

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ФЕРРИТОВЫХ МАГНИТНЫХ ПЛИТКАХ, ОСНОВАННОЕ НА КОНТУРЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИИ БЕЗ ДЕЦИМАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕКСТУРЫ

© 2020 г. Сюэцин Ли^{1,*}, Чжэнь Лю^{2,**}, Гофу Инь^{3,***}, Хунхай Цзян^{4,****}

¹Институт машиностроения, Университет Сихуа, Чэнду 610039, Китай

²Высшая школа инженерии, Институт прикладных наук Нагасаки, 53 Абама, Нагасаки-кен 851-0193, Япония

³Институт исследований и инженерии в области производства, Университет Сычуаня, Чэнду 610065, Китай

⁴Институт электротехники и машиностроения, Куньминский университет науки и техники, Куньмин 650504, Китай

E-mail: *6326935@qq.com; **liu_zhen@nias.ac.jp; ***gfyin@scu.edu.cn; ****836078614@qq.com

Поступила в редакцию 03.10.2017; после доработки 29.09.2019

Принята к публикации 11.10.20219

Ферритовые магнитные плитки широко используются в промышленности. На данный момент контроль дефектов на поверхностях ферритовой магнитной плитки выполняется вручную. Для повышения эффективности контроля дефектов и предотвращения ложных отметок и пропуска дефектов была предложена автоматическая система, применяемая для неразрушающего контроля магнитных плиток на основе системы компьютерного зрения. Комплекс оборудования для автоматического контроля дефектов, используемого для контроля поверхностей магнитных плиток, был спроектирован таким образом, чтобы мы могли программно регулировать положение, угол освещения и камер в соответствии с требованиями к различному расположению для различных видов магнитных плиток. Для решения задачи автоматического контроля дефектов на темных и малоконтрастных изображениях магнитных плиток был предложен новый гибридный алгоритм, который объединяет контурлет-преобразование без децимации (КПБД) и определение параметров текстуры Лавса, чтобы исключить влияние текстуры после шлифования и выявить дефекты. Согласно методике, исходное изображение сначала раскладывается с помощью КПБД, параметры коэффициентов разложения анализируются с помощью определения параметров текстуры Лавса. Затем в соответствии с энергиями текстуры восстановленного изображения определяется порог сегментации для обнуления коэффициентов разложения. Наконец, изображение было восстановлено с использованием коэффициентов реконструкции, текстуры шлифовки были устранены, и с помощью оператора Кэнни были выделены дефекты. Результаты эксперимента показывают, что на основе предложенного способа текстура шлифовки может быть эффективно устранена, дефекты могут быть точно выявлены, а степень точности обнаружения дефектов может достигать 93,57 %. Автоматическая система контроля может оказаться очень эффективной в области контроля дефектов магнитной плитки.

Ключевые слова: обработка изображений, магнитная плитка, обнаружение дефектов, контурлет-преобразование без децимации, характеристики текстуры.

DOI: 10.31857/S0130308220040089

1. ВВЕДЕНИЕ

Ферритовые магнитные плитки являются важной частью двигателей с постоянными магнитами и широко используются в таких областях промышленности, как автомобили, станочные системы и т.д. В следующих десятилетиях на них также будет огромный спрос на рынке внутри страны и за рубежом, поэтому невозможно насовсем отказаться от их использования.

Методы производства магнитных плиток сложны и в основном включают в себя шесть процедур: (1) смешивание сырья в необходимой пропорции и последующее его измельчение до состояния порошка, (2) прессование магнитных частиц в твердые массы, (3) спекание их в контролируемой атмосфере при высокой температуре в печах, (4) шлифовка магнитных плиток (что приводит к образованию стандартных текстур на поверхности), (5) очистка и сушка, (6) контроль наличия дефектов. Такие методы производства приводят к неизбежному появлению дефектов на поверхности изделия, наиболее распространенные показаны на рис. 1 (дефект типа трещины (а), скол (б), расслоение (в), неравномерный износ (г)). Дефекты магнитной пластины будут напрямую влиять на рабочие характеристики и срок службы двигателей. Можно видеть, что текстуры шлифовки мешали обнаружению дефектов, увеличивая сложность обнаружения дефектов человеческим глазом или системами неразрушающего контроля.

В настоящее время указанные выше пять процедур выполняются машинами, и только дефекты определяются вручную с помощью визуально-измерительного контроля. Результаты контроля подвержены влиянию субъективных факторов, а методика контроля имеет высокую стоимость, низ-

