

旋转不变广义粗糙度特征结合自适应 加权距离在纹理检索中的应用

王成儒 吴娅辉

(燕山大学信息学院电子与通信工程系, 秦皇岛 066004)

摘要 针对图像检索时的旋转问题, 提出了一种基于 Gabor 分解的旋转不变广义粗糙度纹理描述子和一种自适应加权距离准则。首先, 计算 Gabor 分解子带的幅度和频率谱, 依据多尺度空间局部能量分布、Hurst 分形指数、方向差别来计算纹理特征向量; 然后采用自适应加权距离作为相似性准则。分别采用旋转纹理库和普通纹理库进行仿真实验, 仿真实验结果表明, 该算法在两种情况下都取得了较好的检索效果, 算法对图像的旋转具有较好的鲁棒性。

关键词 纹理检索 Gabor 广义粗糙度 旋转不变 自适应加权距离

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)06-0762-05

Texture Retrieval Based on a Rotation-invariant Generalized Roughness Vector and an Adaptive Weighted Distance

WANG Cheng-ru, WU Ya-hui

(Department of Communication and Electronic Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract A rotation-invariant generalized roughness vector and an adaptive weighted distance are applied in texture retrieval. Texture image is decomposed into amplitude spectra and frequency spectra based on Gabor wavelet. The rotation-invariant vector is calculated on the basis of the local energy distributions, Hurst parameters and direction differences. Then the adaptive weighted distance is used to measure the similarity. In order to demonstrate the efficiency of this method for the general texture images, the experiments are carried on the rotation texture database and the general texture database respectively. The proposed approach performed well in both of the experiments.

Keywords texture retrieval, Gabor, generalized roughness, rotation-invariant feature, adaptive weighted distance

1 引言

近年来, 随着数字图像数量的急剧增长和多媒体技术的快速发展, 图像检索技术已成为当前的研究热点之一。目前, 主要采用的是基于内容的图像检索, 而基于纹理的图像检索作为它的一个重要组成部分, 也得到了越来越多的重视。

旋转不变纹理检索一直是检索研究中的一个热门方向。以往的研究中也提出了许多旋转不变图像检索算法, 大致分为两大类: 一类为基于模型的方法^[1,2], 这类方法检索率较高, 但算法相对复杂, 有

时需要进行训练; 另一类为基于特征的方法^[3-7], 这些方法大多从变换域出发, 计算图像的空、频域统计特性, 使用特征向量来描述图像。与模型法相比, 这类方法具有计算量小、算法实现相对简单等优点。

众所周知, 纹理灰度分布的变化可用粗糙度来刻画, 变化的频率、幅度和范围决定了粗糙的视觉效果。依据 Gabor 变换的多尺度、多方向分解特性可以很好地刻画纹理分布的方向性、尺度性和能量分布特性, 同时结合 Hurst 分形特征, 形成旋转不变多尺度广义粗糙度纹理描述子。此外, 依据不同特征项的分辨能力提出了一种自适应加权方法进行距离度量。仿真实验结果表明, 该算法取得了较好的检

收稿日期: 2004-07-14; 改回日期: 2004-11-09

第一作者简介: 王成儒(1949 ~), 男, 教授, 硕士生导师。主要从事图像处理、模式识别方面的研究。已发表论文 20 余篇, 出版专著 1 部。E-mail: wzryb@sina.com

索效果。

2 Gabor 分解

Gabor 小波具有多方向和多分辨率特性,可以同时 在空频域达到最优联合分辨率。但 Gabor 小波 为非正交的,为了尽可能减少冗余信息,文中采用文 献[3]中的设计方法。Gabor 小波定义为

$$g_{mn}(x, y) = a^{-m} g(x', y') \quad (1)$$

其中, $a > 1$, m 表示当前尺度, n 为当前方向, $m = 0, 1, \dots, S-1; n = 0, 1, \dots, K-1$, S 和 K 分别表示尺度 和方向总数。

$$g(x, y) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \right) \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) + 2\pi j U_0 x \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x' &= a^{-m} (x \cos(\theta) + y \sin(\theta)) \\ y' &= a^{-m} (-x \sin(\theta) + y \cos(\theta)) \\ \theta &= n\pi/K \end{aligned}$$

