

Распознавание неоднородностей, определение их геометрических характеристик, построение 3-D геометрической модели в задачах неразрушающего контроля¹

А.А. Николаев

кафедра “Вычислительная математика и математическая физика”

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

beloian@km.ru

Аннотация

Разработан новый быстрый подход реализации систем технического машинного зрения на основе контурного анализа при неразрушающем контроле магнитным и тепловым методами. Предложен способ построения 3-D геометрической модели обнаруженных неоднородностей на фоне модели объекта контроля. Разработаны элементы программного комплекса на основе теории контурного анализа и других элементов теории распознавания образов. Данная работа является составной частью разрабатываемой автором и коллективом кафедры автоматизированной технологии распознавания дефектов в машиностроительных конструкциях и оценки безопасности их эксплуатации.

Ключевые слова: машинное (компьютерное) зрение, распознавание образов, контурный анализ, фильтрация, диагностика, дефект.

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует достаточное количество методов для диагностирования дефектов, которые не разрушают контролируемое изделие [13]. На основе этих методов создаются диагностические комплексы (например “КОМПЛЕКС-2.05” компании ООО “Институт “ДИМЕНСтест” или “Марс” компании ООО “Ханк”), состоящие из аппаратной и программной частей. Результатом работы диагностических комплексов чаще всего является матричный набор параметров измерения [1, 2, 3] (рис. 1).

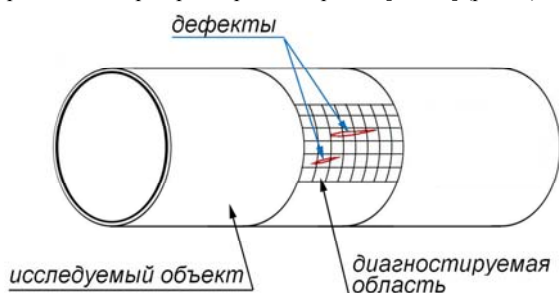


Рис. 1. Диагностируемая область исследуемого объекта в матричном представлении

Так, например, для неразрушающего магнитного метода диагностирования такими параметрами могут являться значения магнитной индукции, магнитного потока и, напряженности магнитного поля, а для неразрушающего теплового метода – распределения температуры над всей поверхностью объекта контроля.

По визуализированному матричному набору (рис. 2) исследуемого параметра оператору предлагается определить наличие дефектов, и их геометрические размеры. Часто такие изображения поступают оператору в реальном времени, т.е. в достаточно быстром темпе, и являются несовершенными: обладают недостаточной к фону контрастностью, четкостью, искажены помехами и шумами. Поэтому по таким сигналам оператору часто бывает затруднительно принять правильное решение, а системы машинного зрения, основанные на традиционном подходе обработки каждой точки изображения и имеющие более низкую зрительную эффективность по сравнению с человеком, “захлебываются”, обрабатывая непомерные объемы данных.

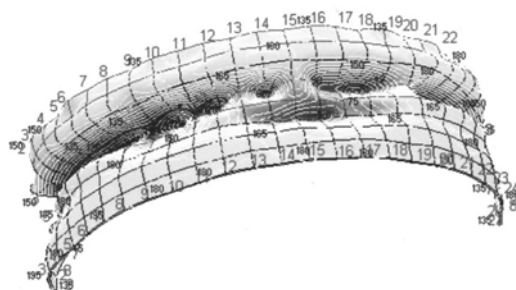


Рис. 2. Пример отфильтрованного матричного набора параметра измерения

Решением проблемы построения автоматизированной системы выявления и классификации неоднородностей, построения 3-D геометрической модели контролируемого изделия с обнаруженными неоднородностями, работающей в режиме реального времени, может быть разработанный и описанный в данной работе комплексный алгоритм, основанный на использовании подхода контурного анализа (закключающемся в отказе от обработки каждой точки изображения и переходе к обработке его контуров [4], т.е.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 07-08-00574-а

переходом от растрового зашумленного изображения к векторному).

2. ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КАК СИСТЕМЫ КОНТУРОВ

Задача построения 3-D геометрической модели неоднородностей (дефектов) на фоне геометрической модели объекта контроля является задачей компьютерного зрения. Имеется изображение, получаемое в режиме реального времени. В рассматриваемых методах неразрушающего контроля (магнитном и тепловом) задачей предобработки часто является задача подавления шума (так в [3] используются медианные фильтры). В разрабатываемой системе к задачам предобработки относятся также адаптивная бинаризации и морфологическое расширение. В качестве задачи извлечения признаков рассматривается задача выделения контуров. Для выделения контуров использован алгоритм "Жука" [9]. Также может быть использован любой другой алгоритм выделения контуров, например алгоритм Розенфельда [10] или выделение с помощью активных контуров [11]. Задача обнаружения неоднородностей (дефектов) является задачей обнаружения объектов, ее можно рассмотреть как задачу распознавания зашумленных контуров (по сравнению, например, с [5]). Задача построения геометрической модели неоднородности является задачей анализа характеристик объекта.