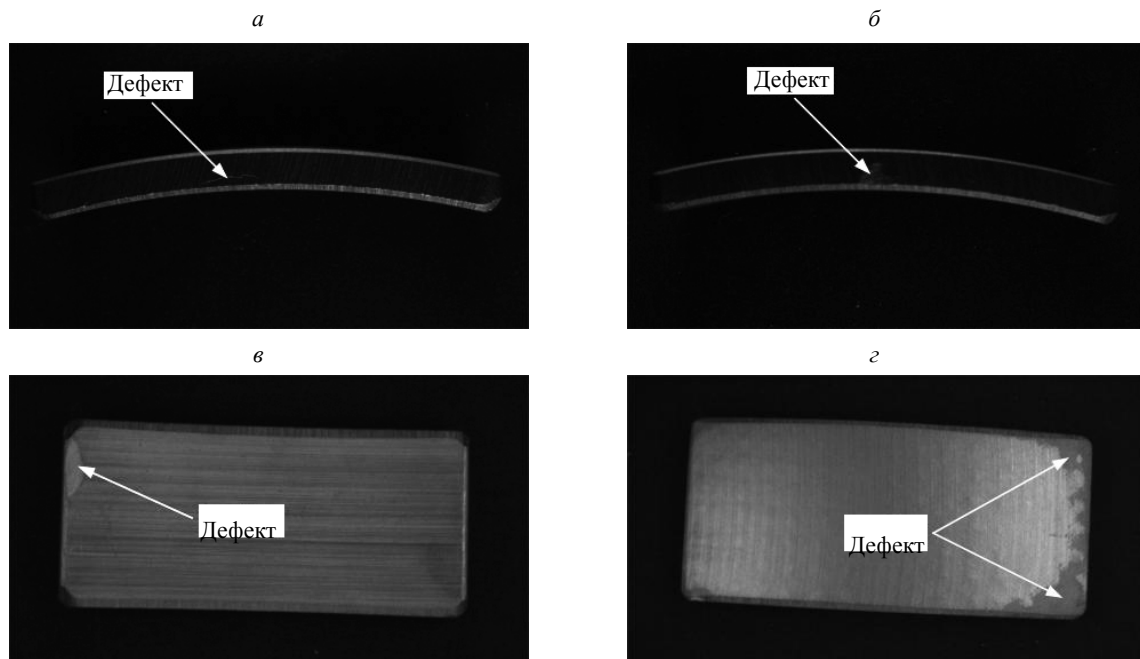


Рис. 1. Изображения магнитных плиток с дефектами: трещина (а); скол (б); расслоение (в); неравномерный износ (г).

кую эффективность, низкую надежность и не может быть интегрирована в систему автоматизации. Поэтому существует необходимость разработки систем автоматического обнаружения дефектов.

На данный момент применение машинного зрения в неразрушающем контроле широко используются в промышленности, и исследователи во всем мире предложили множество алгоритмов для промышленности, таких как пороговая сегментация [1—4], корреляционный анализ [5—8], анализ характерных признаков [9—11], анализ в частотной области [12—16] и др. [17—20]. Но очень мало исследований по обнаружению дефектов в ферритовых магнитных пластинках, так как сам ферритовый материал имеет темный оттенок и контраст ее изображения низкий. Целью данной работы является разработка автоматической системы обнаружения дефектов на поверхностях ферритовых магнитных пластинок.

Система автоматического обнаружения дефектов на поверхностях магнитной пластинки обычно состоит из двух частей: аппаратной и программной. Чтобы выполнить задачу по обнаружению дефектов на всех поверхностях с различными радиусами кривизны, разработан комплект оборудования для автоматического контроля, позволяющий программно регулировать положение, угол освещения и камеры для повышения контрастности изображения. Оборудование для контроля встраивается в производственную линию. Кроме того, предлагается новый гибридный алгоритм, который объединяет метод КПБД и метод анализа текстуры Лавса для обнаружения дефектов магнитных пластинок. Влияние текстуры шлифовки может быть устранено путем реконструкции КПБД, используя порог сегментации, который рассчитывается путем определения параметров текстуры Лавса, а дефекты могут быть выделены оператором Кэнни. Система может быть эффективной в обнаружении дефектов магнитной плитки.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 представлены алгоритмы устранения текстур шлифовки с использованием КПБД и определения параметров текстуры Лавса. В разделе 3 показано применение метода для обнаружения дефектов магнитной пластинки, результаты эксперимента и обсуждение. Наконец, в разделе 4 представлено заключение.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Контурлет-преобразование без децимации

Чтобы устранить влияние текстур шлифовки и обнаружить дефекты, в этой статье используется КПБД [21] для разложения исходного изображения, коэффициенты КПБД обнуляются путем обработки пороговых значений, а затем восстанавливают изображение магнитной плитки.

КПБД был разработан на основе контурлет-преобразования [22] и алгоритма «à trous» [23, 24]. Это достигается за счет использования пирамидальных фильтров и банков фильтров направления без децимации. Коэффициенты разложения КПБД не только наследуют многомасштабные и разнонаправленные характеристики контурлет-преобразования, но также имеют трансляционную инвариантность и селективность по направлению. При КПБД не происходит наложение спектров, потому что при многомасштабном разложении отсутствует децимация. Два уровня разложения КПБД показаны на рис. 2. Каждый уровень подразделяется на два этапа. Во-первых, изображение раскладывается на поддиапазон нижних частот и полосу нижних частот с помощью банков пирамидальных фильтров без децимации. Поддиапазон нижних частот содержит информацию о нижней частоте, которая аналогична информации исходного изображения, а полоса частот содержит информацию о средней и высокой частоте. Во-вторых, полоса пропускания подразделяется на клинья с разными направлениями по банкам фильтров направления без децимации. Каждый поддиапазон клина описывает подробную информацию изображения в одном направлении, как показано на рис. 2б, и количество направленных поддиапазонов может быть любой степенью двойки. Повторяя эти шаги, можно разложить низкочастотный поддиапазон рекуррентным методом, изображение может быть разложено на многомасштабное и многонаправленное с помощью КПБД.

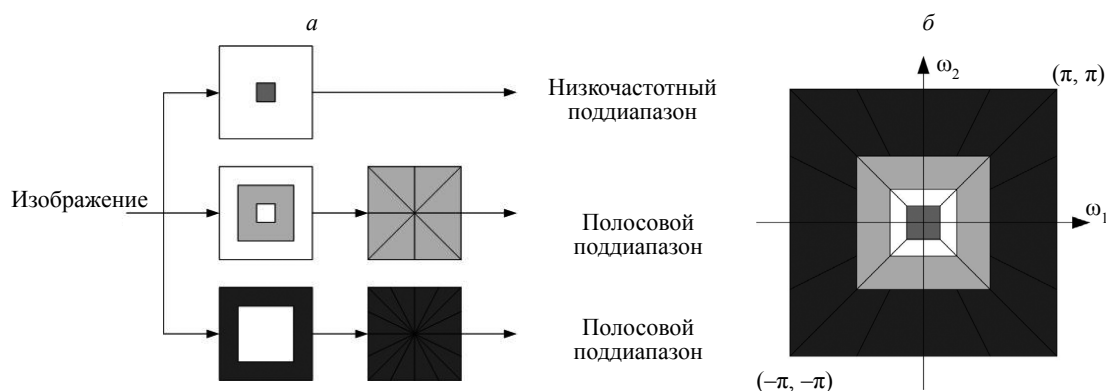


Рис. 2. Два уровня КПБД-разложения: банки фильтров без децимации (а); разделенная частотная область (б).

