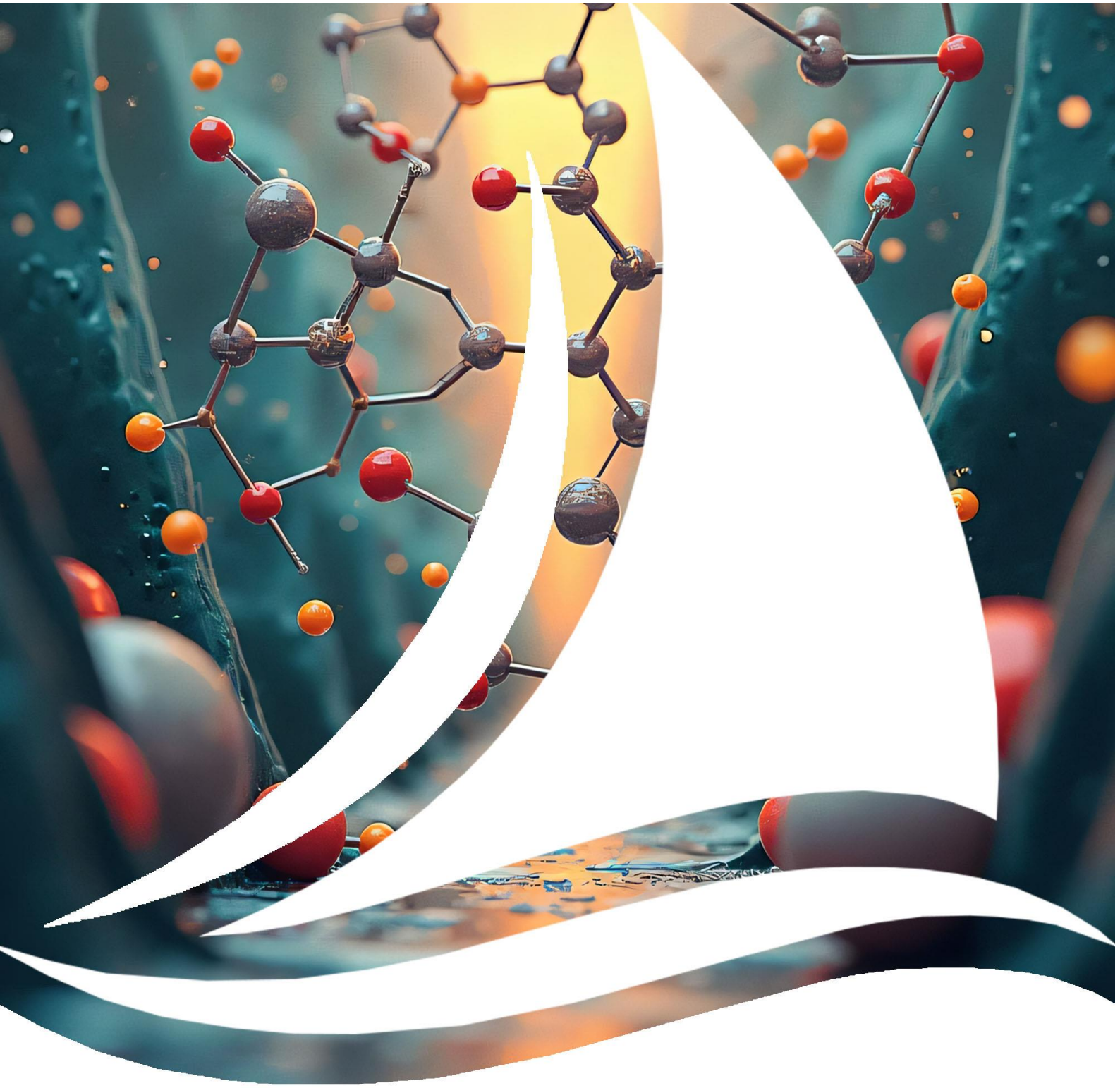

ФЛАГМАН НАУКИ 2025

№11(34) НОЯБРЬ 2025

ISSN 2949-1991

ГУМАНИТАРНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
"НАЦРАЗВИТИЕ"

№ 11(34) Ноябрь 2025

ФЛАГМАН НАУКИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025

ФЛАГМАН НАУКИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 1 раз в месяц

№ 11(34) Ноябрь 2025

ISSN 2949-1991
DOI 10.37539/2949-1991.2025.34.11.001

Учредитель:
ГУМАНИТАРНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ "НАЦРАЗВИТИЕ"
Санкт-Петербург

ISSN 2949-1991

Ф69 Флагман науки: научный журнал. - №11(34). СПб., Изд. ГНИИ "Нацразвитие", Ноябрь 2025. - 1080 с.

