

На правах рукописи

САФРОНОВ Кирилл Валерьевич

**ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД  
РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МНОГОМЕРНЫХ  
ДАННЫХ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (в промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»  
на кафедре вычислительной техники и защиты информации

Научный руководитель	д-р техн.наук, проф. <b>Васильев Владимир Иванович</b>
Официальные оппоненты	д-р техн.наук, проф. <b>Юсупова Нафиса Исламовна</b>  канд.техн.наук, доц. <b>Гиниятуллин Вахит Мансурович</b>
Ведущая организация	ГОУ ВПО МО « <b>Челябинский государственный университет</b> »

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д212.288.03  
при Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, Уфа-центр, ул.К.Маркса, 12. УГАТУ

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета.  
Автореферат размещён на сайте университета <http://www.ugatu.ac.ru/science>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн.наук, проф.

**В.В. Миронов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одной из основных задач, которую человек постоянно решает в процессе своей жизнедеятельности, является задача распознавания объектов. Эта задача эффективно решается человеком как на бытовом уровне, например, при чтении книг, при разговоре с собеседником, так и при выполнении своих профессиональных обязанностей, например, при визуальном контроле за качеством производства, при поиске и идентификации объектов на изображениях и т.п. При этом при решении задачи распознавания человек является наиболее эффективной и универсальной системой, т.е. человек способен распознавать не только конкретные, но и абстрактные образы (например, обнаружить логическую связь). Именно поэтому создание эффективных автоматических систем распознавания объектов, явлений, ситуаций и процессов, которые по своим возможностям приближались бы к возможностям человека, является одной из приоритетных задач в области разработки искусственного интеллекта, привлекающая внимание многих исследователей.

Задача автоматического распознавания объектов известна довольно давно, а первые попытки её решения предпринимались уже в начале 70-х годов прошлого века. По данной тематике опубликовано и выпущено множество статей и книг, разработан целый ряд методов распознавания и спроектированных на их основе автоматических систем, которые находят широкое применение в различных областях.

Вместе с тем, несмотря на высокий уровень исследований в этой области, создание эффективно работающих систем для распознавания объектов остаётся сложной, до конца не решённой проблемой. Существует ряд практических задач, которые не могут быть эффективно решены с помощью известных методов и алгоритмов распознавания. Фундаментальные исследования по данной проблеме сегодня практически не ведутся, а конкретные научные разработки имеют своей целью лишь решение узкоспециализированных задач. Основная причина этого заключается в отсутствии эффективных методов распознавания объектов, способных решать задачи различных классов, особенно в реальном времени. Отсюда вытекает и основная проблема существующих систем распознавания: каждая такая система жёстко ориентирована на специфику обрабатываемых данных и распознаваемых объектов. При изменении исходных данных либо классов распознаваемых объектов необходимо адаптировать систему к изменившимся условиям, если это возможно, а также проводить длительное переобучение на новых наборах тестовых данных. Само распознавание может занимать, как правило, довольно значительное время.

Другой характерной особенностью существующих систем и методов распознавания объектов является невозможность либо неточность одновременного распознавания объекта и определения его положения и ориентации в простран-

нстве либо по отношению к другим объектам.

Одним из путей решения вышеназванных проблем является разработка нового метода распознавания объектов, основанного на комбинации методов сопоставления с образцом и использовании оптимизационных алгоритмов. В основе этого подхода лежит идея объединения различных методов сопоставления с использованием общей математической модели задачи распознавания объектов на основе анализа многомерных данных, не зависящей от характера обрабатываемых данных, а также от признаков распознаваемого объекта.

Однако такой подход требует решения ряда задач, связанных с оптимизацией длительности и сложности процедуры обучения, сложности процедуры построения набора признаков распознаваемого объекта, длительности процедуры сопоставления и возможности распознавания объектов на искажённых и зашумлённых данных. Таким образом, тема диссертационной работы, связанная с разработкой универсального метода распознавания объектов на основе анализа многомерных данных, является актуальной.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является повышение скорости, точности и надёжности распознавания объектов и определения их положения на множестве многомерных данных на основе разработки и использования нового иерархического итерационного метода.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие задачи:

1. Разработать метод распознавания объектов на основе анализа многомерных данных, позволяющий одновременно определять класс объектов, их положение и ориентацию в пространстве.
2. Разработать алгоритмическое обеспечение для реализации предложенного метода распознавания объектов.
3. Разработать архитектуру системы распознавания объектов, основанную на предложенном методе, а также методику её практического применения при решении конкретных задач.
4. Разработать программное обеспечение, реализующее предложенный метод распознавания объектов.
5. Оценить эффективность применения предложенного метода распознавания объектов при решении ряда практических задач.

