

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения
(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Разработка системы бесконтактного контроля оптических
элементов автомобильных зеркал заднего вида»

Студент

Е.Н. Канаева

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент, А.А. Козлов

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ дефектов оптических элементов автомобильных зеркал.....	5
2 Обзор существующих систем контроля.....	15
2.1 Виды контроля оптических элементов зеркал.....	15
2.2 Анализ систем бесконтактного контроля.....	21
3 Разработка структуры системы контроля.....	31
3.1 Требования предъявляемые к системе контроля.....	31
3.2 Структура системы контроля.....	32
4 Математические модели и алгоритмы функционирования системы контроля.....	37
4.1 Бинаризация изображения.....	37
4.2 Поиск и оценка геометрических характеристик дефектов на изображении.....	57
5 Проектирование аппаратной части системы контроля.....	75
Заключение.....	77
Список используемых источников.....	78

Введение

В современном автомобилестроении возрастает конкурентная борьба за конечного потребителя. В результате чего конструкция автомобилей становится все более сложной, а требования к деталям, узлам и элементам, входящим в ее состав, становятся более жесткими. Проблема контроля одна из наиболее актуальных в автомобилестроении.

В данной диссертационной работе будет рассмотрена проблема входного контроля зеркальных элементов зеркал заднего вида перед сборкой. Большинство методов контроля применяемых для ее решения на предприятиях относятся к неавтоматизированным методам.

Наиболее распространен метод визуального контроля. Это один из простейших методов контроля, который не требует применения сложных и дорогостоящих контрольных приборов. В случае входного контроля необходимо определить только наличие дефекта [28]. В ряде случаев требуется определить его местоположение на зеркале, а также геометрические параметры. Классификация дефекта непосредственно на контрольном посту входного контроля не производится. В связи с этим визуальный контроль считается достаточно эффективным методов контроля. Однако, он обладает существенными недостатками. В связи с тем, что контроль осуществляется человеком, имеет место влияние человеческого фактора. Человеку свойственны усталость, утомляемость, невнимательность и ряд других факторов психологического и эмоционального плана. Это выражается в субъективности результатов контроля и их низкой достоверности. Производительность при применении данного метода зависит от квалификации контролера и, как правило, она достаточно низкая, что обусловлено физическими особенностями каждого человека. Несколько улучшает положение применение простейших оптических устройств, но при этом сильно увеличивается утомляемость оператора, что приводит к снижению качества контроля и оказывает влияние на здоровье.

Основной путь развития современных систем контроля заключается в автоматизации данного процесса при помощи различного рода систем технического зрения. Данные системы представляют собой сложные технические комплексы, состоящие из оптических систем и соответствующего программного обеспечения к ним [13]. Основным недостатком данных систем – это их стоимость. Ряд таких систем также требуют создания специальных микроклиматических условий для проведения контроля, что также усложняет процесс их внедрения в производство. Следует отметить, что отечественных систем выпускаемых серийно на данный момент нет.

Разработка системы для проведения автоматизированного контроля оптических элементов автомобильных зеркал заднего вида в производственных условиях является весьма актуальной научно-технической задачей.

Цель магистерской диссертации заключается в разработке такой системы контроля оптических элементов зеркал заднего вида автомобиля, которая позволит автоматизировать процесс контроля, повысить его качество и производительность.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ дефектов оптических элементов автомобильных зеркал;
- провести анализ имеющихся технических решений;
- разработать структуру и функции системы контроля;
- разработать математические модели и алгоритмы функционирования системы контроля;
- спроектировать аппаратную часть системы контроля.

Решению данных задач посвящены последующие разделы диссертации.

1 Анализ дефектов оптических элементов автомобильных зеркал

Проектирование, технология изготовления и транспортировка оптических элементов автомобильных зеркал тесно связаны с возможностью возникновения в них дефектов. Классификация дефектов представлена в таблице 1 согласно данным [6].

Таблица 1 – Классификация дефектов оптических элементов автомобильных зеркал

Термин	Определение
1 Включения (пороки стекломассы)	
Разрушающее включение	Включение в стекле, сопровождающееся трещинами и (или) посечками
Неразрушающее включение	Включение в стекле, не сопровождающееся трещинами и (или) посечками
1.1 Газообразные включения	
Пузырь	Полость в стекле различных размеров и формы
Закрытый пузырь	Пузырь, полость которого находится в толще стекла и не сообщается с внешней средой
Открытый пузырь	Пузырь, полость которого выходит на поверхность стекла и сообщается с внешней средой
Поверхностный пузырь	Пузырь, находящийся в непосредственной близости от поверхности стекла и сопровождающийся деформацией поверхностного слоя стекла
Капиллярный пузырь	Пузырь в виде капилляра, длина которого в десять или более раз превышает диаметр
Мошка	Пузырь, размеры которого не превышают 1 мм
1.2 Кристаллические включения	
Камень	Включения в стекле различных размеров, формы и цвета, имеющие кристаллическую структуру: продукт разрушения огнеупоров (огнеупорный камень, черная точка), непровар шихты (шихтный камень, черная точка), продукт кристаллизации стекла (рух), окалина
1.3 Стекловидные включения	
Свиль	Включение, имеющее стекловидную структуру, которое по химическому составу и физическим свойствам отличается от основного стекла
Внутренняя свиль	Свиль, находящаяся в толще стекла и не влияющая на качество поверхности
Поверхностная свиль	Свиль, находящаяся в непосредственной близости от поверхности стекла и сопровождающаяся деформацией поверхностного слоя стекла
Грубая свиль	Локальная свиль с выраженной поверхностью раздела, хорошо видимая невооруженным глазом
Нитевидная свиль	Свиль, имеющая форму четкой или нечеткой, резко ограниченной

Продолжение таблицы 1

Термин	Определение
	или с постепенным переходом в массу стекла нити или пучка нитей
Узловая свиль	Грубая свиль с отходящими от нее нитевидными свиллями
Шлир	Поверхностная свиль в виде капли чужеродного стекла, сохранившей свою форму, бесцветная или слегка окрашенная
2. Пороки формования	
Отпечатки валков	Небольшие углубления на поверхности стекла, иногда сопровождающиеся налетом белого или серого цвета
Кованость	Мелкие деформации поверхности стекла в виде выпуклостей и вогнутостей, создающие непрерывный характерный искажающий рисунок в виде пятен, ряби различной интенсивности
Прилипшая крошка	Мелкие частицы стекла, приварившиеся к поверхности листа стекла
3. Пороки, вызванные механическими повреждениями	
Царапина	Острое механическое повреждение поверхности стекла в виде черты. В зависимости от ширины различают царапины грубые и волосные
Заполированная царапина	Царапина с размытыми (оплавленными) краями
Потертость	Механическое повреждение поверхности стекла в виде сплошной или прерывистой полосы, вызывающее ухудшение прозрачности
Скол	Нарушение геометрии листа стекла в виде углубления на торцевой поверхности
Выступ	Нарушение геометрии листа стекла в виде выступа на торцевой поверхности
Отбитый угол	Нарушение геометрии угла листа стекла, вызванное откалыванием части стекла
Трещина	Нарушение целостности стекла, проходящее через всю толщину
Посечка	Нарушение целостности стекла, не проходящее через всю толщину стекла и имеющее ограниченную длину
4. Прочие пороки	
Выщелачивание	Матовый налет или радужная окраска на поверхности стекла в виде пятен различных размеров и формы
Дросс	Налипание на поверхность стекла частиц оксидов олова
Блюм	Помутнение поверхности стекла голубоватого, серовато-белого, серовато-желтого и других оттенков после вторичной термообработки стекла

Как видно из представленной таблицы количество возможных дефектов достаточно велико, однако не все из них встречаются на стадии входного контроля перед сборкой [29]. Наиболее часто встречаются такие пороки зеркала как: точка, царапина, трещина, упорядоченные точечные дефекты, расслоение покрытия и спиральные трещины и разрушения,

вспучивание, след ворсинки. Рассмотрим данные дефекты оптических элементов подробнее.

Наиболее распространенным дефектом покрытия является "точка". Точкой называется дефект, изображающийся в условиях освещения, предусмотренных технической документацией, в виде образования округлой формы (отношение максимального размера к минимальному не более 2). На рисунке 1 показаны примеры изображения поверхности зеркала с точками.

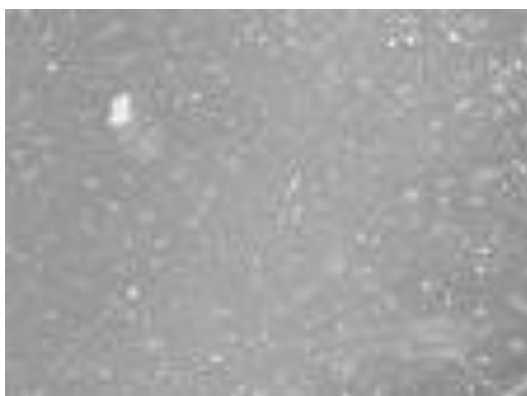


Рисунок 1 – Дефект «точка»

Причины возникновения точек могут быть различными [27]. Наиболее часто встречаемые причины связаны с наличием на подложке посторонних частиц и пузырей. В ходе выполнения входного контроля причины возникновения данного дефекта обычно значения не имеют, гораздо важнее определить их размеры и количество, что может быть критично для выполнения зеркалом своего функционального назначения.

Получить подложку без точечных дефектов практически невозможно. Нормирование дефектов осуществляется по их плотности: очень хорошие покрытия имеют плотность дефектов $0,01 - 1 \text{ 1/мм}^2$, удовлетворительного качества $50 - 150 \text{ 11/мм}^2$. Обычные покрытия имеют 200 и более $1/\text{мм}^2$. Для уменьшения точечных дефектов чаще всего применяют различные методы снижения запыленности.

Как правило, точечные дефекты имеют умеренный размер (не более 0,05 – 0,08 мм) и распределены равномерно. В этих условиях интегральный коэффициент обратного рассеяния однозначно характеризует качество покрытия. Если плотность дефектов менее 10 1/мм² или встречаются крупные дефекты, возникает проблема их измерения и счета. Одним из средств контроля для такой цели может служить анализатор изображения, обычно применяемый для расшифровки, например аэрофотоснимков.

Дефект «царапина» представлен на рисунке 2.

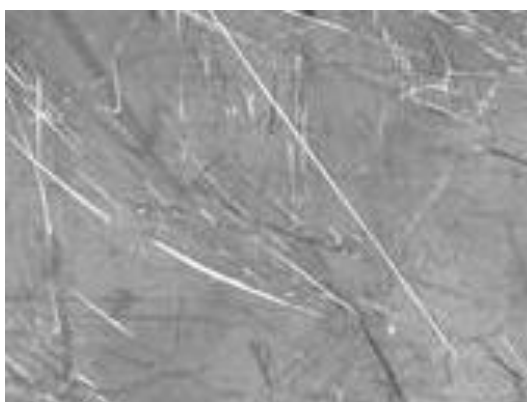


Рисунок 2 – Дефект «царапина»

Царапина является дефектом подложки. В соответствии с техническими условиями на различные зеркальные элементы данный дефект может быть допустим в краевых частях определенных размеров. Кроме того, обычно нормируется и оптическая чистота подложки. Обычно сумма длин царапин не превышает два световых диаметра. На рисунке 2 представлен пример зеркала с множественными царапинами. Основная трудность при их обнаружении заключается в их малом размере в одном из измерений.

Еще одним часто встречающимся дефектом является трещина (рисунок 3). По внешнему виду трещина очень похожа на царапину, поэтому отличить их в некоторых случаях затруднительно. Основное отличие заключается в

топологии дефекта. Трещина может иметь ветвления. Пример такого дефекта приведен на рисунке 4.



Рисунок 3 – Дефект «трещина»



Рисунок 4 – Дефект «трещина»

Основная опасность данного дефекта заключается в том, что с течением времени или под действием внешних факторов данный дефект может увеличивать свои размеры или вообще привести к полному разрушению оптического отражающего элемента. В связи с этим наличие данного дефекта является недопустимым.

Другие дефекты встречаются гораздо реже, поэтому приведем выборочно наиболее вероятные из них. Внешний вид упорядоченного точечного дефекта приведен на рисунке 5. На рисунке 6 представлены

расслоение покрытия, на рисунке 7 спиральные трещины и разрушения.
Рисунок 8 иллюстрирует дефект «вспучивание».

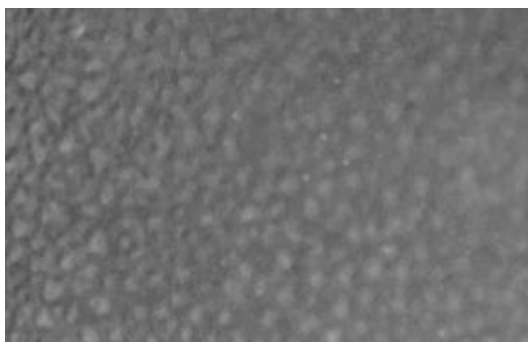


Рисунок 5 – Упорядоченный точечный дефект



Рисунок 6 – Расслоение покрытия



Рисунок 7 – Спиральные трещины и разрушения



Рисунок 8 – Вспучивание

На рисунке 9 представлен след, остающийся на покрытии от прилипшей к поверхности подложки ворсинки (например, от протирочного материала). Данный дефект, как правило, является следствием низкой культуры производства, но иногда все-таки встречается.



Рисунок 9 – След ворсинки

Причины возникновения дефектов разнообразны [27]. Основные из них связаны с технологией изготовления. К ним можно отнести несоблюдение режимов варки, осветления и охлаждения стекломассы, а также химическое взаимодействие с печными газами.

Последняя причина наиболее распространена. Это связано с тем, что в процессе варки происходит неполное удаление продуктов разложения исходного сырья, возможно возникновение вторичного разложения стекломассы, взаимодействие с газами в печи, а также возможно попадание в стекломассу атмосферного воздуха.

Стекловидные включения возникают из-за неоднородности химического состава сырья, процессов расслоения и слабой гомогенизации стекломассы. Также возможно попадание в стекломассу остатков огнеупоров и окислов.

Твердые непрозрачные включения возникают в следствии непровара шихты из-за некачественной ее подготовки, разрушения огнеупорного покрытия печи, неправильной кристаллизации стекломассы из-за нарушения температурного режима варки и нарушения состава стекла, наличия в шихте сульфата натрия и хромоникелевых соединений.

Как отмечалось ранее, наличие ряда дефектов является допустимым [5] (например, точка, царапина). Допустимыми являются дефекты, которые существенно не влияют на выполнение зеркальным элементом своего функционального назначения и не приводят к снижению его физико-механических характеристик в процессе всего срока службы изделия. Однако, наличие допустимых дефектов также регламентируется [5, 6, 7].

На рисунке 10 показана схема расположения зон допустимых дефектов оптического элемента зеркала заднего вида автомобиля.



Рисунок 10 – Схема расположения зон допустимых дефектов оптического элемента зеркала заднего вида автомобиля

На данной схеме по краям темным выделена зона 1, где допускается повышенное содержание дефектов. Средняя светлая зона 2 имеет более жесткие требования по наличию и характеристикам дефектов. Размер и

форма данных зон зависит от технических условий на конкретную модель зеркала и технического задания автосборочного предприятия.

Рассмотрим один из возможных вариантов технических требований к порокам зеркал [30].

Зона 1 допускается наличие следующих видов дефектов:

- точечные дефекты в виде темных точек диаметром не более 0,5 мм;
- пузыри закрытые внутренние диаметром не более 2 мм;
- инородные неразрушающие включения диаметром не более 2 мм;
- чистые волосные царапины (шириной до 0,1 мм), видимые с расстояния не более 1 метра.

Количество допускаемых пороков в зоне 1 не должно превышать двух штук.

Для зоны 2 допускается наличие следующих видов дефектов:

- точечные дефекты в виде темных точек диаметром не более 0,5 мм;
- пузыри закрытые внутренние диаметром не более 1 мм;
- инородные неразрушающие включения диаметром не более 1 мм;
- чистые волосные царапины (шириной до 0,1 мм), видимые с расстояния не более 1 метра.

Количество допускаемых пороков в зоне 2 не должно превышать одной штуки.

Анализ дефектов оптических элементов автомобильных зеркал позволяет сформулировать основные требования к системе контроля. Исходя из того, что при входном контроле требуется только определение наличия дефекта, классификация дефекта в автоматическом режиме необязательна. Система должна уверенно определять дефекты с минимальным размером в одном из измерений от 0,1 мм. Необходимо наличие возможности определения геометрических характеристик пороков и их количества в зависимости от зоны их расположения на контролируемом оптическом элементе.

2 Обзор существующих систем контроля

2.1 Виды контроля оптических элементов зеркал

Большинство известных технических средств неразрушающего контроля зеркал получили свое развитие с развитием компьютерной техники. Данные средства контроля построены на базе систем технического зрения, на основе анализа двумерных сцен [3].

Автоматизация восприятия и анализа двумерных сцен достаточно сложная научно-техническая задача, решение которой возможно различными методами оптического контроля [19]: триангуляционный, сканирующая дальнометрия, структурированное освещение, распознавание образов.

В основном данные методы направлены на оптическое восприятие двумерных объектов и контроль их размеров. Рассмотрим более подробно методы связанные с дифракционными явлениями на объектах, триангуляционными и теневыми методами измерений. Также рассмотрим подробнее созданные на их основе оптико-электронные измерительные системы.

В общем случае система технического зрения должна распознать форму объекта, определить его положение в пространстве и выработать сигнал на управляющее воздействие.

В состав технических средств реализующих данный метод контроля обычно входят: фото или видео устройства получения информации; приборы освещения; блоки обработки информации, реализованные на базе ЭВМ; интерфейсные устройства, которые реализуют связь между различным оборудованием системы, а также обеспечивают подключение системы к базе данных предприятия, тем самым реализуется концепция компьютерно-интегрированного производства; видеотерминал для управления системой контроля и визуального восприятия полученных результатов непосредственно на рабочем месте.