Международный мультидисциплинарный электронный научный журнал, публикует результаты фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, выполненных по различным наукам. В журнале обсуждаются вопросы и проблемы, направленные на развитие науки, образования, страны и общества в целом.

Рецензируемое издание. Коэффициент уровня издания - К. Рекомендовано к печати Ученым советом ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ». Зарегистрировано в Российской книжной палате за № 2949-1991.

Адрес: 197348, г.Санкт-Петербург, Коломяжский пр., д.18
Электронная почта редакции:
info@flagmannauki.ru
Контакты издателя и типографии:
тел. (812) 9052909
info@natsrazvitie.ru
сайт: natsrazvitie.ru

САЙТ ЖУРНАЛА:
https://flagmannauki.ru/

Текущий номер журнала:
https://flagmannauki.ru/page_nomer/
Подать статью в журнал:
https://flagmannauki.ru/#anketa
Архив журнала:
https://flagmannauki.ru/page_arhiv/

Редакционная коллегия журнала
Главный редактор журнала - Романов П.И.,
члены редколлегии: Бисалиев Р.В., Викторенкова С.В., Грязнов С. Е., Гусева Н. Г., Зеленецкий Н.М, Игнатьева М.Ю, Илюшин В.А., Королев В.А., Павлова А. Н., Павлов Л. А., Печенкин А. С., Поздеева Н. С., Розова Т. Н., Романова О. И., Романова Е.П., Санкин Л.А., Сингуринди Э.Э., Соловьев В.Д., Эльзессер Ю.Ф.

Выпускные данные:
Подписано к изданию с оригинал-макета 05.11.2025. Формат издания: 210x297мм (А4). Гарнитура Time New Roman. Усл.печ.л. 135,4. Объем данных 12 Мб. Заказ 202511(34). Сверстано в типографии Гуманитарного национального исследовательского института "Нацразвитие"

© ГНИИ "Нацразвитие"

Дормидошина Дарья Андреевна,
Технический директор, АО «ЦКБ «Дейтон»
Dormidoshina Daria A.**,**
Technical Director, JSC «CDO «Deyton»

Рубцов Юрий Васильевич,
Генеральный директор, АО «ЦКБ «Дейтон»
Rubtsov Yuriy V.**,**
General Director , JSC «CDO «Deyton»

ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ В АВТОМАТИЧЕСКОМ ОПТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
REVIEW AND ANALYSIS OF LIGHTING CONTROL METHODS IN AUTOMATIC OPTICAL QUALITY CONTROL OF ELECTRONIC PRODUCTS

Аннотация. В настоящей статье выполнен обзор и анализ методов управления освещением в автоматическом оптическом контроле качества изделий электронной техники, как системы, обеспечивающей обнаружения дефектов. Представлен обзор наиболее актуальных систем. Отмечено, что в основе управления всеми подобными системами лежит потребность в получении высококачественных изображений. Рассмотрены алгоритмы управления освещением с учетом особенностей функционирования алгоритмов обнаружения дефектов. На конкретных примерах рассмотрены методы формирования решений, используемых при проектировании различных типов управления освещением и их конструкций, а также методы настройки таких систем с применением методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных.

Abstract. This article provides a review and analysis of lighting control methods in automated optical quality control of electronic products as a system for defect detection. An overview of the most relevant systems is presented. It is noted that the need to obtain high-quality images underlies the control of all such systems. Lighting control algorithms are considered, taking into account the specific operating features of defect detection algorithms. Specific examples are used to examine methods for generating solutions used in the design of various types of lighting control systems and their structures, as well as methods for configuring such systems using machine learning and data mining.

Ключевые слова: Автоматический оптический контроль, компьютерное зрение, управление освещением, изделия электронной техники, машинное обучение.

Keywords: Automatic optical inspection, computer vision, lighting control, electronic products, machine learning.