Изображения магнитной плиткой имеют темный цвет и низкий контраст, на поверхностях после шлифования образуется стандартная текстура. Коэффициенты КПБД обладают многомасштабной, многонаправленной, трансляционной инвариантностью и избирательностью по направлению, поэтому одинаково могут воспринимать как царапину, так и дефекты полировки. Мы представляем новый метод, в котором не учитываются некоторые определенные коэффициенты для исключения особенностей текстуры в восстановленных изображениях, после чего с помощью оператора Кэнни могут быть обнаружены дефекты.

2.2. Определение параметров текстуры Лавса

Чтобы количественно описать текстуры, было предложено много алгоритмов для измерения параметров текстуры; их можно разделить на два типа: анализ структуры и статистический анализ. Первый обнаруживает и исследует примитив текстуры и структурных компонентов, а второй определяет характеристики распределения значения яркости или значения серого с помощью статистического анализа.

Тусерян [25] подробно описал определение параметров текстуры Лавса. Значения вычисляются с применением небольших ядер свертки, а затем выполняется нелинейная свертка. Кеннет Иван Лавс [26] представил ядра свертки длиной три, пять и семь. И мы можем генерировать разные ядра двумерной свертки, сворачивая вертикальное одномерное ядро с горизонтальным одномерным ядром. Исследования показывают, что 5 векторов достаточно для достижения точности 86 %, а 3 вектора обеспечивает точность 68 %. Использование 7 векторов не дает существенного улучшения. Поэтому предлагается использовать ядро свертки длиной пять в алгоритме идентификации дефектов в ферритовой магнитной плитке.

Ядра двумерной свертки, обычно используемые для распознавания текстур, генерируются из следующего набора одномерных ядер свертки длиной пять:

$$\begin{cases} L5=[1 & 4 & 6 & 4 & 1] \\ E5=[-1 & -2 & 0 & 2 & 1] \\ S5=[-1 & 0 & 2 & 0 & -1] , \\ W5=[-1 & 2 & 0 & -2 & 1] \\ R5=[1 & -4 & 6 & -4 & 1] \end{cases} \quad (1)$$

где $L5$ — локальное среднее значение, $E5$ — край, $S5$ — пятно, $W5$ — волна, а $R5$ — пульсация.

Из этих пяти векторов мы можем сгенерировать 25 различных ядер 2D-свертки, свернув вертикальное 1D-ядро с горизонтальным 1D-ядром, и 25 ядер свертки можно представить как

$$E_k[r, c] = \sum_{j=c-7}^{c+7} \sum_{i=r-7}^{r+7} |F_k[i, j]|, \quad (2)$$

где $F_k[i, j]$ — результат фильтрации пикселя в положении $[i, j]$.

Некоторые из двумерных ядер свертки симметричны, поэтому 25 ядер свертки можно объединить в 15 ядер свертки, и мы используем 15 ядер свертки для определения параметров текстуры. Список их приведен ниже:

$$\begin{cases} L5L5 & L5E5/E5L5 & L5S5/S5L5 & L5W5/W5L5 & L5R5/R5L5 \\ E5E5 & E5S5/S5E5 & E5W5/W5E5 & E5R5/R5E5 & \\ S5S5 & S5W5/W5S5 & S5R5/R5S5 & & \\ W5W5 & W5R5/R5W5 & & & \\ R5R5 & & & & \end{cases} \quad (3)$$

2.3. Реконструированный метод и начальные параметры

Изображение магнитной плитки темное, и после шлифования магнитной плитки стандартные текстуры образуются на поверхностях с другим значением серого, в то время как дефекты магнитной плитки выглядят черными в светлом поле. Чтобы устранить эффект шлифовки и сохранить дефекты на поверхностях изображения магнитной плитки, нам необходимо выполнить пороговую обработку для коэффициентов КПБД перед восстановлением изображения магнитной плитки.

Формула имеет вид:

$$C_l^k(x, y) = \begin{cases} C_l^k(x, y) & |C_l^k(x, y)| > T \\ 0 & |C_l^k(x, y)| \leq T \end{cases}, \quad (4)$$

где $C_l^k(x, y)$ — коэффициент КПБД, k — направление, l — масштаб разложения, T — порог.

Как мы видим, порог T является ключевым фактором при КПБД-реконструкции. В этой статье мы определяем параметры текстуры Лавса для определения порога T . Он представляется в виде:

$$T = I_m, \quad (5)$$

где I_m — выбранный вектор коэффициента, $m = [k \times n_c]$ — ранг оставшихся коэффициентов, n_c — общее количество восстановленных коэффициентов, k — доля оставшихся коэффициентов.

