

基于小波系数频谱的纹理分析

张 涛 王成儒

(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘 要: 小波变换对信号的多分辨率分析能力与傅立叶变换的自配准性质使它们在图像纹理分析中得到了广泛的应用。但二者互不具备对方的优点,这在一定程度上限制了其应用。本文通过构造小波系数频谱的概念使算法具有多分辨率分析能力和自配准性质。首先,利用小波变换和傅立叶变换得到小波系数频谱,然后根据小波系数的特点对算法进行优化,最后对小波系数频谱提取图像的纹理特征。利用图像检索与 Gabor 等方法进行了对比,实验结果表明利用小波系数频谱方法对图像进行纹理分析可以得到更高的查全率与查准率。

关键词: 纹理 小波 傅氏变换 小波系数频谱

一、前言

纹理分析是图像分析的一个重要内容,广泛应用于遥感图像和医学图像处理、图像检索以及计算机视觉等,已经成为了图像分析领域的研究热点。目前纹理的分析算法一般分为统计法、结构法、模型法和变换域四类方法^[1],它们有各自不同的特点。统计类方法原理简单,较易实现,但适用范围受到限制;结构类方法的研究重点为纹理元相互关系和排列规则,由于目前纹理元提取算法的限制,该方法无法对自然纹理图像进行分析;模型法假设纹理按某种模型分布,通过求模型参数来提取纹理特征,但自然纹理难以用单一模型表达;变换域方法主要包括傅立叶变换法、Gabor 变换法和小波变换法等,根据人类视觉机理,在空间和频率域内同时对纹理进行分析,是目前性能较好的一类纹理分析方法^[2]。

变换域分析方法中,傅立叶变换具有体现纹理元走向与疏密程度的自配准性质,因此傅立叶变换法在纹理分析中得到了广泛应用。但由于傅立叶分析不具有多分辨率特性,限制了其应用范围。Gabor 变换与小波变换均具有多分辨率特性,可以对信号进行多尺度分析。但二者均不具备自配准性质^[4],因此无法对纹理元走向与疏密进行方便的提取。基于以上分析,本文将构造一种新的算法——小波系数频谱(Frequency Spectrum of Wavelet Coefficient, FSWC),该算法同时具有多分辨率分析能力和自配准性质,可以对图像纹理进行更准确地分析。

二、小波系数频谱的构造

设信号为 $f(t)$, 基本小波为 $\varphi(t)$, 则其小波变换 $Wf(a, b)$ 为

$$Wf(a, b) = \langle f(t), \varphi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \varphi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

上标*表示取共轭。尺度因子 $a > 0$, 则尺度 a 的傅立叶变换为

$$WF(a, \omega) = \langle Wf(a, b), e^{j\omega b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \varphi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) e^{-j\omega b} dt db \quad (2)$$

设 $F(\omega)$ 、 $\psi(\omega)$ 分别为 $f(t)$ 、 $\varphi(t)$ 的傅立叶变换, 利用傅立叶变换频移、尺度变换及卷积定理, 可得

$$WF(a, \omega) = \sqrt{a} F(\omega) \psi^*(a\omega) \quad (3)$$

取 $WF(a, \omega)$ 的幅度谱,

$$|WF(a, \omega)| = \sqrt{a} |F(\omega) \psi^*(a\omega)| = \sqrt{a} |F(\omega)| \cdot |\psi^*(a\omega)| \quad (4)$$

$|WF(a, \omega)|$ 即为小波系数频谱 (FSWC), 表示信号 $f(t)$ 在 a 尺度下的频谱。

从滤波器角度, $|WF(a, \omega)|$ 为对 $F(\omega)$ 的加窗处理, 窗函数频谱为 $|\psi^*(a\omega)|$, 则 $|WF(a, \omega)|$ 具有表征 $F(\omega)$ 频域局部性质的能力。改变 a 即可观察 $F(\omega)$ 在 $a\omega$ 附近的局部性质, 因此 $|WF(a, \omega)|$ 具有多分辨率特性。此特性在二维情况下仍然成立。

当 $f'(t) = f(t - t_0)$ 时, 由 (3) 式及傅立叶延时性质可得 $WF'(\omega) = e^{j\omega t_0} WF(\omega)$, 对其取频谱, 得 $|WF'(a, \omega)| = |WF(a, \omega)|$, 即 FSWC 具有一维情况下的平移不变性, 在二维情况下即表现为自配准性质^[4]。

