z)}$ .

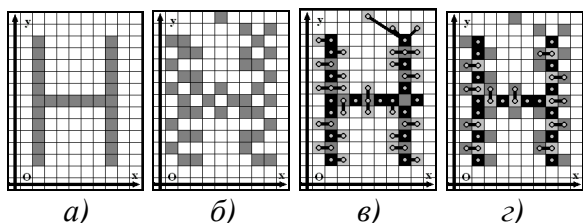


Рис. 1. а) Эталон. б) Объект. в) Совмещение объекта и эталона (совпадающие точки черные), каждой точке объекта поставлена в соответствие ближайшая к ней точка эталона (отношения соответствия обозначены линиями, кроме совпадающих точек). г) Каждой точке эталона поставлена в соответствие ближайшая к ней точка объекта.

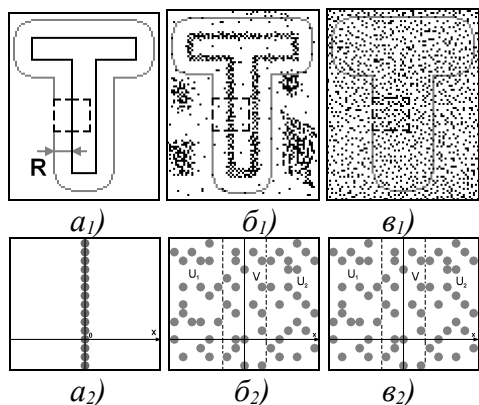


Рис. 2. а<sub>1,2</sub>) Эталон и его фрагмент. б<sub>1,2</sub>) Объектное изображение и его фрагмент. в<sub>1,2</sub>) Шумовое изображение и его фрагмент.

В модификациях расстояния Хаусдорфа, устойчивость к шумам достигается, как правило, отсечением самых удаленных точек множеств, в диссертации впервые применены формальные правила отсека. Вводится понятие значимой области, близкой к эталону, которая используется при подсчете отклонения объекта от эталона (рис. 2). Чтобы объект можно было обнаружить на фоне шума, в значимой области должна существовать зона повышенной плотности точек в окрестности эталона (V), плюс вокруг зона пониженной плотности (U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>).

Для значимой области заданной ширины R вводится признак локального увеличения плотности объектных точек вблизи эталона. Признак строился исходя из следующих пожеланий:

а) если в значимой области точки объектного изображения имеют нулевое отклонение от эталона, значение признака должно быть равно единице; б) если в значимой области присутствует лишь хаотический шум, значение признака должно быть близко к нулю.

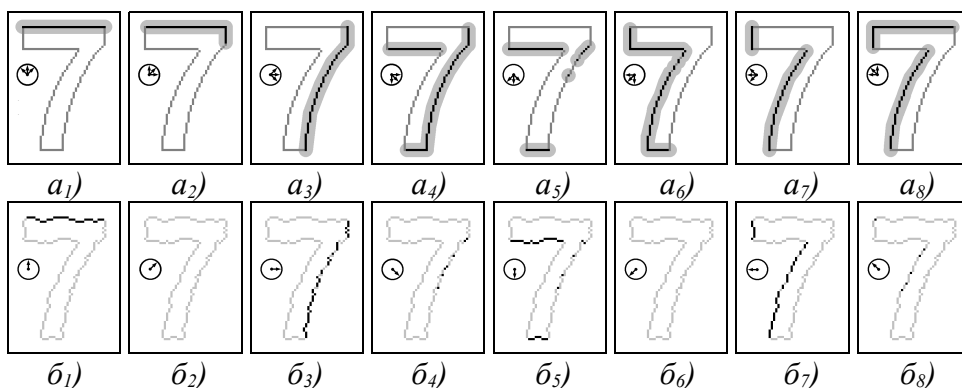
Сходство фрагмента объектного изображения с шумом обнаруживается по близости  $\sigma_R$  (с.к. отклонение части объекта, попавшей в значимую область шириной R) к с.к. отклонению равномерного случайного распределения на отрезке  $[-R, R]$ :  $\sigma_p = R / \sqrt{3}$ , а формула признака имеет вид

$$d(\sigma_R, R) = 1 - \sigma_R / \sigma_p = 1 - \sigma_R \sqrt{3} / R.$$

Имея формальный признак локального увеличения плотности объектных точек в значимой области, можно организовать итеративный процесс со значимыми областями увеличивающейся ширины, целью которого является по-

иск удовлетворительного значения признака. В диссертации проведено тестирование и показана работоспособность данной технологии.

