

А. А. Орлов

МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ И ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ СТРУКТУР НА СНИМКАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Показана актуальность повышения оперативности и достоверности результатов обработки снимков промышленных изделий. Разрабатывается система методов анализа таких снимков, основанного на интегральных преобразованиях по сегментам линейчатых структур.

Ключевые слова: автоматический анализ снимков изделий, определение дефектов, обработка изображений.

Введение. В настоящее время повышение качества продукции машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий за счет внедрения новых технологий (в частности, технологий дефектоскопии) является очень актуальным. Необходимо повысить оперативность и достоверность процедур определения дефектов промышленных изделий по снимкам их микро- и наноструктур, но отсутствуют современные методы и алгоритмы их выявления.

На сегодняшний день в промышленности ручной контроль качества все еще преобладает над автоматизированным. Главная причина — отсутствие более совершенных методов автоматической обработки снимков (изображений), получаемых в большинстве способов контроля качества. В настоящее время для визуального контроля качества стали применяться автоматизированные системы анализа изображений (АСАИ).

Большой вклад в разработку систем и методов компьютерного анализа снимков промышленных изделий внесли Д. Мери, Р. Силва, Н. Насреддин, К. Демандт, Р. Гонсалес, И. Като, Г. Падуа, Х. Шафик, В. В. Клюев, М. В. Филинов, В. А. Лопухин и др. При обработке большинства изображений, как правило, требуется выделять и анализировать их линейчатые структуры, которыми насыщены микро- и наноснимки промышленных изделий, в частности, это дефекты-трещины, риски, царапины, швы, контуры, волокна, линейчатые вкрапления и др. Для оценки линейчатых образов на снимках измеряются геометрические характеристики.

Линейчатые структуры могут быть локально прямолинейными и представленными в виде полос с известным профилем и варьируемой шириной. При этом они часто довольно сильно зашумлены, размыты, мало контрастны, насыщены пересекающимися образами подобных или других типов. Анализ таких структур на многих изображениях довольно сложен. Сложность выделения и анализа структур на дефектоскопических снимках обусловлена неравномерной освещенностью, неоднородной оптической плотностью анализируемого материала, присутствием шумов и размытий, появившихся при формировании снимка, а также образов, не значимых для исследования объектов и их теней.

АСАИ состоят из цифрового микроскопа и компьютерной системы, реализующей методы обработки и анализа изображений. Однако в них применяются довольно простые методы, которые не позволяют выполнить более детальный разбор линейчатых по форме дефектов и с заданной точностью определить геометрические характеристики дефектов. В связи с этим уровень автоматической обработки и анализа дефектоскопических изображений очень низок. Во многих случаях прибегают к полуавтоматической обработке, что снижает оперативность контроля качества. Вклад в разработку методов выделения и анализа изображений линейчатых структур внесли Д. Канни, А. Рад, М. Хюккель, П. Хаф, Ф. Кларк, Д. Пао, К. Канатани, С. Наяр, С. Кониши, С. В. Абламейко, В. А. Соيفер, В. В. Сергеев, Н. Г. Федотов, Я. А. Фурман и многие другие. Однако существующие методы не позволяют выделять линейчатую структуру, характеризующуюся вариациями кривизны, яркости, ширины, пересечениями и разветвлениями, с сохранением признаков, необходимых для анализа дефектоскопических и металлографических снимков. Поэтому на практике для выделения линейчатой структуры часто применяются следующие методы сегментации: пороговая, основанная на областях или морфологическом анализе. Однако данные методы ориентированы на выделение площадных образов и применимы лишь для обработки простых изображений линейчатых структур. Создание новых методов, основанных на анализе линейчатых структур, в рамках настоящего проекта позволит повысить оперативность и достоверность определения дефектов промышленных изделий по их снимкам. Целью настоящей статьи является разработка системы таких методов.

