

С. С. САДЬКОВ, А. А. ОРЛОВ, А. А. ЕРМАКОВ

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЛИНЕЙЧАТЫХ ОБРАЗОВ НА ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ СНИМКАХ

Дается определение полосового (линейчатого) образа и строится его модель. Разрабатываются метод и алгоритм многомасштабной фильтрации полосовых образов. Представлена методика обработки дефектоскопических снимков, содержащих линейчатые образы дефектов. Приводится пример обработки реального изображения.

Ключевые слова: пространственно-распределенный объект, топологическое отношение, муниципальные геоинформационные системы, матрица шестнадцати пересечений.

В настоящее время прослеживается тенденция развития систем технического зрения и методов обработки изображений в цифровой дефектоскопии. Цифровой анализ позволяет быстро обнаруживать, измерять и классифицировать характер дефектов для обеспечения неразрушающего контроля различных материалов и изделий. Существует множество публикаций, связанных с анализом дефектоскопических снимков различной природы путем компьютерной обработки изображений. Основные подходы к решению таких задач представлены в статьях [1, 2].

Многие дефекты имеют специфические сложные образы. Например, очень распространены дефекты (трещины, риски, царапины), имеющие протяженную линейчатую форму (полосы). В существующих системах технического зрения, применяемых в дефектоскопии, в основном используются классические методы цифровой обработки изображений [3], не позволяющие выполнить более детальный разбор сложных по форме дефектов. Поэтому актуальным является создание, исследование и применение новых, более эффективных, специальных методов обработки изображений полосовых дефектов.

Из теории сигналов известен так называемый фильтр воспроизведения полезного сигнала [3]. Этот фильтр позволяет выделить из шума и помех сигнал заданной формы. Однако такой фильтр используется в основном для обработки одномерных сигналов. В нашем случае

к исходным данным для анализа относится изображение, которое рассматривается как двумерный сигнал. Предполагается использовать специфику формы образов — их полосовую структуру (производить фильтрацию вдоль полос).

Цель настоящей работы заключается в разработке специальной технологии обработки дефектоскопических снимков, содержащих линейчатые образы дефектов.

Математическая модель полосового образа. Пусть $x = x(t)$, $y = y(t)$ — параметрические уравнения некоторой кривой (рис. 1, пунктирная кривая) на плоскости R^2 . Множество точек, расположенных вдоль кривой $x = x(t)$, $y = y(t)$ на расстоянии, не превышающем значения σ ,

$$S = \{(x_0, y_0) \mid (x_0 - x(t))^2 + (y_0 - y(t))^2 \leq \sigma^2\},$$

назовем областью полосы, заданной этой кривой.

Кривую $x = x(t)$, $y = y(t)$ будем называть образующей полосы S .

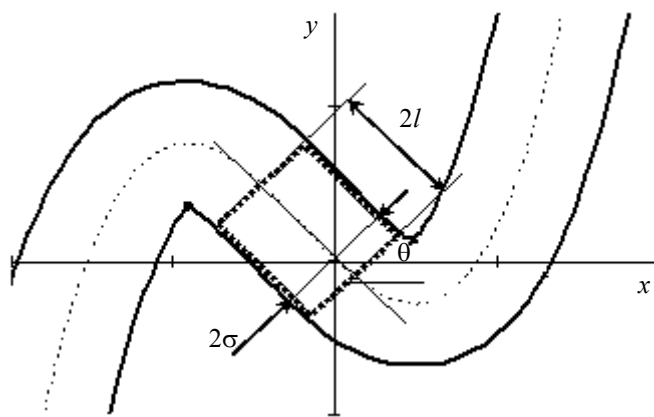


Рис. 1

Если значение σ (полуширина сегмента) является функцией $\sigma = \sigma(t)$, то полосу S назовем полосой с переменной шириной, так что $2\sigma(t)$ — ширина этой полосы, изменяющаяся в соответствии с образующей кривой $x = x(t)$, $y = y(t)$.

Сцена (изображение) полосы задается характеристической функцией

$$\chi(x_0, y_0) = \begin{cases} 1, & (x_0, y_0) \in S, \\ 0. & \end{cases}$$

Профилем полосы S в точке (x, y) будем называть сечение поверхности $z = \chi(x, y)$ нормальной плоскостью в пространстве R^3 к образующей кривой $x = x(t)$, $y = y(t)$ в точке (x, y) . Профиль изображения полосы S будет иметь прямоугольную форму.

