

На правах рукописи

ВИЗИЛЬТЕР Юрий Валентинович

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность

05.13.17 – Теоретические основы информатики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва
2008 г.

Работа выполнена в Государственном научном центре
Федеральном государственном унитарном предприятии
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»
(ГНЦ ФГУП ГосНИИАС)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Желтов Сергей Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Чуличков Алексей Иванович

доктор физико-математических наук
Сметанин Юрий Геннадьевич

доктор физико-математических наук
Чернов Владимир Михайлович

Ведущее предприятие: Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук

Защита состоится "24" апреля 2009 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.215.07 при Государственном
образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Самарский государственный аэрокосмический университет имени
академика С.П.Королева» (СГАУ) по адресу:
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан " " 2009 г.

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

Белоконов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современные информационные системы предназначены для функционирования в нестандартной, меняющейся, неопределенной окружающей обстановке. При этом одним из наиболее важных источников информации является канал зрительного восприятия. Использование в современных информационных системах цифровых видеодатчиков с высоким разрешением (размер получаемых изображений порядка 10^6 - 10^7 элементов и более) позволило существенно приблизить информативность искусственных зрительных устройств к соответствующим характеристикам человеческого глаза. Тем острее стала ощущаться необходимость создания эффективных алгоритмов автоматического *анализа изображений*, обеспечивающих качественную обработку возросших объемов данных. Специфика разработки таких инженерных приложений определяется следующими основными особенностями. Во-первых, при разработке систем информационного обеспечения требуется решать не общую проблему автоматического понимания изображения произвольной сцены, а гораздо более определенную и узкую задачу *проблемно-ориентированной интерпретации изображения*, которая часто сводится либо к *сегментации* изображения на некоторые области с последующим анализом положения и свойств этих областей, либо к *обнаружению и идентификации* на изображении семантических объектов, присутствие которых может повлиять на формирование управления. И в том и в другом случае в основе решения задачи анализа изображения лежит некая интуитивно понимаемая или до определенной степени формализованная *яркостно-геометрическая модель* областей или объектов, подлежащих выделению. Во-вторых, к алгоритмам обработки изображений в системах информационного обеспечения предъявляются *специальные требования*, связанные с конкретными характеристиками разрабатываемой или уже существующей системы управления: *быстродействие*, *достоверность* обнаружения, *точность* измерения различных характеристик объектов.

Таким образом, в основе обработки и анализа изображений как прикладной технико-математической дисциплины лежат задачи математической формализации яркостно-геометрических моделей изображений (объектов) и построения процедур (методов) анализа наблюдаемых изображений на основе этих формализованных моделей. Примером такого рода моделей наиболее общего характера является хорошо известный класс *разложений* (ряды Фурье, обобщенные ряды Фурье и другие). Они позволяют выявлять внутреннюю структуру математических объектов, исследовать критические свойства, регулярным образом порождать различные наборы характеристик. В области анализа изображений стремление к созданию достаточно универсальных и в то же время предметно адекватных моделей и процедур для различных прикладных задач привело к возникновению целого ряда на первый взгляд совершенно различных методов современного компьютерного зрения, таких как корреляционное обнаружение и согласованная фильтрация, частотные и пространственно-частотные методы на базе двумерного преобразования Фурье и вейвлет-анализа, морфологический подход Ю.П. Пытьева, математическая морфология Серра, метод «нормализации фона», преобразование Хафа и обобщенное преобразование Хафа, структурно-лингвистический подход и ряд других. Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов обработки изображений и

машинного зрения применительно к обсуждаемым задачам внесли работы Ю.П. Пытьева, Ю.И. Журавлева, Л.П. Ярославского, Ж.Серра, Д.Марра, Е.Дэвиса, Д.Балларда, А.Демпстера, Г.Шафера, У.Гренандера, М.Павель, Дж.Ту, К.Фу и многих других. За последние десятилетия создано множество успешных систем машинного зрения, в которых в тех или иных сочетаниях используются упомянутые подходы и парадигмы. Однако отсутствие единого математического формализма для описания яркостно-геометрической структуры изображений и соответствующей единой методики разработки алгоритмов анализа изображений по-прежнему является серьезной проблемой, затрудняющей и замедляющей разработку новых приложений и практических систем машинного зрения. Рассматриваемые в данной диссертационной работе *морфологический подход к анализу изображений*, теория *проективных морфологических разложений*, а также более общий математический аппарат *критериальной проективной морфологии* позволяют вскрыть единую математическую природу большинства перечисленных подходов и таким образом обеспечить максимально возможную гибкость и вариативность предметно-ориентированного структурного анализа изображений.

Другой принципиальной проблемой современного анализа изображений является необходимость учета вероятностной природы реальных изображений, учет априорной информации, обеспечение устойчивости (робастности) процедур анализа изображений относительно различного рода шумов и искажений. Предлагаемый в данной диссертационной работе метод *морфологического анализа свидетельств* предназначен для описания вероятностных аспектов процедур структурного анализа изображений, основанных на сложных ярко-геометрических моделях.

Цель работы состоит в разработке теории и методов *проективной морфологии* как унифицированного подхода к описанию, разработке и использованию алгоритмов анализа изображений, основанных на яркостно-геометрических моделях изображений, и метода *морфологического анализа свидетельств* как средства описания вероятностных аспектов процедур морфологического анализа изображений. Практическая направленность работы заключается в разработке структуры и методологии программно-алгоритмического обеспечения ряда прикладных систем анализа изображений: систем автоматизированного документооборота, контрольно-измерительных систем, антитеррористических и биометрических систем, систем автоматизированного управления сложными мобильными объектами, медицинских компьютерных систем.

Для достижения цели исследования решаются следующие задачи:

- ♦ анализ существующих методов обработки и анализа изображений, исследование их критических свойств, включая разработку новых модификаций и обобщений этих методов, повышающих их эффективность и расширяющих область их действия;
- ♦ разработка обобщающего математического формализма, позволяющего с единых позиций описывать яркостно-геометрические аспекты процедур анализа изображений;
- ♦ разработка обобщающего математического формализма, позволяющего с единых позиций описывать вероятностные аспекты процедур анализа изображений;
- ♦ разработка методик автоматизированного конструирования алгоритмов анализа изображений;
- ♦ создание специализированных методов и алгоритмов анализа изображений для систем автоматического анализа документов, технических контрольно-

измерительных систем, антитеррористических и биометрических систем, систем автоматизированного управления сложными мобильными объектами, медицинских компьютерных систем.

Методы исследования. В работе использованы методы компьютерного зрения и обработки изображений, теории множеств и универсальной алгебры, теории вероятности, теории графов, логического программирования, генетического отбора, динамического программирования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, соответствием результатов вычислительных экспериментов, выдвигаемых в диссертации положений и выводов качественного характера, а также результатами практического использования методов, предложенных в диссертации. Эффективность разработанных методов и алгоритмов подтверждена положительной статистикой обработки большого объема реальных изображений, полученных в различных условиях различными видеодатчиками.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Для унифицированного описания яркостно-геометрических аспектов широкого класса процедур анализа изображений разработана теория *проективных морфологических разложений*, опирающаяся на однородные структурные модели, представляющие изображения в виде объединения независимых линейных проекций на образующие (структурные примитивы) из некоторого набора, причем коэффициенты линейной связи образующих и анализируемого образа составляют регулярный вектор морфологического разложения, характеризующий данный образ. Определены морфологические корреляционные меры и соответствующие схемы сравнения и яркостно-геометрической привязки изображений на основе их морфологических разложений. Предложен единый подход к построению алгоритмов структурной фильтрации, сжатия и сегментации цифровых изображений, а также обнаружения и идентификации объектов на изображениях, основанный на проективных морфологических разложениях.
2. Для унифицированного описания яркостно-геометрических аспектов более общего класса процедур анализа изображений предложен математический аппарат *критериальной проективной морфологии*, позволяющий использовать как однородные, так и неоднородные модели данных, накладывающие определенные дополнительные условия на связи между элементами структурной яркостно-геометрической модели. Предложена и исследована схема построения критериальных морфологических операторов анализа изображений на основе *стандартного морфологического критерия*, включающего *критерий соответствия* проекции и проектируемого образа, *критерий (предикат) допустимости* решения, *критерий качества* проекции, характеризующий ее принадлежность модели, и *структурирующий параметр*, обеспечивающий компромисс между требованиями соответствия и качества. Сформулированы необходимые и достаточные условия проективности критериальных морфологических операторов. Показано, что структурирующий параметр морфологического критерия определяет морфологическую сложность соответствующей модели.
3. Для описания вероятностных аспектов процедур анализа изображений разработан метод *морфологического анализа свидетельств*, отличающийся тем, что

вероятностная структурная модель объекта используется непосредственно в ходе низкоуровневого анализа изображения. При этом каждая обнаруженная особенность данного изображения рассматривается как событие, свидетельствующее в пользу гипотезы (ряда гипотез) о наличии и характеристиках искомого объекта, а процесс проверки гипотез управляется событиями в том смысле, что каждое выявленное событие инициирует обработку лишь тех гипотез, на апостериорную вероятность которых данное событие может повлиять. Получены обобщения данной схемы для случая неоднородных моделей объектов, описываемых Марковскими реляционными гиперграфами, а также для общего случая сложных немарковских моделей.

4. Разработана обобщенная методика построения монотонных и ортогональных морфологических фильтров. На ее основе предложена оригинальная схема построения *математической морфологии на базе преобразования Хафа* и его различных модификаций. Предложен оригинальный алгоритм вычислительно эффективной реализации рекуррентного преобразования Хафа в скользящем окне.
5. Предложен и обоснован широкий класс *проективных морфологий на базе структурной интерполяции*. Предложены оригинальные проективные морфологические разложения, а также критериальные проективные операторы сегментации и реконструкции одномерных и двумерных данных, реализуемые с использованием различных методов интерполяции одномерных и двумерных функций.
6. Разработан метод автоматизированного конструирования алгоритмов анализа изображений, основанный на *преобразованиях исходных модельных описаний*, описываемых логическими предикатами, к модельным описаниям, соответствующим метаалгоритмам известных схем анализа изображений. Предложены проективные морфологии на базе неоднородных структурных моделей, описываемых логическими предикатами.
7. Разработан оригинальный метод автоматизированного конструирования модульных морфологических процедур анализа изображений, основанный на «генетическом отборе» информативных элементов.

На защиту выносятся:

1. Математический аппарат, схемы алгоритмической реализации и практического использования теории *проективных морфологических разложений*, позволяющей с единых позиций рассматривать такие методы анализа изображений как корреляционный анализ, математическая морфология Серра, морфология разбиений кадра Ю.П. Пытьева, методы голосования, восходящие к преобразованию Хафа, частотные и пространственно-частотные методы фильтрации. Условия существования проективных разложений. Свойства проективных разложений, а также построенных на их основе морфологических операторов и коэффициентов морфологической корреляции.
2. Математический аппарат, схемы алгоритмической реализации и практического использования *критериальной проективной морфологии*, позволяющей распространить проективный морфологический подход на случай неоднородных структурных моделей. Достаточные условия проективности критериальных морфологических операторов. Свойства обобщенных морфологических операторов и коэффициентов морфологической корреляции.

3. Метод *морфологического анализа свидетельств*, позволяющий строить вычислительно эффективные и вероятностно обоснованные алгоритмы выделения на изображениях объектов, описываемых различными яркостно-геометрическими моделями. Схемы объединения свидетельств для сложных структурных моделей.
4. Обобщенная методика построения монотонных морфологических фильтров, позволяющая строить морфологические фильтры Серра на базе произвольных исходных операторов. Математическая морфология на базе преобразования Хафа и его модификаций.
5. Проективные морфологические разложения на базе кусочной интерполяции одномерных и двумерных функций. Критериальные проективные морфологии на базе интерполяции структурных описаний.
6. Проективные морфологии на базе неоднородных структурных моделей, описываемых логическими предикатами.
7. Метод автоматизированного конструирования модульных процедур обнаружения объектов, основанный на «генетическом отборе» информативных элементов, позволяющий в процессе обучения по наборам эталонов формировать модульные алгоритмы обнаружения объектов на изображениях, близкие к оптимальным по критерию робастность/трудоемкость.

Практическая ценность. Практическая ценность работы состоит в применении разработанных методов и процедур анализа изображений при решении ряда практических задач, в том числе – в системах автоматизированного документооборота, контрольно-измерительных системах, системах видеонаблюдения, антитеррористических и биометрических системах, системах автоматизированного управления сложными мобильными объектами, медицинских радиологических приложениях. Предложенные методы продемонстрировали надежность в сложных условиях применения и обладают возможностью вычислительной реализуемости для систем реального масштаба времени.