### **Методы исследования**

Для решения поставленных в диссертационной работе задач были применены методы оптимизации, математической статистики, интеллектуального анализа данных, обработки изображений, теории принятия решений, теории нейронных сетей.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе разработан иерархический итерационный метод распознавания объектов. При этом получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Предложен метод распознавания объектов на множестве многомерных

данных, новизна которого состоит в комбинации метода сопоставления с алгоритмами оптимизации, а также в интерпретации метода сопоставления, которая заключается в обнаружении и локализации объекта, заданного прототипом, на полном множестве многомерных данных. Разработанный метод обладает высокой устойчивостью к шумам, инвариантен к физической природе исходных данных и распознаваемых объектов, а также не только значительно увеличивает вероятность верного распознавания объектов и повышает точность определения их положения и ориентации в пространстве, но и сокращает время обучения и распознавания, что позволяет разрабатывать системы распознавания объектов, способные решать практические задачи, такие как регистрация медицинских изображений, распознавание текста в промышленных системах и автоматическое извлечение деталей из контейнера.

2. Разработано оригинальное алгоритмическое обеспечение, состоящее из системы взаимосвязанных алгоритмов и процедур, включающих в себя иерархическую оптимизацию, иерархическое сопоставление, расчёт критерия качества с использованием матричного представления исходных данных, деформацию прототипов распознаваемых объектов, итерационное сопоставление и иерархизацию прототипов распознаваемых объектов. Разработанные процедуры позволяют повысить точность и сократить время распознавания объектов.

### **Практическая значимость результатов**

1. Разработана архитектура универсальной системы распознавания объектов, основанная на предложенном иерархическом итерационном методе распознавания, а также методика её использования при решении различных классов практических задач.

2. Разработано прикладное программное обеспечение на базе языка C++ с использованием кроссплатформенной библиотеки обработки изображений *OpenCV*, реализующее предложенный иерархический итерационный метод распознавания объектов и эффективно решающее широкий круг задач в рамках реальных промышленных систем, включая задачи регистрации медицинских изображений, распознавания текста и автоматического извлечения деталей из контейнера.

3. Результаты проведённого сравнительного анализа эффективности разработанного метода распознавания объектов с использованием разработанного программного обеспечения показали, что:

– при решении задачи регистрации медицинских изображений обеспечивается уменьшение времени распознавания по сравнению с классическим методом сопоставления и методом Покрандта в 7,2 и 1,15 раз соответственно, а также повышение точности определения положения на 19,5% и 8,5% и увеличение количества верных результатов в 2,3 и 1,3 раза;

– при решении задачи распознавания текста обеспечивается увеличение количества верных результатов в 1,8 раза (на 44,1%) по сравнению с современ-

нными программными системами распознавания текста, что составило 99,7% от всего количества изображений;

– при решении задачи распознавания объектов в системе автоматического извлечения деталей из контейнера обеспечивается уменьшение времени распознавания по сравнению с классическим методом сопоставления в 7,2 раза, повышение точности определения положения на 16,8% (в 1,2 раза) и увеличение количества верных результатов в 2,2 раза.

### **Основные научные результаты, полученные автором и выносимые на защиту**

1. Иерархический итерационный метод распознавания объектов на основе анализа многомерных данных;

2. Алгоритмическое обеспечение иерархического итерационного метода распознавания объектов;

3. Архитектура универсальной системы распознавания объектов, основанная на предложенном иерархическом итерационном методе распознавания;

4. Прикладное программное обеспечение, реализующее иерархический итерационный метод распознавания объектов;

5. Результаты сравнительного анализа эффективности иерархического итерационного метода распознавания объектов.

### **Связь исследований с научными проектами**

Работа выполнена в рамках совместных научных проектов Уфимского государственного авиационного технического университета и Института управляющих вычислительных систем и робототехники Технического университета Карлсруэ (Германия), поддержанных грантом №16SV2296-310 Министерства образования Германии и компаниями Leibinger Stryker GmbH и Elliptec AG.

### **Апробация работы**

Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались на:

– VII–X Международных научных конференциях “Компьютерные науки и информационные технологии” (Карлсруэ, Германия, 2006; Уфа, 2005, 2007; Анталия, Турция, 2008);

– Международной конференции по робототехнике “Robotik 2008” (Мюнхен, Германия, 2008);

– Семинарах в Институте управляющих вычислительных систем и робототехники Технического университета Карлсруэ (Германия, 2007, 2008).

### **Публикации**

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 11 статьях, в том числе в 1 статье в рецензируемом журнале из перечня ВАК.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из 165 страниц машинописного текста, включая введение, 4 главы, библиографический список из 106 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, обсуждается новизна и практическая ценность выносимых на защиту результатов, даётся краткая характеристика содержания работы.

**В первой главе** проводится анализ современного состояния проблемы распознавания объектов.

Исследуются существующие методы распознавания объектов, анализируются их достоинства и недостатки, определяется область их применения. На основе используемых признаков объектов производится классификация методов с разделением их на группы интенциональных методов, основанных на операциях с признаками, экстенциональных методов, основанных на операциях с объектами, и синтетических методов, объединяющих эти два класса методов.

Проведённый сравнительный анализ различных методов распознавания показал, что на сегодняшний день не существует универсального подхода к решению задачи распознавания объектов, позволяющего эффективно решать любую задачу при использовании одних и тех же признаков и классификаторов. Кроме того, установлено, что каждый метод обладает рядом присущих ему недостатков, ограничивающих область его применения.

Общими недостатками существующих методов распознавания объектов является:

- отсутствие эффективного универсального метода распознавания объектов, способного с высокой эффективностью решать задачи, относящиеся к различным классам;

- невозможность либо неточность одновременного распознавания объекта и определения его положения в пространстве, а также расположения по отношению к другим объектам.

