

На правах рукописи

УДК 681.78

**Нгуен Конг Минь**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы**

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

**МОСКВА - 2015**

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико – электронных систем.

**Научный руководитель: Колючкин Василий Яковлевич,**  
Доктор технических наук, профессор кафедры  
лазерных и оптико-электронных систем МГТУ  
им. Н.Э. Баумана.

**Официальные оппоненты: Носов Виктор Николаевич,**  
Доктор технических наук, заведующий  
лабораторией Института геохимии и  
аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

**Минаев Владимир Леонидович,**  
Кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник ФГУП ВНИИОФИ.

**Ведущая организация: ОАО «НПО «Геофизика-НВ»**

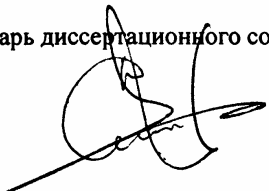
Защита диссертация состоится «27» мая 2015 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д212.142.19.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» 2015

Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.ф.-м.н.



Семеренко Денис Алексеевич.

**Актуальность темы исследования.** Робототехнические комплексы (РТК) промышленного назначения включают в свой состав устройства – датчики, позволяющие получать информацию о текущей ситуации в зоне выполнения технологических операций. К числу таких устройств относятся системы технического зрения (СТЗ), которые входят в состав информационной части робототехнических комплексов и обеспечивают путём регистрации и обработки изображений объектов получение информации, необходимой для выполнения адекватных действий в соответствии с назначением этих комплексов. СТЗ промышленных РТК включают в свой состав оптико-электронные средства регистрации изображений и программно-аппаратные средства цифровой обработки изображений, выполняемой с целью извлечения информации, которая необходима для принятия управленческих решений при выполнении технологических операций. СТЗ, входящие в состав промышленных РТК, позволяют автоматизировать отдельные операции технологических процессов изготовления промышленных деталей, в частности, их сортировку, контроль размеров, контроль положения рабочих органов технологического оборудования и ряд других операций. Задача сортировки практически совпадает с постановкой задачи распознавания образов, а измерение координат и ориентации объектов можно формализовать как задачу оценки параметров сигналов, регистрируемых на фоне помех. Разработка эффективных алгоритмов, обеспечивающих автоматическую обработку и анализ изображений с целью распознавания образов объектов и оценки параметров изображений, является важным направлением совершенствования СТЗ промышленных РТК.

Большой вклад в исследование и разработку СТЗ, используемых в робототехнике, внесли русские ученые, в том числе, В.Л. Генкин, В.И. Мошкин, Ю.Г. Якушенков, Е.П. Путягин, В.Я. Колючкин, А.Н. Писаревский, Н.В. Ким, а также зарубежные ученые Rafael C. Gonzalez, Richard E, E.R. Davies, Linda G. Shapiro, Alan Pugh и др.

Детали, имеющие относительно простую форму, однозначно характеризуются контурами регистрируемых изображений. Для реализации функций распознавания и оценки параметров, характеризующих координаты и ориентацию таких деталей, можно использовать алгоритмы, основанные на анализе контуров изображений. В известных автору публикациях отсутствует следующая, важная для разработки алгоритмов обработки изображений в СТЗ, информация, в том числе: сравнительный анализ эффективности алгоритмов контурной сегментации изображений объектов; оценка эффективности алгоритмов распознавания по признакам, содержащимся в контурных изображениях; сравнительный анализ погрешностей алгоритмов оценки параметров сигналов по контурным изображениям.

В связи с этим тема диссертации, посвящённая разработке новых эффективных методов и алгоритмов обработки изображений в СТЗ промышленных робототехнических комплексов, является актуальной.

**Целью диссертации** является разработка научно-обоснованных методов и алгоритмов цифровой обработки изображений в СТЗ промышленных робототехнических комплексов, обеспечивающих распознавание и оценку параметров объектов на основе анализа контуров изображений.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- разработаны алгоритмы контурной сегментации изображений объектов, обеспечивающие более эффективное, по сравнению с известными алгоритмами, выделение контуров изображений;
- исследована эффективность алгоритмов распознавания образов объектов на основе анализа контуров изображений, сегментированных предложенными методами;
- исследована эффективность алгоритмов оценки параметров изображений, характеризующих их линейные координаты и угловую ориентацию на основе анализа контуров изображений;
- разработана методика проектирования СТЗ промышленных робототехнических комплексов;
- проведены экспериментальные исследования с целью проверки основных теоретических результатов диссертации.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- разработаны новые алгоритмы контурной сегментации цифровых изображений, при использовании которых обеспечивается более высокая эффективность распознавания образов объектов при наличии неравномерного фона и аддитивных помех в исходном изображении;
- предложена методика формирования рабочего словаря признаков в алгоритмах распознавания на основе фурье-дескрипторов контуров изображений объектов, которая позволяет более, чем в 10 раз уменьшить размерность исходного словаря признаков и на 15% уменьшить время реализации алгоритма;
- разработана методика проектирования, позволяющая определить технические требования к СТЗ, в том числе, значения вероятности распознавания деталей и СКО погрешностей измерения координат и ориентации деталей, при которых обеспечивается заданное значение вероятности отсутствия брака на РТК.

**Практическая ценность** заключается в том, что разработанные алгоритмы обработки и анализа изображений позволят повысить эффективность функционирования СТЗ и снизить процент брака промышленных РТК.