Эффективность разработанных методов и алгоритмов подтверждена положительной статистикой обработки большого объема реальных изображений, полученных различными оптическими системами.

Реализация результатов работы. Полученные теоретические и практические результаты использовались при проведении целого ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также при выполнении международных контрактов, в частности: НИР "Феникс-НТ", "Образ", "Секира" и др. выполнявшихся ФГУП ГосНИИАС по заказам Министерства обороны РФ в 1994-2006 гг. НИР "Информационные технологии 1996-2005", выполнявшихся ФГУП ГосНИИАС по заказам Министерства экономики РФ, Минпромнауки РФ и в соответствии с президентской программой "Национальная технологическая база", ОКР «Контролер», выполнявшейся ФГУП ГосНИИАС по заказу Минпромэнерго РФ в 2005-2006 гг. ОКР «Рубеж-визит», выполнявшейся ФГУП ГосНИИАС по заказу Пограничной службы РФ в 2006-2007 гг., контрактов ФГУП ГосНИИАС № 605018, № 42/10 с фирмой Intermec (США) в 1993-94, 2000 гг., контрактов TG001-TG005 с фирмами Novecon Technologies и Silber Semiconductors (США) в интересах фирм Sumitomo, Toyota Motors (Япония) в 1998-2000 гг., контракта ЗАО «Институт информационных технологий» с фирмой National Instruments (США) в 2002-2003 гг., грантов РФФИ №00-01-00315-а (исполнитель), №05-08-18234-а (руководитель).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались автором на следующих международных конференциях:

- ISPRS Intercommission workshop. – г. Цюрих, 1995;
- Digital Photogrammetry and Remote Sensing. – г. С-Петербург, 1995;
- Satellite Remote Sensing II - г. Париж, Франция, 1995;
- Конгрессах ISPRS – XVIII, г. Вена, Австрия, 1996; XX, г. Стамбул, Турция, 2004.
- Конференциях SPIE Photonics – г. Сан-Хосе, Калифорния, США, 2001, 2002.
- Третьей международной конференции “Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных (экстремальных) ситуациях” – г. Минск, Беларусь, 2002.
- Конференции NI NIWEEK – г. Остин, Техас, США, 2003.
- 16 симпозиуме IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace – г. Санкт-Петербург, 2004.
- Конференции BIOMETRICS AIA® TTS «Biometrics in Aviation Security» - г. Москва, 2005.
- Конференциях BIOMETRICS AIA® TTS «Транспортные и пассажирские системы» - г. Москва, 2006, 2007.
- Конференциях BIOMETRICS AIA® LEGS «Паспортные и правоохранительные системы» - г. Москва, 2006, 2007.
- 9-й международной конференции "Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии", г. Нижний Новгород, 2008.

а также на всероссийских конференциях:

- I-III научно-практических конференциях РОФДЗ «Современные проблемы фотограмметрии и дистанционного зондирования» – г. Москва, 2000, 2001, 2002.
- Юбилейной научно-технической конференции «Авиационные системы в XXI веке», г. Москва, 2006.
- VI Рабочем совещании Российской секции международного общества по интеллектуальным вычислениям (IEEE Computational Intelligence Society) «Биометрические системы» («Biometrics»), г. Москва, 2006.

Публикации. Содержание диссертации опубликовано в 53 статьях и докладах, которые приведены в списке литературы, а также монографии [54]. Практические приложения содержатся в более чем тридцати научно-технических отчетах, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (227 наименований), изложенных на 323 страницах, имеет 95 рисунков, 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассматривается актуальность темы диссертации, сформулирована основная цель исследования и вытекающие из неё задачи, приводится краткое содержание работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена рассмотрению *морфологического подхода* к анализу данных и его применения в компьютерном и машинном зрении. Дается общая характеристика основных групп задач анализа данных, включая задачи *фильтрации* (преобразования) данных, *сжатия/декомпрессии* (сегментации/реконструкции) данных, *классификации* данных (тестирования гипотез, распознавания образов), *обнаружения* объектов (локализации

гипотез в пределах одного наблюдения), *обучения* алгоритмов анализа данных (автоматического конструирования моделей). В результате рассмотрения этих задач формулируется унифицированный подход к обработке и анализу данных. В силу значительного сходства основных идей этого подхода с базовыми идеями морфологических теорий Ж.Серра и Ю.П. Пытьева данный подход предложено назвать *морфологическим подходом к анализу данных*. Далее в рамках предложенного подхода рассматриваются форма записи и семантический смысл критериев и моделей, используемых в различных методах анализа изображений. Ставится задача построения и исследования критериальных проективных морфологий.

Сформулированный *морфологический подход к анализу данных* отличается от других схем анализа данных тем, что в качестве обязательного этапа предполагает *обоснованное* (т.е. в некотором смысле оптимальное) построение *модельного описания гипотетического (скрытого) прообраза наблюдаемых данных*. Иными словами, обязательным этапом решения любого типа задач здесь является *модельная сегментация* данных, допускающая их последующую полную или частичную *реконструкцию*. Легко заметить, что морфологический подход не является ни единственно возможным, ни наиболее объемлющим по отношению к остальным методам анализа данных. Однако известно, что фильтры, не опирающиеся на модели данных, в общем случае бесполезны при распознавании образов и обнаружении объектов. Так же и классификаторы, не опирающиеся на модели данных, оказываются бесполезны в задачах фильтрации и сегментации. Таким образом, морфологический подход к анализу данных является, судя по всему, единственным *универсальным*, то есть *функционально полным* подходом, обеспечивающим возможность единообразного решения всех задач обработки и анализа данных, возникающих в реальных технических приложениях.

Формализуем этот подход. Пусть имеются *множество возможных наблюдений* $\mathfrak{G}$ и *множество модельных описаний* некоторого типа Λ . *Базовой (формальной) операцией морфологической сегментации данных* называется однозначное отображение

$$\varepsilon: \mathfrak{G} \rightarrow \Lambda.$$

Базовой (формальной) сопряженной операцией реконструкции данных называется однозначное отображение вида

$$\delta: \Lambda \rightarrow \mathfrak{G}, \forall E \in \mathfrak{G}: \varepsilon(\delta(\varepsilon(E))) = \varepsilon(E).$$

Базовым (формальным) морфологическим фильтром называется последовательная комбинация сопряженных операций базовой сегментации и базовой реконструкции данных

$$\varphi_{\varepsilon\delta}(E) = \delta(\varepsilon(E)): \mathfrak{G} \rightarrow \Lambda \rightarrow \mathfrak{G}.$$

Базовый морфологический фильтр по построению является *алгебраическим проектором* (idempotent operator):

$$\varphi_{\varepsilon\delta}(E) = \varphi_{\varepsilon\delta}(\varphi_{\varepsilon\delta}(E)).$$

Набор элементов $\mathfrak{R} = \{\mathfrak{G}, \Lambda, \varepsilon, \delta\}$ определяет *частную формальную* или *$\mathfrak{R}$ -морфологию*. Далее необходимо перейти к построению *критериальных морфологических операторов*, определяемых некоторыми априорными критериями, основанными на семантике анализируемой предметной области, оптимальному значению которых должны соответствовать результаты обработки (сегментации и реконструкции) наблюдаемых данных.

Пусть заданы: $M(\lambda): \Lambda \rightarrow [0,1]$ – критерий качества морфологического описания данных; $K(E, E'): \mathfrak{G} \times \mathfrak{G} \rightarrow [0,1]$ – критерий соответствия наблюдений и их реконструкции на основе морфологического описания. Тогда *критериальной морфологической сегментацией* ε_Φ и *критериальным морфологическим фильтром* φ_Φ на базе (ε, δ) называются операторы:

$$\varepsilon_\Phi(E) = \lambda, \varphi_\Phi(E) = \delta(\lambda): \Phi(E, \lambda) = K(E, \delta(\lambda)) \times M(\lambda) \rightarrow \max(\lambda: \lambda \in \Lambda),$$

где $E \in \mathfrak{G}$, $\Phi(E, \lambda)$ – критерий оптимального морфологического описания данных. Таким образом, набор элементов $\mathfrak{Z}(\mathfrak{R}) = \{\mathfrak{G}, \Lambda, \varepsilon, \delta, K, M\}$ определяет частную критериальную или $\mathfrak{Z}$ -морфологию, которая также может быть охарактеризована более коротким эквивалентным набором параметров $\mathfrak{Z}'(\mathfrak{R}) = \{\mathfrak{G}, \Lambda, \varepsilon_\Phi, \delta\}$. Важным частным случаем описанных критериальных морфологий являются *проективные критериальные морфологии*, удовлетворяющие условию

$$\varphi_\Phi(E) = \varphi_\Phi(\varphi_\Phi(E)).$$

Поскольку в таком случае критериальная $\mathfrak{Z}$ -морфология является также и формальной $\mathfrak{R}$ -морфологией, то на базе критериальной проективной морфологии *первого порядка* $\mathfrak{R}' = \mathfrak{Z}'(\mathfrak{R})$, в свою очередь, может быть вновь построена критериальная морфология *второго порядка* $\mathfrak{Z}'' = \mathfrak{Z}'(\mathfrak{R}')$ и т.д. Поэтому исследование проективных свойств критериальных морфологий представляет существенный интерес, а класс *проективных критериальных морфологий* $\mathfrak{R}'(\mathfrak{R}, K, M)$ может быть назван классом *критериальных морфологий в узком смысле*. Разработке и построению различных типов таких проективных морфологий посвящены вторая и третья главы данной диссертационной работы.

Для решения задачи *морфологического распознавания образов* необходимо добавить к морфологической схеме анализа данных: множество гипотез Θ ; однозначный оператор *интерпретации морфологических описаний на множестве гипотез* $\sigma: \Lambda \rightarrow \Theta$; модель предметной области $M(H): \Theta \rightarrow [0,1]$; модель соответствия описаний объектов гипотезам из предметной области $M(\lambda, H): \Lambda \times \Theta \rightarrow [0,1]$. Тогда модель описания данных принимает вид

$$M_\Theta(\lambda) = \max \{M(\lambda, H) \times M(H): H \in \Theta\},$$

и критериальный морфологический классификатор формируется как модульная процедура анализа данных вида

$$c_\Phi(E) = \sigma(\varepsilon_\Phi(E)): \mathfrak{G} \rightarrow \Lambda \rightarrow \Theta.$$

Для решения задачи *морфологического обнаружения (локализации) объектов* морфологическую схему необходимо также дополнить операцией *вырезки* или *выборки* части наблюдения E , согласованной с морфологическим описанием λ , вида

$$\pi(E, \lambda): \mathfrak{G} \times \Lambda \rightarrow \mathfrak{G}.$$

С учетом этой операции задача *обнаружения и локализации объекта* решается при помощи морфологического оператора

$$\varepsilon_{\pi\Phi}(E) = \lambda: \Phi_{\pi}(E, \lambda, H) = K(\pi(E, \lambda), \delta(\lambda)) \times M(\lambda, H) \times M(H) \rightarrow \max(\lambda \in \Lambda, H \in \Theta).$$

Данный подход позволяет также определить *селективный морфологический фильтр*

$$\varphi_\pi(E) = \pi(E, \varepsilon_{\pi\Phi}(E)): \mathfrak{G} \times \Lambda \rightarrow \mathfrak{G},$$

по определению являющийся алгебраическим проектором.

Вторая глава посвящена разработке теории *проективных морфологических разложений*. Пусть имеется два сорта элементов: *скаляры* и *образы*. На множестве

скаляров Ψ определены две операции – *умножение* ($\bullet$) и *объединение* ($\vee$). Умножение определяет на множестве Ψ группу с 1, объединение – полугруппу с 0. Образы принимают значения на множестве Ω , на котором также определена операция *объединения* ($\vee$), задающая на Ω полугруппу с «нулевым образом» $\emptyset$. Кроме этого, на множестве образов Ω определена *норма* $\mu(A)=\|A\|: \Omega \rightarrow R, \|\emptyset\|=0$. Пусть также определена операция *умножения образа на скаляр* ($\bullet$). Введем операцию *проекции образа на образ*, обладающую следующими свойствами:

$$\begin{aligned} \Pr(A,B) \in \Omega; \Pr(A,B) &= \Pr(\Pr(A,B), B); \Pr(A,A) = A; \Pr(\emptyset, A) = \emptyset; \Pr(A, \emptyset) = \emptyset; \\ \Pr(a \bullet A, B) &= a \bullet \Pr(A, B); \forall a \neq 0: \Pr(A, a \bullet B) = \Pr(A, B); \end{aligned} \quad (1)$$

где $a \in \Psi; A, B, \emptyset \in \Omega$.