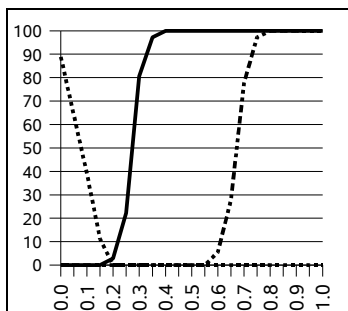
**В пункте 1.2** описывается модификация алгоритма сравнения объекта и эталона по взаимному отклонению, учитывающая направления обхода контуров и допускающая привязку контурных точек одного множества только к близким по направлению обхода контурным точкам другого множества, что повышает точность и надежность распознавания (Олсон, Хаттенлохер, 1997). Для повышения помехоустойчивости этого модифицированного алгоритма в диссертации была предложена модификация технологии значимых областей эталона, описанной в пункте 1.1. В модификации значимые области строятся также с учетом направлений обхода – для каждого эталона используется восемь значимых областей, каждая из которых строится вокруг пикселей эталона с тремя смежными направлениями нормалей к контуру, определяемых таблично по двухшаговым переходам цепи (рис. 3а), при этом точки объектного контура с каждым из восьми возможных вариантов нормали (рис. 3б) учитываются только если попадают в соответствующую значимую область, в противном случае игнорируются.



*Рис. 3. а<sub>1-8</sub>) Значимые области эталона (светло-серые), строящиеся вокруг пикселей с тремя смежными направлениями нормали (черные).*

*б<sub>1-8</sub>) Точки объектного контура с одним из восьми направлений нормали (черные) при вычислении меры близости объекта к эталону учитываются лишь в случае, если попадают в соответствующие значимые области (а<sub>1-8</sub>).*

При использовании этой технологии шумовые контура могут быть сколь угодно близки к объектному контуру, но если у них явно неподходящая ориентация, они не влияют на вычисление мер близости. Технология ориентированных значимых областей позволяет еще больше усилить помехоустойчивость по сравнению с исходной технологией значимых областей (пункт 1.1), что подтверждается результатами имитационного моделирования (рис. 4).



*Рис. 4. Графики ошибок классификации в тесте обнаружения символов шрифта Arial с помощью ориентир. и неориентир. значимых областей и с.к. признака локального увеличения плотности. Абсцисса – пороговое значение  $d$ , ордината – процент ошибок. Шум – кружки диаметром 6 пикселей со случайными координатами центров, среднее отношение сигнал / шум -3,94 дБ.*

- Кривая пропуска символов без учета направлений
- ..... Кривая ложных обнаружений символов без учета направлений
- - - - Кривая пропуска символов с учётом направлений
- Кривая ложных обнаружений символов с учетом направлений не показана (везде 0).

**В пункте 1.3** описываются технологические оптимизации вычисления прямых бинарно-целочисленных корреляций, которые используются при сравнении бинарных объектов и эталонов по модифицированным расстояниям Хаусдорфа. Описываются три разновидности ММХ-оптимизаций (использующих команды архитектуры Intel x86 для параллельной обработки целых чисел) и два варианта оптимизаций, использующих накапливаемые суммы в строках и столбцах.

В оптимизациях с накапливаемыми суммами для матрицы преобразования расстояния объектного изображения  $A(m,n)$   $m=0,\dots,M-1$ ,  $n=0,\dots,N-1$  создаются матрицы горизонтальных и вертикальных накапливаемых сумм –

$S_h(m,n) = \sum_{i=0}^m A(i,n)$  и  $S_v(m,n) = \sum_{j=0}^n A(m,j)$ , с помощью которых для горизонтального

и вертикального сегмента любой длины можно найти сумму элементов в одно

действие:  $\sum_{i=m_1}^{m_2} A(i,n) = S_h(m_2,n) - S_h(m_1-1,n)$ ,  $\sum_{j=n_1}^{n_2} A(m,j) = S_v(m,n_2) - S_v(m,n_1-1)$ .

При сравнительном тестировании всех оптимизаций были получены следующие результаты. При обработке больших изображений главную роль играет объем прокачиваемых из памяти данных, и наилучшее быстродействие показывает 16-битная ММХ-оптимизация (минимальные требования памяти). При обработке маленьких изображений, целиком помещающихся в кэше процессора, главную роль играет нагрузка на арифметических блок процессора, и наилучшее быстродействие показывает 32-битная оптимизация с накапливаемыми суммами. По совокупности испытаний наиболее сбалансированной при любых размерах изображений оказалась 16-битная оптимизация с накапливаемыми суммами, в то время как быстродействие других оптимизаций очень сильно зависит от размеров сканируемых изображений.

**Вторая глава** диссертации посвящена семейству алгоритмов итеративной полигональной аппроксимации контурных цепей, использующих нетрадиционный критерий оптимизации – максимум периметра аппроксимирующего многоугольника. Средствами имитационного моделирования было показано, что аппроксимации, получаемые по этому критерию, лучше локализуют изломы в контурных цепях, чем алгоритмы, основанные на традиционном подходе минимизации погрешности аппроксимации.