Мы измеряем параметры текстуры Лавса для определения наилучшего выбора k , а затем сбрасываем коэффициенты в соответствии с уравнением (4); коэффициенты, превышающие T , останутся, в то время как меньшие или равные T зануляются, и, наконец, можно получить восстановленные изображения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Материалы и оборудование

На рис. 3 показано трехмерное изображение магнитной плитки, контролируемые поверхности от стороны А до стороны Г. Для проведения контроля всех поверхностей с различными радиусами

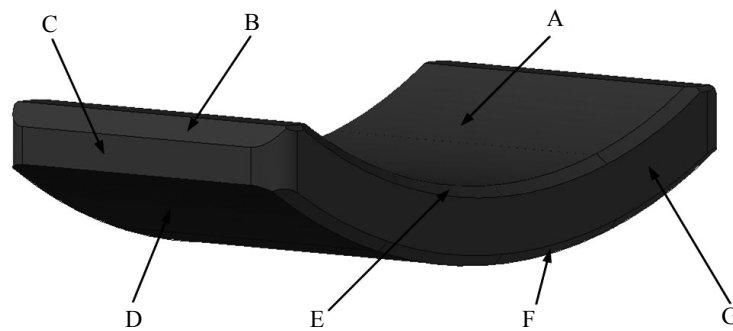


Рис. 3. Магнитная пластинка.

кривизны была разработана автоматическую систему, в которая также возможно программно регулировать положение и угол света и камеры.

Принципиальная схема системы показана на рис. 4. Источник света освещает поверхности магнитной плитки. Магнитных плиток снимаются на камеру, когда конвейерная лента доставляет магнитные плитки в область контроля, а блок распознавания изображений преобразует аналоговые сигналы в цифровые сигналы и передает их в компьютерную систему обработки и управления, после чего алгоритмы обработки изображений могут использоваться для обнаружения дефектов магнитной плитки. Когда магнитная плитка считается дефектной, плата управления движением посылает сигналы в сервосистему, цилиндр выталкивает ее из конвейерной ленты.

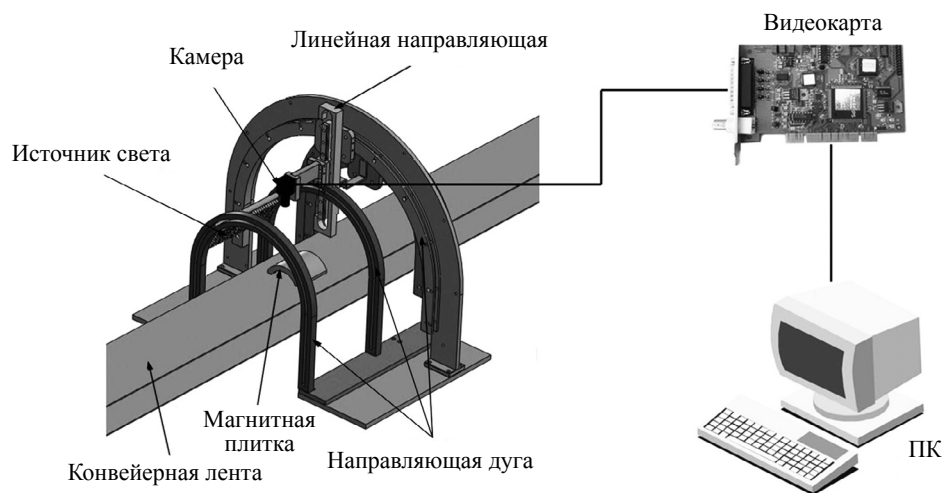


Рис. 4. Схема используемой системы.

На рис. 5 показана установка для автоматического контроля. Специальное освещение, фон и положение подходят для четкого разделения дефектов изображения магнитной плитки. Поверхности магнитной плитки серого или темно-серого цвета, белые светодиоды используются для повышения резкости изображения и повышения контрастности изображения, режим работы светодиодов регулируется фотоэлектрическими датчиками для предотвращения их перегрева. Световой щит, установленный на направляющей дуге, может перемещаться вдоль нее, чтобы удовлетворить требования по расположению источника для обнаружения дефектов магнитной плитки. Камера представляет собой матричную ПЗС-камеру, которая также запускается фотоэлектрическими датчиками, она может перемещаться по линейной направляющей для регулировки расстояния между камерой и магнитными плитками, что позволяет легко программно регулировать глубину фокусировки для различных видов магнитных плиток. Ленточный конвейер приводится в действие серводвигателем, так что скорость транспортировки магнитной плитки можно регулировать.

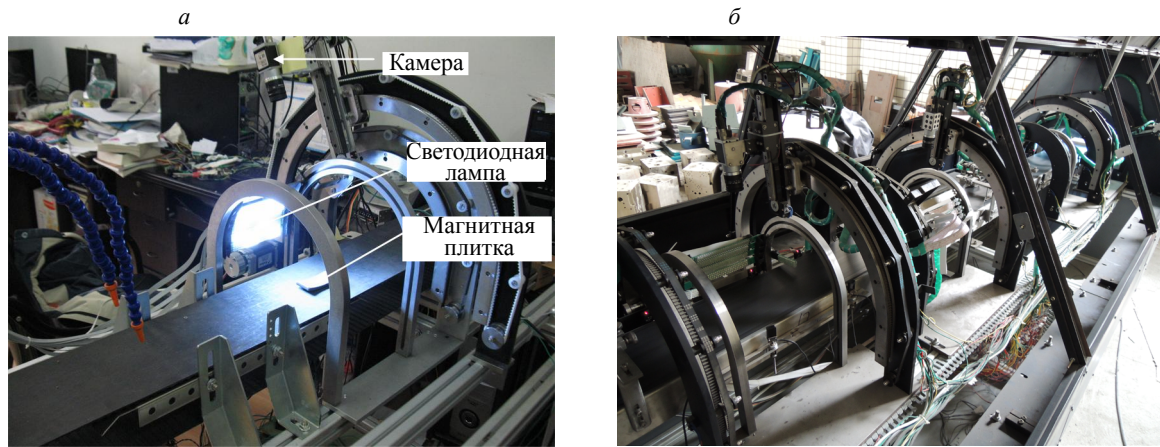


Рис. 5. Установка для автоматического контроля дефектов: опытный образец системы (а); линия контроля (б).