**Положения, выносимые на защиту:**

- новые алгоритмы выделения контуров изображений объектов на основе операций градиентной обработки, пороговой сегментации и последующей морфологической обработки изображений;
- методика формирования рабочего словаря признаков для алгоритмов распознавания по контурам изображений объектов на основе фурье-дескрипторов;
- методика проектирования, позволяющая определить научно обоснованные технические требования как к СТЗ в составе РТК, так и требования к составным частям СТЗ, в том числе, устройству регистрации изображений и программно-аппаратным средствам.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использовались: теория вероятностей и математической статистики; теория принятия решений; теория линейных систем; теория множеств; методы цифровой обработки изображений и методы компьютерного моделирования.

**Достоверность** выводов диссертационной работы обеспечивается согласованностью теоретических положений и результатов численных экспериментов.

**Апробация результатов.** Результаты диссертации обсуждались на кафедре лазерных и оптико-электронных систем ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основные положения диссертации доложены на VIII-ой Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2013».

**Внедрение результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы реализованы в учебном процессе на кафедре лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе «Проектирование систем технического зрения».

**Публикации результатов.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 5 публикациях, в том числе, в 3 научных статьях, опубликованных в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 3 таблицы, список литературы включает 64 библиографических описания.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и основные задачи диссертации, определены научная новизна и практическая ценность работы, приведены выносимые на защиту научные положения и дано краткое описание содержания глав диссертации.

**В первой главе** сформулирована постановка задачи разработки алгоритмов обработки изображений в системах технического зрения (СТЗ) промышленных робототехнических комплексов (РТК).

В состав СТЗ промышленного РТК, функциональная схема которого представлена на рис. 1, входят телевизионная (ТВ) камера 1, осветитель 2, программно-аппаратные средства цифровой обработки изображений, которые на схеме включены в состав информационной системы РТК. СТЗ промышленных РТК, позволяют автоматизировать отдельные операции технологических процессов изготовления промышленных деталей, в частности, их сортировку, контроль положения и ориентации для захвата деталей манипулятором с целью перемещения в зону обработки технологического оборудования или укладки в тару. Постановка задачи сортировки деталей практически совпадает с задачей распознавания образов, а измерение линейных координат и угловой ориентации деталей можно рассматривать как задачу оценки параметров изображений объектов, регистрируемых на фоне помех. Разработка эффективных алгоритмов и программ, обеспечивающих автоматическую обработку и анализ изображений с целью распознавания образов объектов и оценки параметров изображений,

является важным направлением совершенствования СТЗ промышленных РТК. Чтобы обосновать способ описания изображений объектов, регистрируемых СТЗ промышленных РТК, были приняты ограничения и допущения, в том числе: объекты (детали) имеют относительно простую форму, при которой контур изображения однозначно характеризует форму детали; объекты располагаются на ленте транспортера конвейера и подсвечены по направлению визирования на объект; визирование на объекты производится по направлению, перпендикулярному ленте конвейера. Для принятых условий функционирования СТЗ можно считать достаточным описанием образов объектов в виде контуров регистрируемых изображений. Поэтому для решения задач распознавания и оценки параметров можно использовать алгоритмы, основанные на основе анализа контуров изображений.

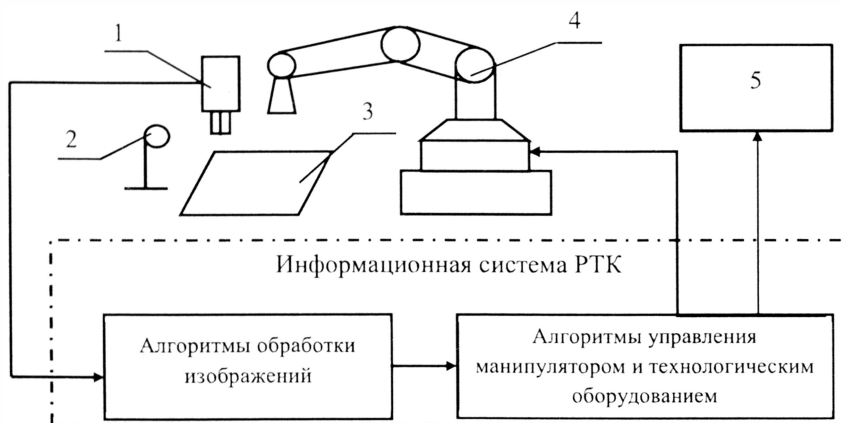


Рисунок 1.

Функциональная схема промышленного РТК:

1 – ТВ камера; 2 – осветитель; 3 – конвейер; 4 – манипулятор; 5 – технологическое оборудование

Анализ научных публикаций в области алгоритмов выделения контуров изображений позволил сделать вывод о том, что при наличии неравномерного фона или аддитивных помех известным методам присущи погрешности в виде разрывов границ, а также возникновение помехового фона в виде точек и штрихов. Этот недостаток присущ практически всем известным методам выделения контуров, в том числе, методу Робертса, Превитта, Собела и Канни, которые основаны на вычислении градиентов и последующей пороговой обработке. Наличие таких дефектов при выделении контуров может приводить к снижению эффективности алгоритмов распознавания по контурам изображений объектов. На основании этого сделан вывод об актуальности задачи разработки более совершенных алгоритмов выделения контуров изображений.