**В пункте 2.1** описываются две классические задачи полигональной аппроксимации: а) минимизация погрешности аппроксимации при заданном числе вершин аппроксимирующего многоугольника и б) минимизация числа вершин при заданной допустимой погрешности аппроксимации. Проводится обзор известных методов полигональной аппроксимации.

**В пункте 2.2** описывается принцип максимизации периметра аппроксимирующего многоугольника и доказывается утверждение о возможности за конечное число шагов построить для заданного многоугольника аппроксимирующий многоугольник с меньшим числом вершин и максимально возможным периметром.

С помощью максимизации периметра можно находить близкое к истинному положение углов в растровых представлениях многоугольников (рис. 5).



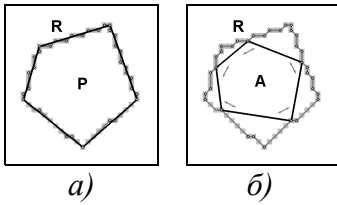


Рис. 5. а) Многоугольник  $P$  и его растровое представление, многоугольник  $R$ . б) Поиск вершин многоугольника  $P$  в его растровом представлении  $R$  с помощью вариации вершин аппроксимирующего многоугольника  $A$ , для которого следует добиться максимума периметра.

На основе принципа максимизации периметра было разработано три алгоритма со сложностью  $O(N^4)$ ,  $O(N \log N)$  и  $O(N) - O(N \log N)$ , где  $N$  число вершин исходного многоугольника, первые два являются модификациями и отличаются от ранее известных критерием оптимизации, третий – оригинальный. Первый алгоритм, называемый «алгоритм максимального периметра» (пункт 2.3), дает истинный максимум периметра для каждого возможного количества узлов аппроксимации от 2 до  $N-1$ , при условии, что узлы аппроксимации лежат на контуре исходного  $N$ -угольника. Как показали тесты, данный алгоритм дает самую субъективно хорошую аппроксимацию заданным числом узлов (т. е. наиболее адекватно описывающую форму объекта), даже если явно выраженных изломов в контуре нет (рис. 6).

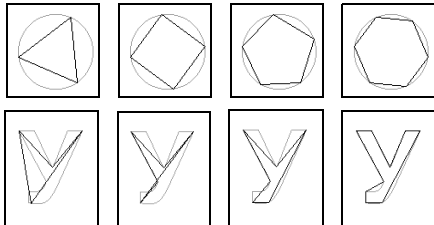


Рис. 6. Примеры работы алгоритма максимального периметра. Вверху – контур окружности, аппроксимируемой 3, 4, 5 и 6 узлами. Внизу – контур буквы «У», аппроксимируемый 4, 5, 6 и 9 узлами.

Однако из-за огромной вычислительной сложности данный алгоритм представляет лишь теоретический интерес. Для практического применения были разработаны быстрые алгоритмы, в которых вершины исходного многоугольника последовательно удаляются таким образом, чтобы потери в длине периметра аппроксимирующего многоугольника были минимальными. Вводится понятие: *важностью* узла называется величина уменьшения периметра многоугольника при удалении этого узла из аппроксимации (выражается через неравенство треугольника и всегда не меньше нуля, рис. 7).

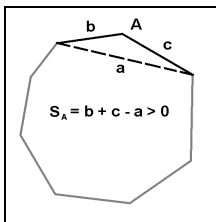


Рис. 7. Важность узла  $A$  ( $S_A$ ) выражается через неравенство треугольника:

$$S_A = b + c - a > 0.$$

В алгоритме *треугольного слияния* (пункт 2.4) на каждой итерации удаляется узел, являющийся глобальным минимумом важности. В алгоритме *треугольного слияния по локальным минимумам* (пункт 2.5) на каждой итерации удаляется сразу много узлов, являющихся локальными минимумами важности. Оба алгоритма дают близкие аппроксимации и хорошо подчеркивают изломы контура, если они есть (рис. 8, внизу). При аппроксимации контуров, не содержащих явных изломов, они проигрывают по субъективному качеству алгоритму максимального периметра (рис. 8, вверху).

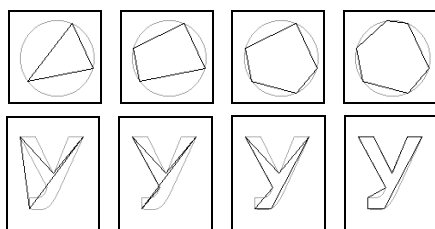
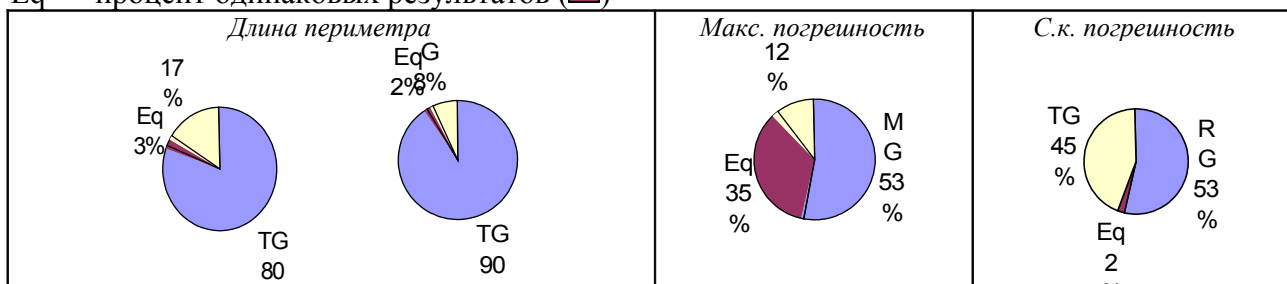