Множество *собственных* (стабильных) элементов проектора

$$\mathbf{M} = \{A \in \Omega: \Pr(A, B) = A\}$$

называется *модельным множеством* или *моделью* образа B . Будем говорить, что модель $\mathbf{M}_1$ по отношению к $\mathbf{M}_2$ является *более общей (менее сложной)*, а $\mathbf{M}_2$ по отношению к $\mathbf{M}_1$ является *менее общей (более сложной)*, если $\mathbf{M}_2 \subseteq \mathbf{M}_1$.

Далее, назовем *линейным проектором* оператор (1) следующего вида:

$$\Pr(A, B) = r(A, B) \bullet B,$$

где $r(A, B)$ – коэффициент *линейной корреляции* со свойствами

$$r(A, A) = 1; r(\emptyset, A) = 0; r(\alpha A, B) = \alpha \bullet r(A, B); \forall \alpha \neq 0: r(A, \alpha B) = r(A, B) / \alpha,$$

$A, B \in \Omega, r(A, B), \alpha \in \Psi$.

Функция $r(A, B): \Omega \times \Omega \rightarrow \Psi$ задает здесь систему парных отношений *структурного сходства* образов, отражающую семантические свойства предметной области. Это позволяет, следуя методике Ю.П. Пытьева, ввести *нормированный коэффициент линейной корреляции*:

$$K_M(A, B) = \|\Pr(A, B)\| / \|A\|, \quad (2)$$

$$0 \leq K_M(A, B); K_M(A, A) = 1; K_M(A, B) = 0 \Leftrightarrow \Pr(A, B) = \emptyset.$$

Зададим множество образов $\mathbf{B} = \{B_1, \dots, B_n\} \subseteq \Omega$. Операции объединения и умножения на скаляр образуют над ним замкнутое линейное подпространство $\mathbf{B} \subseteq \Omega$, причем

$$\forall A \in \mathbf{B}: A = \vee_{k=1 \dots n} (a_k B_k),$$

где $\mathbf{a} = \langle a_1, \dots, a_n \rangle$ – вектор *весов образующих*. Если образы из $\mathbf{B}$ являются *линейно независимыми*, то множество $\mathbf{B}$ можно назвать *базисом структурного описания*, его элементы – *структурными примитивами*, n – *размерностью базиса*. Определим *проекцию образа на подпространство*:

$$\Pr(A, \mathbf{B}) \in \mathbf{B}; \Pr(A, \mathbf{B}) = \Pr(\Pr(A, \mathbf{B}), \mathbf{B}); \quad (3)$$

$$\Pr(\emptyset, \mathbf{B}) = \emptyset; \Pr(a \bullet A, \mathbf{B}) = a \bullet \Pr(A, \mathbf{B}),$$

$a \in \Psi; A, \emptyset \in \Omega; \mathbf{B} \subseteq \Omega$. Пусть существует такой базис примитивов $\mathbf{E}$, что проекция на замыкание $\mathbf{E}$ удовлетворяет следующему *условию разложимости*:

$$\Pr(A, \mathbf{E}) = \vee_{k=1 \dots n} (\Pr(A, E_k)) = \vee_{k=1 \dots n} (r(A, E_k) \bullet E_k), \quad (4)$$

т.е. *проекция образа на базис есть объединение линейных проекций на его элементы*. Тогда можно определить однозначную *операцию морфологического разложения образа по базису*

$$\mathbf{dec}_E(A) = \mathbf{a}(A, \mathbf{E}): \Omega \rightarrow \Psi^n.$$

Алгебраическую систему $\{\Psi, \Omega, \bullet, \vee, \mu, \text{Pr}, \mathbf{E}\}$, для которой справедливо условие (4), будем далее называть *проективной морфологией* на Ω . Базис $\mathbf{E}$ является здесь *базисом морфологического разложения*. Базис $\mathbf{E}$ будем называть *полным* на Ω , если

$$\forall A \in \Omega: \text{Pr}(A, \mathbf{E}) = A \Leftrightarrow \mathbf{E} = \Omega.$$

В работе показано, что *пространство векторов разложений* $\Theta = \Psi^n$, в свою очередь, также является проективным пространством, в котором может быть задана операция *проекции вектора разложения на вектор разложения*

$$\text{Pr}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \mathbf{r}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \bullet \mathbf{b},$$

такая, что для нее выполняется следующее *условие соответствия*:

$$\begin{aligned} \forall A, B, C \in \mathbf{E}: C = \text{Pr}(A, B) = \mathbf{r}(A, B) \bullet B: \mathbf{a} = \text{dec}_{\mathbf{E}}(A), \mathbf{b} = \text{dec}_{\mathbf{E}}(B), \mathbf{c} = \text{dec}_{\mathbf{E}}(C), \\ \mathbf{c} = \text{Pr}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \mathbf{r}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \bullet \mathbf{b}; \mathbf{r}(A, B) = \mathbf{r}(\mathbf{a}, \mathbf{b}), \end{aligned}$$

т.е. *линейная корреляция векторов разложений оказывается равна линейной корреляции исходных образов*. Отсюда следует, что для оценки сходства двух образов A и B может быть использован *нормированный коэффициент линейной корреляции разложений*:

$$K_M(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \|\text{Pr}(\mathbf{a}, \mathbf{b})\| / \|\mathbf{a}\|,$$

где $\mathbf{a} = \text{dec}(A)$, $\mathbf{b} = \text{dec}(B) \in \Theta$, со свойствами

$$0 \leq K_M(\mathbf{a}, \mathbf{b}); K_M(\mathbf{a}, \mathbf{a}) = 1; K_M(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 0 \Leftrightarrow \text{Pr}(A, B) = \emptyset.$$

Таким образом, можно утверждать, что вектора разложений из Θ адекватно описывают структурные отношения образов из Ω , что позволяет обоснованно анализировать образы данного типа, опираясь на их признаковое описание в виде морфологических разложений.

Поскольку в общем случае оператор, сконструированный путем объединения проекций согласно выражению (4), не всегда является проектором в смысле условий (3), для того, чтобы гарантировать их выполнение, необходимо наложить дополнительные условия либо на операцию объединения, либо на вид оператора проекции, либо на способ формирования системы примитивов. Соответственно будут определены различные типы морфологических разложений с различными свойствами.

Монотонные разложения. Пусть множество Ω представляет собой *решетку*, т.е. частично упорядоченное множество, в котором для любых двух элементов $A, B \in \Omega$ объединение $A \vee B$ является их *точной верхней границей*, а также можно указать их *точную нижнюю границу* $A \wedge B$. Это позволяет определить для элементов решетки Ω *отношение включения*:

$$\forall A, B \in \Omega: A \subseteq B \Leftrightarrow A \vee B = B, \|A\| \leq \|B\|.$$

Добавим дополнительные требования к проектору:

$$(a) \text{ сохранения включения: } \forall A, B, C \in \Omega, A \subseteq B \Leftrightarrow \text{Pr}(A, C) \subseteq \text{Pr}(B, C). \quad (5)$$

$$(б) \text{ монотонности: } \forall A, B \in \Omega, \text{Pr}(B, A) \subseteq \text{Pr}(A, A) = A. \quad (6)$$

В работе показано, что условия (5)-(6) являются *достаточными* для выполнения условия (4), то есть *в случае, когда пространство образов является алгебраической решеткой, а оператор проекции монотонен и сохраняет включение, любой базис примитивов является базисом морфологического разложения*.

Ортогональные разложения. Назовем *ортогональными* любые два образа $A, B \in \Omega$, такие что

$$A \perp B \Leftrightarrow \{\text{Pr}(A, B) = \emptyset; \text{Pr}(B, A) = \emptyset\}.$$

Ортогональным базисом будет являться такой базис $\mathbf{E}$, в котором:

$$\forall E_i, E_k \in \mathbf{E}, k \neq i: E_i \perp E_k. \quad (7)$$

Наложим теперь на операцию проектирования дополнительное требование *сохранения объединения*:

$$\forall A, B, C \in \Omega, A \vee B \Leftrightarrow \Pr(A \vee B, C) = \Pr(A, C) \vee \Pr(B, C). \quad (8)$$

В работе показано, что условия (7)-(8) также являются *достаточными* для выполнения условия (4), то есть для *проектора, сохраняющего объединение, любой ортогональный базис примитивов является базисом морфологического разложения*.

Во втором разделе рассматриваются *проективные морфологические разложения изображений*. Для изображений *морфологический проектор* (4) задается выражением

$$\Pr(A(\mathbf{p}), \mathbf{E}(\mathbf{p}, \mathbf{q})) = \vee_{\mathbf{q} \in Q} (A(\mathbf{q}) \bullet \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q})), \quad (9)$$

где $\mathbf{p}=(x, y)$ – вектор пиксельных координат в исходном пространстве изображения; $A(\mathbf{p})$ – анализируемое изображение, заданное как двумерная скалярная функция яркости; $\mathbf{q}$ – вектор параметров разложения; $\mathbf{E}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \{\varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q}) : \mathbf{p} \in P, \mathbf{q} \in Q\}$ – набор образующих (примитивов) структурного разложения, также заданных как параметризованные двумерные функции; $A(\mathbf{q})$ – образ изображения в пространстве параметров; ' $\vee$ ' $\in \{\text{'}\Sigma\text{'}, \text{'}\text{MAX}\text{'}, \text{'}\text{П}\text{'}, \text{'}\text{MIN}\text{'}\}$ – коммутативная и ассоциативная операция *поэлементного объединения*. В работе, в частности, показано, что в унифицированной форме (9) могут быть описаны такие популярные процедуры анализа изображений как *операторы открытия и закрытия Серра, проекторы на кусочно-постоянную форму Пытьева, частотные и пространственно-частотные полосовые фильтры* на основе преобразования Фурье и вейвлет-преобразований и ряд других.

Коэффициент *морфологической корреляции изображений* имеет вид:

$$K_M(A(\mathbf{p}), B(\mathbf{p})) = \|\Pr(A(\mathbf{p}), B(\mathbf{p}))\| / \|A(\mathbf{p})\|.$$

Рассмотрим способы использования проективных морфологических разложений изображения.

Морфологическая фильтрация изображений. Пусть базис $\mathbf{E}(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ является полным на Ω . Назовем *морфологическим преобразованием* изображения любое преобразование f , такое что:

$$f(A(\mathbf{p})) = \vee_{\mathbf{q} \in Q} (F(A(\mathbf{q}), \mathbf{q}) \bullet \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q})),$$

где $F(A(\mathbf{q}), \mathbf{q}) \in \Psi$ – *весовая функция* данного преобразования в пространстве параметров. Если оператор f также обладает свойством проектора:

$$f(f(A(\mathbf{p}))) = f(A(\mathbf{p})),$$

то такое преобразование можно назвать *морфологическим фильтром*. Если весовая функция не зависит от изображения, то

$$f(A(\mathbf{p})) = \vee_{\mathbf{q} \in Q} (F(\mathbf{q}) \bullet A(\mathbf{q}) \bullet \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q})),$$

где $F(\mathbf{q}) \in \{0, 1\}$ описывает *область пропуска* фильтра. Таким образом, возникает унифицированная двухэтапная схема фильтрации:

1. *Деконструкция (анализ)*. Проектирование изображения на образующие полного морфологического разложения.

2. *Частичная реконструкция (синтез)*. Объединение проекций на те элементы разложения, которые находятся в области пропуска фильтра.

Морфологические спектры. Пусть вектор параметров разложения $\mathbf{q} \in Q$ состоит из двух частей: $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)$, где $\mathbf{q}_1 \in Q_1$ – подвектор *параметров-характеристик*, $\mathbf{q}_2 \in Q_2$ – подвектор *параметров локализации*, $Q = Q_1 \times Q_2$. Интегральным спектром порядка n образа $A(\mathbf{p})$ по характеристикам из Q_1 будем называть выражение следующего вида:

$$Sp(A(\mathbf{p}), \mathbf{q}_1) = [\sum_{(\mathbf{q}_2 \in Q_2)} |A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|^n]^{1/n}. \quad (10)$$

Дифференциальный спектр определяется на основе интегрального спектра (10) как его производная. Если максимумы в спектре полезного сигнала не имеют аналогов в спектре фоно-шумового сигнала, это позволяет адаптивно сформировать область пропускания морфологических фильтров.