3.2. Выделение дефектов

Определение параметров текстуры Лавса не только позволяет оценить энергию текстуры, но и может предоставить данные для определения доли оставшихся коэффициентов. В этой статье мы определяем параметры текстуры Лавса, чтобы выбрать правильное значение k , вычислить порог T согласно уравнению (5), а затем восстановить изображение с поправочными коэффициентами, полученными согласно уравнению (4). Наконец, оператор Кэнни используется для выделения контуров реконструированного изображения.

Для разложения рис. 1а был использован КПБД, а затем было реконструировано изображение с различными коэффициентами восстановления, полученными в соответствии с различными значениями k . Нормированные энергии текстуры по параметрам текстуры Лавса были рассчитаны на реконструированных изображениях с различными значениями k , как показано на рис. 6. Нормиров-

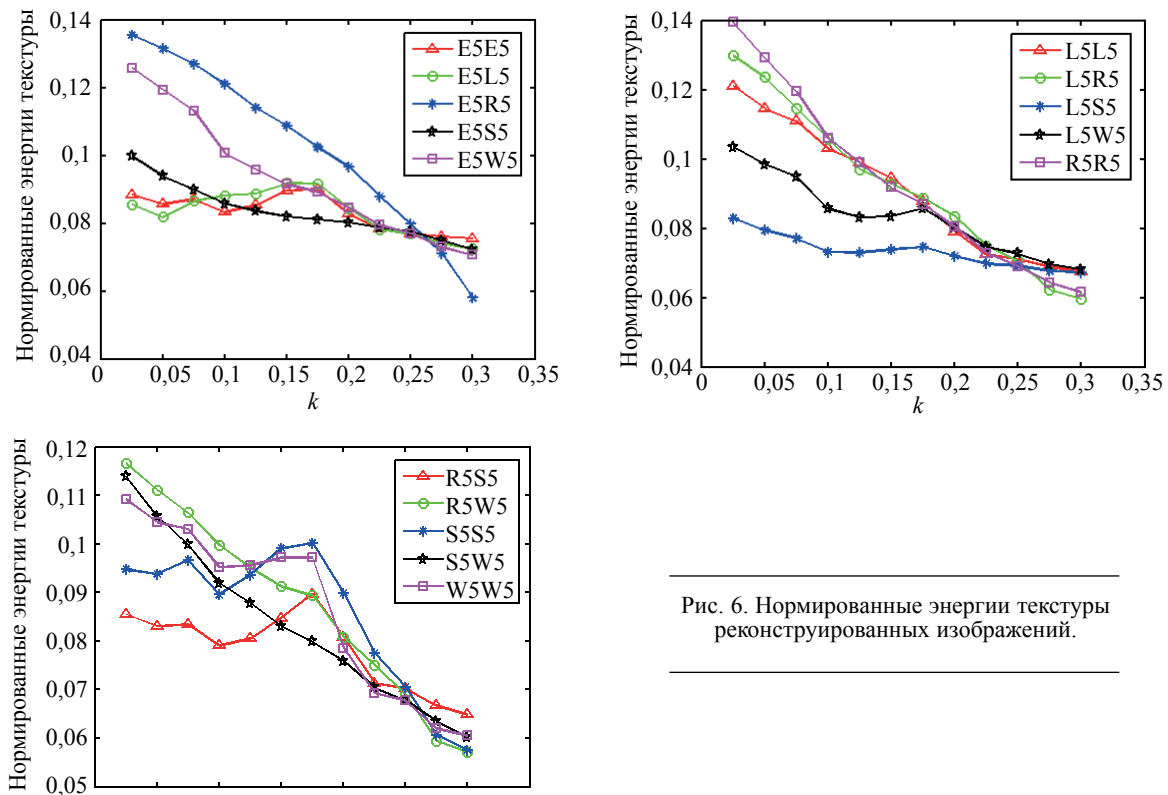


Рис. 6. Нормированные энергии текстуры реконструированных изображений.

ка необходима для того, чтобы избежать большой разницы в 15 ядрах свертки, которая будет влиять на их вес при определении доли оставшихся коэффициентов. Видно, что существует очевидное пересечение кривых энергий текстуры при значении $k = 0,25$.

Восстановленные изображения с различными значениями k показаны на рис. 7. Можно видеть, что изображение практически не изменяется, когда k довольно мало (например, $k = 0,025$) и когда k равно некоторому подходящему значению (такому как $k = 0,25$, обычно присутствующие текстуры практически исключаются), с увеличением значения k изображение практически теряет всю текстуру. На рис. 7а, б практически восстановлено исходное изображение; на рис. 7в теряются некоторые текстуры; на рис. 7г устраняет имеющиеся текстуры и в значительной степени сохраняется изображение дефекта; на рис. 7 д и е потеряются почти все детали.