Рис. 8. Результаты работы алгоритма треугольно-го слияния для растровой окружности (3, 4, 5, 6 узлов) и контура буквы «У» (4, 5, 6, и 9 узлов).

В пункте 2.6 исследуются свойства быстрых алгоритмов слияния, различающихся критериями оптимизации. Исследуемые критерии оптимизации – максимум периметра, минимум максимальной и среднеквадратической погрешности. Алгоритмы сравниваются с точки зрения предпочтительности для локализации изломов, по численным критериям (длине периметра, максимальной и среднеквадратической погрешности) и вычислительной сложности. Выводы, основанные на визуальном сравнении аппроксимаций, а также на сравнении алгоритмов по скорости вычислений, заключаются в том, что алгоритмы, основанные на критерии максимального периметра, являются предпочтительными для локализации изломов и по скорости вычислений, а среднеквадратические – наилучшие во всех отношениях.

Результат сравнения по числовым критериям был представлен в виде статистики выигрышей и проигрышей по целевым числовым критериям (табл. 1).

Таблица 1. Статистика выигрышей (■) и проигрышей (□) по целевым числовым критериям. TG – процент выигрышей треугольного слияния по глобальным минимумам; MG – процент выигрышей минимаксного слияния по глобальным минимумам; RG – процент выигрышей среднеквадратич. слияния по глобальным минимумам; Eq – процент одинаковых результатов (■)



Интерпретируется эта статистика следующим образом. В алгоритмах слияния на каждой итерации после удаления узлов создаются новые условия для следующих итераций, и если алгоритм показывает хорошую статистику выигрышей и проигрышей в своем родном критерии по сравнению с другими алгоритмами, это значит, что метод выбора удаляемых узлов хорош с точки зрения создания благоприятных условий для следующих итераций. В результате имитационного моделирования на серии контуров выяснилось, что худшие алгоритмы – среднеквадратические, между треугольными и минимаксными сложно сделать выбор, поскольку у треугольных алгоритмов лучше статистика выигрышей, а у минимаксных – статистика проигрышей.

Из сравнения критериев оптимизации и алгоритмов аппроксимации на их основе можно сделать следующий вывод: алгоритмы минимизации погрешности решают в первую очередь задачу минимизации погрешности, а локализация изломов в этих алгоритмах происходит как побочный эффект и не всегда наилучшим возможным образом; алгоритмы максимизации периметра в первую

очередь решают задачу локализации изломов, побочным эффектом этого является некоторая минимизация погрешности аппроксимации, которая не всегда является минимально достижимой.

**В пункте 2.7** предложен метод вычисления соответствия изломов контура аппроксимирующим углам. Основными отличиями от известных методов анализа контурных цепей являются, во-первых, соединение технологии полигональной аппроксимации с технологией обнаружения изломов, во-вторых, принципиально другая постановка задачи, а именно, не *обнаружение изломов* (т.е., получение бинарного ответа, где есть излом, а где нет), а нахождение меры соответствия изломов и аппроксимирующих углов. От большинства алгоритмов поиска изломов данная технология принципиально отличается, во-первых, тем, что не игнорирует тупые изломы контура, во-вторых, тем, что количество анализируемых изломов не зависит от произвольно выбираемых параметров (всегда  $2N-4$ , где  $N$  – число поворотов при обходе контурной цепи).

Технология сводится к построению всех возможных аппроксимаций контура одним из быстрых алгоритмов слияния. Для каждого фрагмента контура, стянутого аппроксимирующей хордой, строятся оценочные окружности по отклонениям в обе стороны от хорды, и для этих окружностей строятся касательные в вершинах хорды (рис. 9). Конечная формула величины соответствия аппроксимирующего угла и излома контура строится по аппроксимирующему углу  $\alpha$  и углам к касательным оценочных окружностей  $\beta_i$  (рис. 10).