Морфологическое сравнение изображений. Обобщая методику Ю.П. Пытьева, рассмотрим задачу сравнения образа с моделью. Пусть *модель образа* задана в виде разложения (4). Назовем *индикатором структурной связи* характеристическую функцию вида:

$$\chi(x) = \{0, \text{ если } x=0; 1 - \text{ в противном случае} \}.$$

Определим *характеристический базис* образа В как

$$E_\chi(B) = \{\chi(b_k) \bullet E_k, E_k \in E\},$$

где **E** – некоторый полный базис морфологического разложения. Тогда *морфологическую проекцию образа А на модель [В]* можно определить как

$$Pr(A, [B]) = \vee_{k=1...n} (a_k \bullet \chi(b_k) \bullet E_k) = Pr(A, E_\chi(B)).$$

Аналогичная операция проектирования разложений будет иметь вид:

$$Pr(a, [b]) = Pr(\langle a_1, \dots, a_n \rangle, [\langle b_1, \dots, b_n \rangle]) = \langle a_1 \bullet \chi(b_1), \dots, a_n \bullet \chi(b_n) \rangle,$$

что позволяет определить меру сходства образа с моделью – *морфологический коэффициент структурной корреляции*:

$$K_{стр}(A, B) = \|Pr(a, [b])\| / \|a\|,$$

где $A, B \in \Omega$; $a = dec(A), b = dec(B) \in \Theta$, со стандартными свойствами:

$$0 \leq K_{стр}(A, B) \leq 1; K_{стр}(A, A) = 1; K_{стр}(A, B) = 0 \Leftrightarrow Pr(A, [B]) = \emptyset.$$

Заметим, что отношение *структурного сходства*, задаваемое $K_{стр}(A, B)$, асимметрично, и это позволяет различать «более простые» и «более сложные» структуры (образы, модели). Если

$$K_{стр}(A, B) = 1, K_{стр}(B, A) < 1,$$

значит «А сложнее В», и соответственно «В проще А».

Для решеток морфологический коэффициент структурной корреляции можно определить и непосредственно в пространстве изображений:

$$K_{стр}(A, B) = \|Pr(A, [B])\| / \|A\|.$$

Аналогичным образом решается задача сравнения изображений, инвариантного к заданной группе яркостно-геометрических преобразований.

Третий раздел посвящен конструированию морфологических алгоритмов обнаружения объектов на изображениях. Пусть имеется *морфо-геометрическая модель объекта* вида:

$$M(\mathbf{p}, \mathbf{u}) = \vee_{\mathbf{q} \in Q} (M(\mathbf{u}, \mathbf{q}) \bullet \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q})),$$

где **u** – вектор *параметров локализации* объекта $M(\mathbf{p}, \mathbf{u})$; $\mathbf{q} \in Q$ – вектор *параметров разложения*; $M(\mathbf{u}, \mathbf{q}) \in \{0, 1\}$ – *модель локализации объекта*, которая описывает все допустимые соответствия между параметрами локализации образа в целом и параметрами локализации составляющих его геометрических примитивов. Определим проекцию изображения на модель

$$Pr(A(\mathbf{p}), M(\mathbf{p}, \mathbf{u})) = \vee_{\mathbf{q} \in Q} (M(\mathbf{u}, \mathbf{q}) \bullet A(\mathbf{q}) \bullet \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q})).$$

и соответствующий коэффициент морфологической корреляции

$$K_M(A(\mathbf{p}), M(\mathbf{p}, \mathbf{u})) = \|Pr(A(\mathbf{p}), M(\mathbf{p}, \mathbf{u}))\| / \|A(\mathbf{p})\|. \quad (11)$$

Как видно, коэффициент корреляции при этом оказывается функцией параметра $\mathbf{u}$, то есть представляет собой *корреляционное поле* $K_M(\mathbf{u})$, которое также может быть представлено и в пространстве параметров разложения

$$K_M(A(\mathbf{q}), M(\mathbf{u}, \mathbf{q})) = \|M(\mathbf{u}, \mathbf{q}) \bullet A(\mathbf{q})\| / \|A(\mathbf{q})\|. \quad (12)$$

При этом локальные максимумы корреляционного поля соответствуют параметрам наиболее достоверной локализации объекта. Соответственно возникают две возможные стратегии анализа изображения.

Анализ изображения «сверху вниз» (от гипотез к данным) осуществляется путем последовательного вычисления значений корреляционного поля $K_M(\mathbf{u})$ для каждого гипотетического значения вектора локализации $\mathbf{u}$ согласно формуле (11). Данный способ можно назвать *согласованной морфологической фильтрацией в области изображения*.

Анализ изображения «снизу вверх» (от данных к гипотезам) осуществляется согласно формуле (12) путем обнаружения *значимых элементов разложения* наблюдаемого образа ($|A(\mathbf{q})| > 0$) и их голосования в пользу гипотетических значений параметров вектора $\mathbf{u}$, определяемых выражением $M(\mathbf{u}, \mathbf{q}) = 1$. Данный способ можно назвать *согласованной морфологической фильтрацией в области разложения*, которая, в зависимости от типа разложения может иметь смысл пространственной, частотной, пространственно-частотной области и т.п. Данный способ конструирования вычислительно эффективных алгоритмов анализа изображений подробно рассмотрен в четвертой главе диссертационной работы, посвященной методам голосования и анализу свидетельств.

Далее в работе предлагается и исследуется метод автоматизированного конструирования модульных процедур обнаружения объектов, основанный на «генетическом отборе» информативных элементов. Пусть дан *набор эталонных изображений* $A = \{A_i(\mathbf{p}) : i = 1, \dots, n\} \subseteq \Omega$ вместе с *обучающей информацией* об истинных параметрах локализации объектов на эталонных изображениях $I(A) = \{A_i(\mathbf{u}) \in \{0, 1\}, \mathbf{u} \in U : i = 1, \dots, n\}$, где U – пространство параметров локализации; $A_i(\mathbf{u})$ – списки параметров локализации для объектов $A_i(\mathbf{p}) \in A$. Требуется сформировать модель $M(\mathbf{p}, \mathbf{u})$ вида:

$$M(\mathbf{p}, \mathbf{u}) = \bigvee_{k=1 \dots n} (M_k(\mathbf{u}, \mathbf{q}_k) \bullet \varphi_k(t_k, \mathbf{p}, \mathbf{q}_k)),$$

где n – количество значимых для модели яркостно-геометрических примитивов в наборе $\{\varphi_k(t_k, \mathbf{p}, \mathbf{q}_k) : k = 1, \dots, n\} \subseteq \Omega$; t_k – тип k -го примитива; $\mathbf{q}_k \in Q$ – геометрические параметры k -го примитива; $M(\mathbf{u}, \mathbf{q}) = \bigcup_{k=1 \dots n} \{M_k(\mathbf{u}, \mathbf{q}_k)\} \in \{0, 1\}$ – модель локализации объекта.

Пусть данной модели соответствует корреляционное поле $K_M(\mathbf{u})$ (12) и пороговое правило принятия решения об обнаружении объекта $D(A, M, \mathbf{u}) \in \{0, 1\}$. Определим функционал качества обнаружения $\mathcal{F}(M, A)$, штрафующий несовпадение *множества результатов* $D(M, A) = \{D(A_i(\mathbf{p}), M(\mathbf{p}, \mathbf{u}), \mathbf{u}) \in \{0, 1\}, \mathbf{u} \in U : i = 1, \dots, n\}$ и обучающей информации $I(A)$. Функционал качества должен быть составлен так, чтобы учитывать ошибки первого и второго рода, а также штрафовать аномальные и нормальные ошибки («необнаружение объекта» и «неточную локализацию»).

Необходимо решить следующую задачу условной оптимизации:

$$\mathcal{F}(M, A) \rightarrow \min(M) : \mathcal{T}(M) \leq T_{\max}; \mathcal{V}(M) \leq V_{\max}. \quad (13)$$

где $\mathcal{F}(M, A) = \mathcal{F}(D(M, A), I(A))$ – функционал качества обнаружения; $\mathcal{T}(M)$ – время вычисления $K_M(\mathbf{u})$, $\mathcal{V}(M)$ – используемый объем памяти. Для решения данной задачи

Предложена и реализована следующая схема генетического отбора:

1. Каждому *гену* соответствует один из возможных структурных примитивов, характеризуемый набором $\{M_k(u, q_k), t_k, q_k\}$.
2. *Хромосома* - последовательность генов длины n . Каждая хромосома соответствует одной из возможных моделей $M(p, u)$.
3. *Функция качества* для хромосомы вычисляется согласно критерию (13) с учетом аппаратно-программной архитектуры вычислителя.
4. *Операция скрещивания* позволяет конструировать новые модели и процедуры на базе уже построенных. Новая процедура формируется путем перегруппировки составных частей существующих решений.
5. *Операция мутации* позволяет изменить параметры локализации $\{M_k(u, q_k), q_k\}$ для выбранного гена.
6. *Генетический отбор* осуществляется путем итеративного «размножения», тестирования и селекции в каждом поколении хромосом с наилучшим значением функции качества. На каждом этапе случайным образом осуществляются мутации параметров и скрещивание моделей.

В отборе побеждает процедура с лучшим значением функции качества. Поскольку генетические алгоритмы не гарантируют нахождения оптимального решения, результат отбора понимается как близкая к оптимальной, но необязательно оптимальная процедура обнаружения.

Четвертый раздел посвящен конструированию алгоритмов морфологической фильтрации на базе проективных разложений. Предложена следующая схема построения монотонной морфологии на базе пары произвольных операторов (X, Y) для бинарного изображения A :

1. На основе X построить оператор *сжатия* $E_X(A) = X(A) \cap A$.
2. На основе Y построить оператор *открытия* $O_{XY}(A) = Y(E_X(A)) \cap A$.
3. Построить операторы *расширения* $D_X(A) = [E_X(A^C)]^C$ и *закрытия* $S_{XY}(A) = [O_{XY}(A^C)]^C$, где $(A)^C$ обозначает *дополнение* изображения.

Поскольку построенные по данной схеме операторы не обязательно являются морфологическими фильтрами Серра (т.е. *алгебраическими проекторами, сохраняющими включение*), в каждом конкретном случае эти свойства операторов $O_{XY}(Im)$ и $S_{XY}(A)$ необходимо дополнительно доказывать. В связи с этим предложен также следующий способ конструирования проективных монотонных морфологических операторов:

$$E_X(A) = \bigcup_{B_X(\tau) \in A} \tau, D_Y(A) = \bigcup_{\tau \in A} B_Y(\tau), O_{XY}(A) = D_Y(E_X(A)), O_{XY}(A) = \bigcup_{B_X(\tau) \in A} B_Y(\tau), \quad (14)$$

$$\tau \in B_X(\tau), B_X(\tau, A) = \bigcup_{D \subseteq A} B_X(\tau, D), \tau \in B_Y(\tau), B_Y(\tau, A) = \bigcup_{D \subseteq A} B_Y(\tau, D) \quad (15)$$

где обозначение $B(\tau, A)$ подразумевает использование в различных точках изображения τ различных структурирующих элементов (*структурирующих функций*), в общем случае зависящих от A . В работе доказано, что условия (15) являются *достаточными условиями* проективности получаемых по данной схеме операторов. Обоснована также *частная схема* построения проективных монотонных морфологий (14), определяемая условием:

$$B_X(\tau) \subseteq B_Y(\tau) \subseteq \text{Object}(\tau),$$

где $\text{Object}(\tau)$ – связная область изображения A , содержащая точку τ .

Далее в работе предложена схема построения монотонных *морфологий на базе преобразования Хафа и его модификаций (H-морфологий)*. Морфологический фильтр

H-открытие вычисляется как объединение проекций изображения $A(\mathbf{p})$ на отдельные прямые линии:

$$\Pr(A(\mathbf{p}), t) = \max_{\mathbf{q} \in Q} (A(\mathbf{q}, t) \bullet \Pr(A(\mathbf{p}), \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q}))) = \max_{\mathbf{q} \in Q} (A(\mathbf{q}, t) \bullet A(\mathbf{p}) \bullet \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q})),$$

где $\mathbf{p}=(x, y)$; $\mathbf{q}=(\rho, \theta)$ – параметры нормальной параметризации прямой; Q – пространство параметров; $\varphi(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \in \{0, 1\}$ – характеристическая функция прямой с параметрами $\mathbf{q}$; $A(\mathbf{q}, t) \in \{0, 1\}$ – аккумулятор преобразования Хафа, бинаризованный по порогу t . В работе показано, что *H-открытие* можно представить в форме (14). Кроме того, *H-морфология* на базе $\Pr(A(\mathbf{p}), t)$ является *параметрической*, причем в работе также показано, что параметр t определяет *морфологическую сложность* соответствующей модели $\mathbf{M}(t)$.

Аналогичным образом может быть построена проективная морфология на базе обобщенного преобразования Хафа (GHT).

Предложен оригинальный алгоритм вычислительно эффективной реализации рекуррентного преобразования Хафа в скользящем окне и соответствующая *H-морфология* на основе такого рекуррентного преобразования. Суть рекуррентного преобразования Хафа в скользящем окне заключается в том, что алгоритм голосования разделяется на два прохода – по столбцам и по строкам – и за счет использования специальной натуральной параметризации прямолинейных отрезков в окне обеспечивается возможность рекуррентного обновления значений аккумулятора при переходе к каждому следующему положению окна путем голосования точек вновь приходящего столбца или строки. При этом каждая точка изображения голосует один раз за проход, что обеспечивает вычислительную эффективность.