Триангуляционный метод достаточно прост в реализации, поэтому он является одним из самых распространенных оптико-электронных методов измерений.

Существует достаточно много алгоритмов работы систем, основанных на использовании данного метода. Исследования эффективности снижения погрешности измерений [16] путем численного моделирования, а также в условиях их реальной работы показали, что самым эффективным является медианный алгоритм. Данный алгоритм обеспечивает при правильном выборе параметров хорошее быстродействие системы и снижение погрешности в полтора раза. Для обеспечения снижения пространственного шума более чем в два раза необходимо применять бинокулярные схемы измерения. Кроме того данные исследования показали, что точность измерений зависит от таких параметров зондирующего пучка как степень его когерентности и ширина. Кроме того влияние оказывают форма исследуемого объекта и ориентация его поверхностей относительно зондирующего пучка. Использование зондирующего пучка частично-когерентного позволяет уменьшить погрешность измерений от 4 до 7 раз.

Из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что создание систем контроля промышленных изделий на основе данного метода достаточно перспективно.

Метод теневого контроля [19] также является достаточно перспективным и обладает достаточно высокой точностью измерений, что связано с принципами функционирования, на которых он построен. Идея метода заключается в формировании тени изображения контролируемого объекта за счет применения в качестве источника света светодиода. Затем выполняется сканирование полученного теневого изображения электронной светодиодной линейкой и обработка полученной информации при помощи ЭВМ или промышленного микропроцессора.

Анализ двумерных сцен можно разделить на пассивный и активный. Пассивными принято называть методы, которые в своей основе используют

теорию распознавания изображений. Преимуществом таких методов является то, что они не требуют использования специальных источников светового излучения, но при этом не отменяют полностью требований к характеристикам освещенности исследуемого объекта. По сути, данные методы построены на обработке и анализе информации о плоском изображении исследуемого объекта.

К активным системам анализа двумерных сцен относят системы структурированного подсвета и дальнометрические системы. Оба метода строятся на основе взаимодействия с анализируемым объектом. Различают монокулярные и бинокулярные системы структурированного подсвета

Дальнометрические системы [19] строятся на анализе удаленности различных точек контролируемого объекта. Для построения таких сцен используются дальномерные сканирующие системы на основе лазера. В данных системах при осмотре объекта контроля может быть использовано перемещение сенсоров и изменение освещенности формируемой сцены по определенному алгоритму.

Дальнометрические системы для получения информации об исследуемом объекте используют лазерный сканирующий луч. Это позволяет путем измерения времени прохождения импульса от сканирующего излучателя, определения фазы сигнала отраженного от исследуемого объекта или стробирования сигналов по дальности получать информацию о топологии исследуемого образца. Ряд дальнометрических систем имеют сканирующие лазеры с узкой диаграммой направленности, что достигается путем использования блоков сканирующего обзора выполняемого построчно. Такое решение позволяет изменять направление луча, вдоль которого измеряется расстояние с заданной частотой.

Основная проблема при проектировании систем технического зрения заключается в определении ее рациональной структуры [18]. Необходимо определить количество необходимых устройств ввода информации о контролируемом объекте (чаще всего видео и фото камер), количество и

взаимное расположение световых источников, и т.д. Рациональное решение данных задач приводит к увеличению производительности системы, улучшению ее качественных характеристик. Анализ двумерных сцен не является сложной математической задачей, поэтому чаще всего для реализации данного метода используются монокулярные схемы. Такие схемы могут быть применены, при условии введения в них структурированных систем освещения, для анализа простейших трехмерных сцен.

Методы анализа двумерных сцен имеют определенные достоинства и недостатки. К достоинствам пассивных методов можно отнести отсутствие специальных световых источников, а к недостаткам влияние на конечный результат факторов внешнего воздействия (например, освещение и тени объектов находящиеся вне сцены контролируемого объекта). К достоинствам активных методов можно отнести то, что вне зависимости от оптических свойств контролируемого объекта и фона на котором он расположен можно получить дальностное изображение. Недостаток активных методов заключается в применении для их реализации дорогостоящего оборудования.

На данный момент создаются системы, формируемые на основе новых подходов [24].

Один из таких подходов заключается в применении голографических визуальных анализаторов. Суть данного подхода заключается в том, что регистрация голограммы на оперативном носителе производится с применением излучения с функцией временной когерентности выбранной определенным образом. Далее производится обработка изображения и его восстановление. В полученном изображении интенсивность сигнала в конкретной его точке зависит от расстояния до этой точки на контролируемом объекте, тем самым сцена визуализируется.

Другой перспективный подход заключается в комбинации дву- и трехмерных методов, что позволяет использовать достоинства обоих методов. Данный подход заключается в сокращении размерности анализируемого изображения путем наложения на определенные условия

ограничений (например, на форму объекта, освещение и так далее). Наибольшее распространение получил так называемый 2,5-мерный метод анализа двумерных сцен [4].

Еще один новый подход к анализу и распознаванию двумерных сцен заключается в использовании для этих целей нейронных сетей [41].

Определение взаимной ориентации различных элементов при проведении анализа сцены является одним из наиболее важных этапов. Его проведение выполняется на основе пассивного или активного метода с применением сегментации сцены. После того как элементы сцены контролируемого объекта сориентированы к ней повторно применяются методы сегментации, чтобы выделить отдельные элементы, которые затем могут быть описаны структурой отношений. Дальнейшее распознавание объекта выполняется на основе сравнения полученного описания с сохраненной двумерной моделью. Выводы, сделанные в ходе этого сравнения, имеют вероятностный характер. Результаты сравнения с хранящимися в базе данных системы моделями служат основой для предположения о принадлежности с определенным уровнем достоверности анализируемого объекта к определенному классу. На этих уровнях выбирается наиболее правдоподобное предположение.

Как известно, продолжительность цикла обработки и распознавания изображений в системах технического зрения не должна превышать период циклов, регулирующих внесение изменений в работу соответствующего производственного оборудования. В некоторых случаях это требование не может быть выполнено доступным аппаратным и программным обеспечением, и тогда должны использоваться специализированные параллельные процессоры. При решении этих проблем важно поддерживать оптимальный баланс между функциональностью и затратами.

В области развития систем машинного зрения большие надежды возлагаются на компьютерные схемы нейронных сетей параллельного действия [14]. Используя технологию сверхбольших интегральных схем,

создаются высокоскоростные процессоры, которые способны управлять параллельной обработкой изображений, но их создание затруднительно и поэтому они существуют в относительно небольших количествах. Параллельные процессоры для ряда приложений все еще сложны и дороги, и перспективы их широкого использования зависят от общих достижений в микроэлектронике. Решение некоторых проблем распознавания образов возможно на базе простых и экономичных вычислительных устройств, принцип действия которых основан на оптической обработке информации, что позволяет их достаточно легко адаптировать к условиям параллельной обработки значительных массивов изображений. Такого рода системы основаны на принципе оптической пространственной аналоговой и цифровой обработки входного изображения.

Применение оптической обработки информации, описанной выше, делает возможным применение параллельного анализа изображений для автоматизации процесса распознавания объектов. С применением данного подхода могут быть реализованы различные методы принятия решений, однако самыми эффективными являются устройства распознавания, которые работают на основе линейных правил решения и алгоритмов распознавания на основе корреляции, как наиболее простые и надежные.

Наряду с развитием аналоговых оптических вычислительных систем разрабатываются различные способы построения цифровых оптических вычислительных систем. Основная идея, реализованная в этих системах, заключается в использовании преимуществ цифровой параллельной обработки информации, что позволит создавать более точные и высокопроизводительные системы обработки.

Также получили распространение различные методы обработки когерентной и некогерентной корреляции, которые реализуются с использованием оригинальных матриц фотоприемников и структур CCD [20]. Эти направления достаточно перспективны и интенсивно развиваются благодаря сочетанию когерентных и некогерентных методов с

оптоэлектронными методами, что позволяет лучше сочетать аналоговые оптические методы с электронными цифровыми методами.

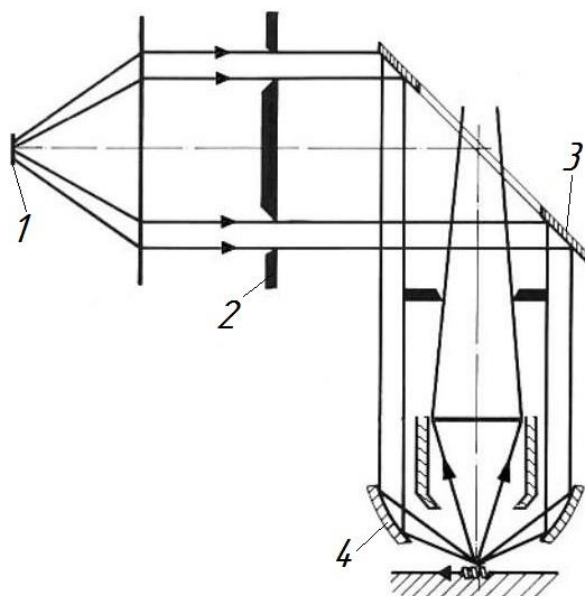
2.2 Анализ систем бесконтактного контроля

Проведенный ранее анализ типов и методов неразрушающего контроля позволяет сделать вывод, об эффективности использования современных оптических системы для контроля поверхности оптического элемента автомобильного зеркала. В данном разделе проанализируем данные системы.

В обзоре рассмотрим измерительные системы, которые обеспечивают точностью контроля от нескольких миллиметров до нескольких сотых миллиметра.

Рассмотрим более подробно используемые для контроля дефектов подложек и зеркал системы.

Контроль на оптическом микроскопе методом темного поля [17] представлен на рисунке 11.



1 – источник света; 2 – диафрагма темного поля; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – эпизеркало.

Рисунок 11 – Оптическая схема микроскопа темного поля

В данном случае изображение формируется рассеянными лучами, ход которых в микроскопе показан на данном рисунке. Ключевым элементом данного микроскопа является эпиобъектив, который представляет собой линзу в сочетании с параболическим зеркалом осветителя. На данном микроскопе производится обнаружение дефектов, имеющих размеры меньше, чем длина волны от осветителя. Данные дефекты представляют собой точки с размером, зависящим от характеристики длины волны.

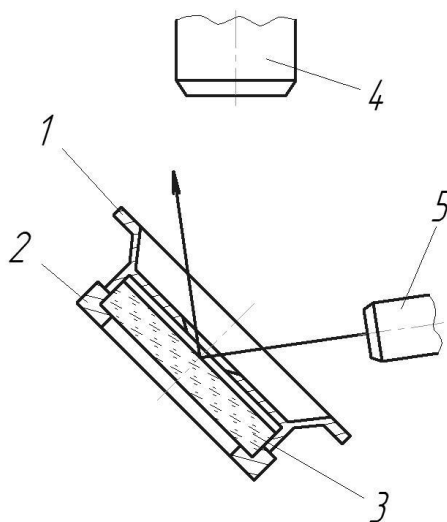
Дефекты с размером, который можно обнаружить, но разделенные расстоянием меньшим, чем разрешение выглядят как точка. Способность обнаружения микроскопа не зависит от увеличения, а зависит от апертуры объектива и угла обзора, Чем они больше, тем больше и способность обнаружения.

Эпиобъективные микроскопы представляют собой сложные и дорогостоящие устройства, которые не удобны для использования в производственных условиях. На практике используется метод моделирования темного поля с использованием относительно простых бинокулярных микроскопов [35]. Микроскоп должен иметь увеличение до 100 крат и относительно большое расстояние от объектива до объекта. Применительно к решаемой задаче контроля оптических элементов автомобильных зеркал схема контроля по данному методу представлена на рисунке 12.

Согласно представленной схеме контролируемый образец наклоняется таким образом, чтобы луч, отраженный от него прошел мимо объектива. Внутренняя поверхность маски, накладываемой на образец, не касается контролируемой поверхности. Функция маски заключается в выделении контролируемой области образца и в создании темного фона.

Некоторые трудности возникают при фокусировке микроскопа в случае отсутствия дефектов. Для настройки в таком случае необходимо снять маску, сфокусировать микроскоп по краю образца, переместить параллельно стороне основания и установить маску на место. Еще одним вариантом

является фокусировка по краю отверстия в маске, ближайшей к контролируемой поверхности. Перед проверкой оптической чистоты контролируемая поверхность должна быть полностью очищена. Любое засорение будет рассматриваться системой как дефект при изготовлении и подготовке подложек.

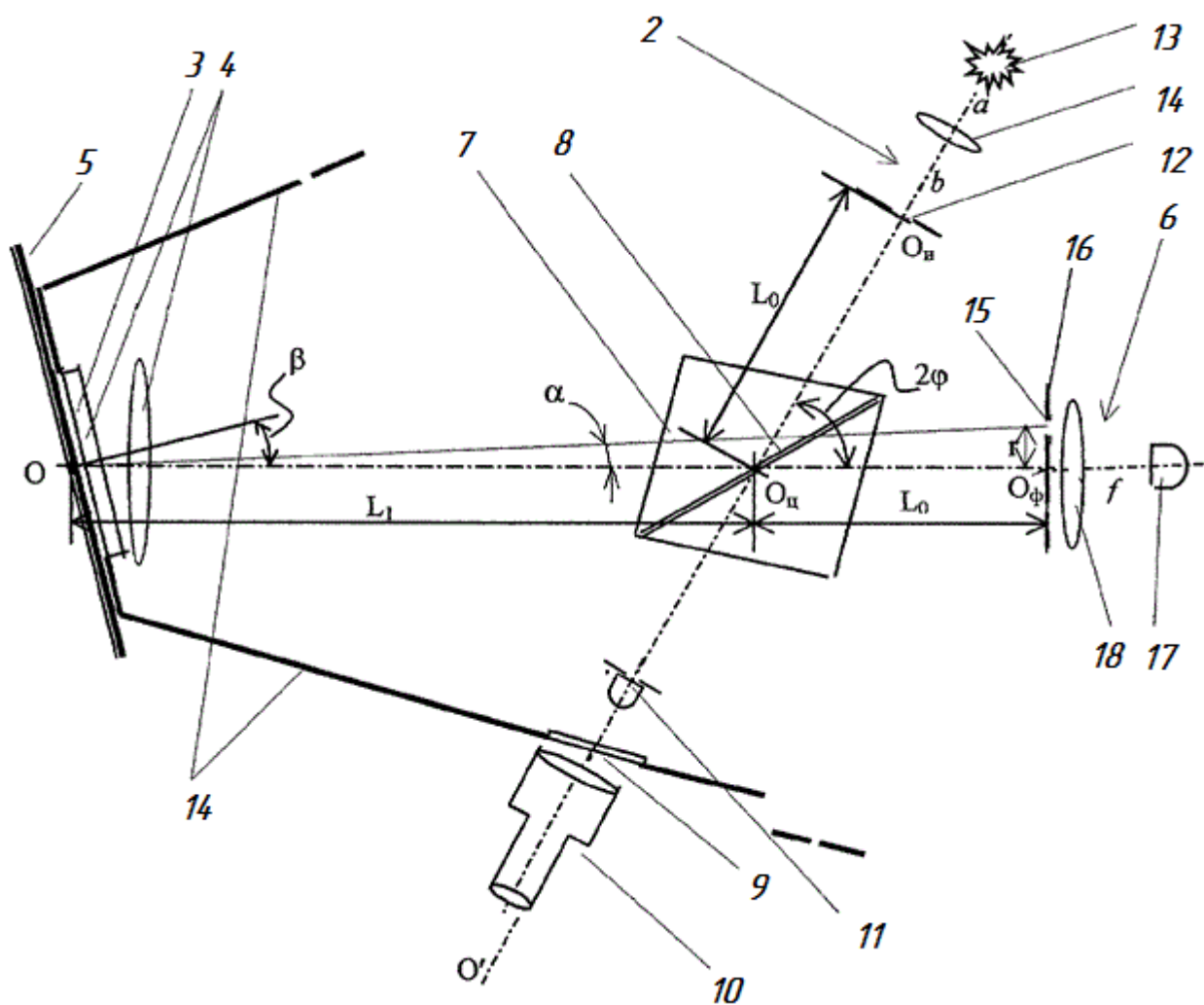


1 – маска; 2 – оправка; 3 – контролируемый объект; 4 – объектив; 5 – осветитель.

