

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 ПОРОГОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В АВТОМАТИЧЕСКОМ ОПТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. Данная статья посвящена обзору и анализу методов пороговой обработки изображений, применяемых в автоматическом оптическом контроле качества изделий электронной техники. Рассматриваются как глобальные, так и локальные методы пороговой обработки, включая широко используемый метод Оцу и адаптивные подходы. Особое внимание уделяется применению этих методов для выявления различных типов дефектов, таких как царапины, частицы, пустоты и дефекты маркировки. Анализируются преимущества и ограничения пороговой обработки, включая зависимость от контраста и условий освещения. Статья также затрагивает перспективные направления развития методов, такие как использование анализа краев и коррекция динамического диапазона. Представленные методы могут служить эффективным инструментом предварительной обработки изображений в системах автоматизированного контроля.

Abstract. This paper reviews and analyzes image thresholding methods used in automatic optical quality control of electronic products. Both global and local thresholding methods are considered, including the widely used Otsu method and adaptive approaches. Particular attention is paid to the application of these methods to detect various types of defects, such as scratches, particles, voids, and marking defects. The advantages and limitations of thresholding are analyzed, including dependence on contrast and lighting conditions. The article also touches on promising areas of method development, such as the use of edge analysis and dynamic range correction. The presented methods can serve as an effective tool for image preprocessing in automated inspection systems.

Ключевые слова: Автоматический оптический контроль, алгоритмы обработки изображений, изделия электронной техники, извлечение признаков, машинное обучение, компьютерное зрение.

Keywords: Automatic optical inspection, image processing algorithms, electronic products, feature extraction, machine learning, computer vision.

Введение

Технология разработки и изготовления изделий электронной техники (ИЭТ) постоянно совершенствуются. Предприятия радиоэлектронной промышленности стремятся получить воспроизводимый и надежный производственный процесс. Однако производство не всегда идеально и ИЭТ все еще изготавливаются с дефектами. Некоторые из этих дефектов не позволяют применять ИЭТ в радиоэлектронной аппаратуре, поскольку любое ИЭТ, поставленное с таким дефектом, приводит к отказу или иным образом становится неработоспособным.



Отсутствие дефектов обеспечивает основу, для которой качество имеет решающее значение для надлежащей работы ИЭТ. По мере того, как технологии изготовления ИЭТ уменьшаются до нанометрового масштаба, ИЭТ становятся все более чувствительными к минимальным поверхностным или объёмным дефектам.

Когда ИЭТ содержит дефект, полезно знать его координаты и размеры. Кроме того, при изготовлении ИЭТ параметры обнаружения дефектов могут быть изменены для отбора ИЭТ в соответствие с категориями качества.

ИЭТ содержат дефекты поверхности, такие как:

- царапины и сколы на поверхностях, вызванные контактом с производственным оборудованием или инородными частицами. Подобные дефекты нарушают функционирование ИЭТ;
- ямки – крошечные недостающие пространства на поверхности, в которых могут скапливаться загрязнения;
- частицы – загрязняющие вещества от оборудования, человеческого контакта или остатков химических веществ.

Объёмные дефекты печатных плат (ПП):

- пустые пространства или зазоры внутри ИЭТ создают проблемные места;
- несоосность между элементами ИЭТ препятствует прохождению сигналов;
- примеси – инородные элементы или молекулы, отрицательно влияющие на проводимость.

Дефекты ИЭТ определены как основные проблемы качества, они снижают выход годных изделий. Отрицательно влияют на характеристики ИЭТ, могут вызывать снижение производительности и надежности устройств.

Идентификация дефектов ИЭТ в основном ранее основывалась на ручном визуальном осмотре, методе с высокой стоимостью, затратами времени и низкой эффективности для массового производства. В настоящее время обнаружение дефектов в основном основывается на измерениях и испытаниях. Этот метод может определять только электрические характеристики, а также может вызвать механические повреждения.