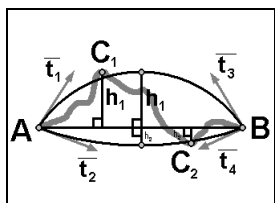


Рис. 9. Для каждого фрагмента контура  $AC_1C_2B$  вычисляются максимумы отклонения в обе стороны от аппроксимирующей хорды ( $h_1$  и  $h_2$  в точках  $C_1$  и  $C_2$  соответственно), по максимумам отклонения и хорде определяются оценочные окружности и четыре касательные  $\bar{t}_i$  в точках  $A$  и  $B$ .

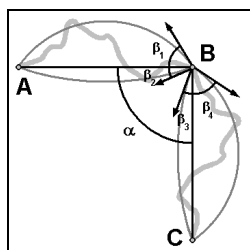


Рис. 10.  $\alpha$  – аппроксимирующий угол, в узле аппроксимации  $B$  имеем четыре угла  $\beta_i$  между касательными к оценочным окружностям и аппроксимирующими хордами  $AB$  и  $BC$ :

$$\mu(\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = \min \left( \frac{\pi - \alpha}{\pi - \alpha + 2\max(\beta_2, \beta_3)}, \frac{\pi - \alpha - 2\max(\beta_1, \beta_4)}{\pi - \alpha} \right).$$

Величины  $\mu$  (рис. 10), близкие к единице, трактуются как хорошее соответствие излома контура и аппроксимирующего угла; величины  $\mu$ , близкие к нулю или меньшие нуля, трактуются как плохое соответствие. В различных алгоритмах поиска изломов при принятии решения о том, какой излом считать изломом, а какой нет, чаще всего устанавливают некоторые пороги для функции кривизны контура или градусной меры излома, что в любом случае приводит к отсечению тупых изломов и крайне нежелательно, поскольку даже тупые изломы могут быть хорошо заметны. Главным плюсом предлагаемой технологии является то, что она не объявляет соответствия углов изломам «плохими» лишь на основании тупости углов, просто для тупых углов выше требования к «прямоте» аппроксимируемых фрагментов контура.

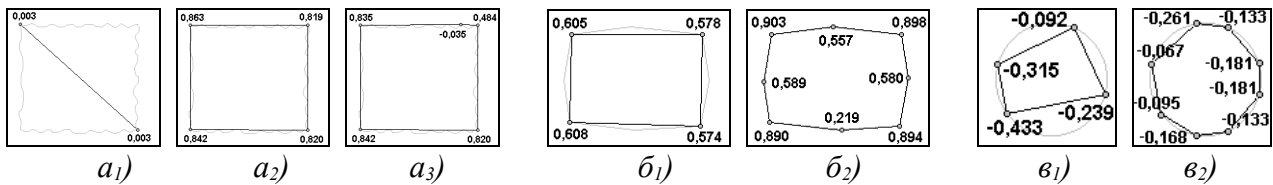


Рис. 11. Примеры вычисления соответствия излома контура аппроксимирующему углу. Кружки – узлы аппроксимации, числа – значения соответствия  $\mu$ .

На рис. 11 представлены примеры вычисления мер соответствия для реальных контуров. Заметно, что для контура окружности, у которого отсутствуют явно выраженные изломы, соответствие аппроксимирующих углов и изломов контура везде получается плохим.

Метод оценок соответствия сравнивался с алгоритмом Бо-Сингера (2001) в задаче локализации выраженных изломов в растровых представлениях многоугольников. Оба метода показали почти идентичные результаты локализации (положение обнаруженных изломов различается не более чем на один пиксел) и близкие значения времени вычислений: Бо-Сингер – 100%, метод оценок с алгоритмом треугольного слияния по локальным минимумам – 55% (лучший), метод оценок с алгоритмом треугольного слияния – 161%. Однако более принципиальна разница в том, что метод оценок дает более конкретную информацию о характере локализованных особенностей контура.

**Третья глава** диссертации посвящена системе технического зрения для распознавания номеров железнодорожных нефтеналивных цистерн.

В пункте 3.1 описывается задача системы – максимально быстрое получение информации о цистернах (рис. 12) и передача данных в систему контроля верхнего уровня. Из-за сильного загрязнения многих цистерн задача стопроцентного автоматического распознавания не ставилась, требовалось лишь максимально увеличить количество распознанных номеров.



Рис. 12. Информация о цистерне: восьмизначный номер, тип (62) и код принадлежности стране (20). Номер распознается автоматически (если удастся), тип и код принадлежности берутся из базы данных по вагонам.

В пункте 3.2 описывается аппаратная структура системы (рис. 13) и комплекс программного обеспечения, управляющий ее работой. В данной системе вагоны проезжают перед специальными щитами с контрастным рисунком, не встречающимся на вагонах, по закрытию щитов определяется начало и направление движения поезда.