Введение

Результаты работы автоматической оптической инспекции (АОИ) в значительной степени зависят от освещения проверяемого изделия электронной техники (ИЭТ), которое критически важно для получения высококачественных изображений, необходимых для выявления дефектов на поверхности изделий. В АОИ могут использоваться различные методы освещения, каждый из которых обладает своими преимуществами для различных задач контроля поверхности ИЭТ. Современные АОИ часто используют светодиодное освещение разных цветов (красный, зелёный, синий и белый) и углов наклона для оптимизации качества изображения и выявления дефектов.

Существенной проблемой при проведении инспекции поверхностей является неравномерно распределенное освещения, которое затрудняет поиск подходящего горизонтального порога для преобразования изображения в оттенках серого в двоичное изображение для отделения дефектов поверхности, таких как пятна и царапины от фона. В

данной работе представлены используемые эффективные методы компенсации проблемы неравномерно распределенного освещения, чтобы можно было эффективно использовать методы обработки изображений для обнаружения дефектов поверхности ИЭТ.

Традиционные методы, позволяющие АОИ лучше интерпретировать результаты, обычно фокусируются на постобработке изображений, такой как фильтрация шума, сглаживание, улучшение изображения, устранение размытости и т. д. Тем не менее, постобработка изображений не увеличивает присущую им информационную нагрузку, а качественное исходное изображение содержит больше информации. Поэтому такое изображения очень важны в АОИ, поскольку они облегчают дальнейший анализ изображения и экономят время на обработку улучшения, особенно для приложений АОИ, работающих в режиме реального времени.

Освещение очень важно для успеха любого процесса получения изображения, а в АОИ оно играет решающую роль с точки зрения качества изображения. Таким образом, управление интенсивностью света тесно связано с качеством изображения и применяется на этапах компьютерного зрения (КЗ).

Негативные действия окружающей среды

В мире было предпринято немало усилий для достижения высокого качества изображения. Контраст определяет различия в значениях интенсивности между исследуемым объектом и фоном [1]. Поэтому исследователями и разработчиками АОИ значительное внимание уделяется фону, который имеет уровни интенсивности, отличные от исследуемых ИЭТ, чтобы дефекты можно было различать при применении методов обработки изображений и извлечения их признаков.

Контраст и другие факторы, способствующие качеству изображения, также могут зависеть от условий освещения, поскольку камера не видит изделие ИЭТ; она видит свет, отраженный от него. Хорошее освещение может уменьшить тени, шум, отражение и увеличить контрастность изображения, тем самым сократив время обработки изображения и повысив их точность [2].

В КЗ АОИ избегают действия окружающего света, так как он изменяется с изменением условий окружающей среды, и это может повлиять на качество изображения и, следовательно, на алгоритм обнаружения. Поэтому в АОИ используются источники освещения с постоянным уровнем света [3]. Размер исследуемого изделия, цвет, особенности поверхности, геометрия, материал, условия инспекции и требования к АОИ – все это важные факторы, которые следует учитываются при выборе подходящего источника света.

Источники освещения

Светодиоды, флуоресцентные лампы и кварцевые галогенные лампы с оптоволокном обычно используются в качестве источников освещения для приложений КЗ. Более того, расположение источника освещения также играет важную роль, особенно при инспекции полированных и блестящих объектов (металлических частей и пайки), которые отражают свет с четким отражением. С другой стороны, матовые поверхности, такие как пластик, рассеивают свет в нескольких направлениях [4]. Поэтому позиционирование источника освещения также зависит от требований к проверяемым изделиям [2].

Барлет и др. в [5] использовали четыре флуоресцентные лампы и одну флуоресцентную кольцевую лампу для эффективной проверки изделий и избежание теней на изображении. Капсон и др. в [6] предложили многослойный метод цветного освещения для проверки дефектов на поверхностях изделий. Осветительная установка, которую они предложили, состояла из круглых красных и синих флуоресцентных ламп, сконструированных в полусферической конфигурации и направленных на изделия под разными углами, при этом синий и красный свет отражаются от поверхности, на которую каждый свет направлен. Отраженный свет будет иметь особую контурную геометрию в зависимости от качества поверхности изделия.