Поэтому разработка неразрушающей, недорогой и быстрой системы обнаружения и определения дефектов на ИЭТ является задачей, на которую было обращено внимание многих исследователей.

Для этого применяются многообразные методы на различных этапах обнаружения и определения дефектов на ИЭТ. Одними из них являются методы пороговой обработки изображений в автоматическом оптическом контроле качества ИЭТ (АОИ), обзор и анализ результатов исследований которых представлен в настоящей статье.

Автоматизированная оптическая инспекция изделий на этапе пороговой обработки изображений изделий электронной техники

Порог – это признак (свойство), который помогает разделить искомый сигнал на классы. Операция пороговой обработки заключается в сопоставлении значения яркости каждого пикселя изображения с заданным значением порога.

Методы пороговой обработки изображений в основном эффективны, когда контраст между различными признаками хорошо установлен. Пороговая обработка считается методом сегментации, который делит изображение на две области: область частиц (например, признак или компонент) и область фона с помощью значения порогового уровня серого [1]. Таким образом, все значения пикселей уровня серого, принадлежащие к области частиц (выше порогового значения), устанавливаются в логическое 1, а остальные пиксели, представляющие фон (ниже порогового значения), устанавливаются в 0; другими словами, изображение преобразуется в бинарное. Значение порога можно выбрать автоматически с помощью



гистограммы [2]. Ось X гистограммы представляет собой значения серого масштаба изображения (в случае 8-битного изображения от 0 до 255 значений), а ось Y представляет количество пикселей для каждого значения интенсивности.

Выбор правильного порогового значения считается ключевым фактором в процессе пороговой обработки. В общем, методы пороговой обработки можно разделить на две категории: глобальная и локальная. При глобальной пороговой обработке выбирается одно пороговое значение из гистограммы всего изображения. Локальная пороговая обработка (также называемая адаптивной пороговой обработкой) использует локализованную информацию о градациях серого для выбора нескольких пороговых значений.

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 [2, 3].

Пороговая обработка Оцу считается одной из широко используемых техник глобальной пороговой обработки. Этот метод выбирает пороговое значение, которое максимизирует дисперсию между классами гистограммы [2, 4]. Методы порогового значения Оцу предпочтительнее использовать, когда характеристика дефекта имеет высокий контраст по сравнению с фоном. Примеры этих дефектов – отсутствие ИЭТ на ПП и отсутствие пайки на ней.

Пернг и др. в [5, 6] и Куо и др. в [7] использовали пороговое значение Оцу для извлечения характеристик дефектов в светодиодах. В [6] авторы обозначили результирующее количество пикселей ярких областей после применения порогового значения как «а». Было определено пороговое значение k_1 , такое что, если «а» меньше k_1 , это означает, что отсутствует ИЭТ на плате, а изображение классифицируется как дефект отсутствующего ИЭТ. В противном случае, если «а» больше k_1 , это означает, что изображение должно быть дополнительно проанализировано на предмет других дефектов (неправильная ориентация, обратная полярность, поверхностные дефекты). Похожее пороговое значение k_2 было определено для классификации изображений, содержащих другие дефекты. Подобные методы также применялись в [5, 7].

Однако, в [7] для определения пороговых значений также использовалось сопоставление шаблонов с помощью максимальных коэффициентов корреляции вместе с пороговой обработкой Оцу.

Ли и др. в [8] использовали пороговую обработку для выделения признаков полос в TFT-LCD (устройство отображения – Thin Film Transistor – Liquid Crystal Display), что может указывать на наличие дефекта Мура (неравномерность яркости или цвета, которая проявляется в виде пятен или полос на изображении). Ширина, соотношение полос, кривизна полосы и размер полосы были оценены из результирующего бинарного изображения и использованы как входные данные для классификации в нейронной сети.