На основании проведённого анализа формулируются цель и задачи исследования, решаемые в диссертационной работе.

**Во второй главе** формулируется общая математическая постановка задачи распознавания объектов, выделяются основные сложности и особенности её решения. Обсуждаются практические задачи, которые пока не получили эффективного решения с использованием существующих методов распознавания объектов. Это, в первую очередь, такие задачи, как регистрация медицинских изображений, распознавание текста в промышленных системах и распознавание множества объектов для системы автоматического извлечения деталей из контейнера.

В качестве особенностей постановки и решения этих задач отмечаются:

- необходимость распознавания объектов и определения их положения в пространстве, ориентации и взаимного расположения;

– нежелательность процесса повторного обучения или модификации метода и алгоритмов;

– необходимость распознавания объектов в режиме реального времени.

На основе проведённого анализа формулируются требования к разрабатываемому методу распознавания объектов, включая требования к результатам распознавания, к обучению и модификации метода, к его быстродействию, к процессу формирования признаков, к используемому набору признаков, к точности распознавания. Выделяются и рассматриваются две подзадачи распознавания объектов: распознавание единичного объекта и поиск и распознавание множества объектов.

С учётом сформулированных требований производится выбор прототипа базового метода распознавания объектов. В этом качестве предлагается использовать традиционный метод сопоставления, позволяющий использовать всю совокупность признаков объекта, что обеспечивает устойчивость распознавания в условиях наличия в исходных данных помех и искажений.

На основе проведённых исследований формулируется основной принцип разрабатываемого метода - поиск на множестве многомерных исходных данных определённых объектов, заданных специальными моделями-прототипами. Преимуществами данного подхода являются:

– простота обучения алгоритма распознавания (обучение заключается в выборе функций качества и их взаимосвязи);

– простота процедуры построения набора признаков (в качестве набора признаков используется прототип распознаваемого объекта).

Дается общая постановка задачи распознавания объекта и определения его положения и ориентации в пространстве.

Пусть заданы следующие множества:

– множество прототипов  $N$  классов объектов  $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ ;

– множество  $M$  объектов  $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$ , принадлежащих пространству исходных данных  $R^K$ .

Для каждого объекта  $Y_j$  требуется найти пару  $\{X_i, P_j\}$ , где  $i = 1 \dots N$ ,  $j = 1 \dots M$ , а  $P_j$  – это положение и ориентация объекта на исходных данных, которое задаётся следующим образом:

$$P_j = \{d_1^j, \dots, d_K^j, d_{K+1}^j, \dots, d_L^j\}, \quad (1)$$

где  $d_1^j, \dots, d_K^j$  – положение объекта, а  $d_{K+1}^j, \dots, d_L^j$  – ориентация объекта.

Эту задачу можно решить с помощью разработанного иерархического итерационного метода распознавания объектов. Представим пространство исходных данных  $R^K$  и прототипы классов объектов  $X$  с помощью иерархических моделей, включающих в себя группы признаков  $A, B, \dots$ , т.е. модели представляет собой иерархическую совокупность наборов групп при-



знаков (например, точечную модель  $A$ , полигональную модель  $B$  и др.):

$$\begin{aligned} X_i &= \{\{A_1^{X_i}, B_1^{X_i}, \dots\}, \dots, \{A_{N_P}^{X_i}, B_{N_P}^{X_i}, \dots\}\}, \\ R^K &= \{\{A_1^{R^K}, B_1^{R^K}, \dots\}, \dots, \{A_{N_P}^{R^K}, B_{N_P}^{R^K}, \dots\}\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\{A_k^i, B_k^i, \dots\}$  –  $k$ -й уровень пирамидального представления,  $N_P$  – количество уровней пирамиды.

Для определения степени соответствия прототипа распознаваемого объекта  $X_i$  исходным данным  $R^K$  будем использовать критерий качества  $F_{i,m}$ , который рассчитывается с помощью функции качества  $f(X_i, R^K, P_m)$ .

Функцию качества  $f$  представим следующим образом:

$$f(X_i, R^K, P_m) = \check{f}(\bar{f}_1(X_i, R^K, P_m), \bar{f}_2(X_i, R^K, P_m), \dots), \quad (3)$$

где  $\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots$  – функции качества более низких порядков, использующие только определённые группы признаков (например, только точечные модели или только полигональные модели).

Таким образом, входные параметры алгоритма представлены в таблице 1.

Таблица 1. Входные параметры алгоритма иерархического итерационного метода распознавания объектов

Параметр	Описание
$\{G_1, G_2, \dots, G_{N_G}\}$	набор параметров фильтров предварительной обработки исходных данных
$N_G$	количество наборов фильтров предварительной обработки исходных данных
$N_P$	количество уровней пирамиды
$\{X_1, X_2, \dots, X_{N_X}\}$	образцы распознаваемых объектов
$N_X$	количество образцов распознаваемых объектов
$F_{min}$	минимальное значение критерия качества соответствия образца распознаваемому объекту, ниже которого объект считается нераспознанным.