Рисунок 12 – Схема контроля оптической чистоты и дефектов зеркал

Рассмотрим портативный прибор для измерения силы возвратно-отраженного света выполненный по патенту №2302624. «Схема прибора представлена на рисунке 13. Прибор предназначен для контроля качества световозвращающих изделий. Состоит из светонепроницаемого корпуса, в котором расположены: источник света для освещения световозвращающего образца, устройство базирования образца под заданным углом освещения, фотоприемник для приема возвратно-отраженного излучения и полупрозрачное зеркало, обеспечивающее согласование пространственно разнесенных каналов излучения и фотоприема с каналом освещения-отражения образца. Входное отверстие фотоприемника выполнено на сменном светонепроницаемом экране, и его зоны светопропускания смещены

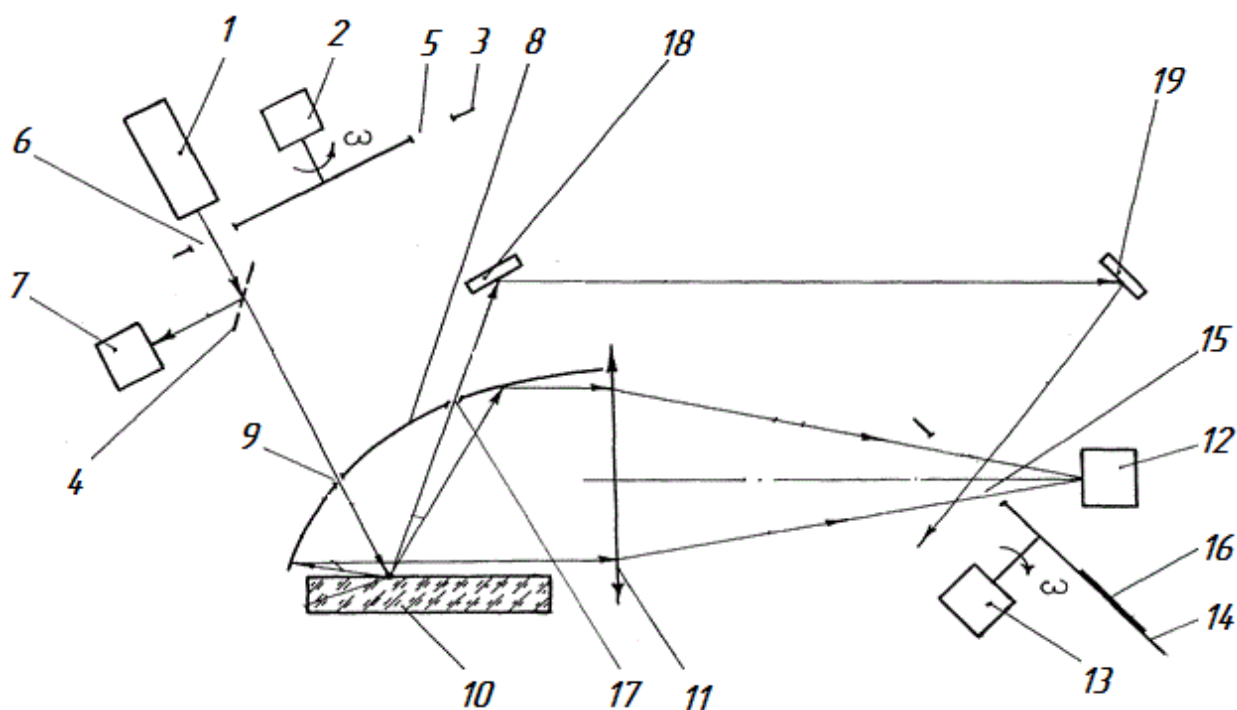
от оси фотоприема на расстояние, пропорциональное требуемому углу расхождения, при этом между экраном и светочувствительным элементом фотоприемника размещена собирающая линза» [22]. Данный прибор позволяет существенно повысить точность контроля. Основным недостатком данного прибора является сложность его конструкции.



1 – светонепроницаемый корпус; 2 – источник света; 3 – световое отверстие; 4 – линза; 5 – исследуемый объект; 6 – блок фотоприемника; 7 – светоделительное устройство; 8 – полупрозрачное зеркало; 9 – вспомогательное отверстие; 10 – наблюдательное устройство; 11 – фотоэлемент сравнения; 12 – выходное отверстие; 13- источник света; 14 – линза; 15 – входное отверстие; 16 – экран; 17 – светочувствительный элемент; 18 – собирающая линза.

Рисунок 13 – Схема прибора по патенту №2302624

Прибор для определения качества поверхности выполненный по патенту №2249787 (рисунок 14).



1 – лазер; 2 – obtюратор; 3 – вращающийся диск; 4 – светоделительная пластина; 5 – окно; 6 – окно; 7 – фотоприемное устройство; 8 – параболическое зеркало; 9 – отверстие; 10 – исследуемая поверхность объекта; 11 – фокусирующая система; 12 – фотоприемное устройство; 13 – obtюратор; 14 – вращающийся диск; 15 – окно; 16 – зеркальная зона; 17 – выходное отверстие; 18 – зеркало; 19 – зеркало.

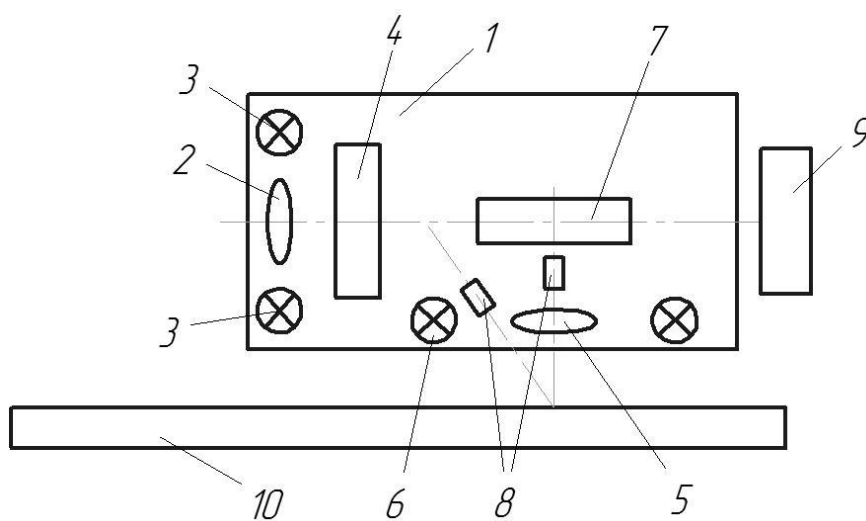
Рисунок 14 – Схема прибора по патенту №2249787

«В данном приборе реализуется способ, заключающийся в получении зеркальной и диффузной компонент отраженного от поверхности объекта светового излучения, получении импульсов равной длительности из полученных компонент, формировании опорных импульсов, соответствующих импульсам, полученным из зеркальной и диффузной компонент отраженного от поверхности объекта светового излучения, попарном поочередном преобразовании каждого импульса, полученного из зеркальной и диффузной компоненты, в фототоки и определении по ним качества поверхности объекта.

Получение импульсов из зеркальной и диффузной компонент осуществляют выделением импульсов равной длительности из монохроматического пучка перед его подачей на поверхность объекта, а формирование опорных импульсов, соответствующих импульсам, полученным из зеркальной и диффузной компонент, производят посредством отделения части светового потока из вышеуказанных выделенных световых импульсов. Устройство для реализации способа содержит источник монохроматического пучка светового излучения, светоделительную пластину, зеркало в виде параболоида вращения, фокусирующую систему, первое фотоприемное устройство, блок управления и обработки информации, первый обтюратор с окном и зеркальной зоной на поверхности вращающегося диска, блок управления и обработки информации. Также содержит второй обтюратор с парой идентичных окон на вращающемся диске и второе фотоприемное устройство» [21]. Достоинство данного прибора заключается в повышении точности и качества контроля. Недостаток прибора заключается в сложности его конструкции.

Устройство для обнаружения и измерения поверхностных дефектов по патенту 2335734 (рисунок 15). «Данное устройство содержит цилиндрический корпус с последовательно расположенными внутри него вдоль его продольной оси широкоугольным объективом панорамного обзора, осветительной системой, состоящей из светодиодов, расположенных вокруг широкоугольного объектива панорамного обзора в плоскости, перпендикулярной его оптической оси, и ПЗС-матрицы, расположенной в фокальной плоскости широкоугольного объектива панорамного обзора. Устройство дополнительно содержит канал бокового обзора и измерений, состоящий из объектива бокового обзора, оптическая ось которого перпендикулярна продольной оси цилиндрического корпуса, и дополнительной ПЗС-матрицы, расположенной в фокальной плоскости объектива бокового обзора, а также дополнительной осветительной системы канала бокового обзора, состоящей из светодиодов, расположенных вокруг

объектива бокового обзора в плоскости, перпендикулярной его оптической оси, и двух полосовых осветителей, расположенных ортогонально друг другу в плоскости, перпендикулярной оси объектива бокового обзора, плоские световые пучки от которых наклонены к нормали поверхности объекта в точке ее пересечения с осями пучков под углом 45° , проецирующихся на поверхность объекта контроля два ортогональных друг другу световых штриха. Устройство также содержит сканирующий механизм для независимого перемещения и совместного вращения полосовых осветителей в плоскости, перпендикулярной оси объектива бокового обзора, и компьютер для наблюдения и обработки изображений дефектов, документирования и хранения результатов измерений. Предлагаемый прибор, построенный по данной схеме, позволяет обнаруживать и измерять поверхностные дефекты одновременно в любой из двух взаимно перпендикулярных плоскостях, а также проводить их компьютерную обработку» [23].



1 – корпус; 2 – объектив; 3 – светодиоды; 4 – ПЗС матрица; 5 – объектив; 6 – светодиоды; 7 – ПЗС матрица; 8 – полосовые осветители; 9 – сканирующий механизм; 10 – исследуемая поверхность.

Рисунок 15 – Схема прибора по патенту EP2045820

К недостаткам данного прибора можно отнести его чувствительность к внешним факторам производственной системы и относительно высокую

СТОИМОСТЬ.

Проведем экспертный анализ известных систем контроля.

Оценку систем контроля проведем на основе показателя оценки, характеризующего степень привлекательности системы контроля для заказчика, вычисляемого по формуле:

$$P = \sum_i \gamma_i \cdot A_i, \quad (1)$$

где $A_i \in \{0; 1\}$ – критерии оценки, которые говорят о наличии или отсутствии определенных свойств;

γ_i – весовые коэффициенты критериев.

$$\gamma_i = \frac{1}{\sum_j k_j}, \quad (2)$$

где k_j – баллы по усредненным экспертным оценкам.

Для проведения экспертной оценки были выбраны следующие критерии: сложность конструкции (1), качество контроля (2), бесконтактность (3), автоматизированность процесса (4), стоимость конструкции (5), скорость замера (6), размер контролируемого объекта (7).

Полученные данные сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Характеристики автоматизированных систем контроля

Система контроля	Наличие компонентов A_i (баллы $k_j \in [0; 10]$)							Итого:
	1	2	3	4	5	6	7	
Field	8	7	9	6	9	5	8	52
lens	9	7	9	6	6	6	10	53
№ 2302624	6	8	10	7	8	7	9	55
№ 2249787	5	9	10	7	7	7	9	54
№ EP2045820	8	9	10	9	6	8	10	60
DESK	9	10	10	9	10	10	9	67

Полученные результаты представим в виде гистограммы (рисунок 16).

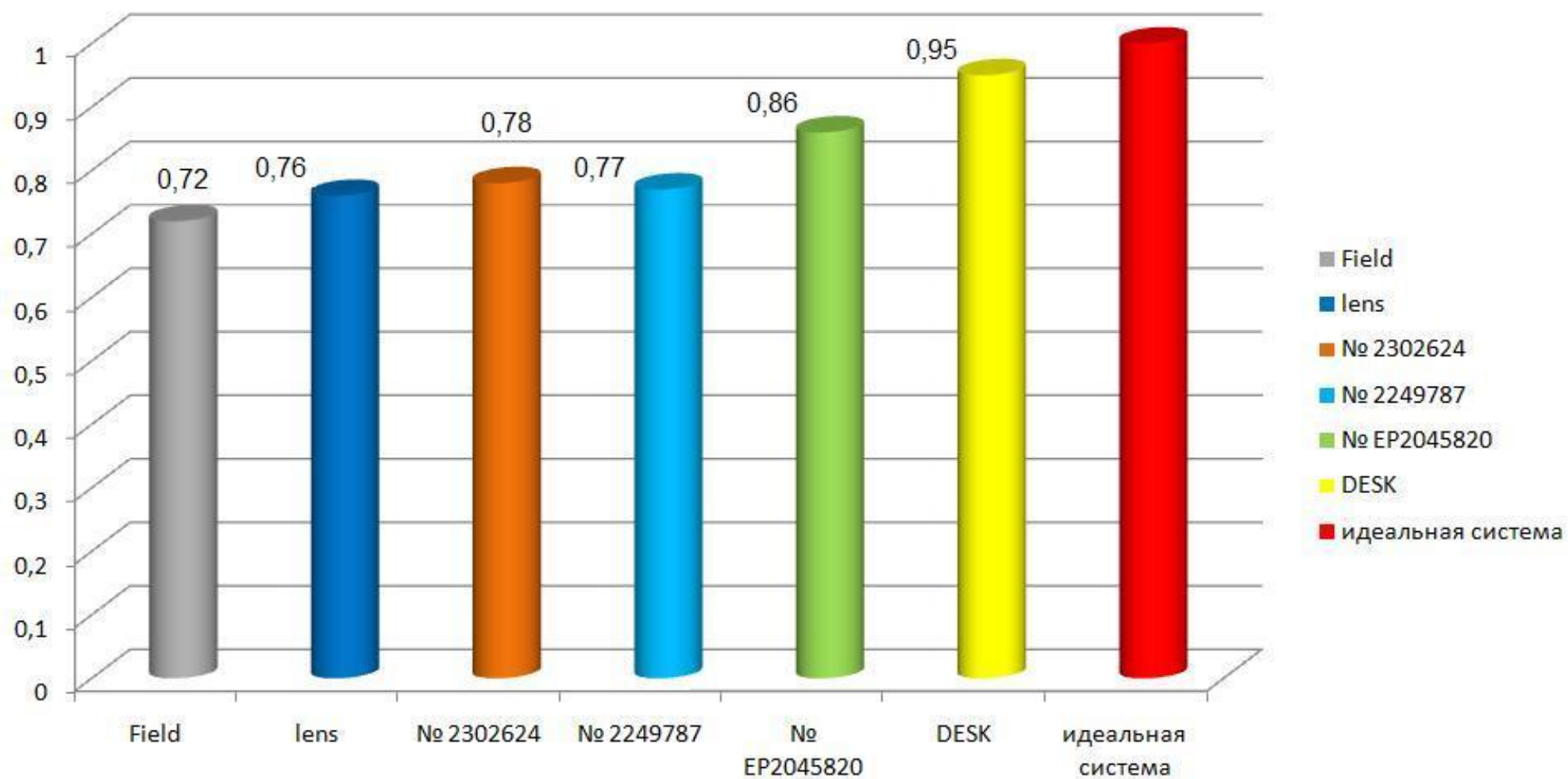


Рисунок 16 – Результаты сравнения систем контроля

Проанализировав данные результаты, очевидно, что наиболее привлекательной с точки зрения потребителя является система под номером 5, а системы под номерами 1, 2, 3, 4 наименее пригодны для проведения контроля оптических элементов зеркал заднего вида, так как их показатель составляет от 0,72 до 0,78. Следовательно, при разработке системы «DESK» в качестве ориентира примем технические характеристики системы под номер 5 как наиболее технически совершенной и привлекательной для потребителя.

Следует заметить, что система под номер 5 удовлетворяет не всем требованиям, так как не достигла показателя идеальной системы. При проектировании системы «DESK» будем ориентироваться на целевой показатель более 0,9.

Предложенная методика сравнения автоматизированных систем контроля оптических элементов автомобильных зеркал не является идеальной, так как учитывает специфику только определенных производств. Например, критерий стоимости конструкции меняет свой вес в оценках различных экспертов в зависимости от масштабов производства и его типа. Также следует учесть, что не все системы оптимизированы для проведения контроля именно оптических элементов зеркал и при соответствующей доработке могут показать существенно лучшие результаты.

Данный анализ проведен для оценки актуальности рассматриваемой в диссертации проблемы и определения характеристик наиболее продвинутых систем. Для наглядности в сравнение введена экспертная оценка уже спроектированной системы «DESK».

3 Разработка структуры системы контроля

3.1 Требования предъявляемые к системе контроля

На практике отечественными производителями автомобилей не используются установки по контролю качества оптических элементов, а применяют следующий способ контроля качества. Он заключается в следующем: контролируемый образец рассматривается специально обученным рабочим под источником монохроматического света на предмет выявления дефектности. Данный метод контроля имеет ряд серьезных недостатков. Результаты контроля зависят от физического состояния контролера и прежде всего органов зрения. Вследствие чего при контроле могут быть замечены не все дефекты, а часть из них может быть неправильно трактована, то есть присутствует субъективность результатов контроля и их низкая достоверность. Определение размеров дефектов и места их расположения по зонам (допустимые и недопустимые) при таком методе контроля также вызывают затруднение. Производительность данного метода невысока, что ограничивает область его применения. Для решения этих проблем могут быть применены простейшие оптические приспособления, но они также предполагают участие контролера, что приводит к перенапряжению зрительных анализаторов и представляет определенную опасность для него. Применение некоторых из систем автоматизированного контроля описанных выше решает многие из описанных проблем, но при этом они также имеют существенные недостатки.

Основываясь на анализе существующих методов и систем контроля проведенных ранее предлагается применить новый метод контроля оптических элементов зеркал заднего вида, основанный на применении анализа цифрового изображения [9].

С целью проведения экспериментального исследования возможности реализации и промышленного применения данного метода необходимо

разработать соответствующую установку, которая в дальнейшем станет прообразом промышленного образца.

На основе проведенной ранее экспертной оценки существующих систем контроля и с учетом выявленных недостатков сформируем технические требования к проектируемой системе:

- простота эксплуатации и обслуживания;
- быстрдействие системы не должно превышать время операции технологического процесса сборки зеркала перед или после которой осуществляется контроль;
- возможность работы в реальном масштабе времени;
- точность контроля должна соответствовать требованиям ГОСТ;
- выдача результатов должна в визуальном и цифровом виде;
- возможность встраивания в автоматизированную систему управления качеством и автоматизированную систему управления технологическим процессом.

Кроме данных требований к установке предъявляется ряд требований связанных с безопасностью эксплуатации установки, эргономикой и экономической эффективностью.

3.2 Структура системы контроля

На основе анализа известных систем контроля, а также требований предъявляемых к проектируемой системе была выбрана следующая структура проектируемой системы. Для реализации условия бесконтактности, а также руководствуясь необходимостью наличия изображения в цифровом формате, система строится на базе цифровой камеры. Обработка полученного цифрового снимка производится при помощи программного обеспечения требующего наличия персонального компьютера. Результатами обработки является информация о дефектах контролируемого образца. В состав системы также должны входить:

осветитель монохромного света, устройство для базирования и закрепления (при необходимости) контролируемого образца, монотонное полотно, создающее фон на контролируемом объекте, а также интерфейсные и периферийные устройства, обеспечивающие связь между элементами системы и вывод полученных результатов на соответствующие устройства отображения информации. Более подробно аппаратная часть системы будет рассмотрена далее.

