

Исследование методов обнаружения дефектов на изображениях внутренней поверхности труб *

Кретинин О.В., Цапаев А.П.

kretinin@list.ru | alexgrusp@mail.ru

Россия, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе представлено исследование методов обработки изображений в применении к задаче обнаружения дефектов на внутренней поверхности труб малого диаметра.

Приводится описание методов и результаты их исследования на реальных изображениях поверхности, даются рекомендации по использованию методов в автоматизированных системах визуального контроля.

Ключевые слова: визуальный контроль, обработка изображений, анализ текстуры, обнаружение дефектов, внутренняя поверхность труб

Введение

Областью данного исследования являются методы обработки изображений при автоматизации визуального контроля внутренней поверхности труб. Инспекция внутренней поверхности осуществляется на предприятиях изготовителях и потребителях труб, в частности при входном контроле в организациях производителях парогенераторов. Одним из подходов к обнаружению дефектов на изображениях поверхности труб является анализ текстуры. Обнаружение дефектов текстуры может быть определено как процесс определения положения и/или протяженности набора пикселей на текстурированном изображении с выделяющимися отклонениями в значениях их интенсивности или пространственной упорядоченности относительно фоновой текстуры.

Анализ текстуры имеет почти сорокалетнюю историю [9]. В 1970–1980-е годы алгоритмы в основном базировались на статистике первого и второго порядка значений яркости полутонового изображения как полутоновой матрицы вхождений пространственной области так и матрицы зависимости соседства полутонов [3]. В середине 1980х, методы на основе моделей, таких как Марковские Случайные Поля [4] и совместные авторегрессионные модели появились в качестве альтернативы. Вейвлеты, несмотря на многолетнюю известность, получили внимание специалистов по обработке изображений только после статьи [5], в которой обеспечивается дискретизация вейвлет-преобразования (ВП) и [6], в которой устанавливается связь между ВП и кратномасштабной теорией. Таким образом, методы обработки сигналов, основанные на преобразовании Габора и ВП заменили статистические и основанные на моделях методы [7]. Извлечение признаков в основном базировалось на энергии и энтропии. Следует отметить, что частотные при-

знаки работают хорошо для большинства приложений, однако, в [8] показано, что статистические признаки превосходят частотные [9].

Из перечисленного перечня работ видно, что методы отличаются своим многообразием как по математическому обеспечению, так и областям применения. Рассмотреть все из представленных подходов не представляется возможным, поэтому для исследования выбраны два метода: метод основанный на ориентированных фильтрах и метод основанный на матрице вхождений коэффициентов вейвлет-преобразования. Ввиду отсутствия программного кода данных методов в свободном доступе разработка программ осуществлялась авторами самостоятельно. Кроме того, предложен новый метод – метод оценки изменения формы спектра [10].

Метод оценки изменения формы спектра (ОИФС)

В основе нового метода лежит сравнение формы эталонного спектра со спектром исследуемого изображения посредством вычисления взвешенного евклидова расстояния [11].

Применение метода ОИФС для обнаружения дефектов на изображении поверхности разделяется на два этапа:

1. Настройка метода ОИФС на конкретную поверхность.
2. Классификация изображения поверхности на дефектное/ не дефектное с применением метода ОИФС.

Рассмотрим каждый этап более детально.

Настройка метода ОИФС. Целью данного этапа является определение параметров эталонной поверхности и порога дефектности P . В качестве параметров выступают два массива данных:

- Значения интенсивности спектра $\overline{s'_{ij}}$ на конкретных пространственных частотах, которые выступают в качестве признаков.

Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 16-07-20482.

- Весовые коэффициенты для каждого признака α_{ij} , которые характеризуют степень значимости каждого признака.

В качестве исходных данных для определения параметров эталона выступает набор изображений эталонной поверхности. Размер каждого изображения принят равным 36×36 пикс.

В данном исследовании набор состоит из 100 полутоновых изображений. Каждый элемент набора определяется следующим образом:

- на вход алгоритма подается развернутое эталонное изображение внутренней поверхности трубы;
- с помощью генератора случайных чисел вычисляются координаты расположения элемента набора;
- определяется изображение набора в вычисленных координатах размером 36×36 пикс.