Полная блок-схема алгоритма иерархического итерационного метода распознавания объектов представлена на рисунке 1.

В целях увеличения точности, а также скорости распознавания образов разработаны следующие алгоритмы, входящие в состав предлагаемого иерархического итерационного метода:

– *Алгоритм иерархической оптимизации многомерной функции.* Данный алгоритм реализует оптимизацию одной либо нескольких функций качества одновременно, проводя поиск глобального оптимума функции в

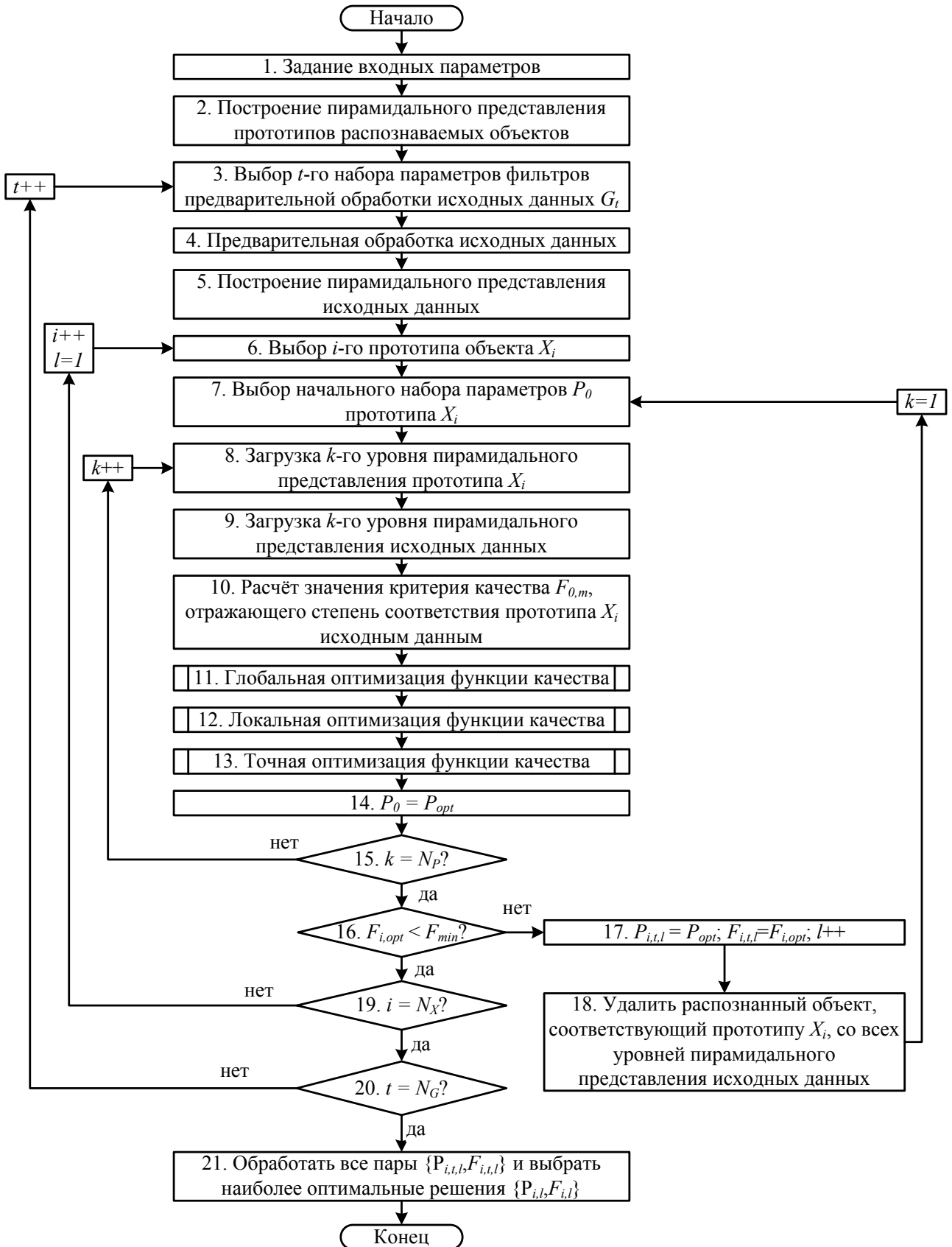


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма иерархического итерационного метода распознавания объектов

три этапа (глобальный, локальный и точный поиски) при использовании комбинаций пространственно-линейных, пространственно-угловых и параметрических аргументов функции;

– *Алгоритм иерархического сопоставления.* Данный алгоритм реализует сопоставление прототипа объекта с исходными данными, представленными в виде пирамиды, каждый уровень которой содержит данные различного уровня детализации и различного разрешения при сохранении существенной информации;

– *Алгоритм расчёта критерия качества с использованием матричного представления исходных данных.* Данный алгоритм реализует использование матриц расстояний и/или указателей при расчёте критериев качества, требующих нахождения расстояния от каждого элемента прототипа распознаваемого объекта до ближайшего элемента исходных данных;

– *Алгоритм деформации прототипов распознаваемых объектов.* Данный алгоритм реализует деформацию прототипов распознаваемых объектов при их сопоставлении с исходными данными, которые могут быть зашумлены и искажены;

– *Алгоритм итерационного сопоставления.* Данный алгоритм реализует итерационный процесс сопоставления прототипа распознаваемого объекта с исходными данными при изменении параметров фильтров предварительной обработки этих данных на каждой итерации;

– *Алгоритм иерархизации прототипов распознаваемых объектов.* Данный алгоритм реализует учёт весов составных частей модели прототипа распознаваемого объекта, а также его разбиения на компоненты при расчёте значений критериев качества.