Пятый раздел посвящен конструированию морфологических операторов сегментации и сжатия данных. Введем понятие *морфологического дескриптора*

$$\mathbf{d}(A, \mathbf{E}) = \{n, d(A, E_1), \dots, d(A, E_n)\},$$

где $\mathbf{E} = \{E_1, \dots, E_n\}$ – базис морфологического разложения; $n = \dim(\mathbf{E})$ – размерность базиса $\mathbf{E}$, называемая также *размерностью дескриптора*; $d(A, E_i)$ – *дескриптор элемента* разложения E_i . Объемом дескриптора назовем $v(\mathbf{d})$ – количество памяти (бит), необходимое для хранения данного дескриптора $\mathbf{d}$. Как правило, объем дескриптора пропорционален размерности базиса.

Пусть дан некоторый полный базис разложения $\mathbf{X}$ размерности n . Тогда для любого образа $A \in \Omega$ его дескриптор $\mathbf{d}(A, \mathbf{X})$ будем называть *базовым полным дескриптором*. Любой подбазис $\mathbf{Y} = \{Y_1, \dots, Y_m\}$: $\mathbf{Y} \subseteq \mathbf{X}$, $\dim(\mathbf{Y}) \leq \dim(\mathbf{X})$ соответственно определяет *субдескриптор* $\mathbf{d}(A, \mathbf{Y})$. Определим *критерий качества сегментации* в виде функционала

$$\Phi(A, \mathbf{Y}) = J(A, \Pr(A, \mathbf{Y})) + \alpha * v(\mathbf{d}(A, \mathbf{Y})) \rightarrow \min(\mathbf{Y}: \mathbf{Y} \subseteq \mathbf{X}),$$

где J – *функционал качества проекции*; α – настроечный параметр, определяющий компромисс между требованиями минимизации объема дескриптора $v(\mathbf{d}(A, \mathbf{Y}))$ и искажений J , вносимых в *сегментированное изображение* $\Pr(A, \mathbf{Y})$ по сравнению с исходным образом A . Процедура оптимальной сегментации S определяет

$$\mathbf{Y} = S(A, \mathbf{X}): \mathbf{Y} \subseteq \mathbf{X}, \Phi(A, \mathbf{Y}) \rightarrow \min(\mathbf{Y}).$$

При этом процедура сегментации S может быть представлена в виде *матрицы перехода к новому базису* $\mathbf{S}(A)$ размерности $m \times n$:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{S}(A) \times \mathbf{X},$$

где n и m – размерности базиса $\mathbf{X}$ и подбазиса $\mathbf{Y}$ соответственно.

Далее в работе предложена схема конструирования неискажающих морфологических операторов сегментации *без потери информации* на основе эквивалентных преобразований базисов путем *исключения* примитивов с нулевыми коэффициентами разложения и *группировки* примитивов с одинаковыми коэффициентами разложения. В качестве примеров рассмотрены задачи сегментации изображений на базе разложений по системам ортогональных функций (Фурье, вейвлет-преобразования), разбиений кадра на области постоянной яркости, морфологических дескрипторов Серра. Предложена также схема конструирования оптимальных морфологических операторов сегментации *с потерей информации*. Доказана проективность получаемых операторов сегментации для двух основных классов операторов морфологической сегментации: *проекторов минимального расстояния* (минимальной нормы отклонения) и *монотонных проекторов* (в более общем виде эти утверждения приводятся ниже для общего случая критериальных проективных операторов). Описаны процедуры проективной морфологической сегментации, реализуемые методом динамического программирования. На примере морфологического оператора сегментации на базе преобразования Хафа рассмотрены информационные критерии оптимального выбора параметров сегментации. Показано, что выбор оптимальных параметров сегментации зависит от информативности (объема выборки) исходных данных. Описана схема совместной морфологической сегментации ансамблей изображений. Рассмотрена задача выбора оптимальной морфологической системы для сегментации классов изображений, представленных конечной выборкой.

Отмечено, что основным ограничением рассмотренных в данной главе методов и подходов является то, что рассматриваемый класс *структурных моделей с однородными связями* позволяет задавать лишь состав входящих в модель элементов и связь между образующими и образом в целом, но не учитывает связи образующих элементов между собой. Это ограничение является принципиальным, так как модели более общего вида, описываемые произвольными гиперграфами, не могут быть однозначно охарактеризованы регулярными массивами или векторами признаков. Для работы с такими моделями необходимо использовать обобщенный морфологический формализм, предлагаемый в следующей главе диссертационной работы.

Третья глава посвящена разработке общей теории и ряда частных аспектов *критериальной проективной морфологии*. В первом разделе рассматриваются алгебраические основы обобщенной проективной морфологии. Пусть имеется множество *образов* Ω , на котором определена операция *сложения* ('+'), задающая на Ω группу с «нулевым образом» $\emptyset$. Кроме этого, на множестве образов определена Ω – *норма* $\mu(A) = \|A\|: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, $\|\emptyset\| = 0$, причем норма разности обладает свойствами *расстояния*. Оператором проекции на Ω будем называть оператор Pr , такой что

$$\forall A \in \Omega: \text{Pr}(A) \in \Omega, \text{Pr}(\emptyset) = \emptyset, \text{Pr}(A) = \text{Pr}(\text{Pr}(A)).$$

Пусть далее целевая *функция-критерий*

$$\Phi(A, B): \Omega \times \Omega \rightarrow \mathbb{R},$$

задана как *функция штрафа* в том смысле, что задача построения *оператора проекции на базе критерия* подразумевает ее минимизацию:

$$\text{Pr}(A, \Phi) = B: \Phi(A, B) \rightarrow \min(B \in \Omega). \quad (16)$$

Множество *собственных* (стабильных) элементов проектора

$$\mathbf{M} = \{A \in \Omega: \text{Pr}(A, \Phi) = A\}$$

в таком случае называется *критериальной морфологической моделью*. Хорошо определенным критерием проектирования является такой, что

$$\forall A \in \Omega \exists B \in \Omega: \forall C \in \Omega, C \neq B \Rightarrow \Phi(A, B) < \Phi(A, C).$$

Областью допустимых значений (ОДЗ) критерия Φ является

$$V(A, \Phi) = \{B \in \Omega: \Phi(A, B) < +\infty\}.$$

Необходимое условие проективности оператора (16) имеет вид

$$\forall A \in \Omega, B \in V(A, \Phi): B \in V(B, \Phi).$$

Во многих случаях используется также условие монотонности по ОДЗ:

$$\forall A \in \Omega, \forall B \in V(A, \Phi): V(B, \Phi) \subseteq V(A, \Phi). \quad (17)$$

Определим теперь стандартный критерий штрафа

$$\Phi(A, B) = J(A, B) + \chi(A, B) + \alpha \times Q(B), \quad (18)$$

где $J(A, B)$ – критерий соответствия проекции и образа, причем

$$\forall A \in \Omega, B \in V(A, \Phi): J(A, A) \leq J(A, B),$$

$\chi(A, B)$ – критерий (предикат) допустимости решения, определяющий ОДЗ

$$\chi(A, B) = \{0: B \in V(A, \Phi); +\infty: B \notin V(A, \Phi)\},$$

$Q(B)$ – критерий качества проекции, характеризующий ее принадлежность модели M ; $\alpha \geq 0$ – структурирующий параметр, обеспечивающий компромисс между требованиями соответствия и качества. Соответствующий проектор является в общем случае проектором на базе структурирующих критериев и параметров

$$Pr(A, J, \chi, \alpha, Q) = B: \Phi(A, B, J, \chi, \alpha, Q) \rightarrow \min(B). \quad (19)$$

Если $\chi(A, B) \equiv 1$, критерий (18) принимает упрощенный вид

$$\Phi(A, B) = J(A, B) + \alpha \times Q(B).$$

В работе доказано, что с увеличением значения структурирующего параметра α в выражении (18) сложность модели, которую определяет проектор (19), также монотонно возрастает. Таким образом, структурирующий параметр α также можно назвать параметром морфологической сложности модели. Более того, для любого конкретного образа A однозначно определяется коэффициент максимальной морфологической сложности по отношению к $\{J, \chi, Q\}$:

$$\alpha_{\max}(A) = \max\{\alpha \geq 0: A = Pr(A, J, \chi, \alpha, Q)\}.$$

Доказаны следующие достаточные условия построения проективных операторов на базе критериев типа (18).

Пусть критерий соответствия $J(A, B)$ обладает свойствами расстояния:

$$\begin{aligned} \forall A, B, C \in \Omega: J(A, B) \geq 0, J(A, A) = 0, J(A, B) = J(B, A), \\ J(A, B) + J(B, C) \geq J(A, C). \end{aligned} \quad (20)$$

В работе доказано, что монотонные по ОДЗ критерии минимального расстояния (17, 19, 20) определяют морфологический проектор (19).

Определим критерий максимума обобщенной нормы проекции вида:

$$\Phi(A, B) = -J(B) + \chi(A, B) + \alpha \times Q(B), \quad (21)$$

$$\forall A \in \Omega, B \in V(A, \Phi): V(B, \Phi) \subset V(A, \Phi), \quad (22)$$

$$\forall A \in \Omega, B \in V(A, \Phi): J(A) \geq J(B). \quad (23)$$

В работе доказано, критерии максимума обобщенной нормы (21-23) определяют морфологический проектор (19). Также доказано, что любой образ, полученный в результате применения проектора минимума нормы разности, при последующем применении к нему проектора максимума обобщенной нормы проекции с теми же параметрами более не изменяется.

Назовем *эффективным подмножеством* области допустимых значений $V(A, \Phi)$ такое множество $U(A, \Phi) \subseteq V(A, \Phi)$, что

$$\forall B \in V(A, \Phi), B \notin U(A, \Phi): \exists C \in U(A, \Phi), \Phi(A, C) < \Phi(A, B).$$

Определим *условие квазимонотонности ОДЗ*:

$$\forall A \in \Omega, \forall B \in V(A, \Phi): U(B, \Phi) \subseteq V(A, \Phi). \quad (24)$$

В работе доказано, что квазимонотонные по ОДЗ критерии максимума обобщенной нормы (21,22,24) определяют морфологический проектор (19).

Также показано, что если критерий качества задан *штрафным предикатом* $Q(B) \in \{0, +\infty\}$, а критерий $J(A, B)$ является *хорошо определенной функцией соответствия*

$$\forall A, B \in \Omega, A \neq B \Rightarrow J(A, A) < J(A, B),$$

оператор (19) является проектором.

Далее в работе описаны проекторы на базе критериев-предикатов, проекторы на базе признаковых описаний и параметрических моделей. Сформулировано необходимое и достаточное условие проективности для таких критериев. Рассмотрены вопросы построения эффективных в вычислительном смысле алгоритмов реализации критериальных морфологических проекторов. Показана вычислительная эффективность проекторов на базе признаковых описаний и параметрических моделей, в частности, морфологических проекторов на базе разложений. В качестве эффективного метода вычисления морфологических проекторов общего вида на базе критериев-функционалов, не основанных на проективных разложениях и предикатах, предложен *метод динамического программирования*.

Для обобщенных критериальных морфологий предложен *модифицированный морфологический коэффициент корреляции*

$$K_M(A, Pr) = K_M(A, M) = \exp(-\|A - Pr(A, M)\| / \|Pr(A, M)\|), \quad (25)$$

$$0 \leq K_M(A, M) \leq 1; K_M(A, M) = 1 \Leftrightarrow A \in M; Pr(A, M) = 0 \Leftrightarrow K_M(A, M) = 0.$$

Форма выражения (25) отличается от формы выражения (2), поскольку в общем случае равенство нормы проекции норме исходного изображения уже не гарантирует совпадения проекции с изображением.

Во втором разделе рассматривается морфологический анализ изображений на основе неоднородных структурных моделей, описываемых логическими предикатами. Предложен метод автоматизированного конструирования алгоритмов анализа изображений, основанный на преобразованиях модельных описаний. Алгоритму обнаружения однозначно ставится в соответствие упорядоченный набор четких предикатов модели, соединенных операцией конъюнкции. Вводятся две операции над моделями: *перестановка предикатов* и *декомпозиция/редукция* модели объекта путем разбиения на две части с возможным отсечением последней. Целью является преобразование заданного модельного описания объекта к одной из метамodelей известных алгоритмов. Разработаны и реализованы метамodelи двух базовых алгоритмов: «голосования свидетельств» - для обнаружения объектов, описываемых *однородными нерекурсивными* структурными моделями; «прослеживания объектов» - для обнаружения объектов, описываемых *неоднородными и рекурсивными* структурными моделями. Показано, что в общем случае модель любого алгоритма обнаружения на базе логических моделей может быть представлена в виде комбинации двух базовых металгоритмов. Также показано, что на базе

неоднородных структурных моделей, описываемых логическими предикатами, могут быть построены проективные морфологии, аналогичные введенным во второй главе.