Эффективность алгоритмов распознавания в значительной степени зависит от выбора признаков. Основным критерием для выбора признаков распознавания

является свойство инвариантности к условиям регистрации. На основе анализа известных методов описания контуров изображений принято решение об использовании в алгоритме распознавания образов объектов по контурам изображений признаков, основанных на фурье-дескрипторах. Фурье-дескрипторы границы изображения определяются в соответствии с выражением:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum f(k) \exp\left(-i \frac{2\pi uk}{N}\right), \quad u=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

где массив комплексных чисел  $f(k) = x(k) + iy(k)$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ , описывает контур границы изображения объекта.

На основе фурье-дескрипторов можно сформировать вектор признаков  $\mathbf{X}$ , который теоретически инвариантен к параллельному переносу, изменению масштаба, повороту изображения, а также изменению начальной точки массива контура. Такой вектор признаков определяется следующим образом

$$\mathbf{X} = \left( \frac{|F_{-L/2}|}{|F_1|}, \dots, \frac{|F_{-2}|}{|F_1|}, \frac{|F_2|}{|F_1|}, \dots, \frac{|F_{(L/2)-1}|}{|F_1|} \right)^T, \quad (2)$$

где значение параметра  $L \leq N-1$  определяет размерность признакового пространства, которая равна  $K=L-2$ .

В соответствии с постановкой задачи распознавания как сортировке, когда для каждого класса определён эталонный образ, решение о принадлежности объекта  $\omega_r$  к некоторому классу  $\Omega_m$  принимается на основе оценки евклидовой меры близости в соответствии с правилом

$$\rho_{r,m} = \min\{\rho_{r,m}\} = \min\left\{\rho_{r,m} = \|X^r - X^m\| = \sqrt{\sum_{i=1}^K (X_i^r - X_i^m)^2}\right\} \rightarrow \omega_r \in \Omega_m, \quad (3)$$

где  $X^r, X^m$  – векторы признаков распознаваемого объекта  $\omega_r$  и эталонных объектов  $\omega_m$  ( $m = \overline{1, M}$ ), образующих алфавит классов.

Описанный подход к распознаванию образов на основе анализа контуров изображений известен, но в литературных источниках отсутствуют результаты исследований по оценке влияния на эффективность алгоритмов распознавания таких факторов, как аддитивный шум, а также представление изображения контуров на регулярной сетке отсчётов. Проведение таких исследований входит в перечень задач диссертации.

Задача определения линейных координат и угловой ориентации объектов может быть сведена к определению положения центра «тяжести» его контурного изображения и ориентации его осей, в качестве которых можно использовать либо главные оси инерции центрированного изображения либо оси, направления которых задаются первыми двумя из главных компонентов разложения Карунена-Лоева. Задачей диссертации в этой области являлась оценка погрешностей алгоритмов, основанных на этих методах, при вариациях масштаба, поворотов, а также аддитивного шума.

На основе критического анализа известных алгоритмов сформулированы задачи исследований диссертации.

Во второй главе изложены результаты исследований, посвящённых разработке алгоритмов сегментации, позволяющих выделить контурные границы изображений объектов, по которым производится распознавание образов объектов, а также определение их линейных координат и угловой ориентации.

В главе, с учётом принятого допущения о линейности устройства регистрации СТЗ, изложена математическая модель, описывающая формирование изображений с учётом присущих устройству линейных искажений и аддитивных помех. Эта модель использована при проведении исследований по оценке эффективности разработанных в диссертации алгоритмов.

В диссертации разработаны новые алгоритмы выделения контуров изображений объектов, которые названы комбинированными, т.к. в дополнение к процедурам, выполняемым в известных алгоритмах, использованы процедуры морфологической обработки. На Рисунке 2 приведена обобщённая структурная схема предлагаемых комбинированных алгоритмов выделения контуров изображений объектов на полутоновом изображении. Согласно этой схеме: на первом этапе осуществляется предварительная обработка, заключающаяся в фильтрации помех; на втором этапе производится обработка с целью получения контурного препарата на основе известных методов; на третьем этапе – морфологические операции, в том числе, дилатация и эрозия, а также морфологические процедуры заполнения областей и выделения контура.

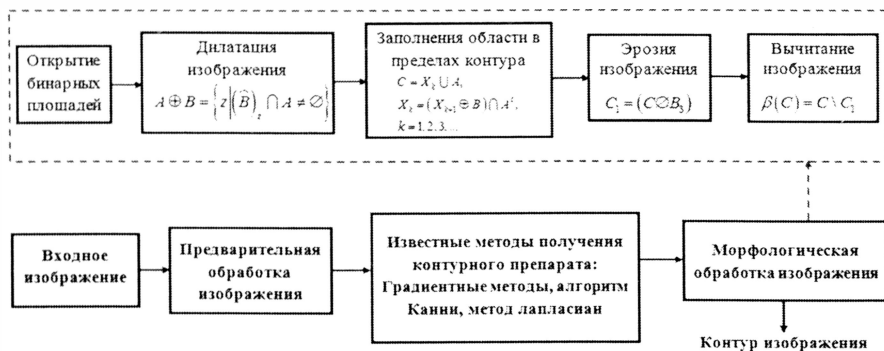


Рисунок 2.