Производится оценка эффективности разработанных алгоритмов на основе решения ряда практических задач. Предлагается методика разработки системы распознавания объектов на основе иерархического итерационного метода. Описываются основные этапы и формулируются задачи разработки такой системы.

**В третьей главе** рассматриваются различные варианты постановок задачи распознавания объектов, решение которых основано на использовании разработанного иерархического итерационного метода.

Первой задачей, решаемой с помощью иерархического итерационного метода распознавания объектов, является задача регистрации медицинских изображений (рис. 2 ).

В рамках данной диссертационной работы была разработана система, основанная на иерархическом итерационном методе распознавания объектов, решающая задачу совмещения компьютерной и магниторезонансной томограмм.

Исходными данными являются медицинские изображения, а именно томограммы: компьютерная, магнитно-резонансная и другие. Прототипом распознаваемого объекта является томограмма. Для определения соответств-

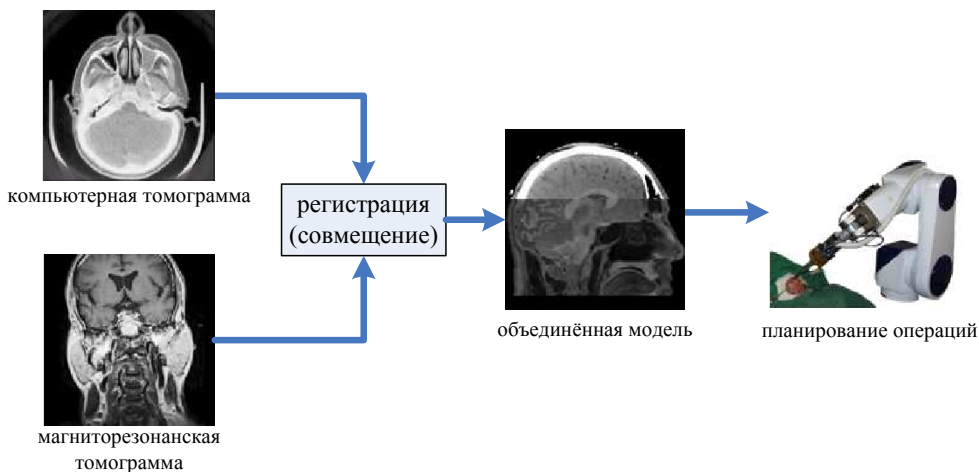


Рисунок 2. Задача регистрации медицинских изображений

ия прототипа исходным данным предлагается использовать следующие два критерия качества:

1. Коэффициент схожести гистограмм:

$$F_{ME} = - \sum_{i=0}^{|\nu|} \sum_{j=0}^{|\nu|} p(i, j) \log \frac{p(i, j)}{p_x(i)p_y(j)}, \quad (4)$$

где

$$p(i, j) = \frac{f(i, j)}{N}; p_x(i) = \sum_{j=0}^{|\nu|} \frac{f(i, j)}{N}; p_y(j) = \sum_{i=0}^{|\nu|} \frac{f(i, j)}{N}; \quad (5)$$

$N$  – количество всех точек изображения;  $p_x(i)$  – частота появления определённой комбинации значений серого в  $i$ -м столбце гистограммы;  $p_y(j)$  – частота появления определённой комбинации значений серого в  $j$ -м столбце гистограммы.

2. Суммарная квадратическая ошибка:

$$F_{SSD} = \sum_i \sum_j \sum_k (f_d^m(x+i, y+j, z+k)^2 \cdot \bar{m}(i, j, k)), \quad (6)$$

где  $f_d^m$  – матрица расстояний, полученная на основе данных одной томограммы;  $(x, y, z)$  – положение томограммы  $m$  по отношению к матрице расстояний; а  $\bar{m}$  вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{m}(x, y, z) = T(m(T_x(x), T_y(y), T_z(z))), \quad (7)$$

где  $m$  – вторая томограмма, которая сопоставляется с первой;  $T, T_x, T_y, T_z$  – функции трансформации томограммы.

Многочисленные эксперименты показывают, что с помощью разработанного иерархического итерационного метода распознавания объектов задача регистрации томограмм может быть решена эффективно и с требуемой точностью.