Многие недавно опубликованные статьи использовали те же техники с некоторыми или без изменений, как показано в таблице 3. Ву и др. в [7] использовали 3 цвета (красный, зеленый

и синий), сформированные в полусферическом массиве светодиодов. Красный, зеленый и синий свет излучается на плоские, наклонные и крутые поверхности соединений, которые отражаются на камеру, таким образом, что каждое состояние качества соединения будет иметь уникальное цветовое распределение на основе отражения света.

Цзен и др. в [8], [9] использовали кольцевые светодиоды с градиентом цвета для выделения элементов печатных плат (ПП), таких как маркировки и отверстия.

Направления цветового распределения

Направление цветового распределения каждого соединения также оценивается для определения типа дефекта. Однако эти исследования были рассмотрены как основа для АОИ и не применяли подход классификации дефектов. Несмотря на способность многослойного цветного освещения эффективно подчеркивать дефективные особенности соединений, эта АОИ требует сканирования и обработки трех изображений каждого соединения, что может значительно увеличить время вычисления.

Чиу и Пернг в [10] предложили однослойную установку цветного освещения, выбрав оптимальный угол падения, который может выполнять инспекцию, обрабатывая только одно изображение. Угол должен быть тщательно выбран, чтобы имитировать эффективность трехслойных цветных источников света. Тени на проверяемых изделиях исключаются, поэтому угол падения должен быть как можно меньше. В идеале он должен быть равен нулю; однако в этом случае свет должен быть помещен либо перед камерой, либо на бесконечном расстоянии от камеры, что в обоих случаях является нереалистичным. Поэтому методом проб и ошибок исследователи протестировали небольшой диапазон углов между 20 и 30 для получения высококачественных изображений для инспекции.

Лиу и Ю в [11] предложили специальную механическую конфигурацию и настройки освещения для инспекции дефектов поверхности с помощью ИК-фильтра. Поскольку в оптический ИК-фильтр не проникает преломленный инфракрасный свет, другая сторона его не может быть зафиксирована на изображении. Поэтому исследователи разработали механизм переворота, чтобы перевернуть образцы с обеих сторон. Многоуровневый инфракрасный светодиод был выбран в качестве системы освещения для данного исследования, поскольку инфракрасный луч не может пройти через ИК-фильтр, и таким образом природа отраженного света будет свидетельствовать о наличии обнаруженного дефекта. Угол для инфракрасных лучей был выбран так, чтобы использовались два слоя инфракрасного света. Первый слой испускает луч под углом 30, что предназначено для отражения перпендикулярного луча от крупных выявленных дефектов поверхности. Луч, наклоненный на 60^0, предназначен для отражения света от мелких дефектов поверхности перпендикулярно к камере. В случае, если дефект не обнаружен, свет будет рассеиваться так, что его не зафиксирует камера.

Рассмотрены исследования, в которых использованы нестандартные установки освещения и камер. Юсефан-Джази и др. в [12] использовали методы съёма изображения для инспекции сильно отражающих поверхностей, для которых необходимо применять определенные геометрические законы для измерения оптимальных длины и углов установки освещения и камер [13].

Ли и др. в [14] предложили установку для определения высоты пайки шариков в корпусах микросхем типа BGA (с шариковыми выводами). Они использовали стереоскопическую систему для захвата 3D-характеристик выводов шариков с помощью двух камер CCD, расположенных под двумя противоположными углами, и двух кольцевых светильников вокруг каждого объектива камеры, которые одновременно захватывают два 2D изображения. Из-за отражающей природы шариков освещение обеспечивает возможность генерирования признаков на шариках, которые затем используются для определения высоты. Эти признаки проявляются как светлые области на полученных изображениях. Этот метод сокращает время процесса извлечения признаков.

Для выполнения восстановления изображений и уменьшения размерности, переводя изображение в спектр частот и ослабляя определенные коэффициенты, которые располагаются в двух основных диапазонах, а именно, низкой и высокой частоты в основном

применяется дискретное косинусное преобразование (DCT) [15]. В большинстве приложений АОИ, поскольку варьирование освещения в основном находится в диапазоне низкой частоты (в верхнем левом углу спектра частот), определенное количество коэффициентов DCT в диапазоне низкой частоты отсекается, чтобы минимизировать вариации при различных условиях освещения, как показано на в [16].