Нох и др. в [9] использовали технику адаптивной пороговой обработки для исследования шести типов дефектов поляризующих пленок в TFT-LCD. Предложенный подход определяет тип дефекта через анализ изображения, используя различные характеристики, такие как геометрические параметры и описатель формы с учетом распределения интенсивности. Для классификации дефектов использовались различные алгоритмы на основе правил в соответствии с такими извлеченными характеристиками, как минимальный ограничивающий прямоугольник, фактическая область дефекта и дескриптор, основанный на области. Предложенный подход достиг очень высоких значений точности и полноты в определении дефектов. Однако значения полноты и точности для результатов классификации были значительно низкими.



Ян и др. в [10] объединили адаптивную пороговую обработку с техникой частотной фильтрации под названием несубсемплированное контурное преобразование NSCT (Non-subsampled Contourlet Transform), чтобы исследовать поверхностные дефекты пленочных конденсаторов. NSCT была разработана на основе теории вейвлет-преобразований как метод многомасштабного геометрического анализа и была выбрана из-за своей способности описывать контуры краев дефектов пленочных конденсаторов.

Термин вейвлет (wavelet) в переводе с английского означает «маленькая волна». Вейвлеты – это обобщенное название математических функций определенной формы, которые локальны во времени и по частоте, и в которых все функции получаются из одной базовой, изменяя её (сдвигая, растягивая). Вейвлет-преобразование – интегральное преобразование, которое представляет собой свертку вейвлет-функции с сигналом. Вейвлет-преобразование переводит сигнал из временного представления в частотно-временное.

Адаптивное пороговое значение с помощью гауссовой функции ядра (Gaussian kernel function) сначала применяется для отделения переднего плана от фона, что позволяет выделить дефектные характеристики. Дефекты затем классифицируются в соответствии с частотным распределением образцов изображений на дефектные и с отсутствием дефектов. Такой подход достиг общей точности 98,7% со временем инспекции 0,1 секунды. Основным преимуществом этого исследования является большое количество реальных образцов, использованных в тестировании алгоритма. В общей сложности использовались 10000 конденсаторов, включая 1000 дефектных. Это подтверждает их результаты и доказывает эффективность предложенного метода.

Клвак и др. в [11] предложили простой, но эффективный алгоритм для проверки дефектов в светодиодных OLED (Organic Light-Emitting Diode) панелях. Сначала фон образцов изображений генерируется с использованием медианного фильтра. Затем сгенерированные изображения вычитаются из оригинальных, чтобы выделить шум, представляющий дефекты.

Метод Оцу использовался для бинаризации изображения, так что черные пиксели бинаризованного изображения представляют собой дефектные пиксели. В конечном итоге, значение признака было сгенерировано в соответствии с числом пикселей, и были установлены определенные контрольные пределы для классификации образцов изображений как дефектных или не дефектных. Предложенный метод был сравнен с другими алгоритмами, такими как DCT (Discrete Cosine Transform – дискретное косинусное преобразование) и DWT (Discrete Wavelet Transform – дискретное вейвлет преобразование), и было доказано, что предложенный метод значительно превосходит другие алгоритмы по времени вычислений. Однако по точности DWT и DCT превзошли предложенный метод, особенно при среднем и высоком уровне шума.

Цзян и др. в [12] исследовали дефекты на ПП. Используя выбранное значение порога, было получено бинарное изображение и серые уровни значений для каждой дефектной области. Из-за недостатка предоставленных образцов данных в их исследовании была применена техника бутстрэп-выборки (bootstrap – метод для оценки стандартных отклонений и нахождения доверительных интервалов статистических функционалов) для генерации большего количества образцов с дефектными признаками на основе их значений серого уровня. Четыре типа признаков, связанных со значениями серого уровня, были извлечены из сгенерированных образцов: среднее значение выборки, стандартное отклонение, среднее абсолютное отклонение и асимметрия. Эти признаки были отправлены в алгоритм классификации для определения типа дефекта. Однако для использования бутстрэп-выборки освещение должно быть хорошо контролируемым. Если используется неравномерный источник освещения, то значения серого, полученные из образцов дефектных изображений, не будут соответствовать необходимой величине. Это повлияет на анализ и классификацию дефектов.



