А.А. ОРЛОВ, Л.В. АНТОНОВ

Система преобразований изображений по линейчатым структурам на снимках промышленных материалов

УДК 004.942

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-07-97515

Показана актуальность автоматического анализа линейчатых структур на снимках промышленных материалов. Сформирована система преобразований изображений по линейчатым структурам, позволяющая получить важную (для диагностики материалов) информацию о линейчатых структурах на таких снимках.

Relevance of the automatic analysis of line structures on the images of industrial materials presented in the article. system to convert images of line structure, which allows to obtain important (for diagnostics of materials) information on the line structure in the images formed in the article.

Сейчас в области визуального контроля качества стали применяться автоматизированные системы анализа изображений. Такие системы существенно уменьшают время и субъективизм оценки, повышают точность результатов и освобождают человека от рутинного однообразного труда.

На изображениях (снимках) промышленных материалов наблюдаются такие структуры как точечные объекты, текстуры, контуры, площадные объекты известной формы, объекты с формой известного вида, образующие линии объектов, прямолинейные полосы, полосы с варьирующейся кривизной, полосы с известным профилем, полосы с варьирующейся шириной, разветвляющиеся полосы, пересекающиеся полосы, полосы с разрывами, размытые контурные перепады. Анализ показывает, что значительный интерес для дефектоскопирования, представляют линейчатые микро и наноструктуры [1-5].

Анализ существующих компьютерных систем обработки дефектоскопических и металлографических снимков показывает невозможность автоматической обработки большинства видов снимков такими системами при контроле качества. Это увеличивает время обработки снимков, что приводит к невозможности оперативного контроля качества изделий. Анализ же методов цифровой обработки и линейчатых структур на изображениях выявляет недостаточные возможности существующих методов для выделения и вычисления признаков линейчатых структур на снимках [1-4].

В связи с этим необходима разработка систем преобразований и методов анализа изображений по линейчатым структурам для выделения и вычисления признаков таких структур.

Целью настоящей работы является разработка системы преобразований изображений по линейчатым структурам, позволяющей получить важную (для диагностики материала) информацию о линейчатых образах на снимках промышленных материалов.

Для определения признаков введем систему ядер интегральных преобразований изображений $f(x,\ y)$, в частности интегральное преобразование по сегменту полосы (ИПСП):

$$h(x_0, y_0, \theta, \sigma) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) s_L(x - x_0, y - y_0, \theta, \sigma) dxdy,$$

где $s_L(x,y,\theta,\sigma)$ – детектор, σ-масштаб, θ– угол наклона сегмента полосы.

Полоса разбивается на части, названные сегментами. Сегмент полосы характеризуется позицией, ориентацией, шириной, длиной, профилем и яркостью. В результате ИПСП формируется функция четырех аргументов (позиция, ориентация и масштаб по ширине сегмента).

Максимальные значения функции ИПСП будут соответствовать параметрам сегментов полос на исходном изображении.

В результате мы получили ядро интегрального преобразования, отличающееся структурным описанием сегмента полосы и позволяющее определить локальные параметры полос на исходном изображении.

Для определения признаков полос заданного вида введем интегральное преобразование по линии (ИПЛ), основанное на криволинейном интегрировании функции изображения, и позволяющее определить функцию, максимальные значения которой соответствуют параметрам линии φ заданного вида на исходном изображении $f(x, y)$:

$$h(a) = \mathbf{H}_{\varphi}\left[f(x, y)\right] = \int\limits_{\varphi} f(x, y)ds\,.$$

Полученное ядро интегрального преобразования отличается использованием криволинейного интегрирования и позволяет определить параметры линейчатых структур заданного вида.

С целью повышения точности выделения линейчатой структуры введем производное интегральное преобразование по линиям (ПИПЛ), в котором используются признаки, полученные в результате ИПСП.

Пусть $\{B_i(x,y)\}$ – множество функций некоторых k ($k < m$) признаков образа линии (например, угол наклона нормали, кривизна и др.), $b_i(a)$ – тот же признак линии φ $(x, y, a) = 0$ с параметрами $a_1, a_2, \ldots, a_m$ в точке (x, y), $i = 1, \ldots, k$.

Преобразование, ставящее в соответствие изображению $f(x, y)$ его спектр параметров по правилу

$$h(a) = \int\limits_{\varphi} f(x, y)\prod_{i=1}^{k} D[B_i(x, y) - b_i(a)]ds\,,$$

где $D(t) = \begin{cases} 1, t = 0, \\ 0, \end{cases}$ будем считать производным интегральным преобразованием по кривой φ.