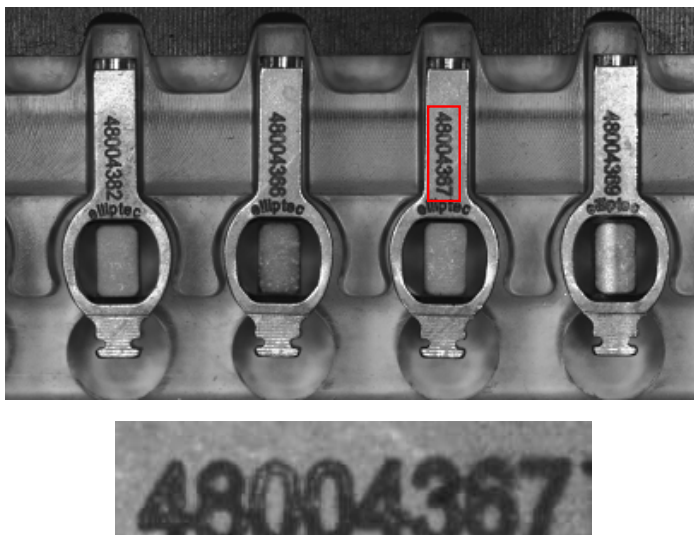


Рисунок 3. Задача распознавания текста в промышленных системах

Следующей задачей, решаемой в работе с помощью иерархического итерационного метода распознавания объектов, является задача распознавания текстов в промышленных системах (рис. 3). Основные требования в этом классе задач – это надёжность и устойчивость, поскольку даже единичные ошибки при распознавании относительно коротких надписей могут представлять серьёзную проблему.

Исходными данными являются изображения деталей, содержащие текст в виде серийных номеров. Прототипом распознаваемого объекта является шаблон символа, который задаётся типом и размером шрифта. Для определения соответствия прототипа исходным данным предлагается использовать следующие два критерия качества:

1. Суммарная квадратическая ошибка:

$$F_{SSD} = \sum_i \sum_j (f_d^m(x+i, y+j) \cdot \bar{m}(i, j))^2, \quad (8)$$

где  $f_d^m$  – матрица расстояний изображения, содержащего текст;  $(x, y)$  – положение шаблона символа по отношению к матрице расстояний; а  $\bar{m}$  вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{m}(x, y) = T(m(T_x(x), T_y(y))), \quad (9)$$

где  $m$  – шаблон распознаваемого символа;  $T, T_x, T_y$  – функции трансформации шаблона.

2. Степень перекрытия или коэффициент корреляции:

$$F_{CC} = \frac{N_e}{N_t} \cdot \frac{N_e}{N_c} = \frac{(\sum_i \sum_j (f(x+i, y+j) \cdot \bar{m}(i, j)))^2}{\sum_i \sum_j f(x+i, y+j) \cdot \sum_i \sum_j \bar{m}(i, j)}, \quad (10)$$

где  $N_e$  – количество точек шаблона, совпадающих с точками распознаваемого символа;  $N_t$  – общее количество точек шаблона;  $N_c$  – количество точек области изображения, ограниченного наложенным шаблоном;  $f$  – изображение, содержащее текст.

При решении задачи распознавания текста для оценки эффективности предлагаемого метода были проведены эксперименты с использованием существующих программных систем распознавания объектов, которые

охватывают весь спектр методов распознавания текста, разработанных на данный момент: *SimpleOCR*, *GOOCR*, *TopOCR*, *Readiris Pro*, *ScreenOCR*, *OpenOCR*, *Finereader*, *TOCR*.

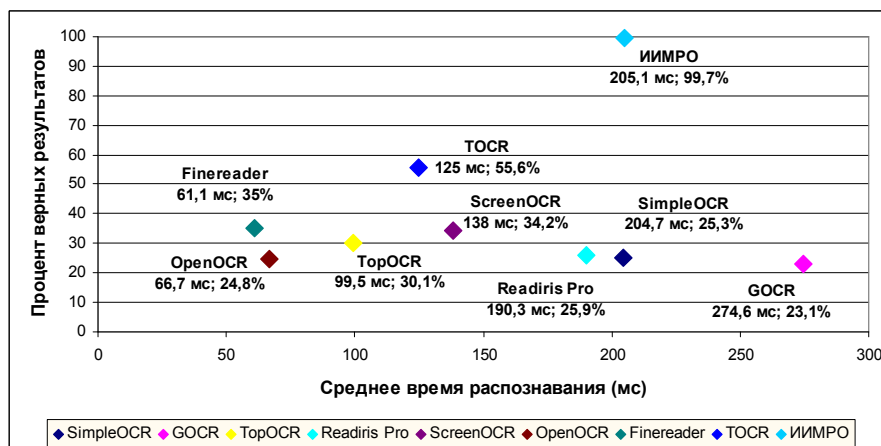
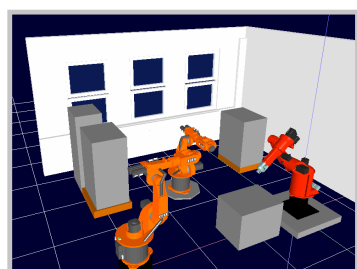


Рисунок 4. Экспериментальные результаты

Эксперименты показали, что разработанный иерархический итерационный метод является наиболее эффективным и обеспечивающим лучшие результаты при решении задачи распознавания текста в промышленных условиях (рис. 4).



