

# 基于小波变换的多尺度自配准纹理分析<sup>\*</sup>

张 涛 王成儒

(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要** 图像分析中多尺度分析与自配准性质与人类视觉相关联,是纹理分析的重要工具。利用小波变换和傅里叶变换对纹理图像进行二次变换域分析构造具有多尺度自配准性质小波系数频谱,然后根据小波系数性质与物理意义对算法进行优化,最后通过小波系数频谱的投影提取图像的纹理特征。利用图像检索与树状结构小波和傅里叶变换方法进行了对比,实验结果表明小波系数频谱具有良好的纹理分析能力。

**关键词** 纹理分析 小波系数频谱 多尺度 自配准

中图分类号 TN911.73 文献标识码 A 国家标准学科分类代码 510.4050

## Texture Analysis Using Multi-scale Auto-registration Based on Wavelet Transform

Zhang Tao Wang Chengru

(Information Science and Engineering College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract** The multi-scale and the auto-registration are related with human vision, and the important tools especially to texture analysis. The concept about frequency spectrum of wavelet coefficient (FSWC) is introduced which has the capability of auto-registration based on multi-scale. Then it is optimized according the characteristic of wavelet coefficient. The last step is to extract the feature vectors from the FSWC. The algorithm is tested by image retrieval compared to tree-structured wavelet and Fourier transform. The experiment result shows that FSWC is a promising method to texture analysis.

**Key words** Texture analysis Frequency spectrum of wavelet coefficient (FSWC) Multi-scale Auto-registration

## 1 引言

纹理分析是图像分析的一个重要内容,广泛应用于遥感和医学图像处理、工业自动监测、图像检索等领域,是目前图像分析领域的研究热点<sup>[1,2]</sup>。

目前,对纹理的分析算法一般分为统计、结构和模型 3 类方法<sup>[3]</sup>。其中,模型法中的变换域分析在近些年取得了很大的进步<sup>[3]</sup>。其主要算法包括傅里叶变换<sup>[4]</sup>、Gabor 变换<sup>[5]</sup>和小波变换<sup>[6]</sup>。傅里叶变换具有可体现纹理走向与疏密程度的自配准性质<sup>[4]</sup>,Gabor 与小波变换具有可对信号进行多尺度分析的多分辨率特性。2

种性质均与人类视觉相关联,是纹理分析的重要工具。但傅里叶变换不能进行多尺度分析,而 Gabor 与小波变换不具有自配准性质<sup>[4]</sup>。如在纹理分析过程中同时使用多尺度及自配准性质,分析效果将得到一定的提高。基于此,文中构造小波系数频谱 (frequency spectrum of wavelet coefficient, FSWC) 的概念,具有多尺度下的自配准性质,并利用此概念进行特征提取算法,最后通过图像检索实验对算法性能进行了验证。

## 2 小波系数频谱的构造

设信号为  $f(t)$ ,基本小波为  $h(t)$ ,则其小波变换

<sup>\*</sup> 本文于 2004 年 12 月收到。

$Wf(a, b)$  为:

$$\begin{aligned} Wf(a, b) &= \langle f(t), h_{a,b}(t) \rangle \\ &= \frac{1}{a} \int_{\mathbb{R}} f(t) h\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \end{aligned} \quad (1)$$

式中: 上标\* 表示取共轭. 尺度因子  $a > 0$ , 则尺度  $a$  的傅里叶变换为:

$$\begin{aligned} WF(a, k) &= \langle Wf(a, b) e^{jkb} \rangle \\ &= \frac{1}{a} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} f(t) h\left(\frac{t-b}{a}\right) e^{-jkb} dt db \end{aligned} \quad (2)$$

设  $F(k)$ 、 $J(k)$  分别为  $f(t)$ 、 $h(t)$  的傅里叶变换, 利用傅里叶变换频移、尺度变换及卷积定理, 可得:

$$WF(a, k) = \frac{1}{a} F(k) J^*(ak) \quad (3)$$

取  $WF(a, k)$  的幅度谱:

$$\begin{aligned} |WF(a, k)| &= \left| \frac{1}{a} F(k) J^*(ak) \right| \\ &= \frac{1}{a} |F(k)| \cdot |J^*(ak)| \end{aligned} \quad (4)$$