综上所述, 二维 FSWC 既具有小波变换的多分辨率特性, 又具备傅立叶变换的自配准性质, 达到了将二者结合的目的, 可以在多分辨率条件下提取图像纹理走向与疏密程度等特征。图 1 列出了对自然纹理图像的小波变换和小波变换频谱, 由此可以看到, 小波系数频谱不仅具有了小波变换的频域滤波特性, 同时具有自配准性质。此外, 在二维情况下, 不同频带上的 FSWC 具有中心对称性质, 可利用此性质简化特征提取。

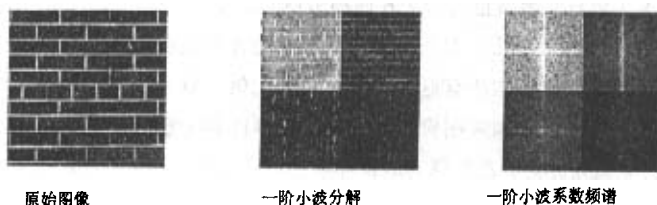


图1 纹理图像的小波分解与小波系数频谱

三、纹理特征的提取

3.1 特征提取的预处理

在小波系数中, 各高频子带近似于以零为均值的高斯分布。因此使用小波系数绝对值代替小波系数进行傅立叶变换仍满足以上各条件, 且小波系数绝对值可以表示各子带的能量分布, 因此, 对小波系数绝对值进行傅立叶变换将进一步反映小波系数的能量分布情况, 可以增强算法的匹配效果。本文以下所提到的小波系数频谱如没有特殊说明, 均指小波系数绝对值的频谱。

另外, 由于 FSWC 具有中心对称性质, 因此只需对 FSWC 的不相邻象限进行特征提取即可。假设 $G(m, n)$ 为子图 i 的小波系数频谱, 大小为 $2M \times 2M$, 则仅取其第一、第二两个象限 $G1(m, n)$ 和 $G2(m, n)$ 进行处理, 它们的大小为 $M \times M$, 使运算得以简化。

3.2 纹理特征提取

本文采用投影法对 FSWC 进行最终的特征提取。分别对其作垂直和水平投影,得到 4 个投影序列,分别表示为: p_{h1} 、 p_{v1} 、 p_{h2} 、 p_{v2} 。

$$\begin{cases} p_{hi}(k) = \sum_{l=1}^M \ln(Gi(k,l)+1) \\ p_{vi}(l) = \sum_{k=1}^M \ln(Gi(k,l)+1) \end{cases} \quad i=1,2 \quad (5)$$

则该子图 i 的特征可以描述为: $p_i = \{p_{h1}, p_{v1}, p_{h2}, p_{v2}\}$ 。因此原始图像 I 的特征为: $p_I = \{p_O, p_{LL}, p_{LH}, p_{HL}, p_{HH}\}$ 。其中, p_O 为原始图像傅立叶特征的下采样。

两幅纹理图像 I 和 J 之间的匹配距离使用 cosine 距离定义:

$$C_{I,J} = \frac{\sum_{k=1}^N p_I(k)p_J(k)}{\left(\sum_{k=1}^N p_I^2(k)\sum_{k=1}^N p_J^2(k)\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

其中, N 为特征向量 p 的长度。

四、实验结果

本文采用基于内容的图像检索 (content-based image retrieval, CBIR) 对算法进行验证。采用的测试图像库为经过 Queensland 大学分类整理的 brodatz 自然纹理图像库^[6], 该图像库共有 256 幅自然纹理图像。每幅图像有 15 幅相关图像。将此图像库 256 幅图像均作为检索图像进行一次检索, 本文所有实验数据均为 256 次检索得到的平均值。

实验使用的评价指标为查准率和查全率。查准率的含义是在一次查询过程中, 系统返回的查询结果中相关图像的数目占所有返回图像数目的比例。查全率的含义是系统返回的查询结果中相关图像的数目占所有相关图像数目 (包括已返回和未返回) 的比例。这两个指标越高, 说明算法的检索效果越好。在相同的测试环境下, 实验采用基于自配准傅立叶变换^[4]和基于小波尺度的共生矩阵^[2]方法作为对比算法, 另外, 作为纹理分析中变换域算法的典型算法, Gabor 小波算法^[7]也是一种对比算法。