В третьем разделе описаны проективные морфологии на базе операторов фильтрации и сегментации изображений, вычисляемых методом динамического программирования. Четвертый раздел содержит описание проективных морфологий изображений, конструируемых на базе моделей, описываемых *структурирующими функционалами, функциями и параметрами*. Пусть определена задача *оптимальной аппроксимации ансамбля функций* $f(x)$ (в простейшем случае – скалярной функции $f(x)$):

$$L(x): \Phi(f(x), g(x), L(x)) \rightarrow \min(L(x)),$$

где $f(x) = \{f_1(x), \dots, f_m(x)\}$ – аппроксимируемый набор функций порядка $m > 0$; $g(x) = \{g_1(x), \dots, g_n(x)\}$ – базис аппроксимации порядка $n > 0$; $L(x) = \{L_1(x), \dots, L_m(x)\}$ – ансамбль-решение; $L(x) = L_1(x) = \dots = L_m(x)$ – функция-решение; $\Phi(f(x), g(x), L(x))$ – комплексный критерий аппроксимации. Тогда оператор

$$\Pr(f(x), g(x)) = L(x),$$

называется *оператором морфологической проекции ансамблей функций*, если

$$\Pr(\Pr(f(x), g(x)), g(x)) = \Pr(f(x), g(x)).$$

В работе показано, что в такой наиболее общей форме, можно описать все рассмотренные во второй и третьей главах частные проективные морфологии, включая проективные морфологии на основе однородных морфологических разложений, морфологии на базе логических предикатов, морфологии на базе отождествления фрагментов изображений и ряд других.

В пятом разделе описаны проективные морфологии на базе методов структурной интерполяции.

Предложен ряд проективных морфологических разложений, основанных на использовании различных методов интерполяции функций. Особенностью данных морфологий является то, что для проектирования функции на различные образующие используются различные операторы проекции:

$$\Pr(A, E) = \vee_{k=1..n} (\Pr_k(A, E_k)) = \vee_{k=1..n} (r_k(A, E_k) \bullet E_k). \quad (26)$$

Рассмотрим классическую задачу построения интерполяционного многочлена одномерной функции. Пусть на отрезке $[a, b]$ заданы $n+1$ опорных (узловых) точек: $a \leq x_0 < x_1 < \dots < x_n \leq b$. Интерполяционный многочлен $I_n(x)$ степени n в форме Лагранжа, как известно, имеет вид:

$$I_n(x) = \sum_i f(x_i) \bullet L(x_i, x). \quad (27)$$

Введем морфологические обозначения согласно (26):

$$\begin{aligned} A &= f(x); \quad E = \{E_k\} = \{L(x_k, x)\}; \quad \Pr(A, E) = I_n(x); \quad ' \vee ' = ' \sum '; \\ r_k(A, E_k) &= f(x_k); \quad \Pr_k(A, E_k) = r_k(A, E_k) \bullet E_k = f(x_k) \bullet L(x_k, x). \end{aligned} \quad (28)$$

Выражения (26), (28) описывают проективную морфологию на базе интерполяционных многочленов. Проективная морфология на базе кусочно-линейной интерполяции аналогична с точностью до вида опорной функции $L(x_k, x)$. В двумерном случае построение морфологического проектора на базе кусочно-линейной интерполяции связано с вычислением триангуляции Делоне. Пусть на прямоугольной области двумерной числовой плоскости $[a, b] \times [c, d]$ заданы n опорных (узловых) точек $X = \{x_i, y_i\} : a \leq x_i \leq b, c \leq y_i \leq d, i = 1..n$. Выражение (27) для двумерного случая принимает вид:

$$I(x, y) = \sum_i f(x_i, y_i) \bullet L(x_i, y_i, x, y),$$

причем *носителем* (областью ненулевых значений) каждой опорной функции $L(x_i, y_i, x, y)$ является объединение треугольников из триангуляции Делоне, прилежащих к соответствующей вершине (x_i, y_i) . По аналогии с морфологическим анализом Ю.П. Пытьева в рамках проективной морфологии на базе кусочно-линейной интерполяции определены «форма», операции «сравнения функций по форме» и морфологический коэффициент корреляции. В качестве опорного множества точек, характеризующих «форму», предложено использовать множество локальных экстремумов функции.

Далее в работе предложен ряд критериальных проективных морфологий на базе методов интерполяции. В качестве примера рассмотрим процедуру кусочно-линейной сегментации одномерной функции на базе линейной интерполяции. Такая процедура любой одномерной функции $f(x)$ ставит в соответствие некоторую ломаную $L(x)$, значения которой совпадают с исходной функцией в n опорных (узловых) точках. Число опорных точек является переменным. При этом ОДЗ $V(f)$ представляет собой множество всех возможных ломаных, узлы которых принадлежат графику f . Однако легко показать, что при повторной сегментации уже сегментированной функции множество возможных решений $V(f) \subsetneq V(L)$. Определим критерий оптимальной сегментации функционалом

$$\Phi(f, L) = -J(L) + \chi(f, L) + \alpha \times Q(L) \rightarrow \min(L),$$

где $J(L)$ – длина графика ломаной; $Q(L)$ – число узловых точек. Иными словами, процедура оптимальной сегментации состоит в отыскании такой ломаной, которая одновременно максимизирует длину графика и минимизирует число опорных точек. В работе показано, что данный критерий является *квазимонотонным по ОДЗ*, и поскольку $J(L)$ не зависит от f , описанная процедура кусочно-линейной сегментации является морфологическим проектором. Критерий J , имеющий смысл «максимум длины графика интерполированной функции», легко обобщить на случай функций большего числа измерений. Например, для двумерной функции аналогичный критерий будет иметь вид «максимум площади поверхности графика интерполированной функции» и т.д.

Переход от монотонных к квазимонотонным критериям позволяет обосновать существование широкого класса *критериальных проективных морфологий на базе структурной интерполяции*, которые могут быть описаны следующим образом. Назовем набор образов $X = \mathfrak{A}(A) = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \subseteq \Omega$ *полным структурным описанием* образа $A \in \Omega$, если образ A может быть полностью однозначно реконструирован путем объединения элементов из X :

$$A = \delta(X) = X_1 \vee X_2 \vee \dots \vee X_n,$$

где $(\mathfrak{A}, \delta)$ – операции сегментации и реконструкции соответственно. Определим *множество опорных элементов интерполяции* $Y \subseteq X$. Интерполированный образ в таком случае будет иметь вид $A' = \delta(\gamma(Y))$, где γ – *оператор структурной интерполяции*, такой, что $\forall Y: Y \subseteq \mathfrak{A}(\delta(\gamma(Y)))$. Критериальная морфология на базе структурной интерполяции определяется решением следующей задачи:

$$\psi(A, \Phi) = A': \Phi(A, A') = J(A, A') + \chi(\mathfrak{A}(A), Y) + \alpha \times Q(Y) \rightarrow \min(Y), \quad (29)$$

где $J(A, A')$ – критерий соответствия исходного и интерполированного образов; предикат $\chi(X, Y)$ описывает условие $Y \subseteq X$; $Q(Y) = \dim(Y)$ – число опорных образов, используемых при интерполяции.

Если критерий $J(A, A') = -J(A')$ не зависит от A и при этом

$$\forall B \in V(A): J(B) < J(A)$$

то в силу рассуждений, аналогичных проведенным выше для примера оптимальной интерполяции одномерной функции, оператор оптимальной структурной интерполяции (29) будет являться *интерполяционным проектором*. Используя различные способы структурного описания изображений и различные критерии, можно строить различные практически полезные процедуры сегментации изображений на базе структурной интерполяции образов и изображений для различных предметных областей.

Четвертая глава посвящена рассмотрению вероятностного подхода к анализу изображений. Как было показано в первой главе, в основе морфологического подхода лежит единая *схема порождения анализируемых данных*. При этом в большинстве практических задач от четких логических моделей необходимо перейти к *вероятностным моделям*, описывающим наши априорные знания и представления об этих ненаблюдаемых составляющих задачи. Пусть заданы: *вероятностная модель формирования образа* $P(M): \Omega \rightarrow [0,1]$, *вероятностная модель регистрации* $P(L/M): M \rightarrow [0,1]$, *вероятностная модель искажений* $P(A/L): M \times \Omega \rightarrow [0,1]$, где $P(X)$ обозначает «вероятность X », $P(X/Y)$ обозначает «вероятность X при условии Y ». Как следует из теории вероятности, комплексный критерий анализа данных, включающий эти элементы, имеет вид *критерия максимальной вероятности*, требующего подобрать такое *решение* $L(A)$, которое максимизирует оценку вероятности наблюдаемых образов

Определим оператор *максимально вероятной реконструкции образа*

$$\psi: \Omega \rightarrow M, \psi(A)=L: P(A,L)=P(A/L) \times P(L/M) \times P(M) \rightarrow \max(L).$$

Имеет ли смысл накладывать на этот оператор условие проективности? Далеко не всегда, ведь при вторичном применении оператора максимально вероятной реконструкции необходимо учитывать изменения в вероятностной модели, происходящие при замене реального образа A модельным L .

Добавим в схему порождения данных *модель измерений* $f(A): \Omega \rightarrow \Psi^m$, описывающую вычисление признаков, регистрируемых на изображении в ходе его анализа. Определим оператор *максимально вероятной реконструкции образа по признакам*

$$\psi_f: \Omega \rightarrow M, \psi_f(A)=L: P(f,L)=P(f/L) \times P(L/M) \times P(M) \rightarrow \max(L),$$

где $P(f/L)=P(f/A) \times P(A/L)$. При этом морфологии достаточным обоснованием выбора системы признаков является следующее условие:

$$P(f,L) \rightarrow \max(L) \Rightarrow P(A,L) \rightarrow \max(L), \quad (30)$$

то есть, что f должно быть *достаточной статистикой* для A :

$$P(L/A)=P(L/f(A)).$$

Пусть теперь задана *структурная модель* M вида

$$L=L_1 \vee L_2 \vee \dots \vee L_n,$$

и существует факторизация функции совместной вероятности

$$P(f,L)=\prod_{i=1..m} \prod_{j=1..n} P_{ij}(f_i, L_j).$$

Тогда задача (30) принимает вид

$$P(f,L)=\prod_{i=1..m} \prod_{j=1..n} P_{ij}(f_i, L_j) \rightarrow \max(L_1, \dots, L_n), \quad (31)$$

где функции

$$P_{ij}(f_i, L_j): \Psi_i \times \Omega_j \rightarrow [0,1]$$

определяют *меру свидетельствования* частного признака f_i в пользу частной структурной гипотезы L_j . Процедуру решения задачи (31) будем называть процедурой *анализа морфологических свидетельств*.

Для случая свидетельств, независимых в совокупности, *метод анализа свидетельств на изображениях* был предложен автором совместно с С.Ю. Желтовым в статье [1]. В рамках данного метода обнаружение объектов на изображениях сводится к проверке гипотезы о нахождении изображения объекта на тестируемом реальном изображении. При этом любой *яркостно-геометрической модели* объекта ставится в соответствие некоторая экспертная *вероятностная модель*, описывающая статистические зависимости между особенностями изображения и гипотезой о принадлежности наблюдаемого объекта данной яркостно-геометрической модели. Полученная вероятностная модель используется непосредственно в ходе *низкоуровневого анализа* конкретного предъявляемого изображения. При этом каждая обнаруженная особенность (характерная черта) данного изображения рассматривается как *событие, свидетельствующее* в пользу гипотезы (ряда гипотез) о наличии и характеристиках искомого объекта. В рамках данной работы «событиям» придается смысл *морфологических событий*, связанных с элементами морфологических описаний наблюдаемых изображений, а «гипотезам» – смысл *морфологических гипотез*, связанных с элементами морфологических описаний их гипотетических прообразов.

Разработаны и обоснованы следующие основные алгоритмические приемы, повышающие вычислительную эффективность процедур морфологического анализа свидетельств:

- Эффективный выбор голосующих событий;
- Декомпозиция и редукция вектора параметров;
- Загрубление (переход к менее сложной) модели;
- Иерархический анализ свидетельств.

Предложена модульная схема инвариантного детектирования объектов, содержащая по крайней мере три основных процедуры:

- обработка изображения путем выделения первичных событий и их голосования;
- анализ аккумулятора с целью определения положения и/или ориентации объектов;
- повторный анализ изображения с целью проверки природы обнаруженных объектов и уточнения их параметров.