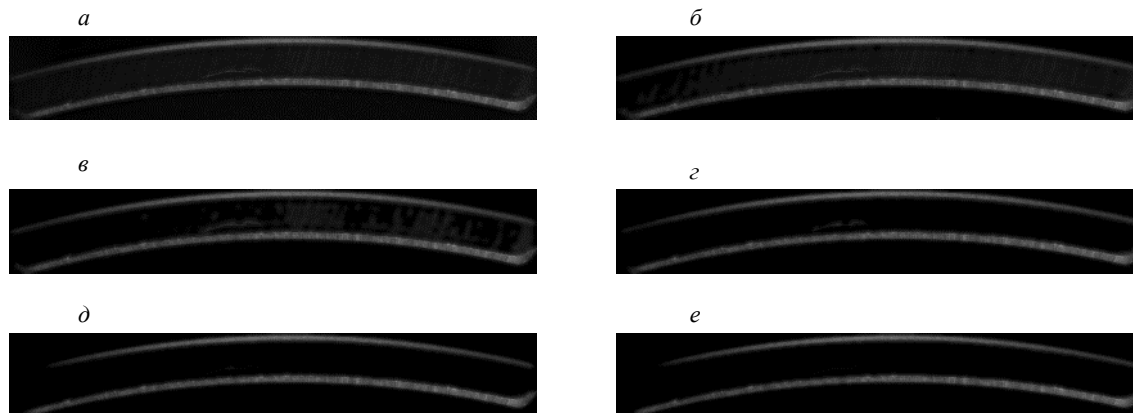


Рис. 7. Восстановленные изображения с различными оставшимися коэффициентами: $k = 0,025$ (а); $k = 0,125$ (б); $k = 0,175$ (в); $k = 0,25$ (г); $k = 0,275$ (д); $k = 0,3$ (е).

Для извлечения контура на рис. 7 был использован оператор Кэнни, результаты показаны на рис. 8. Можно видеть, что когда k меньше 0,175, трудно различить дефект, поскольку дефект не выделяется на фоне текстур шлифования; когда $k = 0,25$, дефект может быть точно извлечен из изображения; когда k больше 0,275, дефект исчезает с текстурами шлифования. Мы сделали маску для рис. 8г и использовали морфологическую операцию для удаления скругленного контура, после чего дефект можно полностью сегментировать.

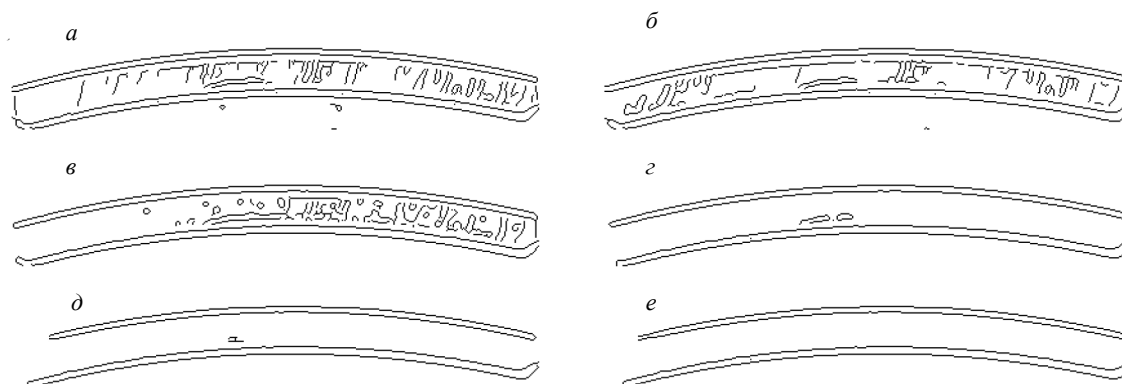


Рис. 8. Выделенный с помощью оператора Кэнни контур рис. 7: $k = 0,025$ (а), $k = 0,125$ (б); $k = 0,175$ (в); $k = 0,25$ (г), $k = 0,275$ (д), $k = 0,3$ (е).

Из рис. 8г очевидно, что наилучший выбор значения k равен 0,25, так как при таком значении пересекаются кривых энергий текстуры, а порог сегментации T был получен в соответствии с уравнением (5).

Чтобы подтвердить работоспособность представленного в статье способа получения значения k , который является правильным и эффективным, необходимо показать преимущество алгоритма.

Мы рассмотрели различные типы дефектов из рис. 1б—г в соответствии с вышеуказанным методом, результаты сравнили с алгоритмом Оцу, алгоритмом морфологической фильтрации и алгоритмом вейвлет-преобразования. Результаты показаны на рис. 9. Как мы видим, поскольку изображения магнитной плитки имеют неоднородность по интенсивности и низкий контраст, сравниваемые алгоритмы не могут точно выявлять дефекты, в то время как метод, предложенный в этой статье, может эффективно выявлять различные типы дефектов, такие как скол, расслоение и неравномерный износ.