Классификация методом ОИФС. При классификации с помощью метода ОИФС на вход алгоритма подается изображение внутренней поверхности трубы размером 36×36 пикс., а также параметры эталонной поверхности, вычисленные на этапе настройки. Вначале происходит вычисление спектра данного изображения п.1-3:

1. Вычислить ДПФ изображения:

$$Ft(i, j), \quad i, j = \overline{1, N},$$

где $N = 36$.

2. Вычислить спектр изображения:

$$Spectr(i, j) = 2 \cdot \frac{Ft(i, j) \cdot conjFt(i, j)}{2N},$$

где $conjFt(i, j)$ – комплексно сопряженное от $Ft(i, j)$.

3. Обрезать спектр изображения в соответствии с правилом:

$$Spectr'(i, j) = Spectr(i, j)$$

при $i = \overline{1, \frac{N}{2} + 1}, j = \overline{1, N}$, где N – число строк и столбцов матрицы $Spectr$.

Далее определяется взвешенное евклидово расстояние от данного спектра до эталонного по формуле:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^N \alpha_{ij}^2 (s'_{ij} - \overline{s'_{ij}})^2}$$

где s'_{ij} – элемент спектра $Spectr'$.

Решение о классификации принимается следующим образом:

Если $R > P$, то на изображении присутствует дефект;

Если $R \leq P$, то изображение не имеет дефектов.

Метод обнаружения дефектов, основанный на использовании матрицы вхождений коэффициентов вейвлет преобразования (МВКВ)

Матрица вхождений (co-occurrence matrix) – это двумерный массив C , в котором индексы строк и столбцов образуют множество V допустимых на изображении значений пикселей. Для полутоновых изображений V может быть множеством допустимых значений интенсивности (яркости). Значение $C(i, j)$ указывает, сколько раз значение i встречалось на изображении в некотором заданном пространственном отношении со значением j [1]. Обозначим через \mathbf{d} вектор перемещения $(\mathbf{dr}, \mathbf{dc})$, где \mathbf{dr} соответствует перемещению в направлении строк (вниз по изображению), а \mathbf{dc} – перемещение в направлении столбцов (вправо по изображению). Обозначим через V множество значений яркости. Полутоновая матрица вхождений C_d для изображения I определяется выражением [1]:

$$C_d[i, j] = |\{[r, c] | I[r, c] = i \text{ и } I[r + \mathbf{dr}, c + \mathbf{dc}] = j\}|$$

Применение метода МВКВ для обнаружения дефектов на изображении поверхности разделяется на два этапа:

- настройка метода МВКВ на конкретную поверхность;
- классификация изображения поверхности на дефектное/ не дефектное с применением метода МВКВ.

Рассмотрим алгоритм определения первого массива данных – вектора признаков.

1. Вычислить вейвлет преобразование изображения. В качестве порождающего вейвлета выбран вейвлет Добеши. Преобразование выполняется на один уровень. На выходе данного этапа алгоритма получаются четыре матрицы: матрица коэффициентов приближения A ; матрица коэффициентов деталей по горизонтали H ; матрица коэффициентов деталей по вертикали V ; матрица коэффициентов деталей по диагонали D .
2. Вычислить матрицы вхождений (МВ) для матриц A, H, V, D . Для каждой из матриц A, H, V, D вычисляются 4 МВ по числу схем взаимного расположения пикселей:
 - расстояние $d = 1$, угол $\theta = 0^\circ$;
 - расстояние $d = 1$, угол $\theta = 45^\circ$;
 - расстояние $d = 1$, угол $\theta = 90^\circ$;
 - расстояние $d = 1$, угол $\theta = 135^\circ$.
 Количество уровней МВ равно 8.

3. Для каждой из матриц вхождений для A , H , V , D при каждой схеме расположения пикселей определить свойства МВ:

контраст, вычисляемый по формуле:

$$CONTRAST = \sum_i \sum_j (i - j)^2 p(i, j);$$

энергия, вычисляемая по формуле:

$$ENERGY = \sum_i \sum_j \{p(i, j)\}^2;$$

корреляция, вычисляемая по формуле:

$$CORR = \sum_{ij} \frac{(i - \mu \cdot i)(j - \mu \cdot j)p(i, j)}{\sigma_i \sigma_j};$$

однородность, вычисляемая по формуле:

$$HOM = \sum_i \sum_j \frac{1}{1 + (i - j)^2} p(i, j).$$

4. Вычислить среднее и СКО каждого свойства (контраст, энергия, корреляция, однородность) по четырем схемам расположения пикселей для каждой матрицы A , H , V , D .