Им соответствует следующая *последовательность шагов разработки алгоритма* обнаружения и идентификации объектов на изображениях:

1. Для конкретной задачи обнаружения, формально описать *модель объекта, модель регистрации и модель искажений*.
2. Определить возможную степень *загрубления модели объекта*.
3. Определить возможную *редукцию (или декомпозицию) вектора параметров регистрации*, обеспечивающую необходимую инвариантность детектирования объекта по загрубленной модели.
4. Определить *типы морфологических событий*, вычислительные затраты на регистрацию которых не превышают заданных пределов.

5. Составить качественную *вероятностную модель*, связывающую гипотезу о присутствии на изображении объекта с соответствующими событиями, по возможности, загрузить эту модель.

6. Для полученной вероятностной модели определить соответствующую *процедуру голосования* для каждого типа используемых событий.

7. С учетом использованного загрубления модели объекта, разработать необходимую *процедуру постпроверки* достоверности идентификации объекта.

Во втором разделе метод анализа морфологических свидетельств обобщается на случай моделей, задаваемых Марковскими реляционными гиперграфами (МРГ). МРГ представляет собой атрибутированный реляционный гиперграф, причем его вершины и гиперребра имеют в качестве атрибутов значения Марковских парциальных вероятностей соответствующих элементов изображения и наблюдаемых связей между ними. Задача обнаружения и идентификации объекта сводится к задаче индексации МРГ на множестве элементов, выявленных в ходе анализа данного изображения. В третьем разделе в рамках задачи объединения свидетельств рассматривается наиболее общий случай сложных гипотез. Предложенная схема объединения свидетельств из множества E позволяет вычислять две независимые оценки достоверности гипотезы H об обнаружении объекта - *коэффициент доверия* $BEL(H/E)$ и *достоверность* $PLS(H/E)$. Если рассматриваются только "подкрепляющие" свидетельства (от событий, вероятность обнаружения которых при условии наличия объекта больше, чем в его отсутствие) они определяют *доверительный интервал* $P(H/E) \in [BEL(H/E), PLS(H/E)]$.

Пятая глава посвящена разработке специализированных методов морфологического анализа изображений и практических приложений машинного зрения. В первом разделе описан разработанный метод обнаружения продольных линий дорожной разметки на стереоизображениях дорожных сцен. Основными этапами предложенной модульной схемы являются: первичное выделение сегментов разметки; монокулярное обнаружение продольных линий разметки; стереоотождествление и локализация положения линий разметки; прослеживание линий разметки. Этап поиска положения линий разметки представляет собой специальную процедуру анализа морфологических свидетельств. Суть процедуры заключается в голосовании пар сегментов разных строк, входящих в зону поиска, в пользу набора гипотез о положении и направлении линии разметки, представленных в виде массива-аккумулятора. Параметризация аккумулятора соответствует натуральной параметризации прямых линий точками пересечения прямой с верхней (x_{Top}) и нижней (x_{Bottom}) границами зоны поиска. При этом пучку параллельных прямых, лежащих в одной плоскости и сходящихся на изображении в одной точке, в пространстве (x_{Top}, x_{Bottom}) соответствуют точки, лежащие на одной прямой. Разработанная система определения собственной полосы движения реализована для системы обнаружения препятствий перспективного автомобиля повышенной безопасности ASV-2 (Япония) на базе вычислительной среды реального времени MVC 150/40 (США) и показала устойчивое функционирование в разнообразных условиях погоды и освещения, при скорости движения до 120 км/час.

Во втором разделе описан разработанный оригинальный метод обнаружения штриховых кодов и текстовых областей на изображениях, основанный на использовании *модифицированного преобразования Хафа (МНТ)*, отличающегося тем, что краевые пиксели голосуют в малом растворе угла вокруг направления вектора-

градиента, а сущность анализа аккумулятора состоит не в поиске локальных максимумов, а в поиске сопряженных пар "минимум-максимум" в дифференцированном пространстве Хафа (ρ, θ) , соответствующих границам штриховых или текстовых полос на изображении.

В третьем разделе описаны разработанные элементы систем автоматизированного документооборота и систем автоматической идентификации. Разработан ряд систем обнаружения и считывания штриховых кодов. Разработана система считывания паспортно-визовой информации. Разработан ряд систем обнаружения и считывания номеров автомобилей, а также номеров вагонов и цистерн. Разработан ряд прототипов систем контроля защищенных документов. Разработаны алгоритмы определения подлинности акцизной марки на основе применения критериев наложения и относительного рассогласования цветowych шаблонов. Разработана методика получения и обработки цифровых изображений защитных рельефных элементов, позволяющей осуществлять восстановление двумерной геометрической модели рельефного элемента. Разработана методика получения и обработки цифровых изображений металлографской печати, позволяющей осуществлять автоматическое выделение и оценку качества металлографских «усиков».

Четвертый раздел посвящен разработке элементов систем автоматизированного промышленного производства и контрольно-измерительных систем. Разработана система автоматического измерения угла схождения сварного шва. Для решения задачи разработана оригинальная процедура анализа свидетельств, использующая аккумулятор Хафа с натуральной параметризацией прямых линий. Разработана система автоматического измерения объема круглых лесоматериалов. Оригинальный алгоритм анализа изображения представляет собой специализированную процедуру анализа свидетельств, предназначенную для обнаружения объектов круглой формы на полутоновых изображениях на основе голосования контурных точек. Разработана система автоматического выделения и фильтрации треков горячих частиц. На этапе выделения следа частиц используется процедура морфологического анализа на основе рекуррентного преобразования Хафа в скользящем окне. Разработана система автоматического распознавания и подсчета некондиционных кристаллов на круглой пластине. Для выделения ячеек используется модифицированное преобразование Хафа, при определении некондиционных ячеек – морфологическая фильтрация.

Пятый раздел посвящен разработке элементов антитеррористических и биометрических систем. Разработана система обнаружения оставленных предметов. Система обеспечивает детектирование появившихся или исчезнувших объектов относительно статичного фона (сцены) в условиях наличия произвольного количества движущихся объектов в поле наблюдения. Разработана система автоматического выделения человеческого лица и слежения за его чертами (глаза, рот, брови, нос) с целью их последующего отображения в реальном времени. Для обнаружения элементов лица применяются специальные морфологические операторы. Разработана система автоматического определения и сохранения стандартизованных цифровых изображений лица оформляемых пассажиров в пунктах пограничного, билетного и другого визуального контроля на транспорте. Разработано программное обеспечение и программно-аппаратный комплекс для автоматизированного контроля соответствия цифровых фотографических изображений лица требованиям стандарта ISO/IEC. Реализованы: детектор лица, позволяющий определять точные границы лица и

оценивать геометрические параметры его размера и положения; модуль оценки яркостных и цветовых характеристик; детектор открытых/закрытых глаз; детектор бликов и теней; детектор основных черт лица; детектор поворотов и наклонов головы.

В шестом разделе описана разработка элементов ряда медицинских компьютерных систем. Описаны: система компьютерного анализа томографических изображений для диагностики воспалительных заболеваний пазух и полости носа (синуситов), система компьютерного анализа медицинской рентгенографической информации для ранней диагностики остеопороза, система автоматизированного анализа цифровых рентгеновских маммографических изображений. Последняя из перечисленных систем является системой автоматизированной компьютерной диагностики и обеспечивает автоматическое обнаружение ряда характерных патологий молочной железы на рентгеновских маммографических изображениях.

В заключении сформулированы основные выводы и рекомендации.

Основные результаты работы

1. Для унифицированного описания яркостно-геометрических аспектов широкого класса процедур анализа изображений предложена теория *проективных морфологических разложений*, опирающаяся на однородные структурные модели, представляющие изображения в виде объединения независимых линейных проекций на образующие (структурные примитивы) из некоторого набора, причем коэффициенты линейной связи образующих и анализируемого образа составляют регулярный вектор морфологического разложения, характеризующий данный образ. Определены морфологические корреляционные меры и соответствующие схемы сравнения и яркостно-геометрической привязки изображений на основе их морфологических разложений. Предложен единый подход к построению алгоритмов структурной фильтрации, сжатия и сегментации цифровых изображений, а также обнаружения и идентификации объектов на изображениях, основанный на проективных морфологических разложениях.

2. Для унифицированного описания яркостно-геометрических аспектов более общего класса процедур анализа изображений предложена теория *критериальной проективной морфологии*, позволяющая использовать как однородные, так и неоднородные модели данных, накладывающие определенные дополнительные условия на связи между элементами структурной яркостно-геометрической модели. Предложена и исследована схема построения критериальных морфологических операторов анализа изображений на основе *стандартного морфологического критерия*, включающего *критерий соответствия* проекции и проектируемого образа, *критерий (предикат) допустимости* решения, *критерий качества* проекции, характеризующий ее принадлежность модели, и *структурирующий параметр*, обеспечивающий компромисс между требованиями соответствия и качества. Сформулированы необходимое и достаточные условия проективности критериальных морфологических операторов. Показано, что структурирующий параметр морфологического критерия определяет морфологическую сложность соответствующей модели.

3. Для описания вероятностных аспектов процедур анализа изображений разработан метод *морфологического анализа свидетельств*, отличающийся тем, что вероятностная структурная модель объекта используется непосредственно в ходе низкоуровневого анализа изображения. При этом каждая обнаруженная особенность данного изображения рассматривается как событие, свидетельствующее в пользу

гипотезы (ряда гипотез) о наличии и характеристиках искомого объекта, а процесс проверки гипотез управляется событиями в том смысле, что каждое выявленное событие инициирует обработку лишь тех гипотез, на апостериорную вероятность которых данное событие может повлиять. Получены обобщения данной схемы для случая неоднородных моделей объектов, описываемых Марковскими реляционными гиперграфами, а также для общего случая сложных немарковских моделей. В последнем случае предложенная схема позволяет вычислять две независимые оценки достоверности - *коэффициент доверия* и *достоверность*. При условии, что рассматриваются только "подкрепляющие" свидетельства, пара указанных значений определяет *доверительный интервал свидетельской достоверности*.

4. Разработана обобщенная методика построения модульных морфологических фильтров. На ее основе предложена оригинальная схема построения *математической морфологии на базе преобразования Хафа* и его модификаций (Н-морфология), а также ее обобщение на случай полутоновых изображений. Предложены оригинальный алгоритм вычислительно эффективной реализации рекуррентного преобразования Хафа в скользящем окне и соответствующая Н-морфология. Особенности предложенного алгоритма являются: двухпроходное голосование (по столбцам и по строкам), а также использование специальной натуральной параметризации прямых линий, обеспечивающей возможность рекуррентного обновления значений аккумулятора при переходе к каждому следующему положению скользящего окна.

5. Предложен и обоснован широкий класс *проективных морфологий на базе структурной интерполяции*. Предложены оригинальные проективные морфологические разложения, а также критериальные проективные операторы сегментации и реконструкции одномерных и двумерных данных, реализуемые с использованием различных методов кусочной интерполяции одномерных и двумерных функций.

6. Разработан метод автоматизированного конструирования алгоритмов анализа изображений, основанный на преобразованиях исходных модельных описаний к модельным описаниям, соответствующим метаалгоритмам известных схем анализа изображений. Предложены проективные морфологии на базе неоднородных структурных моделей, описываемых логическими предикатами.

7. Разработан метод автоматизированного конструирования модульных процедур обнаружения объектов, основанный на «генетическом отборе» информативных элементов эталонных изображений в процессе обучения. При этом критерием отбора является функция качества, вычисляемая по значениям точности, надежности и времени работы процедуры на изображениях обучающей выборки.

8. Разработан метод обнаружения штриховых кодов и текстовых строк на полутоновых изображениях, основанный на использовании оригинальной процедуры анализа свидетельств - *модифицированного преобразования Хафа* (МНТ), отличающегося сведением задачи поиска штриховой полосы к задаче обнаружения вспомогательных интегральных признаков в дифференцированном пространстве Хафа. Предложенный метод успешно реализован в разработанных системах обнаружения и считывания штриховых кодов, считывания паспортно-визовой информации, анализа подлинности защищенных документов, считывания номеров автомобилей, вагонов и цистерн, автоматической сортировки писем.

9. Разработан метод обнаружения продольных линий дорожной разметки на стереоизображениях дорожных сцен, представляющий собой специальную процедуру

анализа морфологических свидетельств, суть которой заключается в голосовании пар сегментов разных строк, входящих в зону поиска, в пользу набора гипотез о положении и направлении линии разметки, представленных в виде массива-аккумулятора, причем выбранная параметризация аккумулятора позволяет непосредственно при анализе аккумулятора учитывать геометрические стерео ограничения. Разработанная система выделения собственной полосы движения автомобиля была реализована для перспективного автомобиля повышенной безопасности ASV-2 (Япония) и показала устойчивое функционирование в разнообразных условиях погоды и освещения.