Обобщим понятие образа полосы, видоизменив ее профиль. Для этого будем полагать, что полосовое изображение состоит (точнее, интегрируется) из бесконечного множества профилей, расположенных вдоль кривой $x = x(t)$, $y = y(t)$.

Пусть $A(x)$ — профиль полосы, так что

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} A(x) = 0,$$

тогда характеристическая функция изображения полосы профиля $A(x)$ определится как криволинейный интеграл:

$$\chi(x_0, y_0) = \int_{\substack{x=x(t), \\ y=y(t)}} A(|(x, y) - (x_0, y_0)|) ds.$$

Примеры изображения кривой (а), полосы с прямоугольным профилем (б) и полосы, где $A(x)$ — гауссиан (в), приведены на рис. 2.



Рис. 2

Прямоугольник, аппроксимирующий часть полосы, будем называть сегментом полосы. Обозначим полудлину сегмента как l , а угол наклона сегмента (равный углу наклона нормали к образующей полосы) — θ (см. рис. 1).

Воспроизведение одномерных сигналов. Рассмотрим одномерный случай. Фурье-спектр фильтра воспроизведения полезного сигнала определяется как

$$\Psi(\omega) = \frac{W_s(\omega)}{W_s(\omega) + W_n(\omega)},$$

где $W_s(\omega)$ и $W_n(\omega)$ — энергетический спектр (плотность мощности) полезного сигнала и помех.

Под помехами (шумами) будем понимать все сигналы вида, отличного от $s(x)$.

Энергетические спектры определяются как

$$W_s(\omega) = |S(\omega)|^2 \text{ и } W_n(\omega) = |N(\omega)|^2,$$

где $S(\omega)$, $N(\omega)$ — фурье-спектры полезного сигнала $s(x)$ и помех $n(x)$ соответственно.

Полезный сигнал (в нашем случае это функция $s(x)$) содержится в исходном сигнале $f(x)$ в сумме с шумами и помехами $n(x)$:

$$f(x) = s(x) + n(x).$$

Пусть $\psi(x)$ — фильтр воспроизведения полезного сигнала, $g(x)$ — функция восстановленного сигнала ($g(x) = f(x) \otimes \psi(x)$). С помощью фильтра $\psi(x)$ производится минимизация средней квадратической ошибки, которая характеризует степень отклонения функции восстановленного сигнала $g(x)$ от полезного $s(x)$:

$$\varepsilon = \mathbf{M}[(g(x) - s(x))^2] = \mathbf{M}[(f(x) \otimes \psi(x) - s(x))^2] \rightarrow \min,$$

где \mathbf{M} — оператор среднего.

Пусть теперь $s(x)$ — многомасштабная функция, т.е. $s = s(x/\sigma)$, так что $\sigma \in [\sigma_1, \sigma_2]$ (σ_1 , σ_2 — минимальное и максимальное значения масштаба соответственно). Для фильтрации сигналов различного масштаба в равной степени необходимо, чтобы средняя квадратическая ошибка была одинаковой для каждого значения σ из $[\sigma_1, \sigma_2]$. В качестве критерия оценки точности функционирования фильтра примем среднее значение ошибки для различных масштабов:

$$\varepsilon = \mathbf{M}_\sigma \{ \mathbf{M}[(f(x) \otimes \psi(x) - s(x/\sigma))^2] \} \rightarrow \min,$$

где \mathbf{M}_σ — оператор среднего по масштабу σ .

Можно доказать, что такой критерий обеспечивается фильтром при

$$\Psi(\omega) = \frac{\mathbf{M}_\sigma[W_s(\sigma\omega)]}{\mathbf{M}_\sigma[W_s(\sigma\omega)] + W_n(\omega)},$$

так что

$$\mathbf{M}_\sigma[W_s(\sigma\omega)] = \frac{1}{\sigma_2 - \sigma_1} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} W_s(\sigma\omega) d\sigma.$$

Двумерная фильтрация вдоль полосы. Функцию $s(x, y)$, которая максимально соответствует изображению полосы $\chi(x, y)$ в каждой точке области ее сегмента, назовем детектором сегмента полосы (или детектором полосы).