При предложенной архитектуре системы она может быть подключена к локальной производственной сети. Это позволит быстро обработать полученные данные о контроле при помощи системы контроля качества и выработать соответствующее управляющее воздействие.

Предполагается использование интерактивную систему управления. Такое решение объясняется тем, что создание эвристического алгоритма управления для данного случая требует решения трудно формализуемых задач и значительных вычислительных мощностей. В данном случае оператор будет вырабатывать управляющее воздействие гораздо быстрее и эффективнее.

С целью обеспечения реализации модульного принципа построения системы, предлагается строить ее на основе распределенных цифровых технических средств. Это позволит снизить стоимость системы за счет применения стандартных технических средств без снижения качества и надежности контроля.

В рассматриваемом случае проектируемая система не влияет на ход технологического процесса, поэтому объект исследования в данном случае будет процесс контроля.

Результаты разработки функциональной схемы представлены на рисунке 17. При ее разработке учитывалось, что система проектируется на основе распределенных средств.

В ходе практической отработки данной схемы необходимо обеспечить синхронизацию взаимодействия элементов системы между собой и обмен информацией между элементами системы.

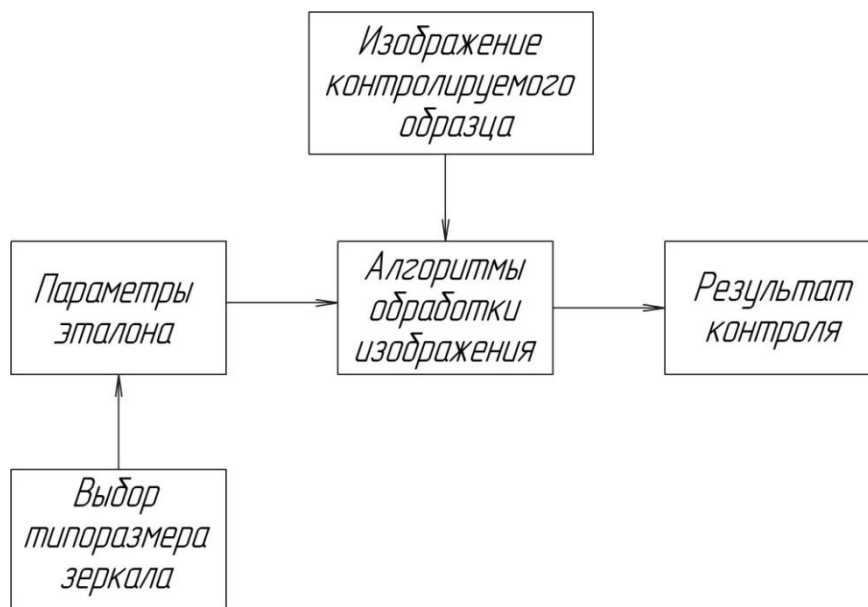


Рисунок 17 – Функциональная схема системы контроля

Реализация представленной функциональной схемы выполняется на базе персонального компьютера при помощи определенного программного обеспечения в состав которого входят: программа обработки изображения, программа контроля режима работы процесса, служебные программы и ряд других. Для организации работы системы необходимо решить вопросы управления этими программами и назначения приоритета их выполнения.

Программный комплекс проектируемой системы можно разделить на две основных группы: основные и диспетчерские программы. Основные программы выполняют все основные функции системы, связанные непосредственно с процессом контроля. Диспетчерские программы предназначены для обеспечения работы основных программ и управления периферийными устройствами.

Для реализации предлагаемых алгоритмов обработки изображения, управления аппаратной частью, а также оптимальной организации процесса обработки информации и использования вычислительных ресурсов была разработана структурная схема программного обеспечения проектируемой системы контроля, представленная на рисунке 18. Более подробно соответствующие алгоритмы системы рассмотрены в следующих разделах данной диссертационной работы.

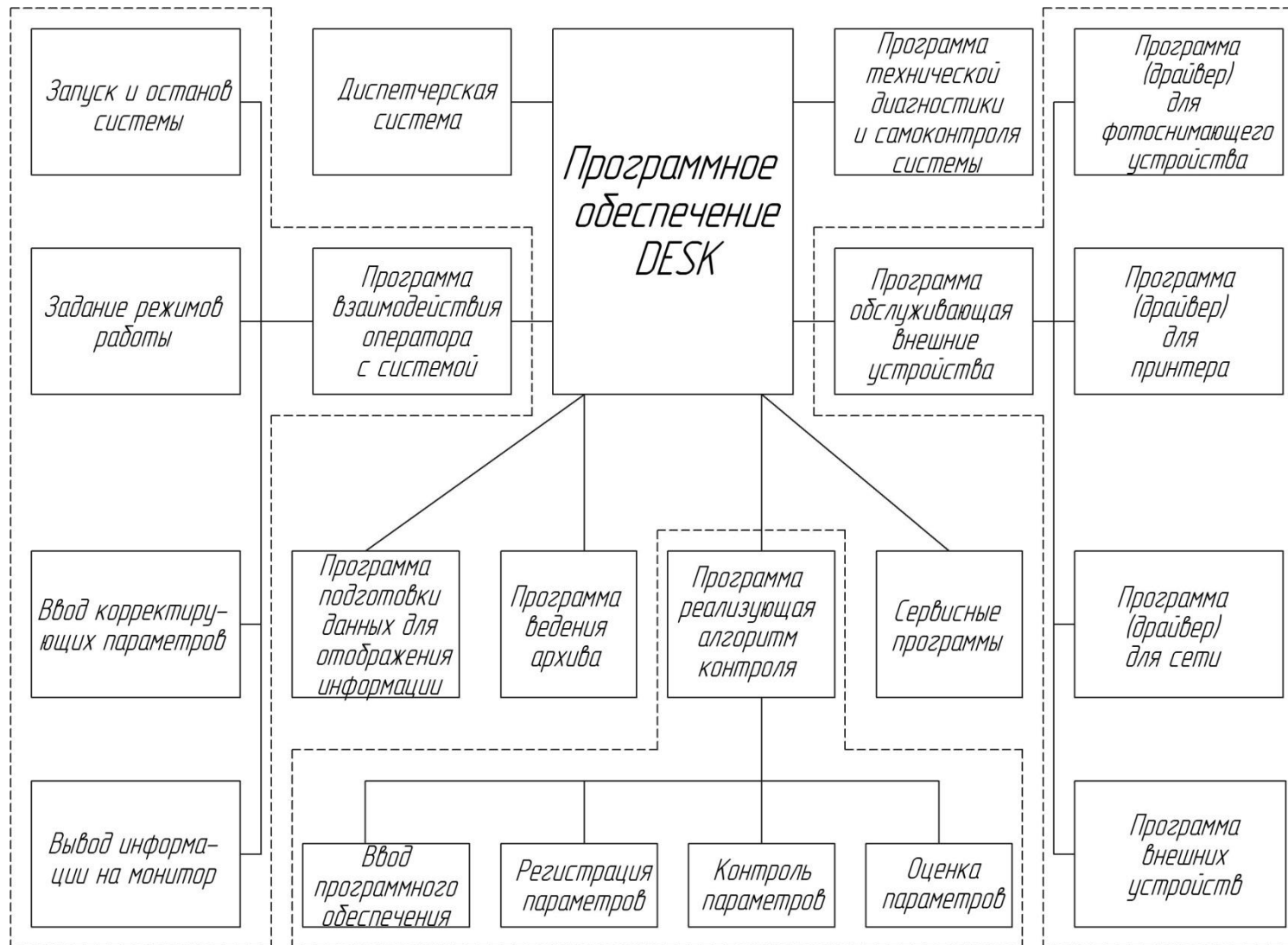


Рисунок 18 – Структурная схема программного обеспечения

Разработанная структурная схема программного обеспечения позволяет учесть ряд особенностей проектируемой системы: работа системы в режиме реального времени, обеспечение стабильной работы программного обеспечения достаточно длительное время, обеспечение обмена информацией с периферийными устройствами и ряд других.

Представленная структура позволяет обеспечить минимизацию времени работы программного обеспечения и объема требуемой памяти, что необходимо исходя из требований, предъявляемых к системе в целом.

Отработка представленной структурной схемы выполнялась в несколько этапов. На первом этапе отладке подвергался каждый отдельный блок. На втором этапе выполнялась отладка всего программного обеспечения. Для этого были проверены и при необходимости скорректированы взаимодействия: всех блоков программ, программ с подпрограммами хранения и передачи данных, программ и алгоритмов с устройствами ввода и вывода информации.

Обязательным условием была процедура оценки надежности функционирования предложенного программного обеспечения с целью обеспечения бесперебойной работы всей системы контроля в целом.

Разработанные в ходе выполнения данного раздела функциональная и структурная схемы проектируемой системы позволяют обеспечить выполнение всех требований, предъявляемых к данной системе контроля.

4 Математические модели и алгоритмы функционирования системы контроля

4.1 Бинаризация изображения

Первоначальное изображение, полученное от камеры, состоит из однородных областей, которые отличаются друг от друга рядом характеристик. Нахождение дефекта и определение его характеристик на таком изображении задача весьма сложная, поэтому при решении данной задачи на практике проще работать с участками изображения, которые представляет собой не большое количество непересекающихся областей изображений одного из типов. Исходя из особенностей решаемой задачи, в данном случае, перед поиском дефектов и определением их характеристик изображение необходимо подвергнуть бинаризации [10, 35]. Такая предварительная обработка позволит разбить изображение на два типа областей (черные и белые). Это сократит до минимума количество анализируемых признаков изображения и как следствие этого приведет к сокращению объема обрабатываемой информации и времени работы алгоритмов контроля.

Основная задача при проведении бинаризации заключается в определении наборов признаков, которые будут отличать области разных типов. Чаще всего для решения данной задачи используются такие признаки как: средняя яркость, дисперсия флюктуации, корреляционные свойства.

Наиболее удобно проводить бинаризацию изображения на основе анализа средней яркости его участков. Однако, реальные изображения имеют различную среднюю яркость участков, что делает необходимым одновременный анализ сразу нескольких характеристик изображения. Для проведения бинаризации цветных изображений в качестве признака можно использовать цвет. В нашем случае от качества решения задачи бинаризации

изображения контролируемого объекта зависит точность контроля, его достоверность и быстродействие проведения контрольной операции.

На данный момент известны и широко применяются несколько методов бинаризации [8]. Самым распространенным из них является метод бинаризации на основе пороговой обработки [8]. Данный метод широко известен, применяется во многих системах контроля, неплохо себя зарекомендовал, но у него имеется существенный недостаток. Данный недостаток заключается в том, что решение о включении или не включении конкретной точки в ту или иную область принимается без учета информации о соседних точках. При бинаризации отраженного изображения и с учетом малых размеров дефектов, которые необходимо обнаружить, данный подход может привести к большому количеству ложных срабатываний или к пропуску дефектов.

Исключение данного недостатка пороговой обработки возможно применения методов фильтрации [12]. Универсального метода проведения данной процедуры на настоящий момент не существует, поэтому рассмотрим два наиболее подходящих для решения задачи бинаризации исходя из условий получения изображения и характеристик искомых дефектов [34].

Метод марковской бинаризации [36, 37] основан на использовании неполных данных и анализе изображения в соседних с анализируемой точкой областях. Характеристики данной области разделяют бинаризацию на каузальную, полукаузальную и некаузальную. Наиболее вероятные характеристики изображений в данном случае говорят о том, что бинаризация будет некаузальной. При этом используются данные строки и столбца, которые своим пересечением образуют текущую исследуемую точку изображения (рисунок 19). Исходя из условия некаузальности, для анализа используются все четыре луча $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$. Образованная при этом структура называется крестообразной Ω .

При использовании такой структуры, ограниченной данным множеством, потеря эффективности обработки будет минимальная, так как

точка относится к тому или иному классу на основе определения максимальной вероятности для всех классов.

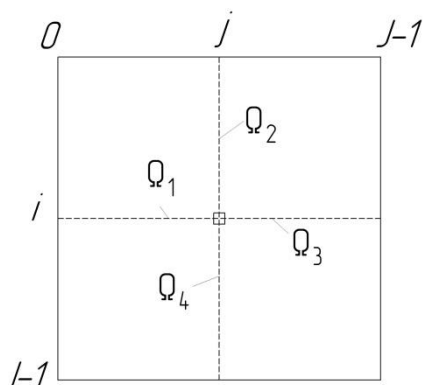


Рисунок 19 – Геометрия используемых данных при бинаризации

Применение статистических методов основано на применении математических моделей изображения. В качестве исходного изображения примем изображение на котором области имеют одинаковую среднюю яркость и дисперсию и отличаются видом корреляционных функций. Например, изображение 20, где различные области отличаются характеристиками рисунка их размерами и рядом других признаков, совокупность которых определяет текстуру данного изображения.



Рисунок 20 – Дефект «вспучивание»

Соответственно различия областей данного изображения являются

текстурными, то есть области отличаются друг от друга целым набором признаков, которые имеют некоторую пространственную упорядоченность. Такое изображение наглядно демонстрирует невозможность применения для данного случая пороговой обработки.

Предположим, что конкретная область исследуемого изображения может быть описана при помощи выражения:

$$H_x(i, j) = D_x \cdot F^{|i|+|j|}, \quad (3)$$

где D_x – дисперсия;

F – коэффициент корреляции соседних по столбцу или по строке элементов.

Случайные поля $x_0(i, j)$ и $x_1(i, j)$ имеющие коэффициенты одношаговой корреляции соответственно F_0 и F_1 описывают классы однородности. Среднее значения для полей обоих классов равно нулю, а наблюдаемое поле имеет вид:

$$y(i, j) = x_\eta(i, j), \quad (4)$$

где η – индекс в точках кадра.

Данный индекс имеет значение 0 или 1, которые назначаются в случайном порядке.

Таким образом формируется управляющее случайное бинарное поле $\eta(i, j)$ при помощи которого определяется принадлежность точки к тому или иному классу. Бинаризация в таком случае заключается в получении оценки $\eta^*(i, j)$ данного поля по изображению (20).

Применение марковского аппарата применительно к бинаризации возможно в случае если корреляционная функция носит биэкспоненциальный характер, а поле $\eta(i, j)$ в строках и столбцах

представлено марковскими последовательностями.

Матрица одношаговых вероятностей перехода (матрица переходных вероятностей) для таких последовательностей имеет вид:

$$\varphi = [\varphi(\eta_r(\eta_{r-1}))] = \begin{bmatrix} \varphi(0|0) & \varphi(1|0) \\ \varphi(0|1) & \varphi(1|1) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\varphi(\eta_r(\eta_{r-1}))$ – вероятность того, что на шаге r процесс имеет значение η_r при условии, что на шаге $r - 1$ значение процесса составляло η_{r-1} .

Выражение (5) представляет собой стохастическую матрицу, которая показывает все возможные комбинации текущих и предыдущих значений вероятностей.

Если принять, что значения полей $\eta_{i,j} = \eta(i,j)$ и $y_{i,j} = y(i,j)$ в точках луча Ω_k кроме исследуемой точки (i,j) образуют векторы $\Lambda^{(k)}$, $Y^{(k)}$, а значения этих полей в точках перекрестия Ω образуют векторы Λ и Y , то марковское свойство условной независимости для совокупности векторов (Λ, Y) описывается выражением совместного распределения вероятностей:

$$\omega(\Lambda, Y) = \omega(\eta_{i,j}) \prod_{k=1}^4 (\Lambda^{(k)}, Y^{(k)} | \eta_{i,j}, y_{i,j}), \quad (6)$$

где $\omega(\Lambda^{(k)}, Y^{(k)} | \eta_{i,j}, y_{i,j})$ – условные распределения на отдельных лучах.

Выражаем апостериорное распределение вероятностей из выражения (6):

$$\omega(\eta_{i,j} | Y) = c_{i,j} \frac{\prod_{k=1}^4 (\eta_{i,j} | Y^{(k)}, y_{i,j})}{\omega^3(\eta_{i,j} | y_{i,j})}, \quad (7)$$

где $c_{i,j}$ – нормировочная постоянная.

Используя данную формулу для точки вычисляют вероятности $\omega(\eta_{i,j} = 1|Y)$ и $\omega(\eta_{i,j} = 0|Y)$ на основании того какая из них больше принимается решение о принадлежности к $\eta_{i,j}^* = 1$ и $\eta_{i,j}^* = 0$.

В соответствии с выражением (7), процедура определения апостериорного распределения вероятностей $\omega(\eta_{i,j}|Y)$ требует выполнения на каждом из лучей Ω_k соответствующих вычислительных процедур. Для обработки изображения необходимо провести построчную обработку с целью определения каузальной $\omega(\eta_{i,j}|Y^{(1)}, y_{i,j})$ и антикаузальной $\omega(\eta_{i,j}|Y^{(3)}, y_{i,j})$ вероятностей, а затем аналогично определить вероятности $\omega(\eta_{i,j}|Y^{(2)}, y_{i,j})$, $\omega(\eta_{i,j}|Y^{(4)}, y_{i,j})$ для соответствующих столбцов. Данная процедура представляет собой сканирование по строкам и по столбцам в двух направлениях.

Исходя из характера случайных полей в выражении (7) алгоритмы вычисления частных апостериорных распределений вероятностей $\omega(\eta_{i,j}|Y^{(k)}, y_{i,j})$ обладают свойством рекуррентности, то есть при проведении процедуры сканирования луча Ω_k апостериорное распределение вероятностей в любой точке данного луча определяется значением апостериорного распределения вероятностей в предшествующей точке. Такой подход достаточно прост и удобен с точки зрения практической его реализации.

