

文章编号: 1002-1582(2009)06-0825-03

基于图谱理论的纹理图像分析<sup>\*</sup>张涛<sup>1,2</sup>, 洪文学<sup>2</sup>

(1. 燕山大学 信息学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 图谱理论作为目前模式识别研究的热门方法之一, 广泛应用于聚类与分割, 但对其进行图像分析, 尤其是复杂的纹理图像分析未见报道。将图谱理论引入到图像分析领域, 并结合窗口纹理分析方法构造新的纹理分析算法。首先对图像灰度级进行窗口划分得到不同灰度级下的子图像, 然后以各子图像作为图的顶点, 子图像间的相似度作为图的边, 将原图像解析为一幅带权无向图。利用图谱理论的相关思想对该无向图进行分析, 可以从中获得纹理粗糙度等特征, 从而完成对原始图像的分析。通过对 Brodatz 图像库的检索实验证明, 该方法优于传统纹理分析算法。

**关 键 词:** 图谱理论; 窗口法; 纹理分析; 归一化划分

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## Texture image analysis based on graph spectral theory

ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, HONG Wen-xue<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(2. College of Information Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** As an active topic in pattern recognition, the graph spectral is applied in clustering and segmentation. But the analysis to image, especially the texture image, can not be retrieved till now. The graph spectral theory is introduced into the field of texture image analysis. The new method combines the graph spectral theory with windows texture analysis. The windows the image gray level is segmented at first to obtain sub-images. The sub-images are taken as the vertexes and the similarity between them are regarded as edges of a graph. In this way, a weighted undirected graph is obtained from the original image and features are calculated from that by spectral theory. The retrieval experiments based on Brodatz dataset show that the method is superior to traditional texture analysis.

**Key words:** graph spectral theory; window texture analysis; texture analysis; normalized cut

## 1 引 言

图谱理论是目前模式识别研究的热门方法之一, 在数据降维、聚类和图像分割方面获得了广泛的应用<sup>[1~5]</sup>。其基本思想是将数据整体看作是一个带权图, 每个数据对应于图中的节点, 并把节点间距离或相似度作为边的权值, 通过对距离测度函数进行学习得到亲和矩阵, 并分解特征值、特征向量, 从而完成对原始数据的新的表达, 完成降维与聚类。

由于图谱理论具有良好的相似度分析, 因此基于图谱理论的降维、聚类与图像分割算法已经取得了较为满意的成果。但在图像处理领域, 图谱理论的应用仍仅限于图像分割<sup>[2,6]</sup>。因为图谱分析本质为相似度的分析方法, 而图像分割的目的就是根据图像内容的相似度将图像分为若干区域, 因此符合

图像分割的要求。对于图像分析而言, 其本质是通过提取图像的内容特征来对原始图像进行描述的。该特征提取过程一般仅针对单个图像, 因此与相似度无关。从这个角度来看, 图谱理论无法在图像分析, 尤其是复杂的纹理图像分析领域中获得应用, 这也是目前没有见到有关基于图谱理论的图像分析的重要原因。

从另一个角度来看, “窗口纹理分析”思想<sup>[7,8]</sup>是通过将纹理图像分为若干子图像进行独立分析的, 然后再对各子特征进行综合, 进而获得整体纹理特征。其子图像分解的思想为图谱理论在图像分析中的应用提供了重要依据。本文就是利用图谱理论思想, 并结合“窗口纹理分析”思想, 提出基于图谱理论的纹理分析, 将图谱理论应用于图像的特征提取的。其根本思想是将图像划分成为若干个子图, 视

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-11-26; 收到修改稿日期: 2009-04-02

E-mail: zhtao-79@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60671025)

作者简介: 张涛(1979-), 男, 河北省人, 讲师, 博士生, 主要研究模式识别、图像分析方面的研究。

这些子图为全局图的顶点,通过分析子图间的相似度即可获得图像的整体特征。本文所选取的子图分解是基于灰度值的分解,这样的分解可以保证算法的通用性。实验证明,本文提出的基于图谱理论的纹理分析方法优于经典的纹理分析方法。

2 图谱理论的纹理分析

人类识别纹理时,粗糙度和对比度是关键性的指标,而粗糙度和对比度均可以通过相邻像素或区域间灰度的强度与空间的相关性来进行衡量。本文方法就是利用人类视觉的这个特点进行特征提取的,可分为三个步骤,即纹理图像的窗口划分即子图形成,求子图间亲和矩阵和通过子图间亲和矩阵求

纹理图像特征值。

2.1 纹理图像的窗口划分

文献[7]提出了“窗口纹理分析”方法,其主要思想首先是对原始图像进行窗口划分,对窗口子图像进行特征提取,然后再利用统计方法对所有窗口子特征进行特征的二次提取,从而获得原始图像的特征。文献[7]分别从空间域和频率域进行了窗口划分,而本文将从灰度域进行窗口划分,从而形成待处理的子图。