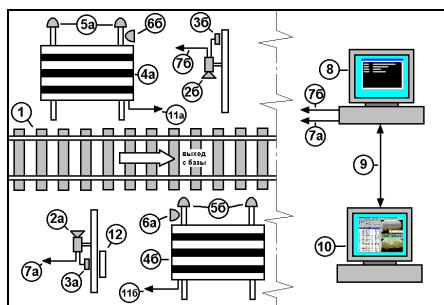


Рис. 13. Аппаратная схема системы технического зрения

- 1 – железнодорожные пути;
- 2а, 2б – видеокамеры;
- 3а, 3б – блоки питания камер;
- 4а, 4б – фоновые щиты;
- 5а, 5б – ночная подсветка фоновых щитов;
- 6а, 6б – ночная боковая подсветка поезда;
- 7а, 7б – сигнальный кабель от видеокамеры к компьютеру;
- 8 – компьютер, управляющий камерами и формирующий отчеты о поездах;
- 9 – локальная компьютерная сеть;
- 10 – компьютер оператора для просмотра и редактирования отчетов о поездах;
- 11а, 11б – питание осветителей на щитах;
- 12 – выключатели питания для камер и освещения (~220 В).

Программный комплекс управления системой (рис. 14) состоит из двух программ: а) генератор отчетов – программа, устанавливаемая на компьютере (8), управляет камерами, осуществляет запись и распознавание поездов и создание отчетов распознавания; б) редактор отчетов – стандартная Windows-программа просмотра и редактирования отчетов, устанавливаемая на компьютере (10), передает отчеты в вышестоящую систему.

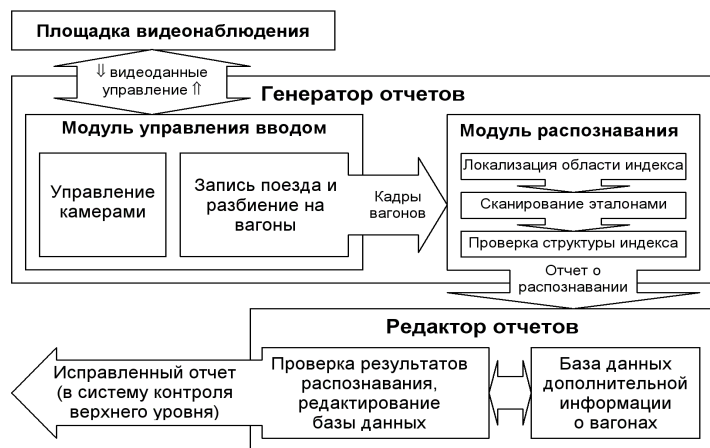
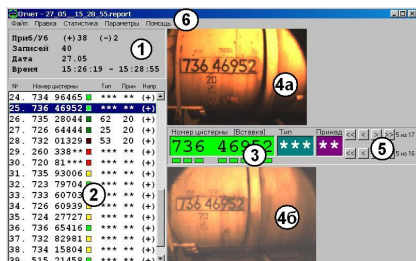


Рис. 14. Структурная схема программного комплекса системы технического зрения

В программе генератора отчетов поезда сначала записываются и разделяются на вагоны по видимым в промежутках между вагонами фрагментам щита. Обработка одного кадра делится на три этапа: а) быстрая локализация области номера по максимуму контраста между темными и светлыми участками; б) сканирование обинаренной области локализации эталонами, вычисление с помощью модификаций

расстояния Хаусдорфа взаимных отклонений фрагментов изображения и эталонов; в) структурная проверка результатов сканирования, формирование номера. После завершения обработки вагонов создается отчет, предназначенный для обработки в программе редактора отчетов.



- 1 – общая информация по отчету;
- 2 – список вагонов;
- 3 – поля редактирования данных;
- 4а, 4б – изображения вагонов от первой и второй камер;
- 5 – управление просмотром изображений для текущего вагона;
- 6 – заголовок редактора и главное меню.

Рис. 15. Интерфейс редактора отчетов

Редактор отчетов периодически проверяет появление новых отчетов и предлагает их для редактирования (рис. 15). Основное его назначение – оперативность обработки информации. Для удобства проверки правильности результатов распознавания поля редактирования (3) расположены между изображениями (4), имеют крупный шрифт, близкий по размерам к тому, что встречается на цистернах (для минимизации дизадаптации пользователя при переключении внимания между полем редактирования и изображениями вагонов), и цвет, сигнализирующий о степени достоверности результата распознавания. При редактировании обновляется база данных по типам и принадлежности вагонов (используется при повторном появлении вагона).

В пункте 3.3 описывается технология распознавания номеров. В качестве основного алгоритма распознавания в системе использовались с.к. модификации расстояния Хаусдорфа (пункт 1.2). В данном пункте описываются особенности применения в данной задаче этого алгоритма, в том числе алгоритмические оптимизации, дающие многократный выигрыш в производительности.

Для уменьшения области сканирования использовалось два варианта алгоритма быстрой локализации области номера – по максимуму контраста и комбинация контраста и выраженных изломов.