U_0 为高斯函数中心频率。本文选取参数 $S=4, K=6$, 最高中心频率 0.4, 最低中心频率 0.05, 滤波器半径方向上相邻子带带宽按 2 倍增长, 角度 方向上相邻子带间隔 30° , 各相邻子带的半峰幅值 彼此相接, 保证滤波后冗余信息最小。此外为消除 平均亮度对滤波结果的影响, 将滤波器调整为零均 值。

3 多尺度广义粗糙度特征向量

Gabor 分解的第 m 尺度 n 方向的信号表示为

$$F_{mn}(x, y) = |F_{mn}(x, y)| \exp(j\psi_{mn}(x, y)) \quad (3)$$

其中, $|F_{mn}|$ 为幅度信号, ψ_{mn} 为相位信号, 它们都是 关于 Gabor 分解方向总数 K 的周期函数, 当图像旋 转 θ 时, 相当于原幅度谱循环平移 $-K\theta/180^\circ$, 相位 谱循环平移 $-K\theta/360^\circ$ [4], 且有

$$\begin{cases} |F_{m((n+K/2))_K}(x, y)| = |F_{mn}(x, y)| \\ \psi_{m((n+K/2))_K}(x, y) = -\psi_{mn}(x, y) \\ \psi_{m((n+K))_K}(x, y) = \psi_{mn}(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

ψ_{mn} 中含有重要的纹理信息, 通过梯度运算可以 提取其局部频率信息

$$\phi_{mn}(x, y) = \sqrt{\nabla_x^2(\psi_{mn}(x, y)) + \nabla_y^2(\psi_{mn}(x, y))}$$

其中, $\nabla_x(\cdot)$ 和 $\nabla_y(\cdot)$ 分别表示沿 x 和 y 方向的

梯度算子, ϕ_{mn} 是尺度 m 方向 n 上的局部频率估计。 由式(4)得

$$\phi_{m((n+K/2))_K}(x, y) = \phi_{mn}(x, y) \quad (5)$$

提取 Gabor 变换后各个子带的能量

$$E_{mn} = \sum_{x, y} |F_{mn}(x, y)| \quad (6)$$

则尺度 m 下纹理的局部总能量为

$$E_m = \sum_n E_{mn} \quad (7)$$

为了刻画不同尺度间的相对差别, 定义 Hurst 分形指数

$$H_m = 0.5 \log \left(\left| \frac{E_{m+1}}{E_m} \right| \right) \quad (8)$$

对 $|F_{mn}|$ 进行特征提取。引入方向粗糙度特征 R_{mn} , 它有效地刻画了子带内的纹理信息, 体现了纹 理变化的粗糙度[5]。对每一子带有

$$\left\langle \max_{\substack{u \in (x-\varepsilon, x+\varepsilon) \\ v \in (y-\varepsilon, y+\varepsilon)}} |F_{mn}(u, v)| \right\rangle_{N \times N} \sim \varepsilon^{R_{mn}} \quad (9)$$

其中, $\langle \cdot \rangle_{N \times N}$ 表示对子带内所有点进行算术平均, $\varepsilon = 1, 2, 3$ 为运算步长。故 R_{mn} 可近似看作由如下坐 标点所拟合直线的斜率,

$$\left(\log \varepsilon, \log \left\langle \max_{\substack{u \in (x-\varepsilon, x+\varepsilon) \\ v \in (y-\varepsilon, y+\varepsilon)}} |F_{mn}(u, v)| \right\rangle_{N \times N} \right) \quad (10)$$