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

由 (4) 式知,  $|WF(a, k)|$  为对  $F(k)$  的加窗处理, 窗函数频谱为  $|J^*(ak)|$ , 则  $|WF(a, k)|$  具有表征  $F(k)$  频域局部性质的能力. 改变  $a$  即可观察  $F(k)$  在  $ak$  附近的局部性质, 因此  $|WF(a, k)|$  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) 式及傅里叶延时性质可得  $WF'(k) = e^{jkat_0} WF(k)$ , 对其取频谱, 得  $|WF'(a, k)| = |WF(a, k)|$ , 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<sup>[4]</sup>.

综上所述, 二维 FSWC 既具有小波变换的多分辨率特性, 又具备傅里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. 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.

### 3 纹理特征的提取

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 (2) 式中使用小波系数绝对值代替小波系数仍满足以上各条件; 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里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. 文中以下所提到的 FSWC 如没有特殊说明, 均指小波系数绝对值的频谱, 该谱仍具有多分辨率及自配准性质.

以下通过投影方法提取 FSWC 特征. 因 FSWC 中

心对称, 只需对 2 个不相邻象限进行特征提取. 设  $G(m, n)$  为子图  $k$  的小波系数频谱, 大小为  $M \times M$ , 其第  $i$  个象限为  $G_i(m, n)$ , 大小为  $(M/2) \times (M/2)$ . 分别对其作垂直和水平投影, 得到投影序列  $p_{hi}$ 、 $p_{vi}$ :

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

则该子图  $k$  的特征可以描述为:  $p_k = \{p_{h1}, p_{v1}, p_{h2}, p_{v2}\}$ , 原始图像  $I$  的特征为:

$$p_I = \{w_1 p_{I0}, w_2 p_{LL}, w_3 p_{LH}, w_4 p_{HL}, w_5 p_{HH}\} \quad (6)$$

式中:  $p_{I0}$  为原始图像傅里叶特征的下采样,  $w_i$  为各个子图特征的权值. 但这样得到的特征向量维数偏高, 不利于特征的存储与检索, 因此应对其进行特征缩减. 文中通过提取低频小波系数进行特征缩减<sup>[7]</sup>, 该方法在缩减特征维数的同时, 通过对其的轮廓平滑, 在一定程度上抑制了噪声的影响.

2 幅纹理图像  $I$  和  $J$  之间的匹配距离使用 cosine 距离定义:

$$C_{I,J} = \frac{\sum_{k=1}^N p_i(k) p_j(k)}{\left( \sum_{k=1}^N p_i^2(k) \right)^{1/2} \left( \sum_{k=1}^N p_j^2(k) \right)^{1/2}} \quad (7)$$

式中:  $N$  为特征向量  $p$  的长度.

### 4 实验结果

文中采用基于内容的图像检索 (CBIR) 对算法进行检验. 测试图像库为 Queensland 大学分类的 Brodatz 自然纹理图像库<sup>[8]</sup>. 该图像库共 16 类 256 幅图像. 每幅图像只与其它 255 幅图中的 15 幅相关. 256 幅图像中的每一幅均作为检索图像参加一次检索, 文中所有实验数据均为这 256 次检索的平均值.

算法的性能从采用查准率与查全率衡量. 查准率是指在一次查询过程中, 系统返回的查询结果中相关图像数目占所有返回图像数目的比例; 查全率则指系统返回的查询结果中相关图像数目占图像库中所有相关图像数目的比例.

在相同条件下, 采用王东峰设计的傅里叶特征提取<sup>[4]</sup>和 Tianhorng Chang 设计的树状结构小波<sup>[6]</sup>作为对比算法. 在 FSWC 中, 小波函数选取 coiflet 小波,  $w_i = 1$ . 实验结果如表 1 表 2 所示, 其中查准率 ( $i$ ) 和查全率 ( $i$ ) 分别表示系统返回图像数为  $i$  时的平均查准率与平均查全率.