Для распознаваемых цифр существуют два порога взаимного отклонения с эталоном – порог допустимости и порог достоверности (который меньше порога допустимости). Если отклонение не превышает порога достоверности, цифра считается распознанной с высокой степенью достоверности. Если отклонение больше порога достоверности, но не превышает порога допустимости, цифра считается распознанной недостоверно.

Существование двух порогов объясняется тем, что шрифты цифр на вагонах не стандартизированы и многовариантны, с разной степенью отклонения от основного шрифта. Сравнительно высокий порог допустимости обычно позволяет правильно распознать нестандартные цифры, однако для них нельзя говорить о достоверности. В редакторе отчетов недостоверные результаты отображаются специальным цветом (жёлтый) для привлечения внимания оператора.

Система технического зрения тестировалась в лабораторных условиях и в условиях опытной эксплуатации. Цистерны в составах имеют разную степень загрязнения, поэтому для улучшения интерпретируемости результатов лабораторного тестирования вся исследуемая выборка из 820 цистерн была разделена экспертами на три группы. Первая группа содержит цистерны, номера которых, по мнению экспертов, подлежат безусловному распознаванию (условное название – «чистые»). Вторая группа содержит цистерны с номерами, распознавание которых желательно, но, на взгляд экспертов, очень проблематично из-за характера загрязнений или особенностей написания цифр номера (условное название – «умеренно грязные»). Третья группа состоит из цистерн, номера которых были прочитаны экспертами с существенными затруднениями («грязные»).

В лабораторных тестах вагоны распознавались с одной стороны (таблица 2). Среди «чистых» цистерн правильно распознается 96,0 % номеров, среди «умеренно грязных» – 69,7 %, среди «грязных» – 14,6 %, всего – 75,1 %. Часть результатов помечается признаком недостоверности.

Таблица 2. Результаты распознавания тестовой выборки

Группа	«чистые»	«умеренно грязные»	«грязные»
Всего цистерн	426	271	123
Распознано <b>ВЕРНО</b> , из них с признаком:	<b>409</b>	<b>189</b>	<b>18</b>
Достоверно	247	54	3
Недостоверно	162	135	15
Отказ	0	0	0
Распознано <b>НЕВЕРНО</b> , из них с признаком:	<b>17</b>	<b>82</b>	<b>105</b>
Достоверно	0	0	0
Недостоверно	6	27	17
Отказ	11	55	88

Таблица 3. Результаты опытной эксплуатации

	Сентябрь 2004	Июнь 2006
Всего вагонов	8187	51239
Результаты распознавания		
Выс. достовер.	43.4 %	48.0 %
Сомнительные	46.5 %	42.0 %
Отказ	10.1 %	10.0 %
Результаты проверки диспетчерами		
Подтверждено	84.1 %	84.0 %
Ошибочные	15.9 %	16.0 %
Проверка распознанных с флагом выс. достовер.		
Подтверждено	98.6 %	99.2 %
Ошибочные	1.4 %	0.8 %
Проверка распознанных с флагом сомнительности		
Подтверждено	88.8 %	86.7 %
Ошибочные	11.2 %	13.3 %

Нестопроцентный результат распознавания «чистых» цистерн объясняется двумя факторами: во-первых, геометрическими отличиями шрифтов на цистернах от используемых в системе эталонов, во-вторых, тем, что часть цистерн

имела дефекты (например, небольшое загрязнение одной цифры), на которые эксперты не обратили внимания. В реальной системе, при учете результата с другой стороны цистерны, процент правильных распознаваний повышается.

Качество распознавания сравнивалось с последней доступной на август 2007 года версией популярной программы FineReader 8.0 Professional, для него результаты распознавания следующие: «чистые» – 61,5 %, «умеренно грязные» – 4,4 %, «грязные» – 0, всего – 33,4 %.

На той же выборке было проведено тестирование двух алгоритмов быстрой локализации области номера: а) по цветовому контрасту; б) сочетание цветового контраста и выраженных изломов.

Таблица 4. Тесты быстрой локализации	Хорошие	Средние	Плохие
Цветовой контраст	99,3%	88,2%	69,9%
Цветовой контраст и выраженные изломы	100%	92,9%	71,5%

Также в этой системе тестировались различные виды низкоуровневых оптимизаций бинарно-целочисленных корреляций при вычислении взаимного отклонения объекта и эталона, по результатам испытаний лучшей оказалась 16-битная оптимизация с накапливаемыми суммами по строкам и столбцам.

Система была введена в эксплуатацию в мае 2004 года, статистика по обработанным диспетчерами составам снималась дважды – в сентябре 2004 и в июне 2006 года (таблица 3).