Исследуемые эталонные геометрические модели дефектов представляются в виде классов систем эквализированных контуров.

Задача разрешения контуров (дефектов) в данной статье не рассматривается.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ – ЗАДАЧА РАСПОЗНАВАНИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ КОНТУРОВ

3.1 Постановка задачи классификации двух дефектов – задача распознавания двух зашумленных контуров

Рассмотрим задачу классификации дефектов как задачу распознавания зашумленных контуров на примере двух классов (часто можно ограничиться моделью дефектов (контуров) в виде продольной трещины и эллипсовидной раковины), используя действительное координатное пространство E^{2k} и комплекснозначное пространство C^k [3]. Пусть $\Gamma_{(1)}^{(c)} = \{\gamma_{(1)}(n)\}_{0,k-1}$ и $\Gamma_{(2)}^{(c)} = \{\gamma_{(2)}(n)\}_{0,k-1}$ - эталонные контуры классов A_1 и A_2 . На устройство распознавания подается либо зашумленный контур первого класса, равный $N_{(1)} = \Gamma_{(1)}^{(c)} + Z$, либо второго класса, равный $N_{(2)} = \Gamma_{(2)}^{(c)} + Z$, где Z - шумовой контур и

$$\Gamma_{(1)}^{(c)} = \left| \mu_{(1)} \right| \exp \{i \Delta \varphi_{(1)}\} \{\gamma_{(1)}(n + d_{(1)})\}_{0,k-1},$$

$$\Gamma_{(2)}^{(c)} = \left| \mu_{(2)} \right| \exp \{i \Delta \varphi_{(2)}\} \{\gamma_{(2)}(n + d_{(2)})\}_{0,k-1}.$$

Параметры $|\mu|$ - масштаб, $\Delta \varphi$ - поворот и d - сдвиг для каждого контура предполагаются неизвестными.

Задача распознавания состоит в обоснованном отнесении зашумленного контура N к одному из классов A_1 или A_2 . Для принятия решения необходимо сформировать безусловное отношение правдоподобия и сравнить его с пороговым значением. Функции правдоподобия контуров $N_{(1)}$ и $N_{(2)}$ имеют соответственно вид:

$$\Lambda_c(N, |\mu_{(1)}|, \Delta \varphi_{(1)}, d_{(1)}) = c \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [\|N\|^2 + \|\Gamma_{(1)}^{(c)}\|^2 - 2 \operatorname{Re}(N, \Gamma_{(1)}^{(c)})] \right\},$$

$$\Lambda_c(N, |\mu_{(2)}|, \Delta \varphi_{(2)}, d_{(2)}) = c \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [\|N\|^2 + \|\Gamma_{(2)}^{(c)}\|^2 - 2 \operatorname{Re}(N, \Gamma_{(2)}^{(c)})] \right\}.$$

Тогда логарифм условного отношения правдоподобия можно записать в следующем виде:

$$\ln [L(N, |\mu_{(1)}|, |\mu_{(2)}|, \Delta \varphi_{(1)}, \Delta \varphi_{(2)}, d_{(1)}, d_{(2)})] =$$

$$= -\frac{1}{2\sigma^2} [\|\Gamma_{(1)}^{(c)}\|^2 - \|\Gamma_{(2)}^{(c)}\|^2 - 2[\operatorname{Re}(N, \Gamma_{(1)}^{(c)}) - \operatorname{Re}(N, \Gamma_{(2)}^{(c)})],$$

где σ^2 - дисперсия шумового контура Z .

Для нахождения оценок $|\mu_{(1)}|, |\mu_{(2)}|, \Delta \varphi_{(1)}, \Delta \varphi_{(2)}, d_{(1)}, d_{(2)}$ используется метод максимального правдоподобия (МП). Подаваемый зашумленный контур сравнивается с эталонным контуром $\Gamma_{(1)}^{(c)}$, методом МП строятся оценки. Аналогичные действия производятся по второму каналу.

Использование [6] оценок параметров $\Delta \hat{\varphi}_{(1)}$ и $\Delta \hat{\varphi}_{(2)}$ позволяет свести задачу к задаче распознавания полностью известных контуров со следующим правилом принятия решения в пользу класса A_1 :

$$\operatorname{Re}(N, \Gamma_{(1)}^{(c)}) - \operatorname{Re}(N, \Gamma_{(2)}^{(c)}) \geq U_{1,2},$$

где $U_{1,2} = \sigma^2 \ln \Lambda_0 + 0.5 (\|\Gamma_{(1)}^{(c)}\|^2 + \|\Gamma_{(2)}^{(c)}\|^2)$,

$\operatorname{Re}(N, \Gamma_{(1)}^{(c)})$ и $\operatorname{Re}(N, \Gamma_{(2)}^{(c)})$ - действительные компоненты скалярного произведения соответствующих контуров.