Использование пороговой обработки

Локальные методы пороговой обработки превосходят глобальные при неравномерном освещении. С другой стороны, глобальная пороговая обработка считается гораздо более простой и требует меньше вычислительного времени. Для приложений по инспекции дефектов, поскольку настройки освещения хорошо контролируются и равномерны, предпочтительна глобальная пороговая обработка [17, 18]. Пороговая обработка Оцу считается одной из широко используемых техник глобальной пороговой обработки. Этот метод выбирает пороговое значение, которое максимизирует дисперсию между классами гистограммы [17, 19].

Цзян и др. в [20] предложили простые техники обработки изображений, основанные на пороговой обработке, сегментации и морфологических операциях для обнаружения трех типов дефектов соединений при пайке. Во-первых, для уменьшения сложности анализа выделения признаков фон удаляется с помощью простого порогового метода, чтобы отделить соединения при пайке от фона. Затем были выполнены операции сегментации и дилатации, чтобы выделить области соединений. Для определения нормальных или дефектных соединений припоем были выбраны два набора характеристик: девять бинарных характеристик, основанных на изображениях, и семь серых значений на основе признаков. Затем были изучены диаграмма Парето для этих признаков, чтобы выбрать лучшие признаки, которые могли бы различать нормальные типы дефектов. Наконец, для классификации дефектов по типу была применена классификация на основе правил с использованием определенных правил и порогов. В их исследовании было отмечено много преимуществ, таких как то, что их методология не требовала специального освещения или специального оборудования для захвата изображения ПЛК. Более того, их подход по удалению фона уменьшил вычислительное время на извлечение признаков.

Сие и др. в [21] получили образцы изображений соединений в пайках используя систему освещения с многоуровневым цветом, после чего изображение делилось на двенадцать подсегментов. Каждый дефект соответствует различным распределениям цветов и паттернам в одном или нескольких подсегментах. Чтобы выделить дефектные области, для трех подснимков (красного, зеленого и синего) каждого образца изображения был проведен процесс извлечения признаков, эти признаки описывают геометрическое и цветовое распределение выбранных областей, такие как площадь, постоянное соотношение и т.д. Для каждого подснимка было выбрано десять признаков (всего тридцать для трех подснимков). В их исследовании использовался улучшенный алгоритм Adaboost для выбора оптимального и минимального числа признаков, которые содержат как можно больше информации.

Adaboost – это алгоритм контролируемого машинного обучения (МО), который используется для классификации; однако он также может использоваться для выбора признаков, как в данном исследовании. После выбора с помощью Adaboost, выбранные признаки отправляются для их классификации в соответствии с рассматриваемыми дефектами. Сохранение вычислительного времени с использованием алгоритма Adaboost считается основным преимуществом этого исследования.

Использование форм признаков

Подобный подход также был рассмотрен Ву и Чжаном в [22]. В данном исследовании использовался источник освещения с многоуровневыми цветами для получения изображений, а соединения ИЭТ также были разделены на несколько подсистем, которые называются формами признаков. Рассматривалось следующие типы дефектов в этом исследовании: избыток припоя, нехватка припоя, смещение. Каждый тип дефекта соответствует различным паттернам и распределению цветов. Цифровые характеристики затем использовались для

оценки качества пайки, анализируя каждую составляющую изображения (красный, зеленый и синий). Эти цифровые характеристики выражаются через цвет, площадь, центр массы и непрерывные пиксели каждого изображения. Затем были рассмотрены логические характеристики, так что дефектные фрагменты изображения, связанные с определенным типом дефекта, отмечаются логикой 1, а недефектные области – логикой 0. Наконец, дефекты классифицируются согласно определенным правилам и порогам, где достигнута общая степень распознавания 98,6%. Однако многие пороги должны быть тщательно определены для достижения удовлетворительной классификации. Это приводит к тому, что оператору приходится тратить много времени на выбор соответствующих порогов.