### Заключение

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Предложен формальный среднеквадратический признак локального увеличения плотности точек объектного изображения в заданной окрестности эталона. На основе данного признака разработана технология обнаружения объектов с помощью с.к. модификации расстояния Хаусдорфа, в том числе с учетом направления обхода контура.
2. Разработано семейство алгоритмов итеративной аппроксимации многоугольников, использующих критерий максимального периметра. Показано, что критерий максимума периметра принципиально лучше ориентирован на решение проблемы локализации изломов контура, чем традиционные критерии минимума погрешности.
3. Разработан метод оценки соответствия углов аппроксимирующего многоугольника и изломов контура. Метод позволяет обнаруживать изломы контура с разной степенью детализации (в том числе тупые).
4. Разработан комплекс программ для распознавания номеров в системах технического зрения, который с мая 2004 года успешно эксплуатируется в технологическом цикле работы нефтебазы ООО «Самара-терминал», г. Сызрань.

### Основные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Казанский Н.Л., Хмелев Р.В. Сравнение объекта и эталона по отклонению контуров // *Компьютерная оптика*, 2000, № 20 – с. 134-139.
2. Казанский Н.Л., Мясников В.В., Хмелев Р.В. Алгоритмы поиска расстояний до объектных пикселей на бинарных изображениях // *Компьютерная оптика*, 2000, № 20 – с. 128-133.
3. Kazanskii N.L., Khmelev R.V. Algorithms of Searching for a Standard on Binary Images // *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2001, Vol. 11, № 1 – p.187-188.



4. Хмелев Р.В. Поиск впадин в замкнутом невыпуклом контуре // *Компьютерная оптика*, 2002, № 24 – с. 164-172.
5. Хмелев Р.В. Совместное использование структурного анализа и метрики Хаусдорфа при сравнении объекта и эталона. // *Компьютерная оптика*, 2005, № 27 – с. 174-176.
6. Волотовский С.В., Казанский Н.Л., Попов С.Б., Хмелев Р.В. Система технического зрения для распознавания номеров железнодорожных цистерн с использованием модифицированного коррелятора в метрике Хаусдорфа. // *Компьютерная оптика*, 2005, № 27 – с. 177-184.
7. Volotovskii S.G., Kazanskii N.L., Popov S.B., Khmelev R.V. Machine Vision System for Registration of Oil Tank Wagons // *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2005, Vol. 15, № 2 – p.461-463.
8. Буланов А.П., Волотовский С.Г., Казанский Н.Л., Попов С.Б., Хмелев Р.В., Шумаков С.М. Система технического зрения для регистрации железнодорожных составов цистерн // *Автоматизация в промышленности*, 2005, № 6 – с. 57-59.
9. Хмелев Р.В. Итеративная аппроксимация последовательностей по максимуму периметра и с использованием неравенства треугольника. // *Компьютерная оптика*, 2005, № 27 – с. 155-164.
10. Хмелев Р.В. Сравнительный анализ быстрых алгоритмов слияния для итеративной полигональной аппроксимации контурных цепей при различных критериях оптимизации // *Компьютерная оптика*, 2006, № 29 – с. 135-140.

**Прочие публикации:**

11. Казанский Н.Л., Хмелев Р.В. Алгоритм поиска эталона на бинарных изображениях // *Труды 5-ой Международной конференции «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии (РОАИ-5-2000)»*, Самара, 16-22 октября 2000 г. Самара: ИПО СГАУ, 2000, Том 2 – с.288.
12. Khmelyoff R.V. Comparison of Standard and Object by Contour Deviation // *Proceedings of the IASTED International Conference ACIT-2002, Новосибирск, 10-13 июня 2002*. ACTA Press, Calgary, Canada, 2002 – с. 549-554.
13. Волотовский С.В., Казанский Н.Л., Попов С.Б., Хмелев Р.В. Распознавание номеров железнодорожных цистерн с использованием быстрой локализации и модификации алгоритма сравнения объекта с эталоном по среднеквадратической метрике Хаусдорфа. // *Обозрение прикладной и промышленной математики*, 2005, том 12, № 3 – с. 714.
14. Хмелев Р.В., Казанский Н.Л., Попов С.Б. Система регистрации железнодорожных составов цистерн // Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004611971 по заявке № 2004611383 от 29 июня 2004 года. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 августа 2004 года.
15. Хмелев Р.В. Итеративная аппроксимация многоугольников по критерию максимального периметра и одномерных последовательностей по критерию максимальной средней кинетической энергии // *Обозрение прикладной и промышленной математики*, 2005, том 12, № 3 – с. 779.
16. Хмелев Р.В. Получение информации об изломах контура с помощью полигональных аппроксимаций // *Сборник трудов Всероссийского семинара по моделированию, дифракционной оптике и обработке изображений*, июль 2006. Самара, ИСОИ РАН, 2006 – с. 46-53.

Подписано в печать 10.02.2009. Усл. печ. л. 1.00. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов.

443086, Самара, СГАУ, Московское шоссе, 34