В результате выполнения данного перехода алгоритма получается вектор признаков для каждой из матриц A , H , V , D :

$$Features_x = \{\mu_{\text{контр}}, \sigma_{\text{контр}}, \mu_{\text{энергия}}, \sigma_{\text{энергия}}, \mu_{\text{корр}}, \sigma_{\text{корр}}, \mu_{\text{однор}}, \sigma_{\text{однор}}\}.$$

где x – индекс матрицы вейвлет коэффициентов A , H , V , D . Далее векторы признаков соединяются в один общий вектор признаков $Features$.

Метод обнаружения дефектов, основанный на применении ориентированных фильтров (ОРФ)

Подобно методу МВКВ применение метода ориентированных фильтров (ОРФ) можно разделить на два: настройка, классификация. Для вычисления признаков формируется набор четно и нечетно симметричных фильтров при различных ориентациях и масштабах (рис. 1). Рассмотрим алгоритм определения матрицы признаков.

1. Сформировать ядра фильтров. В данном исследовании применяются следующие фильтры:
 - нечетные фильтры ориентированных полос трех шкал и 6 ориентаций;
 - четный фильтр ориентированных полос;
 - фильтр пятен.
 Набор фильтров подбирался опытным путем, общее число ядер 20.
2. Для всех изображений набора выполнить п. 3-5

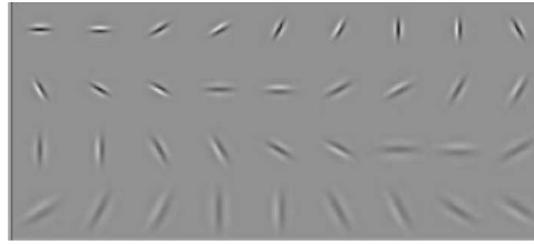


Рис. 1: Набор фильтров состоящий из 2 фаз (четная, нечетная), 3 шкал и 6 ориентаций [2]

3. Выполнить фильтрацию изображения набора. Результатом работы данного перехода алгоритма является набор из 20 отфильтрованных изображений
4. Для каждого из отфильтрованных изображений вычислить свойства:

$$\text{среднее: } \bar{g}_k = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M g_k(i, j)}{N \cdot M};$$

$$\text{СКО: } \sigma_k = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (g_k(i, j) - \bar{g}_k)^2},$$

где M , N – размеры отфильтрованных изображений, $g_k(i, j)$ – значение отфильтрованного изображения фильтром k в точке i, j .

5. Сформировать матрицу признаков для данного изображения набора $Features(n)$. Матрица имеет размер 20×2 , где строки характеризуют индекс ядра фильтра, а столбцы индекс свойства.
6. Вычислить среднее значение признаков $\overline{Features}$ по всему набору изображений из 100, каждый элемент которого \bar{f}_{ij} вычисляется по формуле

$$\bar{f}_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N f_{ij}(n)}{N}.$$

где $f_{ij}(n)$ – элемент вектора признаков $Features(n)$, вычисленный по n -му изображению исходного набора.

Исследование методов обнаружения на изображениях внутренней поверхности труб

Для исследования были подготовлены 100 участков эталонной поверхности, которые выбирались случайным образом и 100 участков изображений с дефектами. Примеры данных изображений представлены на рис. 2.

На вход каждого метода подавалось 200 изображений, и подсчитывалось число верных/неверных обнаружений. Результаты проведения эксперимента

в виде матриц неточностей, а также ошибок классификации представлены в таблицах 1–6. На рис.3 представлено сравнение общей ошибки классификации для трех методов. Матрица неточностей – матрица размера N на N , где N – это количество классов. Столбцы этой матрицы представляют класс установленный системой распознавания, а строки – истинный класс объекта исследования.