### Обобщённая структурная схема комбинированных алгоритмов выделения контуров объектов

В соответствии с этой схемой разработаны два алгоритма. Особенностью одного из них, который назван алгоритмом №1, является то, что после предварительной обработки, заключающейся в фильтрации изображений скользящим окном в виде гауссоиды, для получения контурного препарата используется метод Канни. В другом, который назван алгоритм №2, на этапе предварительной обработки для подавления помех используется адаптивная винеровская фильтрация, а для получения контурного препарата – оператор Превитта с последующей пороговой сегментацией.

На Рисунке 3 представлены примеры выделения контуров изображений группы объектов, зарегистрированных при отсутствии расфокусировки на равномерном фоне и при пиковом отношении сигнала к шуму (ОСШ)  $\mu = 30$  с использованием алгоритмов на основе метода Канни, оператора Превитта и предложенных комбинированных алгоритмов №1 и №2.

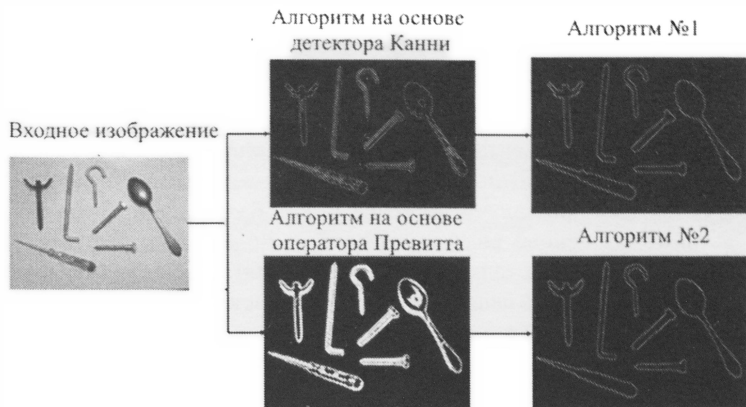


Рисунок 3.

Результат выделения контуров различными алгоритмами

На Рисунке 4 представлены примеры выделения контура изображения объекта различными алгоритмами при наличии в исходном изображении пространственно неравномерного фона (а, б, в, г) и аддитивного шума (д, е, л, м). В обоих рядах первые слева рисунки (а, д) – это исходные изображения, вторые (б, е) – контуры, полученные методом Канни, третьи (в, л) и четвертые (г, м) – контуры, полученные алгоритмами №1 и №2, соответственно.

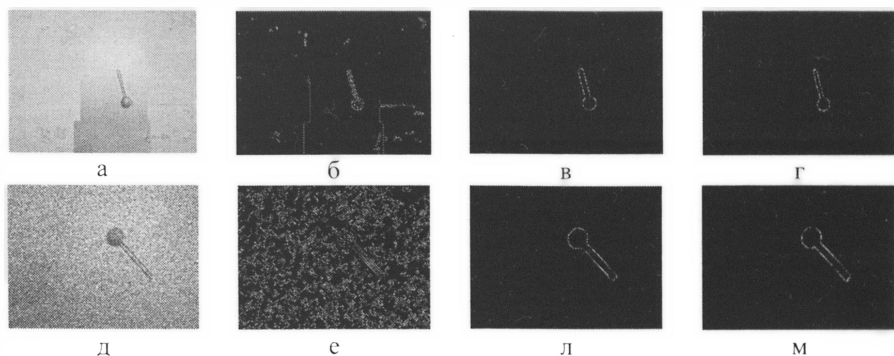


Рисунок 4.

Пример выделения контура изображения объекта различными алгоритмами при наличии аддитивного шума (а, б, в, г) и пространственно неравномерного фона (д, е, л, м)

Из результатов, представленных на Рисунках 3 и 4 следует, что контуры, полученные на основе известных методов, даже при отсутствии помех, содержат в пределах границ внутренние контурные линии и штрихи, а при наличии неравномерного фона или аддитивных помех имеется множество лишних элементов в изображении. Достоинством предложенных комбинированных алгоритмов является отсутствие разрывов контуров границ изображений объектов, отсутствие линий в пределах контуров границ изображений объектов, а также устойчивость к аддитивным помехам и неравномерности фона.

В третьей главе приведены результаты исследований по разработке алгоритмов распознавания объектов по их контурным изображениям в приложении к задаче сортировки деталей, выполняемой СТЗ в составе промышленного РТК. В соответствии с постановкой задачи распознавания образов деталей на открытом конвейере, а также на основе анализа известных подходов к решению задачи распознавания, в диссертации принято правило принятия решения об отнесении объекта к одному из классов на основе процедуры сопоставления с использованием меры близости в виде евклидова расстояния.

Для реализации такого метода распознавания осуществляется подготовка базы данных, в которой содержится описание эталонных объектов в виде соответствующих векторов признаков, сформированных на основе фурье-дескрипторов изображений контуров этих объектов. Алгоритм распознавания образов включает следующие этапы: регистрация изображений объекта, появляющегося в рабочей зоне СТЗ; предварительная обработка изображения; выделение контура; описание объекта в исходном словаре признаков на основе фурье-дескрипторов; описание объекта в рабочем словаре признаков. На заключительном этапе алгоритма осуществляется классификация изображения текущего объекта путём сопоставления его описания в признаковом пространстве с соответствующими описаниями эталонных объектов различных классов.