四种算法的查准率如表 1 所示, 其中查准率 (i) 表示系统返回图像数为 i 时的查准率。因为系统中对任何一幅图像只有 15 幅是与其相关的, 所以系统返回图像数 $i \leq 15$ 。同样, 对于查全率来说, 只有 $i \geq 15$ 查全率指标才有实际意义。查全率如图 2 所示。

表 1 四种算法在不同系统返回图像数下的查准率

算法名称	查准率 (5)	查准率 (10)	查准率 (15)
傅氏变换	96.33%	90.39%	83.20%
小波共生矩阵	80.16%	69.02%	60.55%
Gabor	93.67%	89.77%	85.21%
小波系数频谱	99.69%	99.18%	96.09%

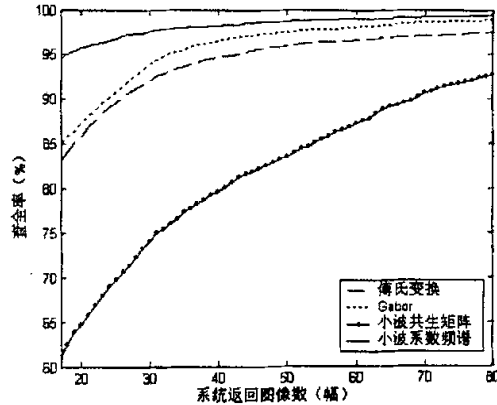


图 2 不同系统返回图像数下的查全率

由表 1 可以看到, 本文方法具有较高的查准率, 在 $i \leq 10$ 的情况下接近 100%, 在 $i = 15$ 的情况下, 仍可以达到 96.09%, 说明了该方法具有良好的纹理分析、检索特性。由图 2 可以看到, 尽管在返回图像数为 80 幅时本文方法和 Gabor 方法查全率都几乎达到了 100%, 但在趋近速度上本文方法却占有明显的优势。

五、结论

以上实验表明, 无论应用查准率还是查全率指标, 本文所构造的小波系数频谱分析方法的性能均优于其他的几类变换域分析方法。其主要原因是 FSWC 方法主要基于两种频域分析方法——傅立叶变换和小波变换, 将二者在图像纹理分析方面的性能进行了结合, 不但具有小波变换的多分辨率特性, 而且具有傅立叶变换的自配准性质。而多分辨率特性与自配准性质均为纹理分析中所要使用的重要工具, 因此该算法在纹理分析方面优于只具有多分辨率分析能力的 Gabor 方法和只具有自配准性质的傅立叶变换。但是目前本方法在特征提取上尽管已经使用了一定的高维缩减, 仍存在特征向量维数高的缺点。如何在保持良好分析性能的同时降低特征向量维数、如何在此架构下提取更为合理的特征向量, 将是今后的一个研究方向。

参考文献

- [1] 盛文, 杨江平, 柳健等. 一种基于纹理元灰度模式统计的图像纹理分析方法[J]. 电子学报, 2001, 28(4): 73~75
- [2] S. Arivazhagan, L. Ganesan. Texture classification using wavelet transform[J]. Pattern Recognition Letters 2003, 24: 1513~1521
- [3] Du-Ming Tsai, Tse-Yun Huang. Automated surface inspection for statistical textures[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21: 307~323
- [4] 王东峰, 邹谋炎. 傅氏变换的自配准性质及其在纹理识别和图像分割中的应用[J]. 中国图象图形学报 (A), 2003, 8(2): 140~146
- [5] Hui Yu, Mingjing li, Hong-Jiang Zhang, et al. Color Texture Moments for Content-Based Image Retrieval [C]. IEEE International Conference on Image Processing, September 22~25, 2002, Rochester, New York, USA.
- [6] Guy Smith, "Brodatz" Test Suite [EB/OL]. www.cssip.uq.edu.au/staff/meastex/imgs/brodatz.html, 1998-01-19/2003-10-03
- [7] B.S.Manjunath, W.Y.Ma. Texture Features for Browsing and Retrieval of Image Data[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1996, 18(8): 837~842.