Цзян и др. в [13] предложили подход, основанный на теории серого реляционного анализа для инспекции маркировки интегральных схем (ИС). Основная идея серого реляционного анализа заключается в схеме ранжирования, которая упорядочивает серую реляцию среди нескольких методов. Были реализованы методы обработки изображений для применения теории серого реляционного анализа. Сначала было применено вращение изображения, чтобы убедиться, что ИС находится в правильном положении для идентификации символов маркировки. Затем были применены морфологические операции для удаления шума и сегментации символов. Наконец, было применено пороговое значение, чтобы преобразовать серое изображение в бинарное с целью минимизации объема данных. Ключевые признаки были извлечены с помощью предыдущих процессов: периметр, диаметр, для определения типа проблемы, возникающей в маркировке, такой как ошибочные символы. В сравнении с традиционными методами, такими как евклидово расстояние, коэффициент корреляции, в предложенном подходе есть три преимущества: 1) не требуется большое количество данных; 2) не требуется специфическое статистическое распределение данных; и 3) нет требований к независимости рассматриваемых факторов. Более того, предложенный подход достиг уровня идентификации дефектов – 97,5%. Однако это исследование не включало распознавание для многотипных, многослойных и различных угловых нанесений маркировки ИС. Также они не включали товарные знаки и знаки препинания в процесс распознавания маркировки ИС. Кроме того, предложенный подход не интегрировал программное и аппаратное обеспечение в единую автоматическую систему проверки.

Нагараджан и др. в [14] предложили аналогичное исследование для ошибок маркировки ИС, таких как неразборчивые символы, отсутствующие символы и печать вверх ногами. Для распознавания символов было применено четыре метода извлечения признаков: профиль проекции, момент, разбиение на зоны (то же самое, что и сегментация) и контурный профиль. После извлечения признаков с помощью упомянутых четырех методов, эти признаки отправляются в нейронную сеть для классификации в соответствии с тремя рассматриваемыми типами ошибок. Их подход достиг 100% точности классификации. Однако предложенный подход не точно выявляет дефекты маркировки, когда ИС размещаются под углами поворота [15]. Кроме того, методы извлечения признаков, рассмотренные в этом исследовании, требуют значительного времени, что занимает от 1,844 до 2,093 секунд для одной задачи проверки.

Саид и др. в [16] предложили исследование для проверки не влагонепроницаемых соединений припайки в соединениях процессоров в корпусах BGA (Ball Grid Array – с шариковыми выводами). Изображения в этом исследовании были получены с использованием рентгеновской и оптической систем инспекции. Подходы к пороговой обработке и сегментации проводились автоматически для поиска областей соединений пайки с минимальным влиянием помех при освещении. Этот автоматизированный процесс может выполняться с помощью статистического моделирования, используя смесь гауссовских распределений для нахождения оптимального порогового значения. Центры соединений пайки затем определяются, и математическая модель оценивается для проверки степени выравнивания центра каждого соединения относительно соединений. Использовался определенный порог для классификации припоев как дефектных и не дефектных в зависимости от степени выравнивания. Проведенная оценка производительности и полученная статистика показали, что предложенный алгоритм обеспечивает уровень обнаружения 95,8%. Несмотря на эффективность этого метода в условиях неравномерного освещения, игнорирование проблем неравномерного распределения яркости может привести к проблемам чрезмерной и недостаточной сегментации [17].

Похожее исследование [18] также было проведено для обнаружения полостей в паяных соединениях в виде шариковых. Полости определяются как каверны, образующиеся внутри



паяного шарика из-за количества газа, которое захватывается во время теплового потока. Главной задачей, с которой столкнулось это исследование, является создание алгоритма, способного различать полости.

Другой задачей является избегание учета форм, похожих на полости, которые находятся в области паяного шарика, что может увеличить уровень ложных срабатываний. Как и в предыдущем исследовании, образцы изображений были получены с использованием рентгеновской системы АОИ.