3.2 Постановка задачи классификации дефектов как задачи распознавания зашумленных контуров

Рассмотрим теперь задачу классификации дефектов как задачу распознавания зашумленных контуров в составе алфавита из M классов A_1, A_2, \dots, A_M . В соответствии с работами [4, 7], устройство распознавания содержит набор из M фильтров, каждый из которых согласован с одним из эталонных сигналов алфавита. Решающее устройство определяет номер фильтра с максимальным по модулю выходным сигналом и при превышении порогового уровня выносится решение в пользу класса, номер которого совпадает с номером фильтра (рис. 3).

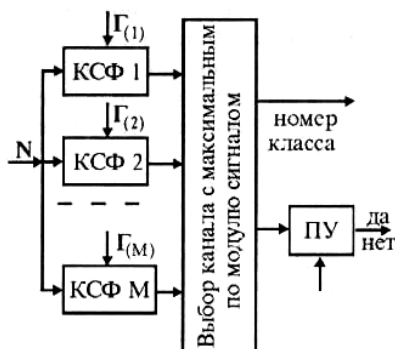


Рис. 3. Структура программного устройства распознавания образов для алфавита из M классов:

КСФ - контурный согласованный фильтр [4]; ПУ - пороговое устройство

Далее решается задача определения является ли подаваемый на вход контур N шумовым или зашумленным (см. ПУ на рис. 3). Правило обнаружения зашумленного контура будет иметь вид

$$|\eta(d)|_{\max} > \sqrt{2}\sigma\|\Gamma\|\sqrt{\ln \Lambda_0} = U_{|\mu|},$$

где $U_{|\mu|}$ - величина, зависящая от оценки масштаба контура, уровня шумов, допустимых рисков и априорных вероятностей классов.

3.3 О геометрических параметрах контуров (дефектов)

Контурные согласованные фильтры обеспечивают образование количественной меры схожести между фильтруемым контуром N и эталонной формой, определяемой контуром Γ . Часто бывает, что эталонные формы имеют ряд общих признаков, связанных с некоторыми общими свойствами, например: прямолинейность линии фрагмента контура, симметричность элементарных векторов, степень правильности задаваемой контуром фигуры и т.п. При наличии таких общих признаков можно говорить о классе форм и появляется возможность учесть закономерности определенного класса форм в выражении для КСФ. В результате такой КСФ будет вырабатывать меру схожести с эталоном не для одного конкретного контура, а для целого класса контуров с общими свойствами.

Для идентификации также можно использовать следующие характеристики формы фигуры: коэффициент формы, определяемый как отношение квадрата периметра контура к площади; ширину фигуры (трактуемой в смысле ширины текущей горизонтали контура и трактуемой как минимальное расстояние между противоположными сторонами) [4, 12]; модуль нормированного скалярного произведения контура эталонного и распознаваемого [4].

В данной работе для построения геометрической модели дефекта прежде всего используются следующие найденные параметры: координаты геометрического центра масс, найденный класс эталонных контуров, параметры масштаба $|\mu|$ и поворот $\Delta\varphi$.

4. ПОСТРОЕНИЕ 3-D ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ФОНЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Входной информацией данной задачи являются линии уровней, полученные путем разбиения исходного изображения на уровни, выделения из них контуров, отнесении к одному из классов. Данные контура характеризуются классом, которому принадлежат, а также координатами геометрического центра масс, параметрами оценок масштаба $|\hat{\mu}_{z_i}|$ и угла ориентации $\Delta\hat{\varphi}_{z_i}$, где индекс

z_i означает номер уровня. В отличие от зашумленных выделенных контуров, имеющих большое количество точек, или от зашумленной исходной матрицы параметра измерения, получаемые распознанные контуры имеют сравнительно небольшое количество точек. Входные линии уровней подаются на вход задаче триангуляции (может быть использован генератор пространственных сеток TetMesh или другой триангуляционный генератор, основанный, например, на триангуляции Делоне) и происходит разбиение и создание, описывающих неоднородность (дефект), треугольников. Поверхность неоднородностей, описанная таким образом, является достаточно универсальной и занимает небольшое количество памяти (в смысле хранения).

5. КОМПЛЕКС ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ КОНТУРОВ (ДЕФЕКТОВ) И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В соответствии с теорией распознавания образов, теорией контурного анализа [4], на основе представленных зависимостей разработан комплексный алгоритм распознавания для различных классов дефектов, включающий в себя следующие алгоритмы: выделения контуров [9-12], эквализации и стандартизации кодов контуров, огрубления контуров на основе метода получения выпуклого контура Грэхема (R.L. Graham) и метода получения выпуклого контура Джарвиса (R.A. Jarvis), пересчета кодов контуров из действительного координатного пространства E^{2k} и комплекснозначного пространства C^k , оценки параметров линейных преобразований контуров, распознавания контуров в пространстве C^k , визуализации (в виде линий уровней, триангуляционной иррациональной сетки, регулярной сетки).