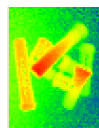
Виртуальная модель производственной ячейки



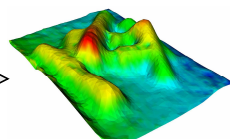
Примеры распознаваемых деталей



PMD-камера



2,5-мерное изображение



3-мерная сцена

Рисунок 5. Задача автоматического извлечения деталей из контейнера

Третьей практической задачей, исследуемой в диссертации, является задача автоматического извлечения деталей из контейнера. Данная задача заключается в распознавании множества объектов разных классов, а также определении их положения и ориентации в пространстве (рис. 5).

Исходными данными при решении данной задачи являются множество точек в пространстве - точечная модель, полученная с помощью какой-либо сенсорной технологии (стереокамера, лазерная триангуляционная система, *PMD*-камера и т.д.) и описывающая определённую трёхмерную сцену, содержащую множество объектов различных классов. Т.е. исходные данные представлены трёхмерными данными, содержащими бинарную информацию.

Прототипом распознаваемого объекта также является трёхмерная точечная модель, которая может быть получена двумя способами: автоматически (прои-

зводится конструирование трёхмерной модели идеального объекта с помощью используемой сенсорной системы) и с помощью CAD-модели.

Для определения соответствия прототипа исходным данным предлагается использовать следующие критерии качества:

1. Суммарная квадратическая ошибка:

$$F_{WSSD} = \frac{\sum_i \sum_j \sum_k (f_d^m(x+i, y+j, z+k) \cdot \bar{m}(i, j, k))^2}{\sum_i \sum_j \sum_k \bar{m}(i, j, k)}, \quad (11)$$

где  $f_d^m$  – матрица расстояний трёхмерной сцены;  $(x, y, z)$  – положение прототипа распознаваемого объекта по отношению к матрице расстояний;  $\bar{m}$  – модель распознаваемого объекта.

При использовании матрицы указателей  $f_p^m$   $d$  рассчитывается по следующей формуле:

$$d(i, j, k) = ((f_p^m(x+i, y+j, z+k)_x - i)^2 + (f_p^m(x+i, y+j, z+k)_y - j)^2 + (f_p^m(x+i, y+j, z+k)_z - k)^2) \cdot \bar{m}(i, j, k). \quad (12)$$

2. Среднеквадратическая ошибка:

$$F_{WSSRD} = \frac{\sum_i \sum_j \sum_k \sqrt{d(i, j, k)}}{N} \quad (13)$$

где  $d$  – расстояние от точки модели распознаваемого объекта с координатами  $(i, j, k)$  до ближайшей поверхности сцены;  $N$  – общее количество точек модели распознаваемого объекта.

3. Степень перекрытия или коэффициент корреляции:

$$F_{CC} = \frac{N_e}{N_t} = \frac{\sum_i \sum_j \sum_k (f_d^m(x+i, y+j, z+k) \cdot \bar{m}(i, j, k) < \delta)}{\sum_i \sum_j \sum_k \bar{m}(i, j, k)}, \quad (14)$$

где  $N_e$  – количество точек модели, расстояние от которых до ближайшей поверхности сцены меньше заданной величины  $\delta$ ;  $N_t$  – общее количество точек модели.

Многочисленные эксперименты показывают, что с помощью разработанного иерархического итерационного метода задача распознавания множества объектов различных классов, а также определения их положения и ориентации, для системы извлечения деталей из контейнера может быть решена эффективно и с требуемой точностью.

**В четвёртой главе** разрабатывается прикладное программное обеспечение (ППО), реализующее предложенный иерархический итерационный метод распознавания объектов для решения вышеописанных практических задач. Приводятся результаты вычислительных экспериментов с использованием разработанного ППО.

С использованием разработанного ППО проведены эксперименты по отладке и тестированию алгоритмов распознавания объектов, разработанных в рамках диссертации.

Разработанное ППО успешно внедрено в следующие промышленные системы:

1. Система автоматического планирования медицинских операций фирмы *Stryker Leibinger*;
2. Система автоматического контроля качества при производстве пьезомоторов фирмы *Elliptec – ReActVision*;
3. Система автоматического извлечения деталей из контейнера фирмы *KUKA Robotics – Lynkeus*.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе содержится решение научной задачи разработки иерархического итерационного метода распознавания объектов на основе анализа многомерных данных. В ходе исследования получены следующие результаты:

1. Предложен метод распознавания объектов на множестве многомерных данных, основанный на комбинации метода сопоставления с алгоритмами оптимизации и заключающийся в обнаружении и локализации объекта, заданного прототипом, на полном множестве многомерных данных. Разработанный метод обладает высокой устойчивостью к шумам, инвариантен к физической природе исходных данных и распознаваемых объектов, а также не только значительно увеличивает вероятность верного распознавания объектов и повышает точность определения их положения и ориентации в пространстве, но и сокращает время обучения и распознавания, что позволяет разрабатывать системы распознавания объектов, способные решать практические задачи, такие как регистрация медицинских изображений, распознавание текста в промышленных системах и автоматическое извлечение деталей из контейнера.

2. Разработано оригинальное алгоритмическое обеспечение, состоящее из системы взаимосвязанных алгоритмов и процедур, включающих в себя иерархическую оптимизацию, иерархическое сопоставление, расчёт критерия качества с использованием матричного представления исходных данных, деформацию прототипов распознаваемых объектов, итерационное сопоставление и иерархизацию прототипов распознаваемых объектов. Разработанные процедуры позволяют повысить точность и сократить время распознавания объектов.