Если известна характеристическая функция ориентации нормали к образу линии $\Phi(x, y)$, то необходимо совпадение ее значений с углом наклона нормали к кривой $\varphi(x, y, a) = 0$:

$$h(a) = \int\limits_{\varphi} f(x, y)D\left[\Phi(x, y) - \angle\left(\nabla\varphi(x, y, a)\right)\right]ds\,,$$

где $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ оператор градиента, $\angle\nabla(\cdot)$ – оператор угла наклона вектора градиента. Назовем данное преобразование градиентным интегральным преобразованием по линии $\varphi(x,\ y,\ a) = 0$ (ГИПЛ).

Пусть $\kappa : R^2 \rightarrow R$ – функция кривизны образов линий на $f(x,\ y)$. Запишем производное интегральное преобразование по линии, усовершенствовав градиентное преобразование так, чтобы кривизна $\kappa\ (x,\ y)$ совпадала с кривизной линии, для которой выполняется преобразование

$$h(a) = \int_{\varphi} f\,(x,y)D\big[\Phi(x,y) - \angle\big(\nabla\varphi(x,y,a)\big)\big]D\left[\kappa(x,y) - \left|\frac{d\theta}{ds}\right|\right]ds\ ,$$

Следует отметить, что касательная к линии ортогональна градиенту, поэтому кривизну можно найти, зная градиент:

$$K = \left|\frac{d\theta}{ds}\right| = \frac{1}{|g|}\left|\frac{dg}{ds}\right|,$$

где $g = \nabla\varphi(x,\ y,\ a)$ – значение градиента в точке линии $\varphi(x,\ y,\ a) = 0$.

Таким образом, базируясь на ПИПЛ с использованием угла наклона сегмента полосы и кривизны образующей линии, разработаны ядра интегральных преобразований, позволяющие определить параметры линейчатых структур заданного вида.

Вычисление признаков подобия линейчатых структур в данной работе реализовано путем интегрального преобразования по базису подобной кривой (ИППК).

В результате преобразования определяется функция признаков подобия (сдвига, поворота, масштаба).

Выделение линейчатых структур инвариантных к признакам подобия будем осуществлять с помощью интегрального преобразования в пространство признаков кривых (ИПППК).

Для описания и анализа линейчатой структуры, претерпевшей преобразования подобия, введем понятия подобной кривой и интегрального преобразования по подобной кривой.

Пусть $U \subset R^2$ – множество точек некоторой линии. Введем оператор A, выполняющий преобразования подобия (растяжение в σ раз, поворот на угол γ и сдвиг на вектор (x_0, y_0)):

$$A(x_0, y_0, \sigma, \gamma) = \sigma \cdot \underset{\gamma}{\mathbf{T}} \cdot \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix},$$

где $\underset{\gamma}{\mathbf{T}}$ – оператор (матрица) поворота на угол γ.

Кривую AU будем называть подобной для кривой U.

Пусть также $f : R^2 \to R$ – функция исходного изображения; $(x, y) \in R^2$; $a = (x_0, y_0, s, \gamma)$ – вектор параметров подобия; R^m – спектральное пространство ($m = 4$) [6-9].

Преобразование $H_{AU} : L_2(R^2, [0, 1]) \to L_2(R^4, R)$, ставящее в соответствие каждому изображению $f(x,y)$ его спектр параметров $h(a)$ по правилу

$$h(a) = \mathbf{H}_{\mathbf{A}U}\left[f(x, y)\right] = \int_{\mathbf{A}U} f(x, y) ds,$$

будем считать интегральным преобразованием по кривой U в пространство признаков подобия, задаваемых оператором A (или интегральным преобразованием по подобной кривой, ИППК).

Спектральная функция $h(a)$ также будет характеризовать степень близости образов линий $P = \{(x, y) \mid f(x, y) = 1\}$ и кривой AU, преобразованной из эталона U.

Градиентное интегральное преобразование по подобной кривой (ГИППК) запишется следующим образом:

$$h(a) = \mathbf{H}_{\mathbf{A}U}\left[f(x, y)\right] = \int_{\mathbf{A}U} f(x, y) \cdot D[\Phi(x, y) - \gamma - \theta(s)] ds.$$

Исследуем свойства различных сигнатурных признаков линий.

Разность угла наклона радиус-вектора в точке кривой и угла наклона нормали в этой точке назовем угловой разностью: $\psi = \alpha - \theta$.

Можно видеть, что ψ характеризует скорость отдаления (приближения) кривой от начала координат.