Похожие настройки освещения были использованы Ву в и др. в [23] для проверки дефектов в двух областях: корпус ИЭТ и паяльная площадка. Из полученного изображения для каждой области были извлечены семь цветовых признаков и один признак сопоставления шаблонов. Цветовые признаки включали среднее значение интенсивности и процент подсветки, в то время как подход сопоставления шаблонов использовал эталонный шаблон для сравнения с образцами изображений. Было установлено, что эти признаки не независимы, и в результате их учет увеличивает необходимое время вычислений для МО. Методы выбора признаков, основанные на получении информации, использовались для игнорирования избыточных признаков и сохранения важных. Выбранные признаки затем были переданы в алгоритм классификации. Главное преимущество этого метода в том, что были выбраны только те признаки, которые могут способствовать качеству процесса классификации, что может сократить время вычислений.

Генетические алгоритмы

Тот же самый подход также рассматривался Ву и др. в [24], однако, в этом исследовании для процесса выбора признаков использовался генетический алгоритм. Сонг (Song) и др. в [25] также использовали генетический алгоритм для выбора оптимизированных признаков для инспекции дефектов пайки ИЭТ. В их подходе также использовалась система освещения с многоуровневыми цветами для получения образцов изображений. Области паяльного соединения ИЭТ были разделены на несколько фрагментов для извлечения фрагментальных признаков для 10 типов дефектов. Четыре типа цветовых признаков также рассматривались для каждого фрагмента.

Генетические алгоритмы использовались для выбора оптимального количества региональных характеристик. Экспериментальные результаты в этом исследовании показали, что выбор девяти фрагментов привел к лучшим результатам распознавания. Выбранные характеристики затем были отправлены в алгоритм классификации для определения типа обнаруженного дефекта.

Ву и Чжан в [26] предложили аналогичный подход для инспекции семи типов дефектов соединений ИЭТ на ПП. Та же самая система цветного освещения, которая использовалась в предыдущем исследовании, также применялась в этом исследовании, чтобы получить изображения. Характеристики региона, оценки и градиенты цвета были извлечены из полученных изображений. Характеристики региона были определены путем разделения полученных изображений на области, где дефект будет в основном возникать. Оценочные характеристики могут быть наблюдаемы путём измерения площади, центра тяжести и распределения дефекта в проверяемой области. Наконец, градиенты цвета описывают последовательность цвета (шаблон) с одной стороны на другую в определенном регионе, это играет важную роль в предлагаемом методе инспекции соединений. Согласно значениям, полученным из характеристик оценки и цветовой последовательности, полученной из характеристик градиентов цвета, простые булевы правила и условные операторы используются для классификации дефектов на семь типов дефектов и еще один класс, представляющий класс образцовой пайки. Предложенный метод достиг общего уровня обнаружения 97,7% с скоростью обнаружения 11 секунд на одну ПП. Однако, поскольку для классификации использовались булевы правила, их алгоритм необходимо перепрограммировать, если необходимо рассмотреть новый тип дефекта.

Мар и др [27] использовали несколько методов улучшения изображений и извлечения признаков для обнаружения дефектов соединений пайки, таких как недостаток и избыток припоя. Преобразование Хафа сначала использовалось для определения положения ПП на изображении, чтобы ПП не нужно было помещать на прецизионный X-Y стол. В этом исследовании была использована DCT для нормализации изображений, чтобы они выглядели стабильными при различных условиях освещения, что выполняется на всем изображении для получения всех частотных составляющих изображения и удаления коэффициентов низкочастотных диапазонов.

Структурированное освещение

Лай и др. в [28] также использовали структурированное освещение и алгоритм робустного анализа RPCA (Robust Principle Component Analysis) для обнаружения дефектов поляризаторов. Процедура начинается с разложения набора качественных изображений соединений ИЭТ и тестовых образцов изображений на составляющие и ошибки с использованием RPCA.

Ко и Чо в [29] предложили комбинированный подход трехцветного кругового освещения для инспекции дефектов соединений на ПП. Каждое проверяемое изображение делится на три подизображения, и комбинированный подход сетей (LVQ) используется для каждого подизображения. Цель этого подхода состоит в снижении нагрузки на классификатор LVQ при классификации сложных дефектов соединений. Входные данные каждого классификатора представляют собой цветовые интенсивности каждого из трехцветных паттернов.