10. Разработаны специализированные методы и алгоритмы анализа изображений для систем автоматического выделения и фильтрации треков горячих частиц, автоматического измерения угла схождения сварного шва, автоматического измерения объема круглых лесоматериалов, автоматического выделения и межкадрового прослеживания движущихся объектов и выделения оставленных предметов на видеопоследовательностях, автоматического выделения человеческого лица и слежения за его чертами, трехмерной реконструкции лиц, автоматической регистрации изображений лица пассажиров в пунктах контроля на транспорте, автоматизированной регистрации цифровых изображений лица для биометрических документов, биомеханических исследований на основе высокоскоростной стереосъемки движений человека, комплексирования двумерной информации от датчиков различной физической природы, выделения движущихся объектов на изображениях от подвижного сенсора, определения собственной полосы движения автомобиля, компьютерного анализа томографических изображений для диагностики воспалительных заболеваний пазух и полости носа (синуситов), компьютерного анализа медицинской рентгенографической информации для ранней диагностики остеопороза, автоматизированного анализа цифровых рентгеновских маммографических изображений.

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях

Списки статей и материалов конференций приведены в хронологическом порядке.

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Buryak D.Yu., Vizil'ter Yu.V. Application of genetic algorithms for automated construction of image analysis procedures // Pattern Recognition and Image Analysis. 2003. V.13. №1. P.77-79.
2. Buryak D.Yu., Vizil'ter Yu.V. The use of genetic algorithms for the automated construction of the image analysis procedures // Pattern Recognition and Image Analysis. 2003. V.13. №3. P.483-488.
3. Визильтер Ю.В. Объединение свидетельств при проверке сложных гипотез в задачах распознавания образов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. №3. С.26-32.
4. Бекетова И.В., Каратеев С.Л., Визильтер Ю.В., Бондаренко А.В., Желтов С.Ю. Автоматическое обнаружение лиц на цифровых изображениях на основе метода адаптивной классификации AdaBoost // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. №8. С.2-6.
5. Визильтер Ю.В. Применение метода анализа морфологических свидетельств в задачах машинного зрения // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. №9. С.11-18.
6. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю. Сравнение и локализация фрагментов изображений с использованием проективных морфологий // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. №2. С.14-22.

7. Бекетова И.В., Каратеев С.Л., Визильтер Ю.В., Бондаренко А.В., Желтов С.Ю. Программно-аппаратный комплекс подготовки и контроля цифровых фотографий для биометрических документов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. №2. С.9-14.
8. Визильтер Ю.В. Структурная фильтрация цифровых изображений с использованием проективных морфологий // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. №3. С.18-22.
9. Визильтер Ю.В. Проективные морфологии на базе интерполяции // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. №4. С.11-18.
10. Визильтер Ю.В., Ососков М.В. Опыт разработки и использования интегрированной программной среды для анализа и обработки цифровых изображений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. №5 С.7-11; 2008. №6. С.12-14.
11. Визильтер Ю.В., Вишняков Б.В. Исследование поведения авторегрессионных фильтров в задаче выделения и анализа движения на цифровых видеопоследовательностях // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. №8. С.2-8.
12. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю. Проективные морфологии и их применение в структурном анализе цифровых изображений // Изв. РАН. ТиСУ. 2008. №6. С.113-128.

Материалы и тезисы конференций, статьи в сборниках:

13. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Степанов А.А. Новые методы обработки изображений. Серия: Авиационные системы. №4. М: ГосНИИАС, 1992. 21 с.
14. Visilter Yu., Zheltov S., Stepanov A. Shape analysis using Pytiev morphologic paradigm and its use in machine vision // SPIE Proceedings. 1994. V. 2350. P.163-167.
15. Zheltov S., Skryabin S., Visilter Yu. Algorithms and software for stereophotogrammetric system based on a personal computer // SPIE Proceedings. 1994. V. 2350. P.357-362.
16. Skryabin S., Zheltov S., Visilter Yu. Photogrammetric processing of large images on a PC // SPIE Proceedings. 1995. V.2646. P.97-102.
17. Zheltov S., Visilter Yu., Stepanov A., Morzeev Yu. Frame paradigm and object-oriented image processing for photogrammetry // SPIE Proceedings. 1995. V.2646. P.234-239.
18. Stepanov A., Visilter Yu., Morzeev Yu, Zheltov S. Object-oriented frame approach to image processing and data management in the multisensory remote sensing // SPIE Proceedings. 1995. V. 2587. P.125-135.
19. Stepanov A., Visilter Yu., Zheltov S., Morzeev Yu. Object-Oriented Frame approach for improved interfaces design for image processing systems // SPIE Proceedings. 1995. V.2597. P.316-320.
20. Visilter Yu., Zheltov S. The conjunction angle measurement using the Hough Transform // ISPRS Intercommission III-V workshop. Zurich, 1995. P.5.
21. Visilter Yu., Zheltov S., Stepanov A. Object Detection and Recognition using Events-based Image Analysis // SPIE Proceedings. 1996. V.2823. P.184-195.
22. Visilter Yu., Zheltov S., Stepanov A. Events-based Image Analysis for Machine Vision and Digital Photogrammetry // ISPRS Proceedings. International archives of photogrammetry and remote sensing. 1996. V.XXXI. Part B3. P.898-902.
23. Visilter Yu., Zheltov S., Stepanov A., Morzeev Yu. Frames based analysis of multisensor image sequences // ISPRS Proceedings. International archives of photogrammetry and remote sensing. 1996. V.XXXI. Part B2.
24. Visilter Yu., Zheltov S., Morzeev Yu. Image segmentation using the original histogram based multithreshold presegmentation // SPIE Proceedings. 1997. V.3217. P.224-231.
25. Vizilter Yu.V., Zheltov S.Yu., Lukin A.A. Development of OCR system for portable passport and visa reader // SPIE Proceedings. 1999, V. 3651. P.194-199.
26. Visilter Yu. Image Analysis Using Select-Only Morphological Operators // SPIE Proceedings. 2000. V.4197. P.107-118.

27. Knyaz V., Visilter Yu. Method for 3D noncontact measurements of cut trees package area // SPIE Proceedings. 2001. V.4189. P.276-285.
28. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В. Машинное зрение: задачи и возможности // Технологии машинного зрения. Регистрация и анализ цифровых изображений. М.: Видеоскан, 2001. С.14-16.
29. Визильтер Ю.В., Сибиряков А.В., Ососков М.В., Выголов О.В. Pisoft Image Framework – программная среда для анализа и обработки изображений // Технологии машинного зрения. Регистрация и анализ цифровых изображений. М.: Видеоскан, 2001. С.16-18.
30. Визильтер Ю.В., Князь В.А., Сибиряков А.В., Ососков М.В., Выголов О.В., Лагутенков А.В. Опыт разработки практических систем компьютерного и машинного зрения // Технологии машинного зрения. Регистрация и анализ цифровых изображений. М.: Видеоскан, 2001. С.22-24.
31. Visilter Yu.V. Design of Morphological Operators Based on Selective Morphology // SPIE Proceedings. V. 4667, Sun Jose, 2002, pp.215-226.
32. Буряк Д.Ю., Визильтер Ю.В. Возможности применения генетических алгоритмов для автоматизированного конструирования процедур анализа изображений // 6-я Международная конференция Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии (РОАИ-6-2002). Труды конференции. 2002. С.87-92.
33. Буряк Д.Ю., Визильтер Ю.В. Автоматизированное конструирование близких к оптимальным процедур идентификации и обнаружения объектов на изображении с использованием генетических алгоритмов // Материалы 12 Международной Конференции по Компьютерной Графике и Машинному Зрению Графикон'2002. Нижний Новгород, 2002. С.292-298.
34. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В., Ососков М.В. Система распознавания и визуализации характерных черт человеческого лица в реальном времени на персональной ЭВМ с использованием web-камеры // Материалы 12 Международной Конференции по Компьютерной Графике и Машинному Зрению Графикон'2002. Нижний Новгород, 2002. С.251-254.
35. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В., Князь В.А., Выголов О.В. Обнаружение препятствий в системе управления транспортным средством // Доклады Третьей международной конференции «Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях». Минск, 2002. Т.2. С.121-126.
36. Buryak D.Yu, Vizilter Yu.V. Automated construction of identification procedures for objects belonging to several classes // Programming and Computer Software. 2003. V.29. № 4. P.238-243.
37. Буряк Д.Ю., Визильтер Ю.В. Модели представления решающих процедур и их использование в генетическом алгоритме для поиска оптимальных процедур анализа изображений // Методы и средства обработки информации: Труды первой Всероссийской научной конференции. М.: МГУ, 2003. С.317-323.
38. Senchenko V.N., Dozhnikov V.S., Vizilter Yu.V., Borisov A.A. Measuring System For Temperature And Velocity Monitoring In Thermal Plasma Spraying Processes // Proceedings of Fifteenth Symposium on Thermophysical Properties. 2003, Boulder, Colorado, USA.
39. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В. Машинное зрение как прикладная техническая дисциплина // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2004. №3. С.14-19.
40. Zheltov S.Yu., Vizilter Yu.V. Robust Computer Image Analysis for Flight Vehicles Navigation and Guidance // 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. St.Petersburg, 2004. V.2. P.164-167.
41. Zheltov S.Yu., Vizilter Yu.V. Development of effective procedures for automatic stereo matching. // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Proceedings. V.XXXV. Part B3. P.720-723.
42. Knyaz V.A., Vizilter Yu.V., Zheltov S.Yu. Photogrammetric techniques for measurements in woodworking industry // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Proceedings. V. XXXIII. Part B5/2. P.42-47.

43. Визильтер Ю.В., Морзеев Ю.В., Бекетова И.В., Каратеев С.Л. Методы биометрической идентификации человека по изображениям его лица // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. №11. С.2-10.
44. Визильтер Ю.В. Метод компьютерного анализа изображений, основанный на объединении морфологических свидетельств // Труды ГосНИИАС. Серия ИТ. 2005. №2. С.14-25.
45. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В., Ососков М.В., Бекетова И.В., Каратеев С.Л. Автоматическое выделение на цветных цифровых изображениях лица человека и его характерных черт // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. №10. С.2-7.
46. Визильтер Ю.В., Лагутенков А.В., Ососков М.В., Выголов О.В., Блохинов Ю.Б. Выделение и межкадровое прослеживание движущихся объектов при регистрации изображений сложных пространственных сцен произвольно движущимися двумерными сенсорами // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2006. №3. С.34-39.
47. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В. Перспективы интеллектуализации систем управления ЛА за счет применения технологий технического зрения // Авиационные системы в XXI веке. Юбилейная научно-техническая конференция. Сборник докладов. Т.1. С.39-52.
48. Визильтер Ю.В., Глазов В.Н., Желтов С.Ю., Ким В.Я., Морзеев Ю.В., Обросов К.В. Проектирование алгоритмов машинного зрения в системах наведения высокоточного оружия, использующих датчики различной физической природы // Авиационные системы в XXI веке. Юбилейная научно-техническая конференция. Сборник докладов. Т.2. С.177-185.
49. Визильтер Ю.В., Б.В. Вишняков, Ососков М.В., Выголов О.В. Использование модифицированного метода оптических потоков в задаче выделения и прослеживания движущихся объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. №5. С.3-8.
50. Бондаренко А.В., Визильтер Ю.В., Князь В.А., Копылов Д.Н. Тренажер нового поколения для обучения распознаванию владельца документа // Пограничник Содружества. 2007. N3(51). С.59-61.
51. Бекетова И.В., Каратеев С.Л., Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю. Автоматическое обнаружение и локализация глаз на цифровых изображениях лиц на основе метода адаптивной классификации AdaBoost. // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы: Материалы IX Международной научно-технической конференции. Донецк: ИПИИ Наука і освіта. 2008. Т.1. С.291- 293.
52. Каратеев С.Л., Костромов Н.А., Бекетова И.В., Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю. Использование самоорганизующихся нейронных сетей для кластеризации цветов на цветных цифровых изображениях и выделения частей человеческого тела по цвету кожи. // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы: Материалы IX Международной научно-технической конференции. Донецк: ИПИИ Наука і освіта. 2008. Т.2. С.227-229.
53. Vizilter Yu., Zheltov S. Projective Morphologies for Image Analysis // 9-th International Conference Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-9-2008): Conference Proceedings. 2008. V.2. P.287-290.

Монография:

54. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Князь В.А., Ходарев А.Н., Моржин А.В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision. М.: ДМК пресс, 2007. 464 с.

Личный вклад. Все оригинальные математические результаты, методы решения задач и основные алгоритмические подходы, описанные в диссертационной работе, принадлежат соискателю. Соавторы публикаций принимали участие в постановке задач, моделировании алгоритмов и их технической реализации.