Уравнения процесса получения каузального апостериорного распределения вероятностей на лучах Ω_1 и Ω_2 записываются согласно выражению:

$$\omega(\eta_r|y_0, \dots, y_r) = C_r \sum_{\eta_{r-1}=0}^1 \omega(\eta_{r-1}|y_0, \dots, y_{r-1}) \varphi(\eta_r|\eta_{r-1}) \times \omega_x(y_r|y_{r-1}, \eta_r, \eta_{r-1}), \quad (8)$$

где C_r – коэффициент нормировки;

y_0, \dots, y_r – элементы части развертки строки и столбца;

$\omega_x(y_r|y_{r-1}, \eta_r, \eta_{r-1})$ – распределение исследуемой точки

изображения при фиксации ее значения на предшествующем шаге и при фиксации значений сигнала на рассматриваемом и предшествующем шагах.

В случае рассматриваемого математического описания данное распределение зависит от характеристик поля и определяется из выражения:

$$\omega_x(y_r | y_{r-1}, \eta_r, \eta_{r-1}) = \frac{1}{\sqrt{2\varphi D_x}} \exp\left(-\frac{(y_r - F_{\eta_r} y_{r-1})^2}{2D_x(1 - F_{\eta_r}^2)}\right). \quad (9)$$

В случае если $\eta_r = 0$ принимаем $F_{\eta_r} = F_0$, в случае если $\eta_r = 1$, принимаем $F_{\eta_r} = F_1$.

Определение распределения вероятностей для бинарного информационного процесса, по аналогии с (7), заключается в определении для $\eta_r = 0$ и $\eta_r = 1$ выражения (8).

Полное апостериорное распределение вероятностей выполняется на основе одноточечного апостериорного распределения вероятностей с использованием формулы Байеса:

$$\omega(\eta_r | y_r) = c \omega_{\eta}(\eta_r) \omega_x(y_r | \eta_r), \quad (10)$$

где c – коэффициент нормировки распределения;

$\omega_{\eta}(\eta_r)$ – априорное распределение вероятностей классов однородности.

$\omega_x(y_r | \eta_r)$ – одношаговая функция правдоподобия.

$$\omega_x(y_r | \eta_r) = \frac{1}{\sqrt{2\varphi D_x}} \exp\left(-\frac{y_r^2}{2D_x}\right). \quad (11)$$

В данных условиях апостериорное распределение вероятностей для классов неоднородностей не влияет на функцию $\omega_x(y_r | \eta_r)$. Это объясняется

спецификой взаимодействия информационного поля и наблюдаемого сигнала. Из этого следует, что в формуле (7) знаменатель не требует вычисления, так как он совпадает с апостериорным распределением вероятностей классов однородности изображения.

Для лучей Ω_3 и Ω_4 вычисления имеют лишь незначительные отличия [43], от описанных выше соответствующих вычислений для Ω_1 и Ω_2 . Отличие заключается лишь в направлении развертки в обратную сторону. Также учитывается тот факт, что для полей имеющих марковскую характеристику $\eta_{i,j} = \eta(i,j)$ и $y_{i,j} = y(i,j)$ переходные распределения вероятностей в обратном направлении будут иметь отличие от этих же распределений в прямом направлении.

Пример обработки изображения дефекта «вспучивание» (рисунок 20) при помощи марковской бинаризации представлен на рисунке 21.



Рисунок 21 – Марковская бинаризация дефекта «вспучивание»

Приведенный пример наглядно показывает эффективность применения данного метода в случае обработки текстурных изображений.

Рассмотрим вариант проведения бинаризации на основе байесовского решения данной задачи. Строго говоря, марковская бинаризация является одним из вариантов байесовского метода. В данном случае для проведения процедуры бинаризации применим распределение Гиббса, на основе

которого строятся многие алгоритмы обработки изображения, в том числе и алгоритмы бинарной сегментации изображений [11, 32].

Обработка с использованием распределения Гиббса, так же как и в случае с предыдущим методом бинаризации, состоит в том, что кадр разбивается на области, которые не должны перекрещиваться, при этом данное разбиение должно максимально соответствовать изображению. Соответствие определяется при помощи апостериорной вероятности разбиения, которая для наилучшего варианта максимальная. В рассматриваемом случае исходное изображение будет описываться распределением Гиббса.

Под распределением Гиббса понимается достаточно большое поле распределений, которые имеют набор общих признаков и могут быть использованы для дискретных изображений. Решение задачи статистической обработки изображений зависит от представления распределения вероятностей всех отсчетов полезного сигнала и наблюдаемых данных. Проблема для такого многомерного распределения вероятностей заключается в определении для элементов их взаимозависимости. Решение этой проблемы основано на двух понятиях клика и потенциалов взаимодействия значений сигнала на них. Рассмотрим данную процедуру подробнее.

Вероятностная взаимозависимость определяет взаимодействие элемента $x_{i,j}$ в точке i,j с другими элементами. Количество элементов во взаимодействии составляет от двух и более, что формирует вокруг каждой точки сразу несколько включающих ее. Одна такая группа получила название клика. Пример таких кликов представлен на рисунке 22.

Как видно из представленного рисунка все клики можно разделить по расположению на горизонтальные, вертикальные, наклонные влево, наклонные вправо, соответственно точка i,j будет входить дважды в каждый тип клика. Для обеспечения однозначности закрепления парных кликов двумерной решетки за точками изображения половина кликов закрепляются за соответствующей точкой i,j как показано на рисунке 22 непрерывными

линиями. Тогда изображение будет сформировано парными кликами.

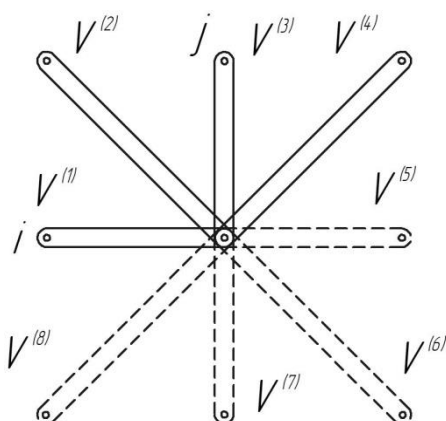


Рисунок 22 – Формирование множества клик

При решении практических задач применяются самые разнообразные по структуре клики. Они необязательно должны соответствовать структуре приведенной на рисунке 22. Они могут формироваться удаленными точками, в них может изменяться число точек. При этом разбиение кадра может быть произведено различными по сложности кликами. Такой подход при использовании распределения Гиббса позволяет создавать большое количество разнообразных моделей.

Далее задается функция значений изображения в каждой точке клики, являющаяся потенциалом взаимодействия. Для нашего примера потенциалы $V^{(i)}$, $i = \overline{1,8}$. Равенства функций для изображения с одинаковым механизмом его образования в поле всего кадра (однородного):

$$V^{(1)} = V^{(5)}, V^{(2)} = V^{(6)}, V^{(3)} = V^{(7)}, V^{(4)} = V^{(8)}. \quad (12)$$

Для случая, когда значения точек в поле $x(i, j)$ равны 1 или 0, то есть поле бинарное, потенциалы выражаются функцией, которая задается таблицей аргументы которой это отсчеты изображения $x_{i,j}, x_{i,j-1}$. В таблице

3 приведен пример функции $V^{(1)}$ для рисунка 22.

Таблица 3 – Потенциал парного взаимодействия бинарного поля

$x_{i,j-1}$	$x_{i,j}$	
	0	1
0	$V_1(0; 0)$	$V_1(1; 0)$
1	$V_1(0; 1)$	$V_1(1; 1)$

Исходя из таблицы, для описания потенциала взаимодействия используется четыре числа. Из (12) следует, что модель однородного поля формируется четырьмя потенциалами, поэтому для описания модели необходимо шестнадцать чисел.

В случае наличия симметрии в изображении число потенциалов уменьшится. При одинаковых свойствах изображения вдоль строк и столбцов потенциалы $V^{(1)} = V^{(3)}$. При одинаковых свойствах изображения по диагонали $V^{(2)} = V^{(4)}$. В данных условиях необходимо восемь параметров для формирования математической модели.

Запишем распределение Гиббса для рассматриваемого случая:

$$P(X) = c_x \exp \left\{ - \sum_{i,j} \sum_{x \in \Omega_x} \left[V_{x(i,j)x(i,j-1)}^{(1)} + V_{x(i,j)x(i-1,j-1)}^{(2)} + V_{x(i,j)x(i-1,j)}^{(3)} + V_{x(i,j)x(i-1,j+1)}^{(4)} \right] \right\}, \quad (13)$$

где X – все отсчеты изображения;

Ω_x – множество узлов решетки изображения;

c_x – постоянная, определяемая из условия:

$$\sum P(X) = 1. \quad (14)$$

В данном условии суммирование производится для случайного поля по множеству его реализаций. Запишем распределение Гиббса в представлении:

$$P(X) = c_x \exp\{-U(X)\}, \quad (15)$$

где $U(X)$ – потенциальная функция.

$$U(X) = \sum_{i,j} \sum_{\epsilon \in \Omega_x} \sum_{k=1}^4 V_x^{(k)}, \quad (16)$$

где $V_x^{(k)}$ – отдельные потенциалы.

Отдельные потенциалы представляют функции всего изображения X .

Рассмотрим еще один характерный случай, когда случайное поле $y(i, j)$ имеет значения из множества $-\infty < y_{i,j} < \infty$. Данное поле отвечает условиям распределению Гиббса. Клики распределения такого же вида, как и для бинарного поля, представлены на рисунке 22. Потенциалы взаимодействия выражаются через квадратичные функции. Например, для $V_y^{(1)}$ она будет иметь вид:

$$V_y^{(1)} = \frac{(y_{i,j} - \lambda^{(k)} y_{i,j-1} - m)^2}{2D}, \quad (17)$$

где $m, D, \lambda^{(k)}$ – параметры поля.

Введем обозначение $y_{i,j}^{(k)}$ для соответствующего клике k центрального элемента i, j элемента поля. С учетом данного обозначения запишем развернутый вид распределения Гиббса:

$$P(Y) = c_y \exp \left\{ - \sum_{i,j} \sum_{\epsilon \in \Omega_y} \sum_{k=1}^4 \frac{(y_{i,j} - \lambda^{(k)} y_{i,j-1} - m)^2}{2D} \right\}. \quad (18)$$

где c_y – постоянная, которая определяется из выражения подобного (14) в котором суммирование следует заменить на интегрирование.

В данной формуле аргумент экспоненты имеет квадратичную форму, поэтому это распределение является гауссовским.

В упрощенном виде данное выражение можно записать как (15) с потенциалами (17).

На основании описания полей $x(i, j)$ и $y(i, j)$ формируется математическая модель неоднородного изображения. В качестве наблюдаемого поля принимаем описываемое распределением Гиббса $y_{i,j}$ при этом параметры данного поля $m, D, \lambda^{(k)}$ принимают одно из возможных значений $m_0, D_0, \lambda_0^{(k)}$ и $m_1, D_1, \lambda_1^{(k)}$. Для принятия решения в пользу одного из вариантов используется значение в данной точке управляющего поля $x(i, j)$, которое по своей сути является бинарным ненаблюдаемым и меняет наблюдаемое изображение по состояниям скачкообразно.

Реализация статистического подхода подразумевает распределение обоих полей:

$$P(X, Y) = P(X)P(Y|X), \quad (19)$$

где $P(X)$ – распределение управляющего поля;

$P(Y|X)$ – распределение наблюдаемого изображения $Y = \{y_{i,j}\}$ условное по отношению к его значению $X = \{x_{i,j}\}$.

Описание $P(X)$ было приведено выше.

Определение $P(Y|X)$ производится с применением (18), путем введения задания параметров $m, D, \lambda^{(k)}$ от X :

$$P(X, Y) = c \exp \left\{ - \sum_{i,j} \sum_{\epsilon \in \Omega_y} \sum_{k=1}^4 \left[V_x^{(k)} + \frac{(y_{i,j} - \lambda^{(k)} x(i,j) y_{i,j-1} - m x(i,j))^2}{2D x(i,j)} \right] \right\}, \quad (20)$$

где Ω – общее для полей множество узлов решетки,

c – постоянная нормирующая равенство единице суммарной вероятности полей дискретного $x(i, j)$ и непрерывного $y(i, j)$.

Еще один вариант байесовской сегментации основан на стохастической

релаксации. Рассмотрим данный вариант подробнее.

Исходя из условия обеспечения максимума апостериорного распределения вероятностей определяется оптимальная байесовская сегментация:

$$X^* = \arg_x \max P(X|Y), \quad (21)$$

где $X^* = \{x_{i,j}^*\}$ – результат оптимальной сегментации.

Апостериорное распределение вероятностей выражается из совместного распределения:

$$P(X|Y) = \frac{P(X,Y)}{P(Y)}. \quad (22)$$

С вычислительной точки зрения выполнять данные расчеты необязательно, так как апостериорное распределение вероятностей отличается от совместного распределения множеством $P(Y)$ независимым от X . Соответственно оба распределения имеют одинаковую характеристику зависимости от X . Тогда X^* вектор, обеспечивающий максимальное апостериорное распределение вероятностей, будет показателем максимальной совместности совместного распределения, также верно и обратное утверждение. В таком случае вместо выражения (21) определение X^* можно произвести по формуле:

$$X^* = \arg_x \max P(X, Y). \quad (23)$$

Рассмотрим реализацию (23) с практической точки зрения. Допустим, что кадр состоит из количества строк I и количества столбцов J , число узлов равно IJ , $N = 2^{I \cdot J}$ – количество бинарных полей $x(i, j)$. Тогда распределение $P(X, Y)$ может быть рассмотрена как соответствующая функция:

$$f(X) = P(X, Y)|_{Y=Y^{(H)}}. \quad (24)$$

где $Y^{(H)}$ – наблюдаемое изображение.

При $Y = Y^{(H)}$ данное выражение можно записать в виде таблицы с количеством значений N . Решение уравнения (23) производится путем определения $f(X)$ и нахождения максимального значения этой функции в точке X^* . Данный способ решения имеет один существенный недостаток, который заключается в большом количестве необходимых вычислений. Например, при $I = J = 256$ требуется таблица размером $N = 2^{256 \times 256} = 2^{65536} \cong 10^{2000}$.

В этом случае удобно применить стохастическую релаксацию, которая заключается в том, что используется вероятностная итерационная процедура моделирования случайного поля. Суть данного моделирования заключается в формировании поля $x_{i,j}^r$ на шаге процесса r с применением результатов шага $x_{i,j}^{(r-1)}$ и распределения $P(X, Y)|_{Y=Y^{(H)}}$, для которого определяется сходимость $x_{i,j}^{(r)}$. В таком случае вычислительные затраты будут гораздо меньше. Способов реализации данного процесса достаточно много [15]. В данном случае, исходя из условий решаемой задачи, применим один из самых наиболее изученных методов – метод Метрополиса [38].

В данном случае на интервале $[0; 1]$ датчик случайных чисел формирует на первом шаге итерации $r = 1$ случайное поле равномерных распределений вероятностей $x_{i,j}^{(1)}$. Это производится путем разбиения на два подынтервала, которые разделяются между собой точкой со значением $x(i, j) = 0$ с вероятностью P_0 . Если значение вероятности неизвестно, то $P_0 = 0,5$. Далее датчик генерирует ε сравниваемое с вероятностью P_0 , которая выполняет роль порога. Результатом этого сравнения является преобразование числа ε в $x_{i,j}^{(1)}$ при помощи соотношения:

$$x_{i,j}^{(1)} = \begin{cases} 0, & \text{при } \varepsilon \leq P_0 \\ 1, & \text{при } \varepsilon > P_0 \end{cases} \quad (25)$$

Случайное поле первого шага формируется независимыми значениями, что обусловлено применением для их генерации датчика случайных чисел.

Далее выполняются так называемые макрошаги итерационного процесса. Такой шаг формируется по количеству точек изображения, то есть из IJ микрошагов. В ходе выполнения микрошага текущей точкой является одна из точек кадра, а в ходе выполнения макрошага текущими поочередно становятся все точки области изображения IJ . Улучшение сходимости процесса релаксации используется случайный порядок обхода.

Принятие решения об изменении текущего отсчета $x_{i,j}^{(r)}$ микрошага необходимо датчиком случайных чисел сгенерировать число $\tilde{x}_{i,j}^{(r)}$. Данное число может как совпадать, так и не совпадать с $x_{i,j}^{(r-1)}$. Таким образом, формируется вектор $\tilde{X}^{(r)}$ отличие которого от $X^{(r-1)}$ может состоять только в одной точке i, j . Используя выражение (20) определяются и сравниваются вероятности $\tilde{P} = P(\tilde{X}^{(r)}, Y^{(H)})$ и $P = P(X^{(r-1)}, Y^{(H)})$, в результате чего определяется наиболее вероятный вектор $\tilde{X}^{(r)}$ или $X^{(r-1)}$.

При отличных друг от друга значениях $\tilde{x}_{i,j}^{(r)}$ и $x_{i,j}^{(r-1)}$ результатом шага будет $X^{(r)} = \tilde{X}^{(r)}$, так как $\tilde{P} > P$. На данном микрошаге текущий элемент поля должен быть изменен.

В случае когда $\tilde{P} \leq P$ необходимо вычислить их отношение $\tau = \frac{\tilde{P}}{P} \leq 1$. Это необходимо, чтобы задать границу величин $\varepsilon_{i,j}^{(r)}$ сгенерированных при еще одном обращении к вероятностному датчику чисел.

Правило формирования данного микрошага определяется выражением:

$$x_{i,j}^{(r)} = \begin{cases} \tilde{x}_{i,j}^{(r)}, & \text{при } \varepsilon_{i,j}^{(r)} \leq \tau \\ x_{i,j}^{(r-1)}, & \text{при } \varepsilon_{i,j}^{(r)} > \tau \end{cases} \quad (26)$$

Использование данного выражения может привести как к сохранению, так и к изменению значения $x_{i,j}^{(r)}$ в точке i, j .