В работе проведены исследования, целью которых являлась оценка эффективности описанного алгоритма при использовании известных и предложенных методов контурной сегментации для различных условий регистрации изображений, в том числе, масштаба, угловой ориентации и уровня аддитивных помех. Для проведения экспериментов была подготовлена база данных для 40 классов относительно простых объектов, которые регистрировались цифровой камерой. Каждый класс в базе данных включал одно эталонное изображение размером 640x480 пикселей при 256 уровнях квантования. Примеры эталонных изображений, включённых в базу данных, представлены на Рисунке 5.

Тестовая выборка изображений была подготовлена из эталонных изображений и включала 480 изображений, полученных поворотом эталонных изображений на углы  $\varphi$  в пределах от 0° до 90°; масштабированием эталонных изображений с коэффициентом  $M$  масштаба, равным 0,75 и 0,5, и добавлением к эталонным изображениям аддитивной помехи с нормальным законом распределения, при которой пиковое отношение сигнала к шуму (ПОСШ) составляло значения, равные 17, 10, 7, 5 и 3.

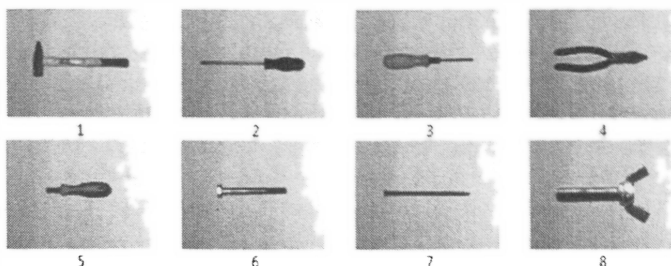


Рисунок 5.

Примеры эталонных изображений из базы данных 40 классов объектов

Оценка вероятности распознавания, выраженная в процентах, определялась по формуле

$$P = \frac{N_r}{N_0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $N_r$  – количество положительных исходов распознавания при предъявлении тестовых изображений, а  $N_0$  – количество предъявлений тестовых изображений в испытании.

В таблице 1 представлены значения вероятности распознавания при предъявлении тестовых изображений, у которых контуры выделялись алгоритмом на основе метода Канни, а также комбинированными алгоритмами №1 и №2. Из результатов, представленных в таблице 1, следует, что при использовании предложенных комбинированных алгоритмов выделения контуров обеспечивается более высокая эффективность распознавания образов, чем при использовании алгоритма контурной сегментации по методу Канни. В наибольшей степени достоинства предложенных комбинированных алгоритмов проявляются при распознавании зашумлённых изображений.

Таблица 1. Оценка эффективности алгоритма распознавания при различных методах выделения контуров изображений и вариациях масштаба, ориентации и ПОСШ.

| Вид<br>тестовой<br>выборки | Вероятность распознавания, % |                |                | Вид<br>тестовой<br>выборки | Вероятность распознавания, % |                |                |
|----------------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------------------|------------------------------|----------------|----------------|
|                            | Метод<br>Канни               | Алгоритм<br>№1 | Алгоритм<br>№2 |                            | Метод<br>Канни               | Алгоритм<br>№1 | Алгоритм<br>№2 |
| $M = 1.00$                 | 100                          | 100            | 100            | $\varphi = 80^\circ$       | 90                           | 95             | 100            |
| $M = 0,75$                 | 82,5                         | 95             | 95             | $\varphi = 90^\circ$       | 90                           | 100            | 100            |
| $M = 0,5$                  | 50                           | 70             | 82,5           |                            |                              |                |                |
| $\varphi = 0$              | 100                          | 100            | 100            | ПОСШ = 17                  | 85                           | 90             | 92             |
| $\varphi = 20^\circ$       | 92,5                         | 100            | 100            | ПОСШ = 10                  | 52,5                         | 87,5           | 90             |
| $\varphi = 30^\circ$       | 90                           | 95             | 97,5           | ПОСШ = 7                   | 35                           | 85             | 85             |
| $\varphi = 45^\circ$       | 82,5                         | 95             | 95             | ПОСШ = 5                   | 32,5                         | 80             | 80             |
| $\varphi = 60^\circ$       | 90                           | 95             | 97,5           | ПОСШ = 3                   | 25                           | 67,5           | 75             |

В работе проведены численные эксперименты по оценке влияния линейных искажений на эффективность распознавания при использовании различных алгоритмов выделения контуров изображений. Тестовая выборка изображений была подготовлена из эталонных изображений, которые подвергались линейным искажением с использованием низкочастотного фильтра, импульсный отклик которого имел вид двумерной гауссоиды. При этом линейные искажения оценивались в относительных величинах значением параметра  $k = \sigma/a$ , где  $a$  – размер пикселя на эталонных изображениях, а  $\sigma$  – параметр гауссоиды. Результаты экспериментов приведены в таблице 2. Из этих результатов следует, что линейные искажения регистрируемых изображений оказывают существенное влияние на эффективность распознавания, но при использовании предложенных алгоритмов выделения контуров алгоритмы распознавания более устойчивы к влиянию линейных искажений.