另外不同方向上的相对纹理能量对纹理粗糙度 的视觉效应具有重要影响, 这里使用同一尺度不同 方向上的能量百分比对对应方向的特征加权来模拟 人眼的视觉效果。

尺度 m 上方向为 n 的子带所占能量百分比为

$$P_{mn} = E_{mn}/E_m \quad (11)$$

则基于能量分布的加权粗糙度特征为

$$W_{mn} = R_{mn} P_{mn} \quad (12)$$

为消除方向影响, 定义尺度 m 下平均加权粗糙 度特征

$$A_{F_m} = \left(\frac{1}{K} \right) \sum_n W_{mn} \quad (13)$$

为刻画不同方向间差别, 定义最大方向差:

$$\begin{aligned} D_{F_{md}} &= \max |W_{mn} - W_{m(n+d)}| \quad (14) \\ d &= 1, \dots, K/2; n = 1, \dots, K-d \end{aligned}$$

同理, 对频率谱 ϕ_{mn} 求平均加权粗糙度特征 $A\phi_m$ 和最大方向差特征 $D\phi_{md}$ 。

选取 $S=4, K=6$, 则各特征表示为

(1) 多尺度 Hurst 分形特征

$$H = [H_1, H_2, H_3]$$

(2) 多尺度加权粗糙度特征

$$A_F = [A_{F_1}, A_{F_2}, A_{F_3}, A_{F_4}]$$

$$A_\phi = [A_{\phi_1}, A_{\phi_2}, A_{\phi_3}, A_{\phi_4}]$$

这 3 个特征与方向无关,将其表示为

$$T_{\text{non-d}} = [A_F, A_\phi, H] \quad (15)$$

(3) 最大方向差特征

$$D_F = [D_{F_{11}}, D_{F_{12}}, \dots, D_{F_{42}}, D_{F_{43}}]$$

$$D_\phi = [D_{\phi_{11}}, D_{\phi_{12}}, \dots, D_{\phi_{42}}, D_{\phi_{43}}]$$

这两个向量分别表示幅度谱和频率谱中加权粗糙特征在各个尺度上,方向间隔分别为 $30^\circ, 60^\circ$ 和 90° 时的差特征。由于计算的是方向之间差值,因此该特征受方向影响很小,可近似看作与方向无关。表示为

$$T_d = [D_F, D_\phi] \quad (16)$$

整个纹理图像可用如下 35 维特征向量 T 描述

$$T = [T_{\text{non-d}}, T_d] \quad (17)$$

4 距离准则

采用标准差归一化的街区距离进行计算。设查询图像的特征为 $T^{(q)} = [T_{\text{non-d}}^{(q)}, T_d^{(q)}]$, 图像库中第 j 幅图像的特征为 $T^{(j)} = [T_{\text{non-d}}^{(j)}, T_d^{(j)}]$, 则有

$$d_{T_{\text{non-d}}} = \frac{1}{l(T_{\text{non-d}})} \sum_k \frac{T_{\text{non-d}}^{(q)}(k) - T_{\text{non-d}}^{(j)}(k)}{\alpha_{T_{\text{non-d}}}(k)} \quad (18)$$

$$d_{T_d} = \frac{1}{l(T_d)} \sum_k \frac{T_d^{(q)}(k) - T_d^{(j)}(k)}{\alpha_{T_d}(k)}$$

式中, k 表示对应特征项的序号, $\alpha_{T_{\text{non-d}}}(k)$ 和 $\alpha_{T_d}(k)$ 分别为由特征库求得的对应特征项的标准差。 $l(\cdot)$ 表示特征长度, 用来消除不同长度特征对距离计算的影响。

下面对两个距离进行加权, 总距离表示为

$$d_{\text{all}} = \lambda_{T_{\text{non-d}}} \times d_{T_{\text{non-d}}} + \lambda_{T_d} \times d_{T_d} \quad (19)$$