3. Разработана архитектура универсальной системы распознавания объектов, основанная на предложенном иерархическом итерационном методе распознавания, а также методика её использования при решении различных классов практических задач.



4. Разработано прикладное программное обеспечение на базе языка C++ с использованием кроссплатформенной библиотеки обработки изображений *OpenCV*, реализующее предложенный иерархический итерационный метод распознавания объектов и эффективно решающее широкий круг задач в рамках реальных промышленных систем, включая задачи регистрации медицинских изображений, распознавания текста и автоматического извлечения деталей из контейнера.

5. Результаты проведенного сравнительного анализа эффективности разработанного метода распознавания объектов с использованием разработанного программного обеспечения показали, что:

– при решении задачи регистрации медицинских изображений обеспечивается уменьшение времени распознавания по сравнению с классическим методом сопоставления и методом Покрандта в 7,2 и 1,15 раз соответственно, а также повышение точности определения положения на 19,5% и 8,5% и увеличение количества верных результатов в 2,3 и 1,3 раза;

– при решении задачи распознавания текста обеспечивается увеличение количества верных результатов в 1,8 раза (на 44,1%) по сравнению с современными программными системами распознавания текста, что составило 99,7% от всего количества изображений;

– при решении задачи распознавания объектов в системе автоматического извлечения деталей из контейнера обеспечивается уменьшение времени распознавания по сравнению с классическим методом сопоставления в 7,2 раза, повышение точности определения положения на 16,8% (в 1,2 раза) и увеличение количества верных результатов в 2,2 раза.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

### *В рецензируемых журналах из списка ВАК*

1. Иерархический итерационный метод распознавания образов на основе анализа многомерных данных / Х. Вёрн, В.И. Васильев, К.В. Сафронов, И.М. Чушенков // Вестник УГАТУ : науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Серия „Управление, вычислительная техника и информатика“. 2007. Т.9, №5(23). С.3–8.

### *В других изданиях*

2. Автоматическая регистрация медицинских томограмм головного мозга с использованием градиентного метода / Ю. Граф, К.В. Сафронов, И.М. Чушенков, Х. Вёрн // Матер. 7-й межд. науч. конф. CSIT'2005. Уфа : УГАТУ, 2005. Т.1. С.174–179. (Статья на англ. яз.).

3. Комбинированный метод регистрации медицинских изображений с использованием градиентной и взаимной информации / К.В. Сафронов, И.М.

Чушенков, Х. Вёрн // Матер. 8-й межд. науч. конф. CSIT'2006. Карлсруэ, Германия, 2006. Т.1. С.7–10. (Статья на англ. яз.).

4. Распознавание текста с использованием алгоритмов оптимизации / К.В. Сафронов, И.М. Чушенков, Х. Вёрн // Матер. 9-й межд. науч. конф. CSIT'2007. Уфа : УГАТУ, 2007. Т.1. С.85–89. (Статья на англ. яз.).

5. Применение алгоритмов оптимизации для решения задачи распознавания символов / К.В. Сафронов, И.М. Чушенков, Х. Вёрн // Вычислительная техника и новые информационные технологии: межвуз. научн. сб. Уфа : УГАТУ, 2007. С.92–97.

6. Применение алгоритмов оптимизации для решения задачи распознавания образов / К.В. Сафронов, И.М. Чушенков, Х. Вёрн // Матер. Всерос. молодежн. науч.-техн. конф. Уфа : УГАТУ, 2007. Т.3. С.46–47.

7. Решение задачи извлечения деталей из контейнера с использованием иерархического итерационного метода распознавания образов / К.В. Сафронов, И.М. Чушенков, Х. Вёрн // Матер. межд. конф. Robotik 2008. Мюнхен, Германия, 2008. С.3–6. (Статья на англ. яз.).

8. Использование иерархического итерационного метода распознавания объектов в системе извлечения деталей из контейнера, построенной с использованием PMD-камер / К.В. Сафронов, И.М. Чушенков, Х. Вёрн // Матер. 8-й межд. науч. конф. APCSM 2008. Харбин, Китай, 2008. С.80–84 (Статья на англ. яз.).

9. Система извлечения деталей из контейнера, построенная с использованием PMD-технологии / К.В. Сафронов, И.М. Чушенков, Х. Вёрн // Информатика, управление и компьютерные науки : сб. ст. 3-й рег. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых учёных. Уфа : УГАТУ, 2008. С.523–529.

10. PMD технология: Особенности калибровки PMD камеры / И.Р. Мамаев, К.В. Сафронов, Х. Вёрн // Информатика, управление и компьютерные науки : сб. ст. 3-й рег. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых учёных. Уфа : УГАТУ, 2008. С. 154–160.

11. Система реального времени для решения задачи автоматического извлечения деталей из контейнера при использовании преимуществ PMD технологии / И.Р. Мамаев, К.В. Сафронов, И.М. Чушенков, Х. Вёрн // Матер. 9-й межд. науч. конф. CSIT'2008. Анталия, Турция, 2008. Т.1. С.21–26. (Статья на англ. яз.).

Диссертант

К.В. Сафронов