Таблица 2. Оценка влияния линейных искажений изображения на эффективность алгоритма распознавания при различных методах выделения контуров

| $k$ | Вероятность распознавания, % |             |             | $k$ | Вероятность распознавания, % |             |             |
|-----|------------------------------|-------------|-------------|-----|------------------------------|-------------|-------------|
|     | Алгоритм Канни               | Алгоритм №1 | Алгоритм №2 |     | Алгоритм Канни               | Алгоритм №1 | Алгоритм №2 |
| 0,2 | 97,5                         | 100         | 100         | 1,8 | 70                           | 90          | 92,5        |
| 0,4 | 97,5                         | 100         | 100         | 2,0 | 65                           | 90          | 92,5        |
| 0,6 | 97,5                         | 100         | 100         | 2,2 | 60                           | 90          | 87,5        |
| 0,8 | 92,5                         | 97,5        | 100         | 2,4 | 50                           | 90          | 70          |
| 1,0 | 92,5                         | 97,5        | 100         | 2,6 | 47,5                         | 82,5        | 65          |
| 1,2 | 80                           | 92,5        | 100         | 2,8 | 40                           | 65          | 57,5        |
| 1,4 | 82,5                         | 92,5        | 100         | 3,0 | 35                           | 60          | 57,5        |
| 1,6 | 72,5                         | 92,5        | 95          | 3,2 | 32,5                         | 50          | 47,5        |

Одним из способов повышения быстродействия алгоритма распознавания является уменьшение размерности словаря признаков за счёт использования в нём только наиболее существенных признаков. В третьей главе изложены результаты исследований по уменьшению исходного словаря признаков, сформированного на основе фурье-дескрипторов, методом линейного дискриминантного анализа (ЛДА). Уменьшение пространства признаков методом ЛДА заключается в получении нового вектора признаков и исходного  $\mathbf{X}^{(k,q)}$  путём редуцирования его в соответствии с формулой:

$$\mathbf{Xre}^{(k,q)} = \mathbf{A}_{s,p} \cdot \mathbf{X}^{(k,q)}, \tag{5}$$

где  $\mathbf{A}_{s,p}$  – матрица редукции признаков, которая выбирается из  $s$  строк матрицы собственных векторов матрицы ковариации  $\mathbf{H}_{p,p} = \mathbf{W}_{p,p}^{-1} \cdot \mathbf{B}_{p,p}$ , соответствующих наибольших собственным числам, в которой  $\mathbf{W}_{p,p}$  – матрица ковариаций признаков внутри классов, а  $\mathbf{B}_{p,p}$  – матрица ковариаций признаков между классами.

Для исследования эффективности метода ЛДА применительно к предложенному алгоритму распознавания проведены численные эксперименты. В экспериментах использовалась база данных из 10 классов, каждый из которых содержал по одному эталонному изображению объекта. Все эталонные изображения (см. Рисунок 6) регистрировались цветной цифровой камерой и имели размер 640x480 пикселей. На основе анализа степени сложности формы объектов с точки зрения восстановления их контуров по усечённому набору фурье-дескрипторов установлено, что достаточно использовать 101 гармонику для формирования исходного словаря признаков. Поэтому при проведении экспериментов по распознаванию исходный вектор признаков имел размерность, равную  $P_0 = L_1 - 2 = 99$ .

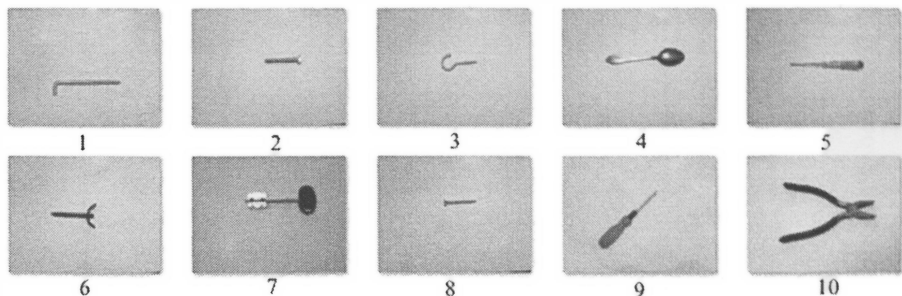


Рисунок 6.

Эталонные изображения объектов.

На основе эталонных изображений была сформирована обучающая выборка из 120 изображений и контрольная выборка из 300 изображений, которые были получены из эталонных изображений путём изменения масштаба, поворотов и добавления аддитивных помех. По обучающей выборке была получена матрица  $A_{s,p}$  редукции признаков. В процессе экспериментов, в которых использовалась контрольная выборка, варьировалось значение  $s$  размерности вектора рабочих признаков и оценивалась вероятность распознавания. Как следует из полученных результатов (см. Рисунок 7), размерность рабочего словаря признаков, полученных методом ЛДА, не превышала значения, равного 9, при значении вероятности правильного распознавания 99%. Таким образом, по отношению к исходному словарю размерность словаря признаков может быть уменьшена в 10 раз.

Была проведена серия экспериментов, в которых в качестве эталонных изображений использовались изображения из базы данных бинарных изображений «A Large Binary Image Database». Были сформированы обучающие и контрольные выборки для различных алфавитов классов, которые содержали количество классов, равное  $K = 10; 25; 50$  и  $100$ . По результатам экспериментов вероятность правильного распознавания контрольных образов достигала 99,15% при количестве признаков  $s \geq 5; 5; 12$  и  $6$  для соответствующих алфавитов классов. На основании проведённых исследований сделан вывод о том, что метод

линейного дискриминантного анализа позволяет существенно уменьшить размерность пространства признаков, сформированного на основе фурье-дескрипторов без потери эффективности алгоритма распознавания и сократить время на реализацию алгоритма распознавания примерно на 15%.



Рисунок 7.