Большинство исследований сосредоточены на том, как компенсировать яркость изображения на основе метода обработки изображения, когда изображение получено при неравномерном освещении и спроектировать определенный источник освещения для достижения оптимальных эффектов освещения в соответствии с различными дефектами, которые необходимо обнаружить. Что касается контроля интенсивности освещения, было выполнено недостаточно работ, особенно по автоматическому контролю интенсивности освещения. Среди немногих работ была предложена стратегия управления с замкнутым контуром для КЗ и получения высококачественных исходных изображений. Были предложены методы, которые оптимизируют положение и оптические параметры осветительного прибора и камеры, с акцентом на управление интенсивностью освещения и предотвращение бликов. На основе был разработан нечеткий контроллер для поддержания уровня освещения, подходящего для роботизированных манипуляций и оправления освещением в динамических средах. Кроме того, был предложен метод автоматического управления яркостью, который целесообразно использовать в условиях низкой освещенности. Он применяет коэффициент контрастности между приемником изображения и фоном в качестве обратной связи контроллера для оценки значения компенсации яркости. Выполняется проектирование индекса оценки качества изображения, связанного с освещённостью, для представления качества яркости изображения при управлении или моделировании.

В методах управления освещенностью существуют компромиссы между вычислительной сложностью и производительностью в реальном времени. Кроме того, такие методы управления интенсивностью освещения по определённым причинам не учитывали информацию о расстоянии камеры до объекта наблюдения. В нашей работе мы исследуем проблему автоматического управления интенсивностью освещения при движении манипулятора АОИ с камерами и светодиодным источником света, установленными на рабочем органе манипулятора.

Заключение

Несмотря на преимущества АОИ, многие ограничения все еще существуют для этих систем.

В АОИ избегают изменения освещения и переменных условий, так как это приводит к увеличению шума и ложных срабатываний. В некоторых приложениях используют индивидуальное освещение для лучшего описания дефектов, например, используя

многоуровневое освещение для инспекции соединений на ПП, чтобы уловить 3D-особенности инспектируемого ИЭТ.

Вариации в освещении являются одной из основных проблем для АОИ, поскольку настройки освещения должны оставаться постоянными или контролируемыми, чтобы избежать нежелательных теней или шумов света, которые могут быть спутаны с дефектами.

Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку устройств реального времени, которые не подвержены влиянию эксплуатационных или производственных условий. Углы обзора систем захвата изображений чаще всего ограничены определённой заранее заданной 2D плоскостью инспектируемого ИЭТ. Исследования и разработки в этом направлении должны устранить такие ограничения.

Список литературы:

1. T. Brosnan and D.-W. Sun «Improving quality inspection of food products by computer vision – A review,» // J. Food Eng., 2004, vol. 61, no. 1, pp. 3–16.

2. M. Teena, A. Manickavasagan, A. Mothershaw, S. El Hadi and D. S. Jayas «Potential of machine vision techniques for detecting fecal and microbial contamination of food products: A review» // Food Bioprocess Technol., 2013, vol. 6, no. 7, pp. 1621–1634.

3. V. Chauhan and B. Surgenor «Fault detection and classification in automated assembly machines using machine vision» // Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2017, vol. 90, nos. 9–12, pp. 2491–2512.

4. C. Vedang, F. Heshan and S. Brian «Effect of illumination techniques on machine vision inspection for automated assembly machines» // Proc. Can. Soc. Mech. Eng. Int. Congr., Toronto, ON, Canada, Jun. 2014, pp. 1–6.

5. S. L. Bartlett, P. J. Besl, C. L. Cole, R. Jain, D. Mukherjee and K. D. Skifstad «Automatic solder joint inspection» // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 1988, vol. PAMI-10, no. 1, pp. 31–43.

6. D. W. Capson and S.-K. Eng «A tiered-color illumination approach for machine inspection of solder joints» // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 1988, vol. PAMI-10, no. 3, pp. 387–393.

7. H. Wu, X. Zhang, H. Xie, Y. Kuang and G. Ouyang «Classification of solder joint using feature selection based on Bayes and support vector machine» // IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol., 2013, vol. 3, no. 3, pp. 516–522.

8. Z. Zeng, L. Z. Ma and Z. Y. Zheng «Automated extraction of PCB components based on specularity using layered illumination» // J. Intell. Manuf., 2011, vol. 22, no. 6, pp. 919–932.

9. Z. Zeng, L. Ma and M. Suwa «Algorithm of locating PCB components based on colour distribution of solder joints» // Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2011, vol. 53, nos. 5–8, pp. 601–614.