В данном случае детектор сегмента полосы будет определять полезный двумерный сигнал. Можно показать, что если полоса имеет прямоугольный профиль, то

$$s(x, y) = \begin{cases} e^{-y^2/2}, & -1 \leq x \leq 1, \\ 0. & \end{cases}$$

Пусть $S(\omega, \nu)$, $N(\omega, \nu)$ — фурье-спектры детектора сегмента полосы и функции шума соответственно.

Назовем воспроизводящим интегральным преобразованием по сегменту полосы (ВИПСП) преобразование $\mathbf{H}_\theta[\cdot]$, выполняющее фильтрацию в пределах $[\sigma_1, \sigma_2]$ функции $f(x, y)$ вдоль каждого направления θ . Спектральная функция $g(x, y, \theta)$ формируется по правилу

$$G(\omega, \nu, \theta) = F(\omega, \nu) \frac{M_s}{M_s + |N(\omega, \nu)|^2},$$

где $F(\omega, \nu)$, $F(\omega, \nu, \theta)$ — фурье-спектры функций $f(x, y)$ и $g(x, y, \theta)$ соответственно,

$$M_s = \frac{1}{\sigma_2 - \sigma_1} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \left| S(\mathbf{Rot}(\sigma\omega, l\nu)) \right|_\theta^2 d\sigma.$$

Преобразование исходного изображения $f(x, y)$ на основе ВИПСП в изображение $g(x, y)$, при котором выполняется условие

$$g(x, y) = \max_\theta \mathbf{H}_\theta[f(x, y)],$$

назовем воспроизведением полосы (ВП).

С помощью ВП можно найти максимумы в откликах ВИПСП, тем самым среди сегментов разной ориентации определив сегмент, который наилучшим образом соответствует части полосы.

Приведем алгоритм воспроизведения полосы:

- 1) формирование фурье-спектра $F(\omega, \nu)$ исходного изображения $f(x, y)$;
- 2) вычисление спектра шума $N(\omega, \nu)$ по области изображения, которая не содержит полезного сигнала;

- 3) выполнение воспроизводящего интегрального преобразования

$$G(\omega, \nu, \theta) = \mathbf{H}_\theta[F(\omega, \nu)];$$

- 4) обратное преобразование фурье-спектра $G(\omega, \nu, \theta)$ в $g(x, y, \theta)$;

- 5) поиск максимумов в функции $g(x, y, \theta)$

$$g(x, y) = \max_\theta g(x, y, \theta).$$

Методика обработки дефектоскопических изображений. Методика обработки и анализа дефектоскопических изображений, содержащих полосовые образы, включает следующие этапы:

- 1) воспроизведение полосовых образов с помощью разработанного алгоритма;
- 2) бинаризация фильтрованного изображения;
- 3) вычисление площади выделенных областей;
- 4) устранение малых (незначачих) областей;

- 5) определение признаков (характеристик) выделенных дефектных областей;
- 6) классификация дефектов.

Фильтрация позволяет выделить образы протяженной формы, которые, вероятнее всего, являются дефектными, и подавить фоновые шумы и помехи, вызванные неоднородной структурой оцениваемой поверхности.

Пороговая бинаризация изображения необходима для отделения дефектных областей от фона. В результате бинаризации возможно выделение малых зашумленных областей, которые не являются дефектными. Для устранения из рассмотрения таких областей выполняется их отсечение по площади. Порог бинаризации необходимо выбирать в зависимости от уровня значимости обнаруживаемых дефектов.

Этап вычисления геометрических признаков объектов основан на использовании известных алгоритмов обработки монохромных (бинарных) изображений, вычисляются их площадь, длина, ширина и др.

На этапе классификации образов выполняются распознавание и классификация областей. В зависимости от их ширины определяется значимость дефекта. В результате получается характеристическое (маркированное) изображение с отмеченными областями значимых дефектов.

Экспериментальные результаты. На рис. 3 приведен пример воспроизведения образа трещины как полосы прямоугольного профиля на дефектоскопическом изображении (здесь *a* — исходное изображение, *b* — результат фильтрации; *в*, *г* — их бинарные образы соответственно). Обработка выполнена при параметрах, которые соответствуют выделяемому объекту: угол наклона сегмента полосы $\theta \in [0, \pi)$, полуширина полосы $\sigma \in [0, 5, 3]$, полудлина сегмента полосы $l = 3$. Спектр помех $N(\omega, \nu)$ определен по области изображения, которая не содержит трещины.