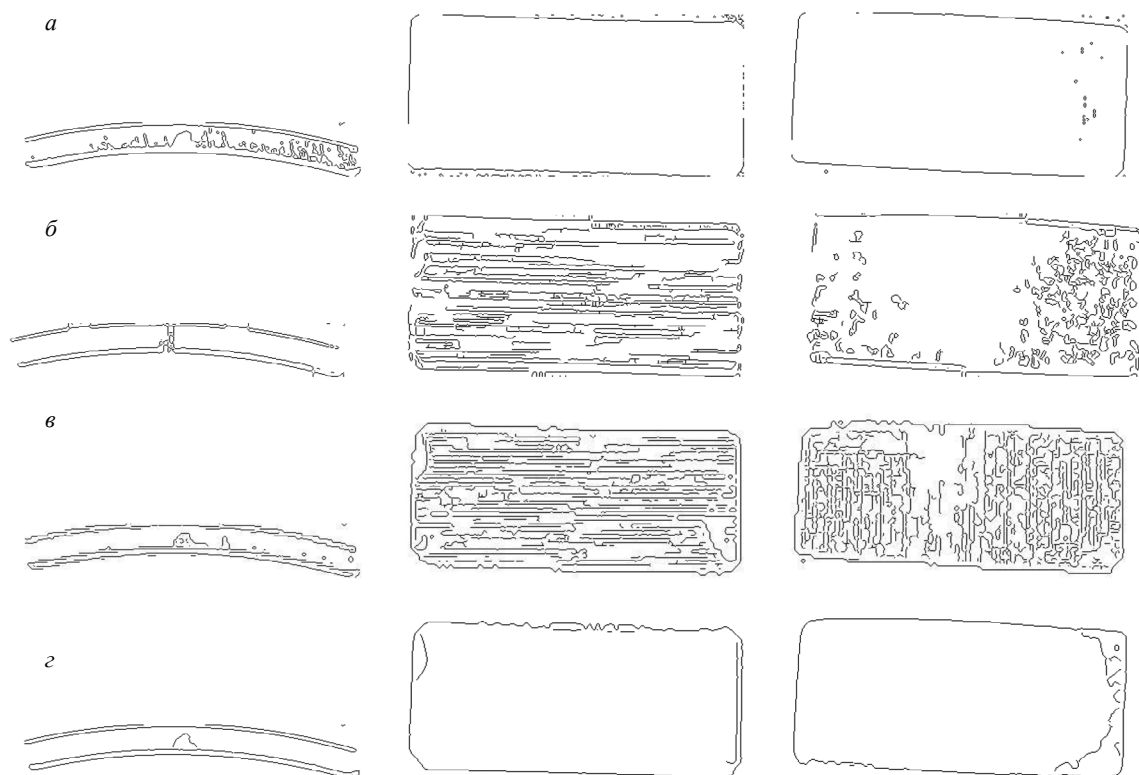


Рис. 9. Выделенные дефекты из рис. 1 б—г: алгоритм ОЦУ (а), алгоритм морфологической фильтрации (б), алгоритм вейвлет-преобразования (в), предложенный метод (г).

Таблица 1

Сравнение ошибок измерения

Изображения магнитных плиток	Алгоритм Оцу	Алгоритм морфологической фильтрации	Алгоритм вейвлет-преобразования	Предложенный метод
Рис.1б. Скол	0,1002	0,0412	0,2447	0,0318
Рис.1в. Расслоение	0,0385	0,1409	0,4578	0,0359
Рис.1г. Неравномерный износ	0,0360	0,0778	0,4493	0,0315

Помимо того, что результаты распознавания изображения зависят от угла обзора, мы рассчитали ошибку измерения, чтобы оценить и сравнить результаты. Результаты показаны в табл. 1. Видно, что предлагаемый метод обеспечивает минимальную ошибку по сравнению с этими методами, это означает, что результаты правильного обнаружения дефектов с помощью предложенного метода могут быть наиболее достоверными.

3.3. Результаты и обсуждение

Чтобы установить, что метод, предложенный в этой статье, является корректным и показать результаты контроля, мы отобрали 280 магнитных плиток, предоставленных предприятиями-партнерами, из этих образцов 160 были бездефектными, а остальные были дефектными. Следует отметить, что требования к свету и фону различны для разных поверхностей для одной и той же магнитной плитки, по этой причине дефекты не могут быть четко видны, поэтому источник света и камера должны быть предварительно отрегулированы. Результаты распознавания дефектов показаны в табл. 2, измерения достоверности обнаружения дефектов можно разделить на следующие три категории: вероятность ложной идентификации (ВЛИ), вероятность ложного отказа (ВЛО) и

Таблица 2

Результаты обнаружения дефектов

Фактический тип плитки	Результаты контроля		Общее число
	Бездефектная	Дефектная	
Бездефектная	147	13	160
Дефектная	5	115	120
ВЛИ	$5/120=4,17\%$		
ВЛО	$13/160=8,13\%$		
ПТ	$(147+115)/280=93,57\%$		

показатель точности (ПТ). При оценке экспериментальных результатов показано, что ВЛИ, ВЛО и ПТ составляют 4,17, 8,13 и 93,57 % соответственно. Данные превосходят результаты ручного визуального контроля с 8, 10 и 90,91 % соответственно. Причины пропуска дефектов состоят в том, что отражение от некоторых поверхностей маскирует дефекты или если дефекты трещины и текстура шлифования имеют одно направление. Некоторые бездефектные магнитные плитки ошибочно идентифицированы как дефектные, поскольку считается, что некоторые текстуры при глубоком шлифования являются дефектами. Хотя ВЛО кажется высокой, магнитные плитки, которые считаются дефектными, будут измельчены и вновь использованы в качестве сырья. В целом, полученные нами результаты контроля могут соответствовать бизнес-требованиям и показывают, что этот метод идеально подходит для обнаружения дефектов магнитной плитки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье был разработан прототип системы для обнаружения дефектов в ферритовых магнитных плитках и предложен новый алгоритм обнаружения дефектов магнитных плиток, который сочетает в себе метод контурлет-преобразования без децимации и метод определения параметров текстуры Лавса. Сама ферритовая магнитная плитка имеет темный оттенок с текстурами шлифовки, а изображение магнитной плитки, полученное с помощью ПЗС-камеры, имеет неоднородность по интенсивности и низкий контраст, поэтому дефекты магнитной плитки трудно обнаружить. Изображение раскладывается с помощью КПБД, 15 ядер свертки в методе определения параметров текстуры Лавса используются для измерения параметров текстуры в восстановленном изображении. Наилучший выбор доли оставшихся коэффициентов определяется путем измерения параметров текстуры Лавса, порог восстановленных коэффициентов может быть рассчитан автоматически. Текстуры шлифования могут быть устранены путем реконструкции КПБД, используя порог сегментации, и из восстановленного изображения дефекты могут быть корректно извлечены оператором Кэнни.

Следует отметить, что, хотя эффективность и осуществимость предложенного метода были продемонстрированы, дефекты могут быть обнаружены только на поверхностях магнитных плиток. Для обнаружения дефектов внутри магнитных плиток необходимы дальнейшие исследования.