Определение значений вероятностей \tilde{P} и P с использованием (20) входящую в него постоянную c находить не требуется, так как эти вероятности сравниваются только друг с другом и можно принять $c = 1$, что существенно снижает объем необходимых вычислений.

Формула (20) имеет гиббсовские характеристики, поэтому проведение расчетов вероятностей \tilde{P} и P с использованием описанного выше подхода существенно проще. Это связано с тем, что при выполнении микрошага происходит изменение только тех слагаемых в выражении многомерной суммы, которые связаны кликой с текущей точкой i, j . Таким образом, производятся только данные вычисления, а все остальные данные остаются неизменными от предыдущих результатов.

Оценка обеспечения сходимости данного итерационного процесса производится при помощи выражения (20) модифицированного введением управляющего сходимостью параметра $\gamma^{(r)}$:

$$P(X, Y) = c \exp\{-\gamma^{(r)} U_{\Sigma}(X, Y)\}, \quad (27)$$

где $U_{\Sigma}(X, Y)$ – энергетическая функция.

Данная функция определяется выражением:

$$U_{\Sigma}(X, Y) = \sum_{i,j} \sum_{\epsilon \in \Omega_y} \sum_{k=1}^4 \left[V_x^{(k)} + \frac{(y_{i,j} - \lambda^{(k)}(x_{i,j})y_{i,j}^{(k)} - m(x_{i,j}))^2}{2D(x_{i,j})} \right]. \quad (28)$$

При переходе к новому макрошагу при выполнении итерации значение $\gamma^{(r)}$ увеличивается, так как в этом случае в окрестности пиков $P(X, Y)$ будет происходить обострение данного распределения. Наиболее сложной задачей при реализации данного метода является выбор скорости изменений.

Повышение скорости изменений приводит к повышению скорости сходимости итерации, но в этом случае может наблюдаться «залипание» функции $P(X, Y)$ в одном из локальных максимумов. Исследования [42] установили, что для устранения данного недостатка $\gamma^{(r)}$ должно отвечать выражению:

$$\gamma^{(r)} = \ln(1 + r). \quad (29)$$

Рассмотрим пример применения метода гиббсовского метода бинаризации изображения применительно к решаемой задаче. Проведем бинаризацию изображения дефекта «трещина» (рисунок 3). Результаты бинаризации представлены на рисунке 23.



Рисунок 23 – Гиббсовское бинарное изображение дефекта «трещина»

Для остановки процесса итерации необходимо ввести критерий, который анализирует насколько результат текущего макрошага $X^{(r)}$ отличается от предыдущего $X^{(r-1)}$. Первая итерация макрошагов содержит большое количество отличающихся отсчетов поля. С каждой последующей итерацией количество отличающихся отсчетов поля сокращается. Когда это количество становится равным нулю, наступает сходимость итерационного процесса. Исходя из данных соображений формируется правило прекращения итерации исходя из того сколько процентов точек обновилось после макрошага, то есть задается некий порог ω при котором итерация прекращается. Длительность итерации, то есть количество макрошагов, при этом будет величиной случайной. Например, для рассмотренного выше

процесса бинаризации была задана $\omega = 0,01$. При этом потребовалось произвести 235 макрошага до остановки итерационного процесса.

Основная трудность применения бинаризации методом Гиббса заключается в обеспечении адекватности математической модели, так как для этого необходимо измерить соответствующие параметры данного распределения. Это означает, что для подбора параметров необходимо использовать вероятностную модель случайного поля, которая затем сравнивается с исходным изображением.

Область применения рассмотренных методов бинаризации изображения ограничивается исходя из их преимуществ и недостатков.

Марковская бинаризация требует проведения большого объема вычислений, но при этом не требует создания специальных условий для получения изображений, так же можно обрабатывать изображения с одинаковыми средними яркостями и дисперсиями. Исходя из этого наиболее приемлемый вариант применения данного метода бинаризации это обработка текстурных изображений.

Байесовская бинаризация предполагает наличие процедур создания вероятностной модели случайного поля и сравнения ее с исходным изображением, то есть необходим подбор параметров распределения Гиббса, что сказывается на длительности процесса. Однако, это позволяет обрабатывать даже изображения с большим количеством шумов.

Выбор в пользу применения для обработки изображения того или иного метода бинаризации необходимо делать на основе оценки качества изображения.

Понятие качества изображения достаточно нечеткое и оценивается в зависимости от решаемых задач разнообразными способами. Есть несколько основных подходов [31].

Первый подход предусматривает использование таких критериев как характеристики распределения яркости (форма и параметры), ширина пространственного спектра и тому подобное, то есть собственных

характеристик изображения, которые определяются его статистическими, структурными, семантическими свойствами. Данные критерии являются безотносительными и не нашли широкого применения в решении практических задач обработки изображений.

Второй подход заключается в количественной оценке изменений яркости и уровня искажения изображений исходного и эталонного, то есть в данном случае качество является мерой схожести двух изображений. Данный подход более объективен и широко используется при решении практических задач. Реализация этого подхода возможна на использовании критерия визуального восприятия, среднеквадратичного критерия, критерия максимальной ошибки и вероятностно-зонального критерия.

Анализ вышеперечисленных критериев оценки качества изображения показал, что применительно к решаемой задаче наиболее целесообразно применение среднеквадратичного критерия.

Рассмотрим данный подход подробнее. Предполагаем, что модели случайных однородных полей описывают изображения реальное $f(n_1, n_2)$ и эталонное $g(n_1, n_2)$. Тогда среднее значение квадрата разности этих изображений можно использовать для определения их соответствия:

$$\mu_{\text{КВ}}^2 = E(f - g)^2. \quad (30)$$

В случае равенства математических ожиданий $f(n_1, n_2)$ и $g(n_1, n_2)$ разность будет равна нулю $\mu_{\text{КВ}}^2$ будет их дисперсией, а $\mu_{\text{КВ}}$ среднеквадратичным отклонением.

Условие эргодичности стационарной модели является выполненным, если среднее значение набора реализаций может быть заменено на среднее значение одной реализации.

Тогда если непрерывное изображение задано при $|x_1| < L_1$, $|x_2| < L_2$ получим:

$$\mu_{\text{КВ}}^2 \approx \frac{1}{4L_1L_2} \int_{-L_1}^{L_1} \int_{-L_2}^{L_2} [f(n_1, n_2) - g(n_1, n_2)]^2 dn_1 dn_2. \quad (31)$$

В дискретном случае задания изображения при $0 \leq n_1 \leq N_1 - 1$, $0 \leq n_2 \leq N_2 - 1$ получим:

$$\mu_{\text{КВ}}^2 \approx \frac{1}{4N_1N_2} \sum_{n_1}^{N_1-1} \sum_{n_2}^{N_2-1} [f(n_1, n_2) - g(n_1, n_2)]^2. \quad (32)$$

Возможно применение (31) и (32) для определения среднеквадратичной ошибки двух произвольных изображений, которые описываются нестационарными полями. В таком случае $\mu_{\text{КВ}}^2$ оценивает качество всего изображения, при этом $\mu_{\text{КВ}}^2$ на различных участках изображения могут отличаться.

Основным достоинством применения среднеквадратичного критерия для оценки качества изображений является простота его реализации, так как применение данного критерия позволяет применять аналитические решения при анализе изображений. Необходимо учесть, что применение данного критерия плохо согласуется с критерием визуального восприятия.

4.2 Поиск и оценка геометрических характеристик дефектов на изображении

Решение практических задач обработки изображений часто требует введения процедуры совмещения изображений. Например, процедура привязки изображения к САД-модели, процедура калибровки устройств получения изображений и так далее. Для этого требуется разработка соответствующих алгоритмов осуществляющих данную процедуру путем определения параметров сдвигов и поворотов совмещаемых изображений. Данная задача может существенно усложниться, если требуется совместить изображение, которое является частью изображения или модели эталона.

В ходе выполнения анализа дефектов (пункт 1 данной работы) было выяснено, что важно не только наличие дефекта и его размеры, но и место его расположения на контролируемом оптическом элементе зеркала заднего вида. Только на основании комплексной информации о дефекте принимается решение о его допустимости или недопустимости на контролируемом образце. Наличие данной процедуры позволяет избежать ложных срабатываний системы в случае наличия дефекта в краевых (допустимых) областях контролируемого образца.

Ключевым вопросом в данном случае является вопрос совмещения исходного и эталонного изображений. Решение этой проблемы осуществим на основе известного метода описанного в [26].

Совмещение плоских изображений возможно, если они имеют одинаковый масштаб. Для осуществления самой процедуры необходимо найти на данных изображениях по три соответствующих точки и совместить их. В реальных задачах такого рода как правило информации об относительных поворотах и сдвигах нет. В этом случае необходимо выполнить сопоставление каждого отсчета эталонного изображения с отсчетами контролируемого изображения.

Рассмотрим данный подход подробнее. Предполагаем, что задание эталонного изображения осуществляется в векторной форме. Контролируемое изображение в растровой форме $P_{M,N}$ имеет размер $M \times N$ пикселей. Изображение эталона в растровой форме задано в форме $S(A, \chi, \zeta)_{U,V}$. Здесь приняты следующие обозначения: U, V – размеры, A – угол поворота, χ – масштабирование по вертикали, ζ – масштабирование по горизонтали эталонного изображения. Следует заметить, что размеры эталонного и контролируемого образца могут отличаться.

В общем случае задачу совмещения изображений можно сформулировать следующим образом. Необходимо найти такой вектор параметров совмещения изображений S и P , который удовлетворит критерию оптимальности совмещения. Искомый вектор задается в виде (A, χ, ζ, Y, X) , Y

и X задают сдвиги изображений относительно друг друга.

Рассмотрим одну из наиболее эффективных моделей – модель непосредственного совмещения [1].

В случае реализации данной модели применяемый подход заключается в том, что при изменении параметров совмещения изменяется площадь разности изображений. Данный подход наиболее простой и основан на выполнении численной оптимизации.

Строим соответствующее растровое изображение разности контролируемого и эталонного изображений $T(A, \chi, \zeta, Y, X)_{M,N}$ по правилу:

$$t_{i,j} = \begin{cases} \text{abs}(p_{i,j} - s(A, \chi, \zeta)_{i+Y, j+X}) & \text{если } 0 \leq i + Y < U \wedge 0 \leq j + X < V \\ p_{i,j} & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (33)$$

где $t_{i,j}, p_{i,j}, s_{i,j} \in \{0,1\}$ – элементы изображений в растровой форме T, P, S соответственно.

T в данном случае принята по модулю.

Качество совмещения может быть оценено при помощи критерия:

$$J(A, \chi, \zeta, Y, X) = \sum_i \sum_j g_{i,j} t_{i,j}, \quad (34)$$

где $g_{i,j}$ – элементы весового изображения $G_{M,N}$.

Изображение $G_{M,N}$ служит для оценки вклада в критерий качества совмещения отдельных областей эталонного изображения.

Различие сравниваемых изображений S и P будет сильнее при возрастании значения J . Для бинарных изображений и для случая $g_{i,j} = 1 \forall i, j$, не совпадающие пиксели изображений J возвращает, что можно использовать для определения искомой площади расхождения.

Соответственно непосредственное совмещение заключается в оптимизации функции J по соответствующим переменным с использованием

выражением:

$$J(A, \chi, \zeta, Y, X) \xrightarrow{A, \chi, \zeta, Y, X} \min. \quad (35)$$

Точность определения параметров и область их изменения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры совмещения

Параметр	Область изменения	Необходимая точность	Количество итераций полного перебора
A	$0 \pm 0,0025$ рад. ($\pm 0.15^\circ$)	0,0001 рад.	50
χ	$1 \pm 5e-4$	0,0001	10
ζ	$1 \pm 5e-4$	0,0001	10
Y	± 15 пикс.	1 пикс.	15
X	± 15 пикс.	1 пикс.	15

Из данной таблицы видно, что для полного перебора необходимо количество итераций с порядком 10^6 .

Скорость вычисления функции оценки качества изображения J зависит от размера изображений S и P . Обычно размер этих изображений составляет около 10 Мб. Изменение параметров требует перестроения изображения S , что также требует значительных затрат времени. Исключение составляют параметры Y и X , так как их изменение требует только перестроения разности изображений T . Установлено [40], что длительность итерационного процесса по параметрам Y и X составляет около 0,6 сек., а по остальным параметрам около 1,4 сек. Тогда полная итерация изображение размером 10 Мб займет приблизительно 200 часов. Для решения поставленной задачи такая длительность процесса полного перебора неприемлема, поэтому количество вычислений J в алгоритме оптимизации должен быть ограничено. Выбор оптимального алгоритма оптимизации был сделан на основе исследований [25].

Типичный график $J(A)$ при параметрах, зафиксированных в области изменений таблицы 4 представлен на рисунке 24. Сдвиги и параметры масштабирования также имеют похожие зависимости. Представленный на рисунке 24 график имеет экстремумы в количестве 14 штук.

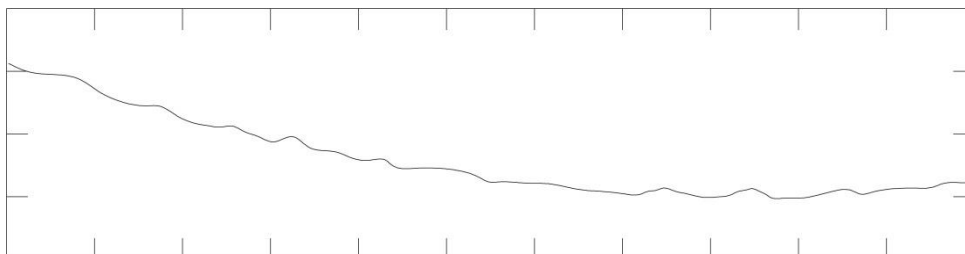


Рисунок 24 – Типичный график функции $J(A)$

В случае фиксации сдвигов и масштабов вблизи их оптимальных значений функция $J(A)$ примет вид, представленный на рисунке 25. На данном графике отсутствуют локальные экстремумы, а наклоны с обеих сторон от него одинаковые. Остальные переменные будут иметь схожие графики. Следовательно, для оптимизации функции $J(A)$ можно применить градиентные методы. Такой подход можно использовать для уточнения предварительного совмещения.

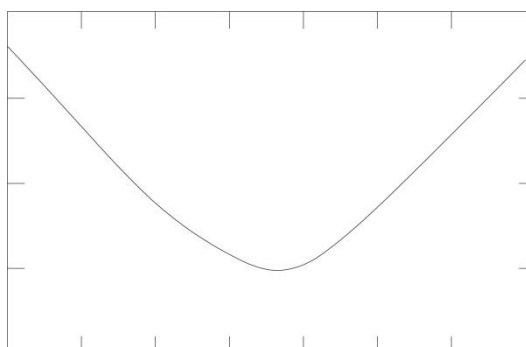


Рисунок 25 – Функция $J(A)$ при оптимальных сдвигах и масштабах

В случае отклонения Y на незначительную величину график $J(A)$ примет вид, представленный на рисунке 26. Остальные параметры будут изменяться аналогично. Форма графика объясняется тем, что при получении эталонного изображения параметры масштабирования, поворота и сдвига относительно эталона проводились от центра изображения. В связи с этим поворот эталонного изображения на незначительную величину не влияет на оптимизацию сдвигов, а в случае аналогичного сдвига масштаб изменять не требуется.

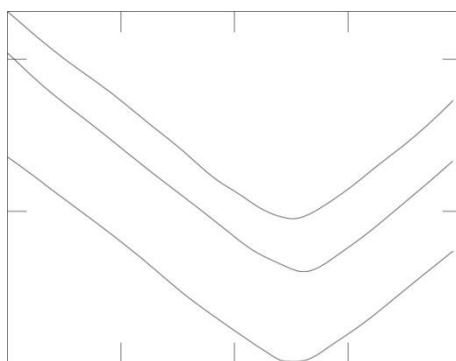


Рисунок 26 – Функция $J(A)$ при малом отклонении фиксированных параметров от оптимальных значений

Вид функции $J(A)$, говорит о том, что можно проводить оптимизацию параметров независимо друг от друга с незначительной потерей точности. Для решения задачи определения областей допустимых дефектов такой подход допустим, так как высокая точность не нужна. При этом, если результаты оптимизации будут неудовлетворительными можно выполнить ее повторно, что увеличит точность.

Решение задачи оптимизации в постановке выражения (35) возможно на основе локального и нелокального методов.

Один из наиболее применимых локальных методов оптимизации – метод деления пополам [2]. Данный метод основан на том, что форма графика оптимизируемой функции имеет наклон с обеих сторон от минимума. В общем случае для оптимизации необходимо найти ее

производную, но с учетом свойств функции делать это необязательно. Следовательно, за несколько процедур оптимизации функции получится ее оптимальное значение.

Допустим, что все параметры выражения (35) кроме параметра, который необходимо оптимизировать находятся вблизи оптимальных значений. Применение данного метода предполагает, что оптимизируемая функция вычислена для предыдущей итерации слева и справа на области поиска. Тогда текущая итерация вычисляет функцию в середине области поиска, тем самым она уменьшается вдвое. Математически данная процедура выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} J(p_m^i) = J\left(\frac{p_1^{i-1} + p_2^{i-1}}{2}\right) \\ J(p_n^i) = J(p_n^{i-1}) \\ m = \arg \max_{m \in \{0,1\}} (J(p_m^{i-1})) \\ n = \arg \max_{n \in \{0,1\}} (J(p_n^{i-1})) \end{array} \right. \quad (36)$$

где i – текущая итерация;

$i - 1$ – предыдущая итерация;

$J(p_1^{i-1})$ – значения оптимизируемой функции на левой границе области поиска;

$J(p_2^{i-1})$ – значения оптимизируемой функции на правой границе области поиска.