Зависимость вероятности правильного распознавания от размерности пространства рабочего словаря признаков

В четвертой главе изложены результаты исследований по разработке алгоритмов определения параметров, характеризующих линейные координаты и угловую ориентацию объектов, на основе анализа контуров изображений объектов. Приведены результаты сравнительного анализа погрешностей двух алгоритмов определения параметров, характеризующих положение и ориентацию объектов, один из которых основан на методе главных компонент, а другой – на анализе моментов функций, описывающих бинарные изображения контуров.

На основе метода главных компонент угол ориентации и координаты изображения предъявляемого объекта относительно изображения эталона определяются из следующих формул:

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} = (\mathbf{A}_p^0)^{-1} \mathbf{A}_z^0 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \bar{\Delta} = \bar{m}_p - \bar{m}_z, \quad (6)$$

где  $\mathbf{A}_z^0$ ,  $\mathbf{A}_p^0$  - матрицы преобразования векторов  $\bar{R}_z$  и  $\bar{R}_p$ , описывающих контуры эталонного и предъявляемого объектов, соответственно, в векторы  $\bar{K}_z$  и  $\bar{K}_p$ , описывающих контуры этих объектов в базисе главных компонент;  $\bar{m}_p, \bar{m}_z$  - векторы математического ожидания векторов  $\bar{R}_z$  и  $\bar{R}_p$ , соответственно. Вектор  $\bar{\Delta}$  определяет координаты изображения предъявляемого объекта относительно

координат изображения эталонного объекта, а угол  $\varphi$  – относительную угловую ориентацию изображений, вычисляемый по значению компонент  $R_{12} = \sin \varphi$ .

Метод оценки линейных координат и угловой ориентации на основе анализа моментов функций, заключается в вычислении моментов функций, описывающих изображения эталонного и предъявляемого объектов в соответствии с формулой

$$\mu_{mn}^{z,p} = \sum_i \sum_j (x_i - x_c)^m (y_j - y_c)^n f_{z,p}(x_i, y_j), \quad m, n = \overline{0, 2}. \quad (7)$$

Относительные линейные координаты определяются по формуле

$$\Delta x = \mu_{10}^p - \mu_{10}^z, \quad \Delta y = \mu_{01}^p - \mu_{01}^z, \quad (8)$$

а относительная угловая ориентация по формуле

$$\varphi = \varphi_p - \varphi_z, \quad (9)$$

где

$$\varphi_{z,p} = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\mu_{11}^{z,p}}{\mu_{02}^{z,p} - \mu_{20}^{z,p}} + t \frac{\pi}{2}, \quad t = \overline{0, 3}. \quad (10)$$

На Рисунке 8 представлены результаты численных экспериментов по оценке погрешности линейных координат изображения. СКО погрешности по обоим алгоритмам практически совпадают. Из приведённых графиков следует, что даже при значении ПОСШ, равного 3, СКО погрешности оценки координат не превышает 1,4 пикселя.

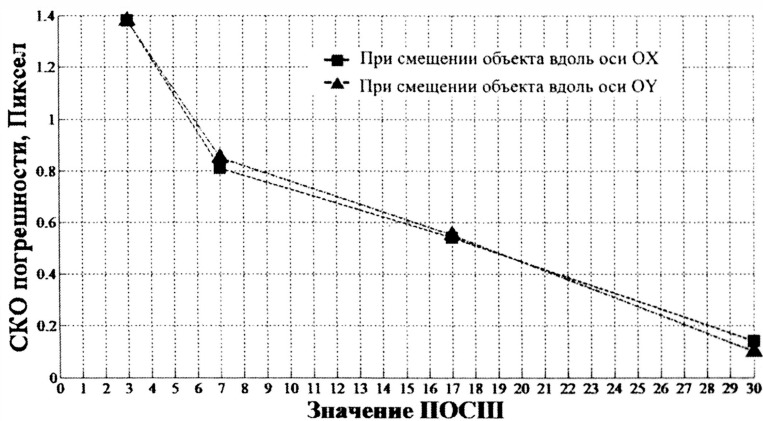


Рисунок 8.

Зависимость СКО погрешности оценки линейных координат изображения от ПОСШ в исходном изображении

На Рисунке 9 приведены результаты численных экспериментов по оценке погрешности алгоритмов по оценке угловой ориентации при наличии аддитивного шума. СКО погрешности по обоим алгоритмам практически совпадают. Из графиков следует, что даже при значении ПОСШ, равном 3 СКО погрешности

оценки угловой ориентации не превышает  $0,1^\circ$ . Кроме этого, СКО погрешности оценки угловой ориентации очень слабо зависит от значения ориентации.

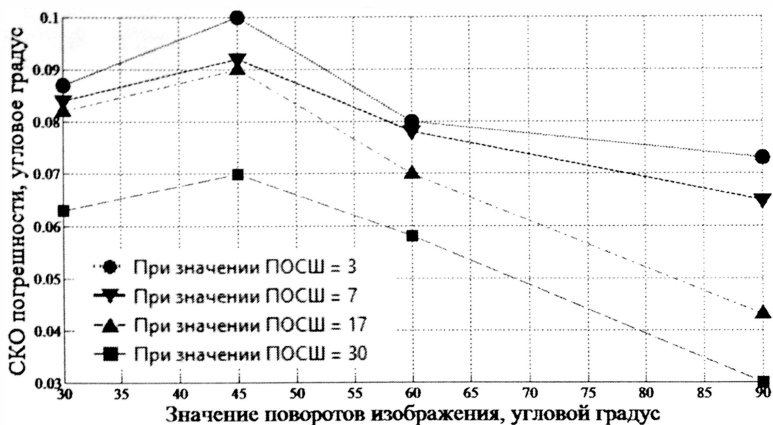


Рисунок 9.