Шаблонное соответствие было впервые применено для выбора идеального шаблона, который может быть использован для идентификации других областей шариков припоя. Чтобы исключить вывода из обнаружения, в исследовании [18] была разработана методика сегментации вывода и их локализации. Затем пустоты были расположены и помечены с использованием определенных мер и характеристик, таких как уровни серого, площадь и фактор компактности, и были оценены определенные пороговые значения, основанные на этих критериях для выполнения процесса классификации. Наконец, чтобы удалить любые обнаруженные фантомные пустоты, которые не были устранены предыдущими операциями из-за схожести с реальными пустотами, был введен ограничительный критерий круговой формы, и он был количественно оценен с использованием фактора компактности и соотношения основных осей. Однако предложенный метод не показал решения, если реальные пустоты на окончательной проверке не имели круглую форму (например, неправильную или какую-либо сложную форму). Другое исследование, проведенное Ван Вейнхузенем, также направлено на исследование пустот в шариках припоя; однако для процесса классификации дефектов использовалась модель глубокого обучения.

Лу и др. в [19] создали систему оптической инспекции для измерения деформаций ЖК-экранов для смартфонов и для определения позиции с максимальной деформацией. Система состояла из CCD (Charge Couple Device – аналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных фотодиодов, выполненная на основе кремния, использующая технологию ПЗС – приборов с зарядовой связью), зеркала, настроенного под определенным углом, и прецизионной пластины, заполненной отверстиями одинакового размера. Если имеется деформация, то изображение отверстий, полученное с помощью наклонного зеркала, будет выглядеть неравномерно. В противном случае, если деформация отсутствует, отверстия будут выглядеть неповрежденными. Для удаления отверстий на краях изображения и восстановления формы других отверстий использовалась морфологическая операция с применением пороговой обработки. Был установлен определенный порог, так что если размеры деформированных отверстий превосходят этот порог, то изделие имеет дефект. Однако не было обсуждения точности предложенного алгоритма.

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 типы дефектов. Наконец, для классификации дефектов по типу была применена классификация на основе правил с использованием определенных правил и порогов. В исследовании было отмечено много преимуществ, например, данная методология не требовала специального освещения или



специального оборудования для захвата изображения. Более того, подход по удалению фона уменьшил вычислительное время на извлечение признаков.

Нэкагаку и др. в [21] предложили систему для распознавания дефектов полупроводниковых пластин, используя методы пороговой обработки и сегментации. Изображения были собраны и замечены различные дефекты. Отверстия и узоры дефектов были определены с использованием методов пороговой обработки путем расчета среднего значения пикселей в полученном бинарном изображении. Алгоритм для выявления узоров дефектов выбирался в зависимости от его плотности. Пороговая обработка использовалась для выявления плотных узоров, в то время как сегментация с помощью бинаризации и обнаружения краев использовалась для выявления редких узоров. В исследовании также была классифицирована информация о дефектах по степени их серьезности на критические и некритические. Однако алгоритм классификации не был объяснен. Точность распознавания узоров дефектов в этом исследовании составила 98,8%, в то время как точность оценки дефектов в целом составила 95,6%. В аналогичном исследовании, проведенном теми же авторами в [22], была использована техника сопоставления шаблонов для анализа дефектов. Однако данное исследование привело к незначительному улучшению точности, что составило 98,9%.

Ограничения и будущее развитие

Методы пороговой обработки изображений наиболее эффективны, когда контраст между дефектами и фоном имеет высокое значение. Кроме того, изображение дефекта должно быть существенно двумерным. Все, что поступает для обработки – лишь очертание или силуэт дефекта. По такой информации трудно судить о его форме или пространственном положении.