设原始图像灰度分布为  $\{f_i \mid i = 0, 1, \dots, m - 1\}$ ,对原始灰度进行窗口划分,窗口数为  $n$ ,则窗口长度为  $m/n$ ,形成  $n$  个子图  $V_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,如图 1 所示。

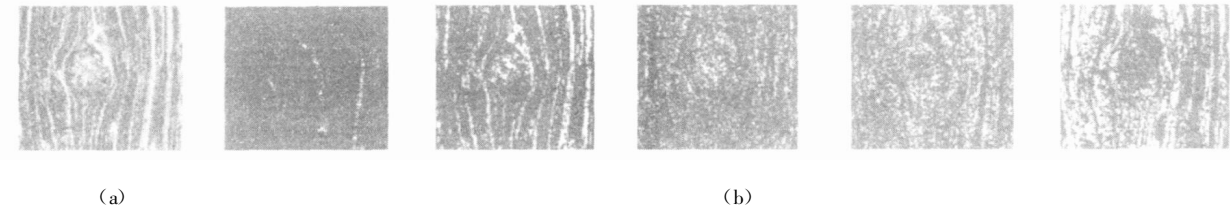


图 1 对 Brodatz 库 D72 的 5 窗口分解结果  
(a) D72 原始图像; (b) 对图(a)的 5 窗口分解后形成的子图像。

由图 1 可知,各子图间表示了该窗口灰度的空间分布,相邻子图表示了相邻灰度分布的空间关系。因此,将各子图看作独立的点集,可以利用图谱理论度量不同点集间的空间分布状况,从而获得各图像子图间的分布关系。

2.2 子图间亲和矩阵与特征提取

为衡量不同子图  $V_i$  间各点的空间距离,本文采用图谱理论中归一化划分[3]描述了两子图间的分离度。

令  $V = \{(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, n_l; j = 1, 2, \dots, n_c\}$ ,其中  $n_l$ 和  $n_c$ 分别表示原始图像的高度和宽度,令  $L = \{0, 1, \dots, m - 1\}$ ,令  $f(x, y)$ 为图像在  $(x, y)$ 点处的像素灰度值,则  $V$ 和  $f(x, y)$ 满足下列条件:

$$f(x, y) \in L, \forall (x, y) \in V \tag{1}$$

$$V_i = \left\{ (x, y) \mid f(x, y) \in \left[ \frac{(i-1)m}{n}, \frac{im}{n} \right), (x, y) \in V \right\} \tag{2}$$

$$\bigcup_{i=1}^n V_i = V, V_i \cap V_j = \phi, i \neq j, i, j \in \{0, 1, \dots, n - 1\} \tag{3}$$

将各子图的每个像素点看作是一个节点,每对节点均用一条边连接起来,边的权值反映的是节点间空间的距离,可构建基于子图的带权无向图  $G = (V, E)$ ,该图既反映了子图的内部关系,同时又表

达了子图之间的相互关联,即可认为是表示图间自相关和互相关的关系图。 $G$ 中任意节点  $u$ 和  $v$ 的边的权值为

$$w(u, v) = \exp \left[ - \frac{\|X(u) - X(v)\|_2^2}{2\sigma^2} \right] \tag{4}$$

式中:  $X(u)$ 表示节点  $u$ 的空间位置;  $\sigma$ 为调节因子。则

$$Ncut(V_i, V_j) = \frac{cut(V_i, V_j)}{asso(V_i, V_j)} + \frac{cut(V_i, V_j)}{asso(V_i, V_j)} \tag{5}$$

其中

$$cut(V_i, V_j) = \sum_{u \in V_i, v \in V_j} w(u, v) \tag{6}$$

$$asso(V_i, V_j) = \sum_{u \in V_i, v \in V_j} w(u, v) \tag{7}$$

$$V_{ij} = V_i \cup V_j \tag{8}$$

令

$$AffinityMatrix(i, j) = Ncut(V_i, V_j) \tag{9}$$

由以上分析可知,亲和矩阵  $AffinityMatrix$ 反映了原始图像中各灰度窗口子图中的像素点的空间分布状况,其中第  $i$ 列表示第  $i$ 个子图与所有子图的空间关系。因此对矩阵  $AffinityMatrix$ 作垂直投影即可反映各子图与所有子图的平均亲和程度。可以利用图谱理论中度的概念获得纹理图像的特征向量,如式(10)所示。该特征向量可以很好地表达各