Выделение линейчатых структур с варьирующейся кривизной. Введем следующее интегральное преобразование:

$$h(x_0, y_0, \theta, \sigma) = \frac{1}{\|s_L\|^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) s_L(x - x_0, y - y_0, \theta, \sigma) dx dy,$$

где $f(x, y)$ — исходное изображение; $h(x_0, y_0, \theta, \sigma)$ — спектральная функция; $s_L(x, y, \theta, \sigma)$ — детектор сегмента линейчатой структуры; σ — масштабный коэффициент; θ — угол поворота.

Для анализа образов с варьирующейся кривизной разработан метод выделения и вычисления признаков без вращения сегмента линейчатой структуры, для которого детектор сегмента будем аппроксимировать второй производной гауссоида по переменной x :

$$s_L(x, y) = (1 - x^2) e^{-\frac{x^2 + y^2}{2}}.$$

Детектор линейчатой структуры в нашем случае будет задаваться функцией трех переменных:

$$s_L(x, y, \theta) = s_L \left[\mathbf{T}_{\theta} \left(\frac{x}{\sigma}, \frac{y}{\sigma} \right) \right] = \left(1 - \frac{(x \cos \theta - y \sin \theta)^2}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}},$$

где $\mathbf{T}_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ — оператор (матрица) поворота на угол θ .

Функция $s_L(x, y, \theta)$ может быть разложена на три составляющие:

$$s_L(x, y, \theta) = s_1(x, y) \cos 2\theta + s_2(x, y) \sin 2\theta + s_3(x, y),$$

где $s_1(x, y)$, $s_2(x, y)$ — нормированные гауссоидом гиперболические параболоиды:

$$s_1(x, y) = -\frac{x^2 - y^2}{2\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}, \quad s_2(x, y) = \frac{xy}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}},$$

а $s_3(x, y)$ — лапласиан гауссоида:

$$s_3(x, y) = \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}.$$

Спектральная функция $h(x_0, y_0, \theta)$ принимает максимальное значение в точке

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \angle (S_1, S_2),$$

так что

$$h(\theta_0) = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} + S_3,$$

где S_1 , S_2 , S_3 — свертки исходного изображения $f(x, y)$ с функциями $s_1(x, y)$, $s_2(x, y)$ и $s_3(x, y)$ соответственно:

$$S_i = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) s_i(x - x_0, y - y_0) dx dy, \quad i = 1, 2, 3.$$

Преобразование исходного изображения $f(x, y)$ в изображение $g(x, y)$, так что

$$g(x, y) = \max_{\theta} h(x, y, \theta) = \sqrt{(f \otimes s_1)^2 + (f \otimes s_2)^2} + f \otimes s_3,$$

назовем выделением линейчатых структур без вращения их сегментов.

Метод выделения и вычисления признаков структур без вращения их сегментов предполагает вычисление $g(x, y)$ и $\theta(x, y)$ по данным формулам.

Выделение линейчатых структур с изменяющейся шириной. Для анализа образов с изменяющейся шириной разработан метод выделения линейчатых структур различного масштаба.

Назовем интегральным преобразованием по сегменту линейчатой структуры различного масштаба преобразование \mathbf{H}_{θ} , выполняющее фильтрацию функции $f(x, y)$ по масштабу в пределах $[\sigma_1, \sigma_2]$ вдоль каждого направления θ . При этом формируется спектральная функция $G(\omega, \nu, \theta)$, такая что

$$G(\omega, \nu, \theta) = \frac{F(\omega, \nu)}{C_s} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \left| S_L \left(\mathbf{T}_{\theta}(\sigma\omega, \nu) \right) \right|^2 \frac{d\sigma}{\sigma},$$

C_s — нормирующий параметр, $S_L(\omega, \nu)$, $G(\omega, \nu, \theta)$, $F(\omega, \nu)$ — фурье-спектры функций $s_L(x, y)$, $g(x, y, \theta)$ и $f(x, y)$ соответственно.

Преобразование исходного изображения $f(x, y)$ в изображение $g(x, y)$, так что

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

назовем выделением линейчатых структур различного масштаба.