Оптимизация останавливается, когда выполняется условие:

$$J(p) = J\left(\frac{p_1^i + p_2^i}{2}\right), \quad |p_1^i - p_2^i| < \varepsilon. \quad (37)$$

Как было отмечено ранее переменные функции J обладают малой корреляцией, поэтому алгоритм оптимизации был построен на их рекурсии. Полученный алгоритм работает следующим образом. Производится

оптимизация с использованием условия (37) по переменной $J(X)$. Оптимизация по Y согласно условия (37) выполняется для двух переменных $J(Y, X)$. Определение $J(\bar{Y}, X)$, также производится по (37) по X , при этом \bar{Y} имеет фиксированное значение, а X изменяется.

Количество итерационных переходов данного алгоритма определяется количеством итерационных переходов полного перебора, выполненного через двоичный логарифм. Например, для области, представленной в таблице 4, число итераций до схождения будет иметь порядок 10^2 .

Рассмотрим метод оптимизации выражения (35) нелокальным методом. Для рассмотрения берем один из наиболее распространенных – метод покоординатного спуска [33].

Допустим, что все параметры выражения (35) кроме параметра, который необходимо оптимизировать находятся вблизи оптимальных значений. Предполагаем, что в текущей точке оптимизируемая функция на предыдущей итерации определена, тогда на текущей итерации необходимо для данной функции определить ее значения слева и справа относительно текущей точки. После чего точка передвигается. С математической точки зрения данная процедура запишется как:

$$J(p^i) = \min(J(p^{i-1} + \Delta p), J(p^{i-1} - \Delta p)), \quad (38)$$

где $J(p^{i-1})$ – значения оптимизируемой функции в текущей точке;

Δp – шаг изменения параметра p .

Процесс итерации останавливается, если выполнено условие:

$$J(p^i) < \min(J(p^{i-1} + \Delta p), J(p^{i-1} - \Delta p)). \quad (39)$$

Данный алгоритм может работать быстрее при условии, что на текущей итерации $J(p^{i-1})$ будет использоваться как $J(p^{i-1} + \Delta p)$ или $J(p^{i-1} - \Delta p)$.

В общем случае многомерная оптимизация методом покоординатного спуска является алгоритмом выбора для каждого шага одной оптимальной переменной. При этом из всех возможных направлений выбирается направление с минимальной J .

Очевидно, что на количество итераций при использовании метода покоординатного спуска влияет качество изображения. При определенном качестве изображения количество итераций может сравняться с методом полного перебора.

Рассмотренные методы позволяют успешно решить задачу (35), а, следовательно обеспечивают совмещение контролируемого и эталонного изображений. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, которые и определяют область их применения.

Решение задачи оптимизации методом деления пополам, описанным выше, содержит допущения, позволяющие ускорить процесс сходимости. Это приводит к тому, что остановка процесса итерации происходит не в оптимальной точке, а в точке близкой к ней. Тогда необходимо провести процедуру еще раз, что позволит более точно определить оптимальную точку. В случае применения метода деления пополам повторное применение процедуры является наилучшим решением, но это в конечном итоге увеличивает время обработки. В связи с этим количество уточняющих процедур, как правило, ограничено, что сказывается на точности совмещения.

Решение задачи оптимизации методом покоординатного спуска применяется в случае необходимости получения совмещения максимально возможной точности. Как отмечалось ранее, данный метод имеет один существенный недостаток, который заключается в том, что при сильной зашумленности изображения итерационный процесс включает большое количество переходов.

В проектируемой системе контроля оптических элементов зеркал предусматривается возможность предварительного выбора алгоритма в

зависимости от требуемой точности совмещения.

После совмещения контролируемого и эталонного изображений и определения областей, допустимых и недопустимых дефектов необходимо определить наличие дефектов и их геометрических характеристик. Для этого используются изображения, предварительно обработанные по алгоритмам бинаризации, описанным в пункте 3 данной диссертационной работы.

Измерения на изображении представляют собой получение количественных характеристик параметров исходного изображения, которые характеризуют либо его в целом, либо какую-то его часть. При анализе изображения может понадобиться решение самых разнообразных задач такого рода. Например, оценить статистические характеристики изображения, обнаружить объекты и определить их координаты, оценить геометрические параметры объектов.

В нашем случае необходимо решить последнюю из перечисленных задач. Практическое ее решение заключается в определении геометрических характеристик возможных дефектов, таких как их размеры, площадь, расположение и так далее. Рассмотрим более подробно алгоритм, позволяющий это сделать [33].

Допустим, что обрабатываемое изображение представлено в бинарной форме в соответствии с алгоритмами обработки, представленными в пункте 3. Примем фон белым, то есть его значение равно нулю, а искомые дефекты черные, то есть их значение равно 1.

Задача распознавания заключается в определении числа дефектов и их геометрических характеристик (площади, центры тяжести, размеры и так далее). Данные значения параметров могут быть использованы в виде значений и гистограмм распределения или быть признаками для процедуры распознавания.

В соответствии с поставленной задачей можно использовать для определения различных геометрических характеристик один алгоритм бинарной обработки.

Возьмем для примера алгоритм определения площади объекта. Предположим, что искомая площадь состоит из числа отсчетов объекта. Тогда один отсчет задается в виде квадрата единичной площади, который представлен на рисунке 27, а объект определяется критерием четырехсвязанности.

Обработку прямоугольной матрицы отсчетов будем проводить с верхней строчки вниз и с левого столбца вправо, то есть в виде построчной развертки. Для рассмотрения берем любой не граничный отсчет $f(n_1, n_2)$. Для граничных отсчетов, то есть принадлежащих первой строке и левому столбцу, процедуру обработки рассмотрим далее.

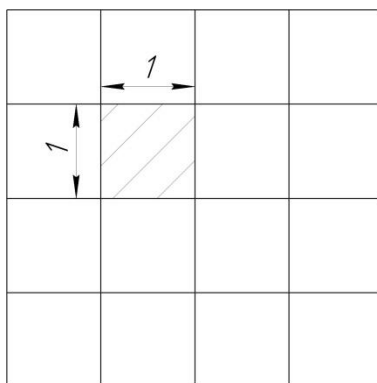


Рисунок 27 – Квадрат единичной площади

Отсчет фона $f(n_1, n_2) = 0$ предполагает выполнение следующего шага.

Для отсчета $f(n_1, n_2) = 1$ необходимо провести анализ его принадлежности к одному из объектов на изображении. Данная процедура предусматривает рассмотрение соседних отсчетов $f(n_1 - 1, n_2)$ и $f(n_1, n_2 - 1)$. При выполнении условия $f(n_1 - 1, n_2) = f(n_1, n_2 - 1) = 0$ оцениваемый отсчет будет являться началом новой области, то есть это новый объект и в таблице характеристик областей добавляются вносятся соответствующие значения. При выполнении условия $f(n_1 - 1, n_2) = 0$ и $f(n_1, n_2 - 1) = 1$, оцениваемый отсчет включается в область отсчета $(f(n_1, n_2 - 1))$, а ее площадь увеличивается на одну единицу. Аналогично при выполнении

условия $f(n_1 - 1, n_2) = 1$ и $f(n_1, n_2 - 1) = 0$, текущий отсчет включается в область $(f(n_1 - 1, n_2))$ и выполняются соответствующие вычисления площади. При выполнении условия $f(n_1 - 1, n_2) = f(n_1, n_2 - 1) = 1$ необходимо произвести анализ областей данных отсчетов. Если соседние отсчеты относятся к одной области, то текущий отсчет также присоединяется к ней. Если соседние отсчеты относятся к разным областям, то текущий отсчет, а также сами области объединяются в одну, а их площадь пересчитывается.

Схема алгоритма, реализующего данные соображения, представлена на рисунке 28.

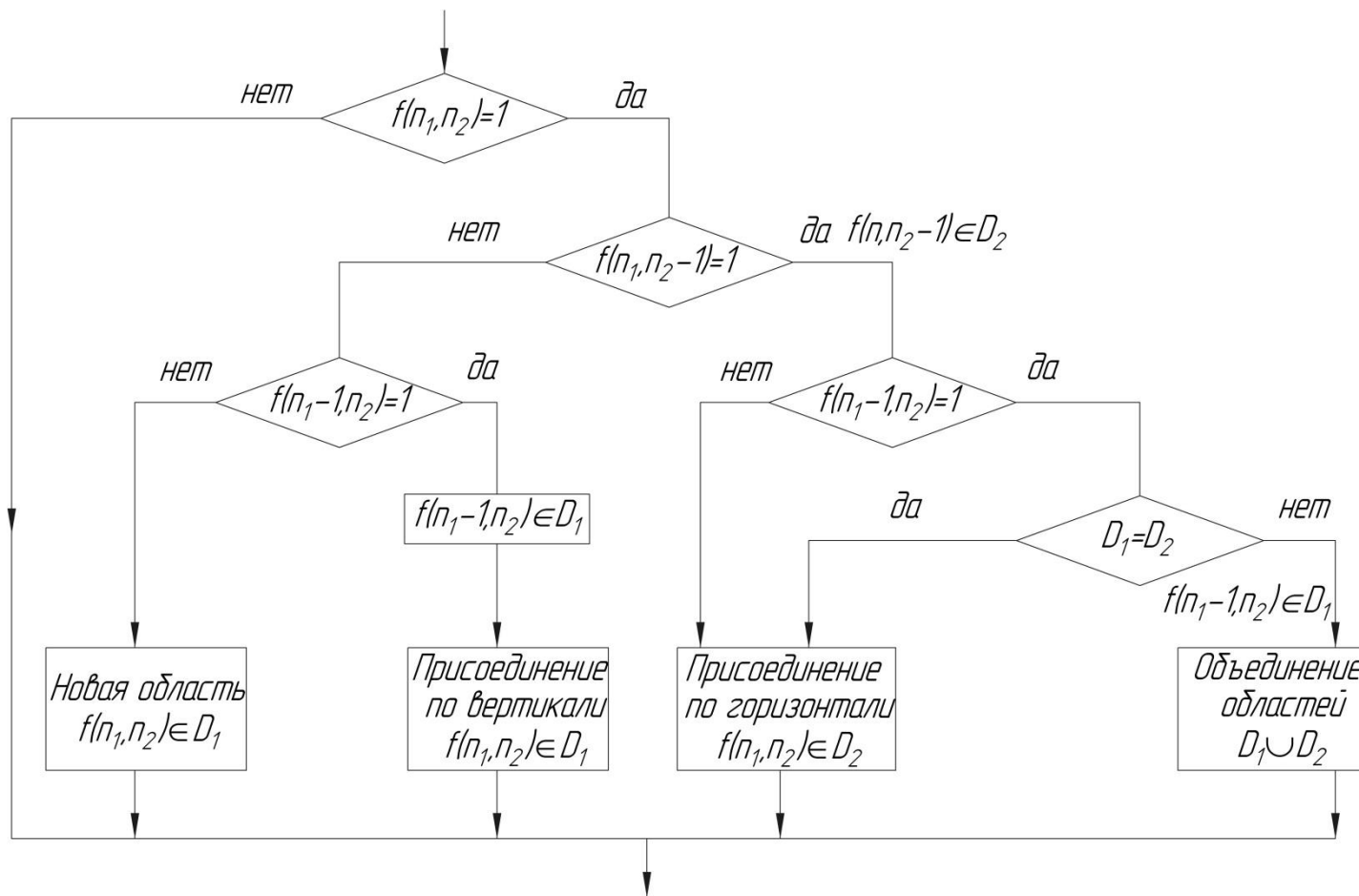


Рисунок 28 – Алгоритм определения геометрических характеристик

Алгоритм, представленный на рисунке 28, выполним для всех отсчетов, кроме граничных. Рассмотрим алгоритм для обработки граничных отсчетов. Для первой строки и левого столбца отсчеты $f(n_1, n_2 - 1) = 0$. Для углового отсчета $f(0,0)$ в таблице характеристик принимается $f(0,0) = 1$ или $f(0,0) = 0$.

Приведем пример определения площади объекта на фрагменте 5×5 , представленного на рисунке 29.

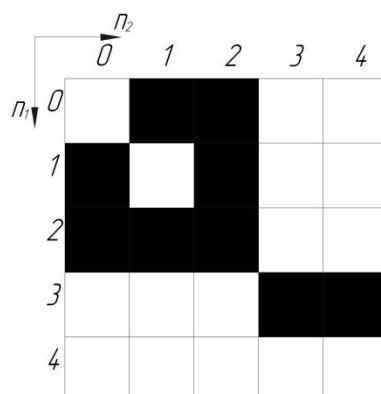


Рисунок 29 – Фрагмент изображения

Создадим таблицу 5 определения площадей и рассмотрим процесс ее формирования при условии построчного просмотра отсчетов.

Таблица 5 – Таблица определения площадей

Текущий отсчет	Характеристика (площадь) области		
	область 1	область 2	область 3
$f(0,1)$	1	-	-
$f(0,2)$	$1+1=2$	-	-
$f(1,0)$	2	1	-
$f(1,2)$	$2+1=3$	1	-
$f(2,0)$	3	$1+1=2$	-
$f(2,1)$	3	$2+1=3$	-
$f(2,2)$	$3+3+1=7$	объединена с обл.1	-
$f(3,3)$	7	-	1
$f(3,4)$	7	-	$1+1=2$

Данная таблица для простоты восприятия сокращена путем введения в нее только тех отсчетов, которые соответствуют объектам, и происходит изменение таблицы, то есть $f(n_1, n_2) = 1$.

На рисунке 30 показана разметка областей алгоритма.

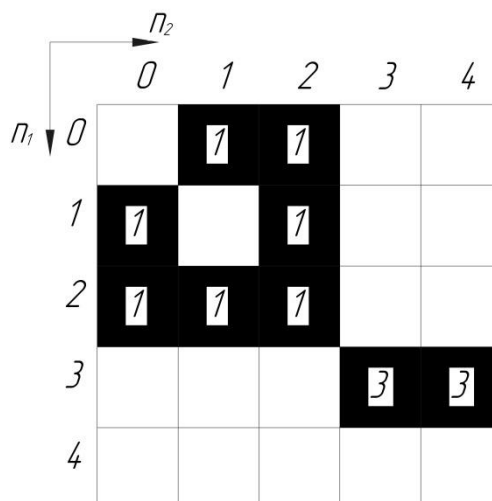


Рисунок 30 – Разметка областей

В данной разметке получаем две области площадью: 7 отсчетов для первой и 2 отсчета для второй.

Используя аналогичные алгоритмы можно произвести расчеты других характеристик объектов. Для определяемых характеристик необходимо наличие правила вычисления характеристики объединенной области по характеристикам объединяемых областей. Математически данное правило выглядит следующим образом:

$$F(D_1 \cup D_2) = \Phi[F(D_1), F(D_2)] \quad (D_1 \cap D_2 = \emptyset - \text{области не пересекаются}) \quad (40)$$

где $F(D)$ – характеристика, которая определена по множеству отсчетов D .

Характеристики, удовлетворяющие данному ограничению, имеют

следующий вид. Для аддитивных характеристик:

$$F(D) = \sum_{(n_1, n_2) \in D} (\Phi(n_1, n_2)), \quad (41)$$

где $\Phi(n_1, n_2)$ – произвольная функция координаты n_1, n_2 .

Для экстремальных характеристик:

$$F(D) = \text{ext}_{(n_1, n_2) \in D} (\Psi(n_1, n_2)), \quad (42)$$

где $\Psi(n_1, n_2)$ – произвольная функция координаты n_1, n_2 .

Рассмотрим пример определения геометрических характеристик для фигуры, показанной на рисунке 31.

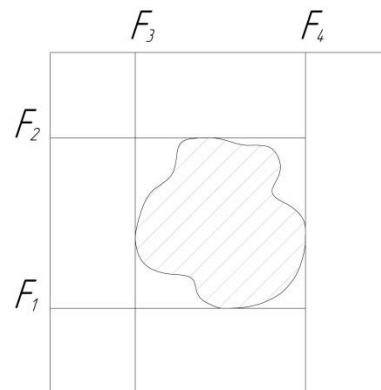


Рисунок 31 – Координаты краев области на изображении

Площадь данной фигуры определяется:

$$F(D) = \sum_{(n_1, n_2) \in D} 1. \quad (43)$$

Здесь функция $\Phi(n_1, n_2) \equiv 1$ представляет собой аддитивную характеристику.

Координаты края изображения по вертикали и горизонтали

определяются выражениями:

$$F_1(D) = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}; \quad (44)$$

$$F_2(D) = \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}; \quad (45)$$

$$F_3(D) = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}; \quad (46)$$

$$F_4(D) = \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}. \quad (47)$$

Здесь функция $\Psi(n_1, n_2) = n_1$ и $\Psi(n_1, n_2) = n_2$ представляет собой экстремальные характеристики.

Данные характеристики являются основой для определения характеристик, не удовлетворяющих сформированным требованиям. К данным характеристикам относятся, например центр тяжести объекта или области D (рисунок 32) и размеры по вертикали и горизонтали (рисунок 33).