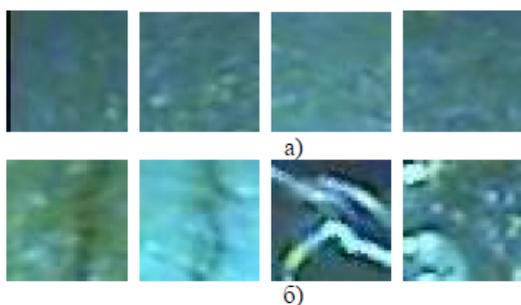


Рис. 2: Участки эталонной поверхности (а); участки дефектной поверхности (б)

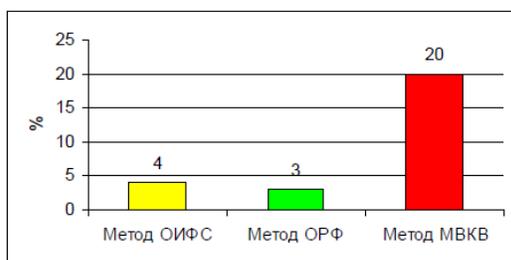


Рис. 3: Ошибки классификации

		Класс, установленный системой распознавания	
		Д	НД
Истинный класс	Д	94	6
	НД	2	98

Таблица 1: Матрица неточностей. Метод ОИФС

Класс	Ошибка 1 рода (ложное срабатывание)	Ошибка 2 рода (пропуск события)
Д	0.02	0.06
НД	0.06	0.02

Таблица 2: Ошибки классификации Метод ОИФС

В таблице 7 представлено время работы каждого из методов на ПК с параметрами: процессор с тактовой частотой 1.66 ГГц; ОЗУ 1Гб. Из данных таб-

		Класс, установленный системой распознавания	
		Д	НД
Истинный класс	Д	97	3
	НД	3	97

Таблица 3: Матрица неточностей. Метод ОРФ

Класс	Ошибка 1 рода (ложное срабатывание)	Ошибка 2 рода (пропуск события)
Д	0.03	0.03
НД	0.03	0.03

Таблица 4: Ошибки классификации Метод ОРФ

		Класс, установленный системой распознавания	
		Д	НД
Истинный класс	Д	60	40
	НД	0	100

Таблица 5: Матрица неточностей. Метод МВКВ

Класс	Ошибка 1 рода (ложное срабатывание)	Ошибка 2 рода (пропуск события)
Д	0.00	0.40
НД	0.40	0.00

Таблица 6: Ошибки классификации Метод МВКВ

лицы следует, что метод ОИФС является наиболее быстроедействующим.

Метод	Время работы с изображением 36x36 пикс., с.	Скорость работы, Мпикс./с
ОИФС	0.0022	0.589
МВКВ	0.065	0.02
ОРФ	0.09	0.0144

Таблица 7: Время работы методов обнаружения дефектов

Заключение

На основании вышеприведенных данных можно сделать следующие выводы:

- Скорость работы метода ОИФС на порядок превышает другие рассмотренные методы;
- Методы ОИФС и ОРФ надежно обнаруживают дефекты внутренней поверхности труб. Пропуск дефекта для методов составил 6% и 3% соответственно;
- Методы ОИФС можно рекомендовать для использования в автоматизированных системах

визуального контроля внутренней поверхности труб для обнаружения дефектов.

Литература

- [1] Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
- [2] Malik J., Belongie S., Leung T., Shi J. Contour and Texture Analysis for Image Segmentation // International Journal of Computer Vision, V.43, No.1, pp. 7–27, 2001.
- [3] Haralick R.M., Shanmugan K., Dinstein I., Textural features for image classification, IEEE Trans. SMC 3 (1973) 610–621.
- [4] Geman S., Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distribution and the Bayesian restoration of images // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, Issue 6, p. 721–741.
- [5] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets // Commun. Pure Appl. Math. 41 (1988) 909–996.
- [6] Mallat S.G. Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Trans. PAMI 11 (1989) 674–693.
- [7] Bovik A.C., Clark M., Geisler W.S. Multichannel texture analysis using localized spatial filter // IEEE Trans. PAMI 12 (1990) 55–73.
- [8] Weszka J.S., Dyer C.R., Rosenfeld A., Comparative study of texture measures for terrain classification // IEEE Trans. SMC 6 (1976) 269–285.
- [9] Latif-Amet A. et al. An efficient method for texture defect detection: sub-band domain co-occurrence matrices // Image and Vision Computing 18 (2000) 543–553.
- [10] Кретинин О.В., Цапаев А.П. Программа обработки изображений для обнаружения дефектов поверхности. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2014613819 от 08.04.2014.
- [11] Кретинин О.В., Цапаев А.П. Методы сегментации изображений в задачах обнаружения дефектов поверхности. Компьютерная оптика. – 2012. – Т.36. – №3. – С.448–452.