10. S.-N. Chiu and M.-H. Perng, «Reflection-area-based feature descriptor for solder joint inspection» // Mach. Vis. Appl., 2007, vol. 18, no. 2, pp. 95–106.

11. Y. Liu and F. Yu «Automatic inspection system of surface defects on optical IR-CUT filter based on machine vision» // Opt. Lasers Eng., 2014, vol. 55, pp. 243–257.

12. A. Yousefian-Jazi, J.-H. Ryu, S. Yoon and J. J. Liu «Decision support in machine vision system for monitoring of TFT-LCD glass substrates manufacturing» // J. Process Control, 2014, vol. 24, no. 6, pp. 1015–1023.

13. G. Rosati, G. Boschetti, A. Biondi and A. Rossi «Real-time defect detection on highly reflective curved surfaces» // Opt. Lasers Eng., 2009, vol. 47, nos. 3–4, pp. 379–384.

14. J. Li, B. L. Bennett, L. J. Karam and J. S. Pettinato «Stereo vision based automated solder ball height and substrate coplanarity inspection» // IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., 2016, vol. 13, no. 2, pp. 757–771.

15. H.-D. Lin and D.-C. Ho «Detection of pinhole defects on chips and wafers using DCT enhancement in computer vision systems» // Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2007, vol. 34, nos. 5–6, pp. 567–583.

16. N. S. S. Mar, P. K. D. V. Yarlagadda and C. Fookes «Design and development of automatic visual inspection system for PCB manufacturing» // Robot. Comput.-Integr. Manuf., 2011, vol. 27, no. 5, pp. 949–962.

17. H.-F. Ng «Automatic thresholding for defect detection» // Pattern Recognit. Lett., 2006, vol. 27, no. 14, pp. 1644–1649.

18. F. Yan, H. Zhang and C. R. Kube «A multistage adaptive thresholding method» // Pattern Recognit. Lett., 2005, vol. 26, no. 8, pp. 1183–1191.

19. N. Otsu «A threshold selection method from gray-level histograms» // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC-9, 1979, no. 1, pp. 62–66.

20. B. C. Jiang, C. C. Wang and Y. N. Hsu «Machine vision and background remover-based approach for PCB solder joints inspection» // Int. J. Prod. Res., 2007, vol. 45, no. 2, pp. 451–464.

21. X. Hongwei, Z. Xianmin, K. Yongcong and O. Gaofei «Solder joint inspection method for chip component using improved AdaBoost and decision tree» // IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol., 2011, vol. 1, no. 12, pp. 2018–2027.

22. F. Wu and X. Zhang «Feature-extraction-based inspection algorithm for IC solder joints» // IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol., 2011, vol. 1, no. 5, pp. 689–694.

23. H. Wu, X. Zhang, H. Xie, Y. Kuang and G. Ouyang «Classification of solder joint using feature selection based on Bayes and support vector machine» // IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol., 2013, vol. 3, no. 3, pp. 516–522.

24. W. Hao, Z. Xianmin, K. Yongcong, O. Gaofei and X. Hongwei «Solder joint inspection based on neural network combined with genetic algorithm» // Optik, 2013, vol. 124, no. 20, pp. 4110–4116.

25. J.-D. Song, Y.-G. Kim and T.-H. Park «SMT defect classification by feature extraction region optimization and machine learning» // Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2019, vol. 101, nos. 5–8, pp. 1303–1313.

26. F. Wu and X. Zhang «An inspection and classification method for chip solder joints using color grads and Boolean rules» // Robot. Comput.-Integr. Manuf., 2014, vol. 30, no. 5, pp. 517–526.

27. N. S. S. Mar, C. Fookes and P. K. Yarlagadda «Design of automatic vision-based inspection system for solder joint segmentation» // J. Achievements Mater. Manuf. Eng., 2009, vol. 34, no. 2, pp. 145–151.

28. W.-W. Lai, X.-X. Zeng, J. He and Y.-L. Deng «Aesthetic defect characterization of a polymeric polarizer via structured light illumination» // Polym. Test., 2016, vol. 53, pp. 51–57.

29. K. W. Ko and H. S. Cho «Solder joints inspection using a neural net- work and fuzzy rule-based classification method» // IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf., 2000, vol. 23, no. 2, pp. 93–103.