Метод выделения линейчатых структур различного масштаба предполагает вычисление $G(\omega, \nu, \theta)$ и $g(x, y)$ по данным формулам, при этом

$$\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_2.$$

Преобразование заключается в поиске угла наклона детектора, который соответствует максимуму в спектре $g(x, y, \theta)$.

Если $s_L(x, y) = (1 - x^2) \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2}}$, то

$$G(\omega, \nu, \theta) = \frac{1}{C_s} F(\omega, \nu) \psi_L \left[\mathbf{T}(\sigma\omega, l\nu) \right] \Big|_{\sigma_1}^{\sigma_2},$$

где $\psi_L(\omega, \nu) = (1 - \omega^2) e^{-\omega^2 - \nu^2}$.

Воспроизведение линейчатых структур. Для выделения образов на снимках без искажения их ширины разработан метод воспроизведения линейчатых структур, основанный на многомасштабной фильтрации профилей линейчатых структур. Для осуществления многомасштабной фильтрации профилей линейчатых структур использованы два преобразования: воспроизводящее интегральное преобразование по сегменту линейчатой структуры и преобразование для воспроизведения линейчатой структуры, подробно описанные в работе [1].

Метод воспроизведения линейчатых структур по максимуму в откликах воспроизводящего интегрального преобразования по сегменту структуры позволяет наилучшим образом повторить часть образа на снимке.

Вычисление кривизны линейчатых структур. Для анализа линейчатых структур различной формы разработан метод вычисления их кривизны образующих.

Значения координат образующей (x, y) , угол наклона нормали к ней θ и масштаб σ возможно найти, определив максимумы спектральной функции, т.е. в результате решения задачи оптимизации:

$$\begin{aligned} h(x, y, \theta, \sigma) &\rightarrow \max, \\ 0 &\leq \theta < 2\pi, \\ \sigma_1 &\leq \sigma \leq \sigma_2. \end{aligned}$$

В статье [2] показано, что кривизна линии яркостного перепада в точке (x, y) на плоскости xOy определяется как абсолютное значение дивергенции векторного поля градиента яркости в этой точке:

$$k(x, y) = |\operatorname{div}(\cos\theta, \sin\theta)|$$

для дискретного пространства

$$k(i, j) \approx \frac{1}{2} \left(|X_{i+1, j} - X_{ij} + Y_{i, j+1} - Y_{ij}| + |X_{i-1, j} - X_{ij} + Y_{i, j-1} - Y_{ij}| \right),$$

где X, Y — матрицы значений составляющих нормали к линейчатой структуре по оси x и y соответственно.

Заключение. Рассмотренные методы реализованы и апробированы на реальных изображениях промышленных объектов. Результаты экспериментальных исследований подтверждают правильность теоретических выводов [1—4]. Таким образом, разработана система методов, позволяющих анализировать различного рода структуры, которые характеризуются вариацией кривизны, яркости, ширины, пересечениями, разветвлениями, наблюдающиеся на снимках промышленных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садыков С. С., Орлов А. А., Ермаков А. А. Теория, алгоритмы и методика обработки линейчатых образов на дефектоскопических снимках // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 2. С. 11—16.
2. Орлов А. А. Реализация системы обработки изображений линейчатых объектов // Программные продукты и системы. 2007. № 4. С. 61—62.
3. Орлов А. А. Компьютерный рентгенографический анализ качества сварных соединений и выделение линейчатых объектов в них // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 6. С. 5—7.

4. Орлов А. А., Ермаков А. А. Фильтрация полосовых образов прямоугольного профиля // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. № 3(60). С. 52—56.

Сведения об авторе

Алексей Александрович Орлов — д-р техн. наук, доцент; Муромский институт Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, кафедра физики и прикладной математики; E-mail: AlexeyAlexOrlov@rambler.ru

Рекомендована Юго-Западным
государственным университетом

Поступила в редакцию
24.10.11 г.