表 1 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
树状小波	98. 61	93. 28	88. 21
FSWC	99. 69	99. 18	96. 09

表 2 算法在不同系统返回图像数下的查全率

算法名称	查全率 ( 20 ) ( % )	查全率 ( 30 ) ( % )	查全率 ( 50 ) ( % )
傅氏变换	85. 82	92. 00	95. 97
树状小波	90. 02	93. 14	96. 61
FSWC	96. 36	97. 71	98. 80

由以上数据可以看出,FSWC通过 在 多 尺 度 下 利 用 自 配 准 性 质 进 行 纹 理 分 析 , 在 分 析 性 能 上 比 具 有 单 纯 的 多 尺 度 分 析 的 树 状 小 波 和 自 配 准 性 质 的 傅 里 叶 变 换 有 了 明 显 提 高 , 证 明 了 FSWC 算 法 的 有 效 性。

5 结 论

文中提出小波系数频谱 (FSWC)的概念,可对图 像 纹 理 进 行 多 尺 度 自 配 准 分 析 , 并 利 用 其 进 行 了 特 征 提 取 与 图 像 检 索 实 验。 实 验 结 果 证 明 该 算 法 具 有 良 好 的 纹 理 分 析 能 力 , 其 主 要 有 如 下 特 点:

- (1)具有 多 分 辨 率 特 性 , 可 对 信 号 进 行 多 尺 度 分 析。
- (2)同时 具 有 自 配 准 性 质 , 可 特 定 尺 度 下 分 析 纹 理 走 向 及 疏 密 程 度。
- (3)在 纹 理 分 析 上 具 有 平 移 不 变 性 , 该 性 质 在 一 定 程 度 上 提 高 了 纹 理 分 析 的 鲁 棒 性。
- (4)不 同 子 图 的 特 征 通 过 对 特 征 权 值  $w_i$  的 组 合 到 一 起 , 便 于 反 馈 机 制 的 使 用。

同时,该方法 存 在 一 定 的 问 题 , 仍 需 要 进 一 步 改 进。 主 要 在 于 以 下 2 个 方 面:

- (1)特 征 提 取 方 法 不 成 熟 , 特 征 向 量 维 数 偏 高 , 需 进 一 步 研 究 及 精 简。
- (2)特 征 提 取 时 间 相 对 较 长 , 应 在 保 证 分 析 性 能 的

同时简化计算复杂度。

参考文献

[ 1 ] M A N J U N A T H B S , V A S U D E V A N V V . Color and texture descriptors [ J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11 (6): 703- 715.

[ 2 ] V U K , H U A K A , T A V A N A P O N G W . Image retrieval based on regions of interest [ J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2003, 15( 4): 1045- 1049.

[ 3 ] Z H A N G J G , T A N T N . Brief review of invariant texture analysis methods [ J]. Pattern Recognition, 2002, 35( 3): 735- 747.

[ 4 ] 王 东 峰 , 邹 某 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 像 图 形 学 报 ( A ) , 2003, 8(2): 140- 146.

[ 5 ] M A N J U N A T H B S , M A W Y . Texture features for browsing and retrieval of image data. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18( 8): 837- 842.

[ 6 ] C H A N G T H , K U O C C J . Texture analysis and classification with tree-structured wavelet transform. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(4): 429- 441.

[ 7 ] 张 海 勤 , 蔡 庆 生 . 基 于 小 波 变 换 的 时 间 序 列 相 似 模 式 匹 配 . 计 算 机 学 报 , 2003, 26( 3): 373- 377.

[ 8 ] S M I T H G . “ Brodatz ” test suite [ EB/OL ]. www. cssip. uq. edu. au /staff /meastex /imgs /brodatz. html, 1998-01-19/2003-10-03.

作者简介

张 涛 1979 年 出 生 硕 士 主 要 研 究 方 向 为 图 像 纹 理 分 析 模 式 识 别  
E-mail zh tao\_ 79@ 163. com