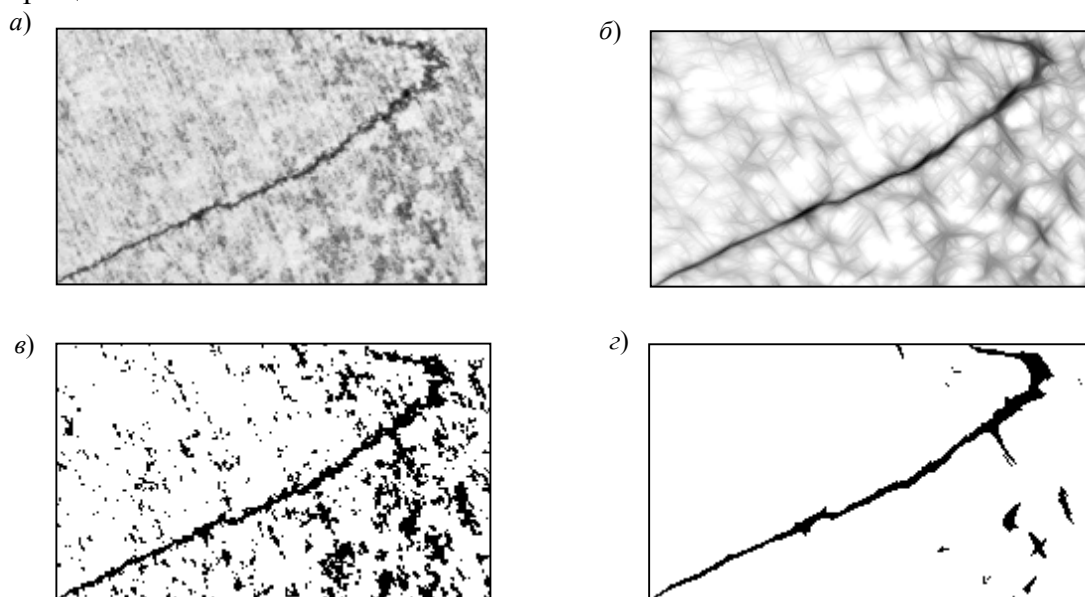


Рис. 3

Проведена бинаризация исходного и обработанного изображений. Порог бинаризации выбран таким образом, чтобы образ трещины не содержал разрывов. Из рис. 3, *в*, *г* видно, что с помощью фильтрации возможно довольно четко отделить фон от изображения, следовательно, возможно выделять изображения дефектов такого рода для дальнейшей автоматической оценки качества поверхности анализируемого изделия.

Заключение. Таким образом, в настоящей работе построена математическая модель обработки дефектоскопических изображений, учитывающая множество структурных особенностей полосовых объектов. Это обеспечивает качественный результат обработки изображений,

который подтверждается экспериментальными исследованиями. Обработка образов полос на основе предлагаемой методики обеспечивает их непрерывность на малоконтрастных изображениях. Появляется возможность дальнейшего автоматического анализа.

Следует отметить возможность и целесообразность применения метода в промышленности для автоматического анализа различного рода сцен, которые содержат полосовые образы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mery D., Berti M. A.* Automatic Detection of Welding Defects Using Texture Features // *Insight*. 2003. Vol. 45, N 10. P. 676—681.
2. *Silva R. R., Caloba L. P., Siqueira M. H. S.* Evaluation of the Relevant Characteristic Parameters of Welding Defects and Probability of Correct Classification Using Linear Classifiers // *Insight*. 2002. Vol. 44, N 10. P. 197—218.
3. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. *В. А. Сойфера*. М.: Физматлит, 2003. 784 с.

Сведения об авторах

- Султан Садыкович Садыков* — д-р техн. наук, профессор; Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, кафедра информационных систем
- Алексей Александрович Орлов* — канд. техн. наук, доцент; Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, кафедра информационных систем; E-mail: AlexeyAlexOrlov@rambler.ru
- Александр Андреевич Ермаков* — аспирант; Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, кафедра информационных систем

Рекомендована кафедрой
информационных систем

Поступила в редакцию
12.09.08 г.

УДК 681.3