Необходимо выделение тех особенностей изображения, которые помогают локализовать участки, где можно обнаружить дефект. Вполне очевидно, что зашумленность интенсивности ограничивает возможность выделить информацию о краях дефектов. Обнаруживается противоречие между чувствительностью и точностью, и формируется вывод, что короткие края должны обладать большей контрастностью, чем длинные, чтобы их можно было распознать. Выделение краев можно рассматривать как перспективу к пороговой обработке, поскольку края можно использовать для разбиения изображений на области, соответствующие различным фрагментам изображений.

Поскольку исследуемое изображение подвергается воздействию шума, на нем допускается некоторый разброс значений яркости. Исследователями прорабатываются несколько аналитических подходов к пороговому ограничению по яркости. Одним из них является проработка установления порога на таком уровне, при котором общая сумма элементов с подпороговой яркостью согласована с априорными вероятностями этих значений яркости.

Еще один способ совершенствования пороговой обработки изображений – коррекция динамического диапазона интенсивностей элементов изображения. Известно, что при недостаточном освещении формируются изображения с ограниченным динамическим диапазоном. Поэтому развитие метода коррекции динамического диапазона в АОИ очень актуально, поскольку система должна работать с различными изделиями, интенсивность освещения элементов которых может быть не совсем достаточная.

Заключение

Пороговая обработка изображений в АОИ является эффективным методом для обнаружения дефектов, который широко используется во многих АОИ для обнаружения дефектов на фоне и на основе их значений интенсивности.

Бинарная пороговая обработка преобразует изображение в бинарное представление, где пиксели выше определенного порога интенсивности считаются частью дефекта, а пиксели ниже этого значения считаются фоном.



Адаптивная пороговая обработка изображений с использованием методов Оцу или методов Ниблака может использоваться для обработки различных условий освещения или изменений фона.

Глобальное пороговое значение применяется к одному пороговому значению для всего изображения. Этот метод работает лучше всего, когда освещение равномерное и контраст между различными планами четкий. Например, в изображении в оттенках серого можно установить фиксированный порог для отделения более светлых областей от более темных. Пиксели выше порога становятся частью переднего плана, а те, что ниже него, формируют фон. Этот метод прост и эффективен с точки зрения вычислений. Тем не менее, он сложен при работе с неравномерным освещением или сложным фоном. В таких случаях глобальное пороговое установление может не обеспечить точную сегментацию, что приведет к ошибкам при обнаружении дефектов.

Локальное пороговое значение делит изображение на более мелкие области и вычисляет отдельный порог для каждой из них. Такой подход адаптируется к вариациям освещения и фону, что делает его более эффективным для изображений с неравномерным освещением. Например, в оттенках серого с тенями локальное пороговое значение гарантирует, что дефекты могут обнаруживаться, корректируя пороговые значения в зависимости от места.

Локальные пороговые значения можно использовать для обработки сложных сценариев, в которых глобальные методы не справляются. Такой метод обеспечивает лучшие результаты сегментации для изображений со сложными деталями или различными уровнями яркости. Однако этот метод требует больше вычислительных ресурсов, так как он обрабатывает несколько частей поверхности по отдельности.

Представленные и проанализированные в статье результаты могут быть использованы в качестве предварительной обработки изображений для оптического обнаружения дефектов ИЭТ.

Список литературы:

1. IMAQ Vision Concepts Manual Number 322916A-01, Nat. Instrum., Austin, TX, USA, 2000.
2. H.-F. Ng, «Automatic thresholding for defect detection» Pattern Recognit. Lett., vol. 27, no. 14, pp. 1644–1649, Oct. 2006.
3. F. Yan, H. Zhang, and C. R. Kube, «A multistage adaptive thresholding method» Pattern Recognit. Lett., vol. 26, no. 8, pp. 1183–1191, Jun. 2005.
4. N. Otsu, «A threshold selection method from gray-level histograms,» IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC-9, no. 1, pp. 62–66, Jan. 1979.
5. D.-B. Perng, H.-W. Liu, and S.-H. Chen, «A vision-based LED defect autorecognition system» Nondestruct. Test. Eval., vol. 29, no. 4, pp. 315–331, Oct. 2014.
6. D.-B. Perng, H.-W. Liu, and C.-C. Chang, «Automated SMD LED inspection using machine vision» Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 57, nos. 9–12, pp. 1065–1077, Dec. 2011.
7. C.-F.-J. Kuo, T.-Y. Fang, C.-L. Lee, and H.-C. Wu, «Automated optical inspection system for surface mount device light emitting diodes» J. Intell. Manuf., vol. 30, no. 2, pp. 641–655, Feb. 2019.
8. T.-Y. Li, J.-Z. Tsai, R.-S. Chang, L.-W. Ho, and C.-F. Yang, «Pretest gap mura on TFT LCDs using the optical interference pattern sensing method and neural network classification» IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 3976–3982, Sep. 2013.
9. C.-H. Noh, S.-L. Lee, D.-H. Kim, C.-W. Chung, and S.-H. Kim, «An effective and efficient defect inspection system for TFT-LCD polarised films using adaptive thresholds and shape-based image analyses» Int. J. Prod. Res., vol. 48, no. 17, pp. 5115–5135, Sep. 2010.



10. Y. Yang, Z.-J. Zha, M. Gao, and Z. He, «A robust vision inspection system for detecting surface defects of film capacitors» *Signal Process.*, vol. 124, pp. 54–62, Jul. 2016.
11. J. Kwak, K. B. Lee, J. Jang, K. S. Chang, and C. O. Kim, «Automatic inspection of salt-and-pepper defects in OLED panels using image processing and control chart techniques» *J. Intell. Manuf.*, vol. 30, no. 3, pp. 1047–1055, Mar. 2019.
12. B. C. Jiang and Y. M. W. C. C. Wang, «Bootstrap sampling technique applied to the PCB golden fingers defect classification study» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 39, no. 10, pp. 2215–2230, Jan. 2001.
13. B. C. Jiang, S.-L. Tasi, and C.-C. Wang, «Machine vision-based gray relational theory applied to IC marking inspection» *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 15, no. 4, pp. 531–539, Nov. 2002.
14. R. Nagarajan, S. Yaacob, P. Pandian, M. Karthigayan, S. H. Amin, and M. Khalid, «A real time marking inspection scheme for semiconductor industries» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 34, nos. 9–10, pp. 926–932, Sep. 2007.
15. F.-H. Hsu and C.-A. Shen, «The design and implementation of an embedded real-time automated IC marking inspection system» *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 32, no. 1, pp. 112–120, Feb. 2019.
16. A. F. Said, B. L. Bennett, L. J. Karam, and J. S. Pettinato, «Automated detection and classification of non-wet solder joints» *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 67–80, Jan. 2011.
17. W. Jin, W. Lin, X. Yang, and H. Gao, «Reference-free path-walking method for ball grid array inspection in surface mounting machines» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 8, pp. 6310–6318, Aug. 2017.
18. A. F. Said, B. L. Bennett, L. J. Karam, A. Siah, K. Goodman, and J. S. Pettinato, «Automated void detection in solder balls in the presence of vias and other artifacts» *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 2, no. 11, pp. 1890–1901, Nov. 2012.
19. Q. Lu, Q. Fu, L. Luo, Q. Yuan, W. Hua, and Y. Yunguang, «Measurement method of LCD surface deformation for smartphone based on optical vision sensing system» *Optik*, vol. 172, pp. 1079–1088, Nov. 2018.
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.*, vol. 45, no. 2, pp. 451–464, Jan. 2007.
21. R. Nakagaki, Y. Takagi, and K. Nakamae, «Automatic recognition of circuit patterns on semiconductor wafers from multiple scanning electron microscope images» *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 8, Aug. 2010.
22. R. Nakagaki, T. Honda, and K. Nakamae, «Automatic recognition of defect areas on a semiconductor wafer using multiple scanning electron microscope images» *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 7, Jul. 2009.