Об авторах

Кретинин Олег Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизация машиностроения Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексева. kretinin@list.ru

Цапаев Алексей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизация машиностроения Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексева. alexgrusp@mail.ru.

Использование возможностей программной среды ADEM CAD для изготовления литых художественных изделий с помощью аддитивных технологий*

Д.А. Бояков, Е.А. Скворцова, Е.Ю. Исаев

danielsdan9@gmail.com | KOTynock_96@mail.ru | Eugen.Isaev.SSAU@yandex.ru

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

В работе рассматриваются процессы моделирования памятной медали в программной среде ADEM CAD и дальнейшее ее изготовление методом литья в силиконовые формы. Данные процессы могут использоваться для создания изделий из пластика, металлополимеров и других материалов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, литые изделия, мастер-модель, CAD-система

Harnessing the power of ADEM CAD software environment for the manufacture of cast art products using additive technologies*

D.A. Boyakov, E.A. Skvortsova, E.Y. Isaev

Samara National Research University

The article examines the processes of modeling commemorative medal in ADEM CAD software environment and further its production by casting in silicone molds. These processes can be used to create plastic products, and other materials metallopolymers.

Keywords: additive technology, castings, master model, CAD-systems.

Введение

Трудно встретить такую область применения, где хоть косвенно не использовалось бы 3D-моделирование и компьютерная графика. Не остаются в стороне и литые изделия, а точнее литые металлические художественные изделия. Ювелирное искусство, декоративное искусство, мелкая скульптура – все это является художественными изделиями из металла. Художественное литье – это отливка художественных произведений из металлов, полимеров (вулканизируемых или отверждаемых химически), из металлов чаще всего это золото, серебро, бронза, олово, медь, чугун, сплавы алюминия, из полимеров используются резины, силиконы, пластизол ПВХ.

Основными видами литых художественных изделий являются лепнина, мелкая пластика и скульптура. Традиционные методы литья уходят в прошлое, на смену им приходят аддитивные технологии: силиконовые формы, мастер-модели и т.д. Но для того, чтобы изготовить изделие, сначала требуется построить 3D-модель продукта. В данной работе представлен весь процесс получения готового литого художественного изделия: от построения 3D-модели в программной среде ADEM CAD до выходной продукции.

Авторы работы выражают благодарность Лаборатории аддитивных технологий Самарского Университета, Кафедре инженерной графики Самарского Университета и лично Чемпинскому Л.А. и Иващенко В.И. при подготовке данной работы. Работа опубликована по гранту РФФИ №16-07-20482.

Построение 3D-модели в программной среде ADEM CAD

Система ADEM предназначена для автоматизации решения проектных, конструкторских и технологических задач в области машиностроения. Она используется в следующих областях: авиационной, атомной, аэрокосмической, машиностроительной, электро- и приборостроительной и других. Система ADEM также ориентирована на проектирование и производство сложной оснастки, инструмента, штампов и пресс-форм. [1] В качестве литого художественного изделия была выбрана памятная медаль, посвященная 100-летию со дня рождения Панина В.И.

Вначале требовалось построить саму изготавливаемую медаль. Формой медали был выбран цилиндр (высота $H = 5$ мм, диаметр $D = 60$ мм). Следующий шаг – создание рабочей плоскости с двух сторон. С помощью команды «Отверстие» был получен желаемый результат: цилиндрическое углубление с двух сторон диаметрами $d = 58$ мм и глубиной $h = 0,5$ мм. Так же на одной из сторон была создана дополнительная рабочая плоскость диаметром $d_1 = 45$ мм для нанесения эмблемы. Далее на получившейся окантовке с одной стороны необходимо нанести надпись «КуАИ – СГАУ Кафедра инженерной графики» по окружности диаметром $d_2 = 50$ мм. Для этого использовался шриффт «TrueType». С помощью команды «Смещение» и «Отверстие» были получены объемные буквы. Таким же образом была получена объемная надпись. В конце для фотографии была создана рамка толщиной $h_3 = 0,15$ мм.