На основе комплексного алгоритма в Microsoft VS 7.0 реализованы следующие элементы программного комплекса.

На вход программному комплексу подается набор классов (дефектов), распознаваемая матрица параметра измерения диагностирования (см. рис. 2; в нашем случае, магнитным методом), априорные вероятности и отношение рисков, отношение сигнал/шум. Результатом работы программного комплекса является решение об отношении распознаваемого контура к одному из классов, оценки линейных преобразований ($|\hat{\mu}|$, $\Delta\hat{\varphi}$ и \hat{d} , смещение контура относительно начала координат) или решение о том, что

распознаваемый контур является шумовым. По обработанным данным производится построение 3-D геометрической модели системы дефектов.

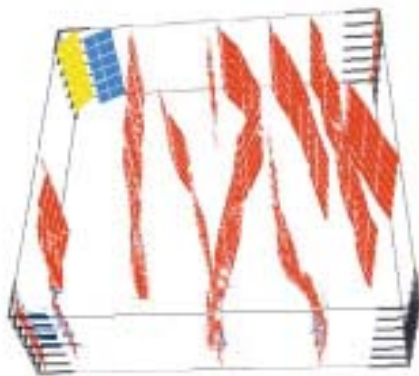


Рис. 4. Пример 3-D модели системы трещин в квадратной пластине

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный комплексный алгоритм на основе контурного анализа, других элементов теории распознавания образов позволяет существенно сократить время создания 3-D геометрической модели системы неоднородностей (дефектов) на фоне геометрической модели объекта контроля. Дальнейшее увеличение скорости обработки, по мнению автора, реализуемо путем включения в комплексный алгоритм элементов адаптивного обучения под конкретный неразрушающий контроль. Технологии разработанного программного комплекса [8] для создания 3-D геометрической модели системы неоднородностей (дефектов) по входному зашумленному матричному изображению являются собственными разработками автора и кафедры. Автоматически получаемая 3-D геометрическая модель системы дефектов на фоне объекта контроля в дальнейшем импортируется в программный комплекс, решающий трехмерные и оболочечные задачи напряженно-деформированного состояния и задачи прогнозирования.

7. БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Николаев А.А. *Вычислительная диагностика дефектов типа трещины магнитным методом и прогнозирование их дальнейшего развития* / И.К. Краснов, А.А. Николаев // *Научные материалы Первой международной научно-технической конференции "Аэрокосмические технологии"*, М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. С. 144-146.

[2] Николаев А.А. *Вычислительная диагностика дефектов типа трещины магнитным методом* / А.А. Николаев // *Студенческий научный вестник, Сборник тезисов докладов общеуниверситетской научно-технической конференции "Студенческая научная весна - 2005"*, 4-29 апреля 2005 г., МГТУ им. Н. Э. Баумана / под ред. К.Е. Демикова, М.: НТА "АПФН", 2005, том 2. С. 222-223.

[3] Будадин О.Н. *Тепловой неразрушающий контроль изделий: Научно-методическое пособие*. / О.Н. Будадин, А.И. Потапов, В.И. Колганов, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова. – М.: Наука, 2002. - 472 с.

[4] *Введение в контурный анализ. Приложения к обработке изображений и сигналов* / под ред. Я.А. Фурмана, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. -, 592 с.

[5] *Морфологический анализ изображений*. / Пытьев Ю.П. // *Доклад АН СССР*, 1983, т.269, №5. С. 1061-1064.

[6] *Статистическая теория распознавания образов*. / Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. // М.: Радио и связь, 1986. - 532 с.

[7] *Разрешение и распознавание радиосигналов: Уч. пособие*. / Сосулин Ю.Г. // М.: МАИ, 1983.

[8] Николаев А.А. *Математические аспекты классификации дефектов и определения их геометрических параметров при диагностировании магнитным методом* / А.А. Николаев // *Международная научная конференция "Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании" 2006 - Тезисы докладов, г. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2006. С. 35-36.*

[9] Дуда Р., Харг П. *Распознавание образов и анализ сцен*. / М.: Мир, 1976.

[10] Розенфельд А. *Распознавание и обработка изображений*. / М.: Мир, 1987.

[11] Blake A., Isard M. *Active Contours*. / Springer-Verlag, 1998.

[12] Klette R., Rosenfeld A. *Digital geometry. Geometric methods for digital picture analysis*. / San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2004.

[13] Ключев В.В. *Неразрушающий контроль и диагностика*. / М.: Машиностроение, 2005.