$\lambda_{T_{\text{non-d}}}$ 和 λ_{T_d} 为对应特征权值。依据图像分类的思想, 利用整个特征库的统计特性计算权值。为了保证运算范围相同, 计算前先将各特征向量使用该向量上的最大值归一化, 然后抽取相应特征库中同一维数上的各特征值构成一组新的特征向量, 并计算各向量的标准差。从整个图像库来看, 可以认为库中绝大部分图像都不属于一类, 因此各标准差就近似代表了各类图像对应特征的类型间方差。依据图像分类的知识, 可认为该值越大, 各类图像对应项的区别就越明显, 则该特征项的权值就越大。最后计算特征库中所有标准差的均值, 该值即为对应特征库的权值。为使权值和为 1, 对上述权值进行归一化处理

$$\lambda_{T_{\text{non-d}}} = \frac{a_{T_{\text{non-d}}}}{a_{T_{\text{non-d}}} + a_{T_d}} \quad (20)$$

$$\lambda_{T_d} = \frac{a_{T_d}}{a_{T_d} + a_{T_{\text{non-d}}}}$$

其中, $a_{T_{\text{non-d}}}$ 和 a_{T_d} 分别为特征库 $T_{\text{non-d}}$ 和 T_d 的平均标准差。需要说明的是这种加权方法是从整个特征库出发的, 它与库中图像类型和特征有关。仿真实验结果表明, 该算法可以有效地提高系统检索率。

5 实验结果

进行两组实验分别验证算法对旋转纹理和普通纹理的检索效果, 并将实验结果与 LBP (local binary pattern) 特征和旋转不变 Gabor 特征的检索结果进行对比。

实验 1 验证算法的旋转不变性

选取文献[6]中的旋转纹理库进行实验。该库共包含 16 类纹理图像如图 1 所示。且每类图像都包含旋转角度分别为 $0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ 和 150° 的 10 幅旋转图像, 图像大小均为 128×128 。检索时, 依次取出库中每一幅图像作为查询图像, 认为与查询图像对应的 10 个不同旋转角度的图像为它的相似图像。利用检索结果返回的前 10 幅图像中正确检索到的图像百分比表示检索率。把每类对应的 10 幅图像的检索率求平均得到这类图像的平均检索率, 将 160 次的计算结果求平均得到整个图像库的平均检索率。

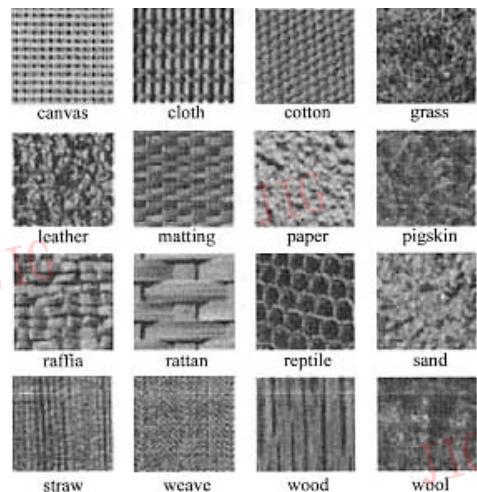


图 1 未旋转前的纹理图像

Fig. 1 Non-rotated texture images

由 Matlab 仿真实验计算得该库平均检索率为 95.5625%，权值为 $\lambda_{T_{\text{non-d}}} = 0.8501, \lambda_{T_d} = 0.1499$ 。图 2 给出对应库中每类图像的平均检索率曲线图。

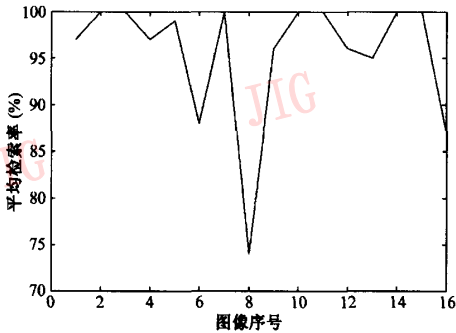


图 2 实验 1 中各类图像的平均检索率

Fig. 2 The average retrieval rates for individual texture class in experiment 1

为避开算法选取的 30° 角度间隔对计算结果造成的影响, 将库中对应旋转角度为 60°, 90°, 120°, 150° 的图像重新旋转为 80°, 100°, 115°, 160°, 并对新的图像库进行实验。这时检索率为 94.9632%，说明算法对图像旋转有较好的鲁棒性。此外, 实验还发现当增加 Gabor 分解的方向数时, 检索率提高, 但计算量也随之增加。仿真实验表明, 当方向数为 6 时, 可以得到计算量和检索率的折衷。