Данное исследование поддержано фондом основных научных исследований Университета Сихуа (№ Z1510220), Проектом фонда исследований Департамента образования китайской провинции Сычуань (№ 15ZB0125) и Планом «Chunhui» Министерства образования Китая (№ Z2015104).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Xian'en Zhou, Yaonan Wang, Qing Zhu, Chengzhong Wu, Yu Peng.* Research on defect detection method for bottle mouth based on machine vision // *Journal of electronic measurement and instrumentation.* 2016. V. 30. № 5. P. 702—713.
2. *Mao Li.* Research of the Mura defect detection of TFT LCD based on machine vision. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
3. *Chiou Yih-Chih, Li Wei-Chen.* Flaw detection of cylindrical surfaces in PU-packing by using machine vision technique // *Measurement.* 2009. V. 42. № 7. P. 989—1000.
4. *Vorobeichikov S.E., Fokin V.A., Udod V.A., Temnik A.K.* A study of two image-recognition algorithms for the classification of flaws in a test object according to its digital image // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2015. V. 51. № 10. P. 644—651.
5. *Tsai Du-Ming, Lai Shia-Chih.* Defect detection in periodically patterned surfaces using independent component analysis // *Pattern Recognition.* 2008. V. 41. № 9. P. 2812—2832.
6. *Tao Xian, Xu De, Zhang Zhengtao, Zhang Feng, Liu Xilong, Zhang Dapeng.* Weak scratch detection and defect classification methods for a large-aperture optical element // *Optics Communications.* 2017. V. 387. P. 390—400.
7. *Tsneg Yan-Hsin, Tsai Du-Ming.* Defect detection of uneven brightness in low-contrast images using basis image representation // *Pattern Recognition.* 2010. V. 43. P. 1129—1141.
8. *Huang Yiming, Wu Di, Zhang Zhifen, Chen Huabin, Chen Shanben.* EMD-based pulsed TIG welding process porosity defect detection and defect diagnosis using GA-SVM // *Journal of Materials Processing Technology.* 2017. V. 239. P. 92—102.
9. *Boaretto Neury, Centeno Tania Mezzadri.* Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images DWDI // *NDT&E International.* 2017. V. 86. P. 7—13.
10. *Hu Guang-Hua.* Automated defect detection in textured surfaces using optimal elliptical Gabor filters // *Optik.* 2015. V. 126. P. 1331—1340.
11. *Epifantsev B.N., Zhumazhanova S.S.* On the effect of the shape of a flaw on its detectability against noise background // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2017. V. 53. № 1. P. 62—70.
12. *Liu Tao, Zhang Wei, Yan Shaoze.* A novel image enhancement algorithm based on stationary wavelet transform for infrared thermography to the de-bonding defect in solid rocket motors // *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2015. V. 62—63. P. 366—380.
13. *Wu Jing, Wang Yu, Zhang Weiwei, Nie Zhenhua, Lin Rong, Ma Hongwei.* Defect detection of pipes using Lyapunov dimension of Duffing oscillator based on ultrasonic guided waves // *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2017. V. 82. P. 130—147.
14. *Zhang Yichun, Shi Tielin, Su Lei, Wang Xiao, Hong Yuan, Chen Kepeng, Liao Guanglan.* Sparse Reconstruction for Micro Defect Detection in Acoustic Micro Imaging // *Sensors.* 2016. V. 16. P. 1—11.
15. *Mishne Gal, Cohen Israel.* Multiscale anomaly detection using diffusion maps // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing.* 2013. V. 7. P. 111—122.
16. *Tolba Ahmad Said.* A novel multiscale-multidirectional autocorrelation approach for defect detection in homogeneous flat surfaces // *Machine Vision and Applications.* 2012. V. 23. № 4. P. 739—750.
17. *Li Wu-bin, Lu Chang-hou, Zhang Jian-chuan.* A lower envelope Weber contrast detection algorithm for steel bar surface pit defects // *Optics & Laser Technology.* 2013. V. 45. P. 654—659.
18. *Li Wei-Chen, Tsai Du-Ming.* Defect Inspection in Low-Contrast LCD Images Using Hough Transform-Based Nonstationary Line Detection // *IEEE Transactions on Industrial Informatics.* 2011. V. 7. P. 136—147.
19. *Chao Shin-Min, Tsai Du-Ming.* An anisotropic diffusion-based defect detection for low-contrast glass substrates // *Image and Vision Computing.* 2008. V. 26. P. 187—200.
20. *Yongwei Yu, Guofu Yin, Honghai Jiang, Qiang Huang.* Defect extraction method of arc magnet surface images based on adaptive morphological filtering // *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics.* 2005. V. 23. P. 325—338.
21. *Cunha Arthur L., Zhou Jianping, Do Minh N.* The Nonsubsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications // *IEEE Transactions on image processing.* 2006. V. 15. № 10. P. 3089—3101.
22. *Do Minh N., Vetterli Martin.* The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation // *IEEE Transactions on image processing.* 2005. V. 14, № 12. P. 2091—2106.
23. *Candès E.J., Donoho D.L.* Ridgelets: a key to higher-dimensional intermittency? // *Philosophical Transactions Mathematical Physical & Engineering Sciences.* 1999. V. 357. № 1760. P. 2495—2509.
24. *Candès E.J., Donoho D.L.* Ridgelets: New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with piecewise C2 singularities // *Communications on Pure & Applied Mathematics.* 2004. V. 57. № 2. P. 219—266.
25. *Tuceryan M., Jain A.K.* Texture Analysis / In *Handbook of Pattern Recognition and Vision*, C.H. Chen, L.F. Pau, P.S.P. Wang, Eds, World Scientific Publishing Co., Singapore, 1994. P. 235—276.
26. *Laws Kenneth I.* Texture Energy Measures. *Proceeding: Image understanding workshop*, Lee S. Baumann, Science Applications, Inc., Los Angeles, California, 1979. P. 47—51.