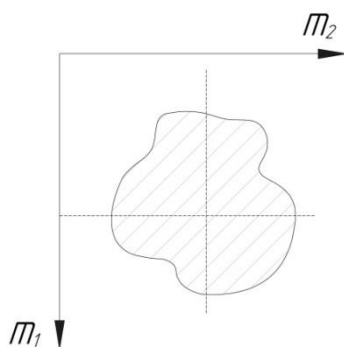


Рисунок 32 – Область изображения и ее центр

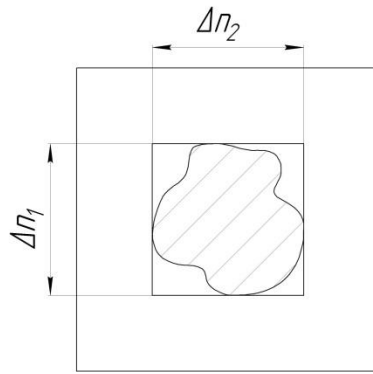


Рисунок 33 – Максимальные линейные размеры объекта на изображении

Для расчета центра тяжести в случае непрерывных аргументов используется выражение:

$$\theta_1 = \frac{\int_D \int x_1 dx_1 dx_2}{\iint_D dx_1 dx_2}; \theta_2 = \frac{\int_D \int x_2 dx_1 dx_2}{\iint_D dx_1 dx_2}. \quad (48)$$

Выражения для изображений в цифровой форме примут вид:

$$m_1 = \frac{\sum_{(n_1, n_2) \in D} n_1}{\sum_{(n_1, n_2) \in D} 1}; m_2 = \frac{\sum_{(n_1, n_2) \in D} n_2}{\sum_{(n_1, n_2) \in D} 1}. \quad (49)$$

Полученное выражение можно записать в виде:

$$m_1 = \frac{\alpha_{10}}{\alpha_{00}}; m_2 = \frac{\alpha_{01}}{\alpha_{00}}. \quad (50)$$

В данном выражении аддитивные первичные характеристики определяются:

$$\begin{cases} \alpha_{00} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} 1 \\ \alpha_{10} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} n_1 \\ \alpha_{01} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} n_2 \end{cases} \quad (51)$$

Размеры по вертикали и горизонтали определяются выражениями:

$$\Delta n_1 = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\} - \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}, \Delta n_2 = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\} - \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}. \quad (52)$$

Расчет данных характеристик производится исходя из соответствующих характеристик, определяемых по выражениям (44) – (47).

Приведенная методика определения геометрических характеристик контролируемых дефектов полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к проектируемой системе контроля.

В данном разделе рассмотрены математические модели и алгоритмы, которые позволили автоматизировать процесс обработки исходного изображения при выполнении контроля оптических элементов зеркал заднего вида.

Рассмотрены алгоритмы бинаризации изображения, оценена их эффективность и определена область их применения. Предложена процедура автоматизации процесса выбора алгоритма бинаризации на основе оценки качества исходного изображения.

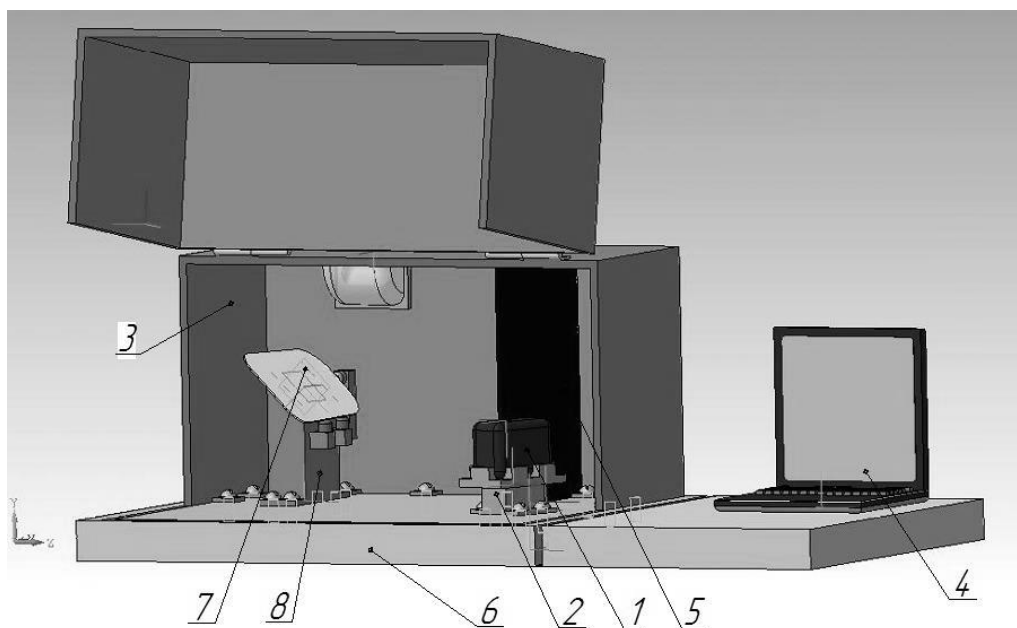
Предложена модель совмещения исходного и эталонного изображений с целью деления контролируемого образца на области в зависимости от допустимых характеристик дефектов.

Математически описана процедура определения геометрических характеристик изображений дефектов.

Полученные данные свидетельствуют о возможности автоматизации процесса поиска и определения характеристик дефектов оптических элементов автомобильных зеркал заднего вида.

5 Проектирование аппаратной части системы контроля

С целью реализации предлагаемого метода контроля была предложена конструкция экспериментальной установки. Общий вид установки для контроля дефектов оптических элементов автомобильных зеркал представлен на рисунке 34.



1 – цифровая камера; 2 – приспособление для крепления камеры; 3 – корпус с источником света; 4 – персональный компьютер; 5 – монотонное полотно; 6 – базовая плита; 7 – контролируемый образец; 8 – стол для крепления оптического элемента.

Рисунок 34 – Установка для контроля дефектов оптических элементов автомобильных зеркал заднего вида

Контроль с использованием данной установки происходит следующим образом. Оптический элемент устанавливается на столе 8 таким образом, чтобы монотонное полотно 5 отражалось в нем. Корпус установки закрывается и включается источник света. Камера, предварительно закрепленная в соответствующем приспособлении 2, делает снимок оптического элемента. Далее полученное изображение передается на персональный компьютер. Происходит обработка полученного изображения в соответствии с

алгоритмами, приведенными в пункте 4 данной работы, и выдаются результаты в необходимом для оператора виде. Также полученные данные могут быть использованы для использования их в системе контроля качества предприятия или для хранения и использования в банке данных.

Требования, предъявляемые к техническому оснащению системы, в которое входят источник света, камера и персональный компьютер, могут быть удовлетворены стандартными техническими средствами, что делает проектируемую систему существенно дешевле.

Оценка точности контроля с применением спроектированной системы проводилась на 200 образцах оптических элементах зеркал автомобиля заднего вида. Разница с результатами контроля при помощи систем Field и lens составила 1 – 1,9%.

Оценка стабильности выдаваемых результатов проводилась путем проведения контроля одного и того же образца с переустановкой и без переустановки образца. Всего было сделано по 30 измерений. Результаты контроля показали разброс 0,6 – 0,9%.

Алгоритмы работы системы были проверены на их устойчивость к шуму. Для этого на изображение эталонного образца последовательно добавлялся шум, а затем производилась его оценка. Критерием остановки испытаний было возникновение ложных дефектов. Получено соотношение сигнала и шума 11%.

Проведенная оценка показателей работоспособности системы с учетом специфики решаемой задачи позволяет сделать вывод о ее пригодности для проведения контроля дефектов оптических элементов автомобильных зеркал.

Заключение

В ходе выполнения магистерской диссертации была разработана система контроля оптических элементов зеркал заднего вида автомобиля, позволяющая автоматизировать процесс контроля, повысить его качество и производительность.

Проведен анализ возможных дефектов оптических автомобильных зеркал и методов их контроля. На экспертном уровне произведена оценка существующих систем контроля. В результате выработаны основные требования к проектируемой системе контроля. Разработана функциональная схема системы контроля и структурная схема ее программного обеспечения. Данные схемы позволили задать алгоритмы управления и обработки данных в форме, которая наилучшим образом подходит для разработки программного обеспечения системы контроля. Разработаны алгоритмы и математические модели, позволяющие реализовать процедуру контроля, учитывающие требуемую точность и производительность системы контроля.

Спроектирована экспериментальная установка для контроля дефектов оптических элементов автомобильных зеркал, которая позволяет реализовать предлагаемый метод контроля. Так же она использовалась для отладки системы в реальном масштабе времени, проведения проверки и корректировки алгоритмов и программ системы контроля. С помощью данной установки были оценены основные технические характеристики системы и ее пригодность для использования в производственных условиях для проведения входного контроля.

Проектирование такого рода систем представляет собой сложную задачу, которая требует комплексного подхода к ее решению и основана на использовании методов обработки информации с использованием персонального компьютера. В данном случае можно считать задачу проектирования автоматизированной системы контроля оптических элементов автомобильных зеркал заднего вида решенной.

Список используемых источников

1. Бериков В.Б. Методы кластерного анализа данных и сегментации изображений : учебное пособие / В.Б. Бериков ; М-во образования и науки РФ, Новосибирский гос. ун-т, Мех.-мат. фак. – Новосибирск : РИЦ НГУ, 2015. – 97 с.
2. Вейвлет-анализ топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов : монография / В.А. Ткаль [и др.] ; Федеральное агентство по образованию, Новгородский гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород : Новгородский гос. ун-т, 2006. – 397с.
3. Волков В.Г. Техническое зрение. Инновации / В.Г. Волков, П.Д. Гиндин. – Москва : Техносфера, 2014. – 836 с.
4. Гонсалес Р.С. Цифровая обработка изображений / Р.С. Гонсалес, Р.Е. Вудс ; пер. с англ. Л.И. Рубанова, П.А. Чочиа ; науч. ред. П.А. Чочиа. – Третье изд., испр. и доп. – Москва : Техносфера, 2019. – 1103 с.
5. ГОСТ 17716-2014. Зеркала. Общие технические требования. – Введ. 2015–01–01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 11 с.
6. ГОСТ 32361-2013. Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения. – Введ. 2015–01–01. – М. : Стандартинформ, 2018. – 11 с.
7. ГОСТ 32529-2013. Стекло и изделия из него. Правила приемки. – Введ. 2015–01–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 8 с.
8. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. Пособие / И.С.Грузман, В.С.Киричук, В.П. Косых и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
9. Гуляев В.А. Логинов, Н.Ю. Система определения дефектов автомобильных зеркал заднего вида / В.А. Гуляев, Н.Ю. Логинов // THEORETICAL & APPLIED SCIENCE – 2017 – №5 – С. 28–31.
10. Журавлев Ю.И. "Распознавание". Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю. И. Журавлев, В. В.

Рязанов, О. В. Сенько. – Москва : ФАЗИС, 2006 М. : Типография "Наука" РАН. – 176 с.

11. Зайцева А.Ю. Обнаружение дымовых облаков на изображениях лесных массивов в системах противопожарного видеомониторинга : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.17 / Зайцева Анна Юрьевна. – Новосибирск, 2019. – 132 с.

12. Кирьянов К.А. Устойчивые методы восстановления изображений во встроенных системах для повышения точности измерений механических величин на объектах : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.11.01 / Кирьянов Константин Александрович. – Санкт-Петербург, 2013. – 23 с.

13. Клименков С.С. Нормирование точности и технические измерения в машиностроении: учебник / С. С. Клименков. – Минск : Новое знание, 2017 ; Москва : ИНФРА-М, 2017. – 248 с.

14. Лагунов Н.А. Нейросетевое моделирование распознавания многопараметрических объектов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.18 / Лагунов Никита Алексеевич. – Ставрополь, 2016. – 207 с.

15. Лебедько Е.Г. Теоретические основы передачи информации : [учеб. пособие] / Е.Г. Лебедько. – Гриф УМО. – Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2016. – 349 с.

16. Методы компьютерной обработки изображений : учеб. пособие для вузов / М. В. Гашников [и др.] ; под ред. В. А. Сойфера. – 2-е изд., испр. ; Гриф МО. – Москва : Физматлит, 2003. – 780 с.

17. Можаров Г.А. Основы геометрической оптики : учеб. пособие / Г.А. Можаров. – Гриф УМО. – Москва : Логос, 2006. – 280 с.

18. Нгуен Т.Х. Математические методы моделирования и классификации объектов на основе технического зрения и машинного обучения : диссертация ... кандидата технических наук : защищена 05.13.18 / Нгуен Тху Хыонг. – Иркутск, 2019. – 133 с.

19. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В.В. Клюев [и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2005. – 656 с.

20. Орлов О.В. Математическое обеспечение и алгоритмы обработки геофизической информации в частично когерентных оптико-электронных вычислительных системах : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.11. – Томск, 1999. – 22 с.

21. Пат. 2249787 МПК G01B 11/30 Бесконтактный способ определения качества поверхности и устройство для его осуществления / Виноградов В.И., Захаров М.А., Мурашев В.М.; заявитель и патентообладатель Государственное унитарное предприятие "НПО Астрофизика". – № 2003122397/28; заявл. 23.07.2003; опубл. 10.04.2005 Бюл. № 10. – 11 с.

22. Пат. 2302624 МПК G01N 21/55 Портативный прибор контроля и измерения возвратно-отражающей способности световозвращающих изделий / Решетин Е.Ф., Новаковский Л. Г., Новикова Л. А., Анохин Б. Б. ; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество "ФАРОС-АЛЕФ". – № 2005117145/28; заявл. 06.06.2005; опубл. 20.12.2006 Бюл. № 35. – 11 с.

23. Пат. 2335734 МПК G01B 11/24 Устройство для обнаружения и измерения поверхностных дефектов / Филинов М.В., Маслов А.А.; заявитель и патентообладатель ЗАО "НИИИН МНПО "Спектр". – № 2007102036/28; заявл. 22.01.2007; опубл. 10.10.2008 Бюл. № 28. – 5 с.

24. Подпалый Е.А. Магнитооптические методы в голографии : диссертация ... доктора технических наук : защищена 05.11.07. – М, 2007. – 245 с.

25. Поройков А.Ю. Кросскорреляционная обработка изображений в оптических методах диагностики потоков и деформаций : учебное пособие по курсам "Компьютерная обработка изображений" для студентов, обучающихся по направлению "Электроника и микроэлектроника" / А.Ю. Поройков ; Министерство образования и науки Российской Федерации,

Национальный исследовательский университет "МЭИ". – Москва : Изд-во МЭИ, 2018. – 73 с.

26. Савичева С.В. Система распознавания отдельных и наложенных плоских объектов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.01 / Савичева Светлана Владимировна. – Владимир, 2013. – 192 с.

27. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов и др. ; под ред. канд. хим. наук М. А. Окатова. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Изд-во Политехника, 2004 (Петрозаводск : ГП Тип. им. П.Ф. Анохина). – 678 с.

28. Тавер Е.И. Введение в управление качеством : учеб. пособие / Е.И. Тавер. – Москва : Машиностроение, 2013. - 368 с.

29. Тихомирова О.Б. Технический контроль колесных транспортных средств : [учебное пособие] / О.Б. Тихомирова, А.Н. Тихомирова, В. А. Гурин ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева". – Нижний Новгород : НГТУ, 2019 – 213 с.

30. ТУ 5910-001-37538875-170809. Технических условий на продукцию из листового стекла. – М : ООО «ДомГласс», 2017. – 16 с.

31. Цапаев А. П. Методы и алгоритмы распознавания изображений для обнаружения дефектов внутренней поверхности труб с целью автоматизации визуального контроля : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.17 / Цапаев Алексей Петрович. – Нижний Новгород, 2013. – 20 с.

32. Цаплин А.Е. Совершенствование методов контроля деталей механической части электроподвижного состава применением оптико-электронных средств : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.07 / Цаплин Алексей Евгеньевич. – Санкт-Петербург, 2011. – 116 с.

33. Шапиро Л. Компьютерное зрение : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Прикладная информатика (по областям)" / Л. Шапиро, Дж. Стокман ; пер с англ. А. А.

Богуславского под ред. С. М. Соколова. – 2-е изд. (электронное). – Москва : Бином. Лаб. знаний, 2013. – 752 с.

34. Ширмер Т. Оцифровка и реставрация фотографий, негативов и диапозитивов : сканирование и пересъемка цветных и черно-белых фотографий, негативов и диапозитивов, реставрация выцветших фотоматериалов и их ретуширование, оптимальный подбор оборудования и программ для обработки изображений : [перевод с немецкого] / Т. Ширмер, А. Хайн. – Санкт-Петербург : БХВ–Петербург, 2010. – 216 с.

35. Шрёдер Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер ; пер. с нем. Р. Е. Ильинского. – Москва : Техносфера, 2006. – 423 с.

36. Штарьков Ю.М. Универсальное кодирование. Теория и алгоритмы / Ю.М. Штарьков. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 279 с.

37. Bhunia A.K., Kumar G., Roy P.P., Balasubramanian R., Pal U. Text recognition in scene image and video frame using color channel selection / A.K. Bhunia, G. Kumar, P.P. Roy, R. Balasubramanian, U. // Pal Multimedia Tools and Applications – 2018. – Vol. 77, № 7. P. 8551-8578.

38. Hall C., Blaisten-Barojas E., Ji W. The metropolis monte carlo method with cuda enabled graphic processing units / C. Hall, E. Blaisten-Barojas, W. Ji // Journal of Computational Physics – 2014. – Vol. 258. P. 871-879.

39. Laiho M., Poikonen J., Paasio A. Object segmentation and tracking with asynchronous grayscale and binary wave operations on the mipa4k / M. Laiho, J. Poikonen, A. Paasio // 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications, CNNA – 2010. – P. 5430302.

40. Li C. Defocus Fuzzy Image Restoration / C. Li, G. Li, Y. Sun, D. Jiang, S. Xu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 466(1) – 2018. P. 12 – 46.

41. Nakazawa, T. Wafer map defect pattern classification and image retrieval using convolutional neural network / T. Nakazawa, D.V. Kulkarni // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2018. Т. 31. №2. P. 309-314.

42. Ren Y. Review of convolutional neural network optimization and training in image processing / Y. Ren, X. Cheng // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 10. Cep. "Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation" – 2019. P. 110–123.

43. Xue F. Recursive sure for image recovery via total variation minimization / F. Xue, J. Liu, X. Ai // Signal, Image and Video Processing. – 2019. T. 13. № 4. P. 795–803.