Зависимость СКО погрешности оценки угловой ориентации изображения от значений поворотов при различных ПОСШ в исходном изображении

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что предложенные для реализации алгоритмы обеспечивают достаточно высокую степень точности измерения линейных и угловых координат изображений.

**В пятой главе** изложена методика проектирования, которая основана на блочно-иерархическом подходе и включает в себя задачи проектирования, решаемые на функционально-логическом и системотехническом уровнях. На функционально-логическом уровне, где объектом проектирования является промышленный РТК, целевая функция (ЦФ) проектирования определена как зависимость вероятности  $P(\bar{B})$  отсутствия брака при изготовлении деталей от показателей эффективности технологического оборудования и СТЗ. На основе формул, описывающих ЦФ проектирования РТК, можно определить оптимальное сочетание значений показателей эффективности СТЗ, в том числе, вероятности правильного распознавания деталей, а также СКО погрешностей оценки линейных координат и угловой ориентации деталей при заданных параметрах технологического оборудования РТК.

На системотехническом уровне, где объектом проектирования является СТЗ, разработанная методика позволяет определить оптимальное сочетание значений параметров, определяющих требования к устройству регистрации изображений, устройству подсветки рабочей зоны на конвейере, ЭВМ, входящей в состав программно-аппаратных средств СТЗ, а также параметрам алгоритмов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Предложено два новых алгоритма контурной сегментации изображений объектов, отличающихся от известных использованием процедур и операций морфологической обработки цифровых изображений. Показано, что использование предложенных алгоритмов позволяет существенно повысить эффективность распознавания образов объектов по контурам изображений при наличии аддитивных помех и пространственно неравномерного фона.

2. Разработан алгоритм распознавания образов, в котором использованы предложенные алгоритмы контурной сегментации, а принятие решения о классификации осуществляется путём оценки евклидова расстояния между регистрируемым изображением и эталоном в пространстве признаков, сформированном на основе фурье-дескрипторов контуров изображений объектов. Определены допустимые значения размеров цифрового изображения, пикового отношения сигнала к шуму и степени линейных искажений исходных изображений, при которых обеспечивается вероятность распознавания, близкая к 100%.

3. Предложено для выбора рабочего словаря признаков, сформированного на основе фурье-дескрипторов контуров изображений объектов, использовать метод линейного дискриминантного анализа. На основе численных экспериментов показано, что этот метод без потери эффективности распознавания образов объектов позволяет уменьшить размерность словаря признаков более, чем в 10 раз и примерно на 15% снизить временные затраты на реализацию алгоритма.

4. Предложено для измерения линейных и угловых координат объектов использовать алгоритмы, основанные на методе главных компонент или моментов функций, описывающих контуры изображений объектов. На основе численных экспериментов показано, что эти алгоритмы позволяют производить оценку координат изображений с высокой степенью точности и имеют практически совпадающие СКО погрешностей измерений; даже при отношении сигнала к шуму, равного 3, СКО погрешности измерения линейных координат не превышает 1,4 пикселя, а СКО погрешности измерения угловых координат не превышает  $0,1^\circ$ .

5. Разработана методика проектирования СТЗ промышленных робототехнических комплексов, которая, позволяет определить требования к значениям основных показателей эффективности СТЗ, в том числе, вероятности распознавания и СКО погрешностей измерения линейных и угловых координат объектов, а также определить оптимальное сочетание значений параметров аппаратных средств регистрации изображений и параметров алгоритмов.

## **ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИХ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Колючкин В.Я., Нгуен К.М. Алгоритмы контурной сегментации и распознавания образов объектов систем технического зрения// Электронное научно-техническое издание «Наука и Образование». 2013. № 4. DOI: 10.7463/0413.0548084. С. 187 - 200. (0,8 п.л. / 0,6 п.л.). URL: <http://technomag.stack.net/doc/548084.html>.

2. Колючкин В.Я., Нгуен К.М. Выбор рабочего словаря признаков в алгоритмах распознавания изображений на основе фурье-дескрипторов// Электронное научно-техническое издание «Наука и Образование». № 3. DOI: 10.7463/0314.0699817. С. 188 - 199. (0,8 п.л. / 0,6 п.л.). URL: <http://technomag.edu.ru/doc/699817.html>

3. Колючкин В.Я., Нгуен К.М., Чан Т.Х. Алгоритмы обработки изображений в системах машинного зрения роботизированных производственных линий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. М.: Издательство «Радиотехника». 2014. №3. С.44-51. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

4. Колючкин В.Я., Нгуен К.М., Чан Т.Х. Алгоритмы обработки информации в системах технического зрения промышленных роботов // Труды московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Современные проблемы оптотехники, 2013. №610. С.139-150. (0,8 п.л. / 0,3 п.л.).

5. Нгуен К.М, Чан Т.Х. Алгоритмы обработки информации в системах технического зрения промышленных роботов//устный доклад. Сборник трудов VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2013». – 187 – 189. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).