Параметр

$$\xi = \angle(d\alpha, d\theta) = \operatorname{arctg}\frac{d\theta}{d\alpha},$$

характеризующий скорость изменения угла наклона нормали в точке кривой (x, y) в зависимости от изменения угла наклона вектора (x, y), назовем угловой кривизной.

Можно выявить важные параметры в разной степени инвариантные к преобразованиям подобия (сдвиг, поворот, масштабирование). Это длина радиус-вектора, угол наклона радиус-вектора (α), угол наклона нормали (θ), длина нормали (ρ), угловая разность (ψ), кривизна (K), угловая кривизна (ξ), разность длин радиус-векторов, разность углов наклона радиус-вектора, разность углов наклона нормалей, расстояние между касательными и др.

Пусть a_1 и a_2 – производные параметры кривой U в точке (x, y), инвариантные к некоторым преобразованиям подобия. Через параметры a_1 и a_2 зададим уравнение $\mu(a_1, a_2) = 0$, описывающее кривую U. Т.к. параметры являются производными, то уравнение $\mu(a_1, a_2) = 0$ является дифференциальным и описывает в действительности множество кривых. Решением данного дифференциального уравнения будет являться множество уравнений кривых семейства AU. Будем полагать, что уравнение в пространстве параметров a_1, a_2 $\mu(a_1, a_2) = 0$ задает некоторую дифференциальную кривую.

Преобразование, ставящее в соответствие каждому изображению $f(x, y)$, характеризующемуся производными признаками образов кривых на нем $A_1(x, y)$ и $A_2(x, y)$, его спектр параметров по правилу

$$h(a_1, a_2) = \iint_{R^2} f(x, y)\delta[A_1(x, y) - a_1]\delta[A_2(x, y) - a_2]dxdy,$$

назовем интегральным преобразованием в пространство признаков кривых (ИПППК).

Следует отметить, что если $f(x, y)$ содержит образ кривой, то спектр $h(a_1, a_2)$ будет содержать дифференциальную кривую, которая является отображением исходной кривой.

Важным свойством спектра h является то, что он может быть инвариантным к некоторым преобразованиям подобия. Например, спектр $h(\psi, \rho)$ инвариантен к повороту, $h(\psi, \xi)$ инвариантен к повороту и масштабу, $h(\theta, K)$ инвариантен к сдвигу. ИПППК применимо для сравнения линий различных изображений. Для того, чтобы сравнить два изображения независимо от каких-либо признаков подобия, будем искать скалярное произведение спектров этих изображений.

Полученное значение будет являться степенью схожести исходных образов.

Появляется возможность вычисления признаков подобия изображений относительно друг друга. Например, анализ свертки двух спектров $h(\theta, \rho)$ позволяет найти угол поворота γ.

Таким образом, разработана система преобразований изображений по линейчатым структурам, позволяющая получить необходимую информацию о линейчатых образах на снимках изделий, включающая: преобразование по сегменту полосы, отличающееся более полным описанием сегмента (сегмент задается масштабами по длине и ширине, ориентацией и профилем), что позволяет локально описать фрагмент изображения в виде полосы на плоскости; преобразования по линиям, состоящие в интегрировании по линии и заданному дифференциальным уравнением семейству линий объектов на снимках, обеспечивающих переход в спектральные пространства признаков образов линий на исходной сцене.

Литература

1. Садыков С.С., Орлов А.А., Ермаков А.А. Теория, алгоритмы и методика обработки линейчатых образов на дефектоскопических снимках // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2009, №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 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. - СПб.: СПбГПУ, 2008, №3(60). С.52-56.
5. Carrasco M. Segmentation of welding defects using digital image processing techniques. Master of Science Thesis, Departamento de Ingenieria Informatica, Universidad de Santiago de Chile, Abril, 2004.
6. Орлов А.А., Ермаков А.А. Выделение линейчатых образов в капиллярной дефектоскопии. // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2007, № 12. С. 148-152.
7. Орлов А.А., Ткачук М.И. Обзор проблемы обработки изображений чертежей и карт // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2007, № 12. С. 153-158.
8. Орлов А.А., Бесчастнова Т.В. Воспроизведение линий на изображениях рукописей // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2008, № 13. С. 114-118.
9. Орлов А.А., Антонов Л.В. Методы предварительной обработки изображений микро и нано структур. // Алгоритмы, методы и системы обработки дан-

ных. – 2011, № 17. http://www.amisod.ru/index.php/index.php?option=com_content&view=article&id=36:amisod-2011-2-8&catid=14:amisod-2-17-2011