实验 2 验证算法对普通纹理的有效性

采用常用的 Brodatz 纹理库进行测试。该库共有 112 幅纹理图像, 每幅图像大小均为 512 × 512, 将每幅图像看作一类, 并将其等分成 16 张互不重叠的子图, 形成大小为 1792 的纹理库。认为只有来自同一幅原图像的小图是相似图像。检索评价方法与实验 1 类似。仿真实验结果表明, 该图像库的平均检索率为 71.1292%, 权值为 $\lambda_{T_{\text{non-d}}} = 0.6857, \lambda_{T_d} = 0.3143$ 。图 3 为每类图像的平均检索率曲线图。

使用相同的测试图像, 将本算法结果与文献 [6] 中 LBP 特征和文献 [7] 中旋转不变 Gabor 特征检索结果进行比较。结果如表 1 所示, 表中 r 为 LBP 算法所取半径, p 为圆周上采样点数。

为说明加权方法的有效性, 实验还计算了不进行加权处理时算法的检索率。这时在相同的条件下, 实验 1 的平均检索率降为 89.25%, 实验 2 的平均检索率为 69.1376%。由此说明该加权算法可以有效提高系统检索率。

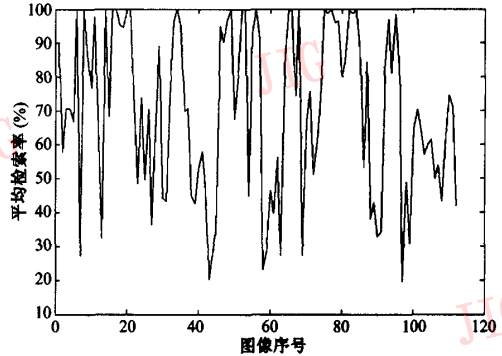


图 3 实验 2 中各类图像的平均检索率

Fig. 3 The average retrieval rates for individual texture class in experiment 2

表 1 检索性能比较表

Tab. 1 Comparison of the performance of different methods

算法名称	特征维数	实验 1 平均检索率 (%)	实验 2 平均检索率 (%)
LBP	$p = 8, r = 1$	78.2500	64.2508
	$p = 16, r = 2$	84.7500	66.9050
	$p = 24, r = 3$	93.9375	67.2259
旋转不变 Gabor 特征	48	91.6250	69.5068
本文算法	35	95.5625	71.1292

6 结论

通过综合利用图像 Gabor 分解的幅度信息和相位信息及其他统计特性得到了一种有效的旋转不变纹理描述方法, 并根据特征分布的统计特性提出了一种自适应加权函数进行距离度量。该算法不仅可靠地实现了各种旋转角度纹理图像的检索, 而且对普通纹理库也取得了较好的检索效果。进一步的研究方向是如何更好地利用图像本身的信息和其他一些学习算法来对距离进行更优加权。

参考文献 (References)

- Do M N, Vetterli M. Rotation invariant texture characterization and retrieval using steerable wavelet-domain Hidden Markov models [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(12): 517 ~ 527.
- Kashyap R L, Khotanzad A. A model based method for rotation invariant texture classification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(7): 472 ~ 481.
- Manjunath B S, Ma W Y. Texture features for browsing and retrieval of image data [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(8): 837 ~ 842.

- 4 Haley G M, Manjunath B S. Rotation invariant texture classification using a complete space-frequency model[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(2):255 ~ 269.
- 5 Charalampidis D, Kasparis T. Wavelet-based rotational invariant roughness features for texture classification and segmentation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(8): 825 ~ 837.
- 6 Ojala T, Pietikainen M, Maenpää T. Multiresolution gray-scale and rotation-invariant texture classification with local binary patterns[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7):971 ~ 986.
- 7 Zhang D, Wong A, Indrawan M, *et al.* Content based image retrieval using Gabor texture features [EB/OL]. <http://www.google.com/search?q=texture+gabor+rotation+invariant+cbir,2000-10-24>.