子图与所有子图的平均亲和程度,即纹理图像不同时灰度级间的空间相似度。图 2 给出不同纹理对应的亲和矩阵及特征向量。

$$d(i) = \sum_{j=1}^n \text{AffinityMarix}(x,y) \tag{10}$$

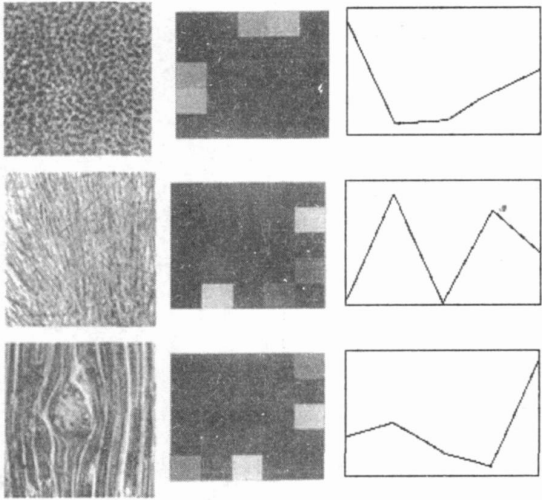
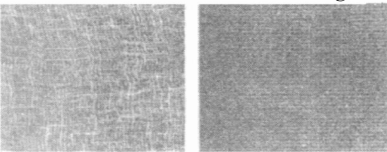


图 2 不同纹理对应的亲和矩阵及特征向量

3 实验结果

采用基于内容图像检索(Content-Based Image Retrieval, CBIR)方式对本文所提方法的性能进行了验证,并利用共生矩阵方法作为对比算法进行了对比测试。共



生矩阵是纹理分析算法中最具代表性的算法之一,已经作为纹理分析函数集成在 Matlab 的函数库中,通过对该函数的调用可以保证实验结果的客观性,且共生矩阵算法的本质也是分析不同灰度级的空间位置关系的,与本文方法在思路上有相似之处,因此两者具有很好的可比性。

本次实验采用的测试图像库是经过 Queensland 大学分类整理过的 Brodatz 自然纹理库<sup>[9]</sup>,该图像库在继承原始 Brodatz 图像库测试性能的同时,强调算法对于相似纹理的可分性。该图像库共有 256 幅 16 类自然纹理图像,每类纹理均有 16 幅图像。图 3 给出了该数据库中的部分纹理类型。在实验过程中,采用留一法(leave one out cross validation, LOOCV)进行了测试,即将此图像库 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通过 256 次检索得到的平均值。在检索过程中,距离函数均使用  $L_2$  距离,即

$$D(A,B) = \sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2 \tag{11}$$

式中:  $A_i$  和  $B_i$  分别表示图像  $A$  和  $B$  的第  $i$  个特征;所得距离  $D(A,B)$  表示两幅图像间的不相似度,  $D(A,B)$  越小,表示两幅图像越相似。

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,在系统返回的查询结果中相关图像的数目占有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有所有相关图像数目(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。随着返回图像数的增加,返回的相关图像数与非相关图像数均为单调增函数,因此查准率必然是一个衰减的过程,而查全率必然是一个增加的过程。

图 4 为两种算法的查准率曲线。由该曲线可以看出,在返回图像数大于 4 时,与共生矩阵相比,本文方法查准率更高。从整体上看,本文方法的查准率曲线衰减较慢,说明随着返回图像数的增加,其返回的非相关图像要少于共生矩阵方法,性能更为稳定。在返回图像数为 16 时,两种方法的查准率如表

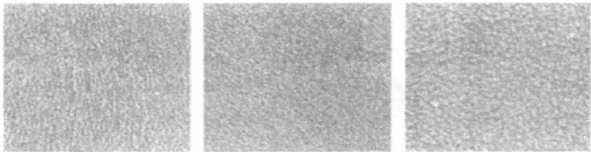


图 3 实验用纹理库中的部分图像

1 所示,分别为 63.60%和 57.57%,本文方法的查准率高出共生矩阵查准率 6.03%。

表 1 给出了在不同返回图像数目下两种方法的查全率关系。表中查全率( $i$ )表示返回图像数为  $i$  时的查全率。可以看到,本文方法在查全率上也高于共生矩阵,说明其漏检的危险要低于共生矩阵方法。

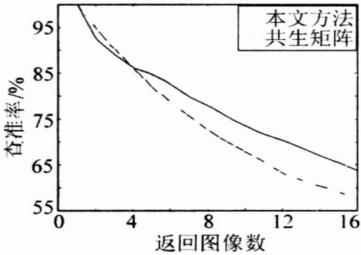


图 4 查准率比较

表 1 本文方法与共生矩阵的检索性能比较

	查准率	查全率(20)	查全率(30)	查全率(40)
本文方法	63.60%	68.63%	77.34%	83.62%
共生矩阵	57.57%	64.84%	75.51%	81.13%

(下转第 831 页)

比周围热量高, 再加上周围的热量会因横向热传导而损失, 整个热作用区分布呈现中心高周围低; 当调节扫描半径到 4mm 时, 环斑的中心能量比周围低, 周围热量的一部分会因横向热传导而损失。另一部分会通过横向热传导移至中心部分, 这样的光斑作用在工件上实现了比较均匀的热作用, 最终可得到比较均匀的淬硬层。

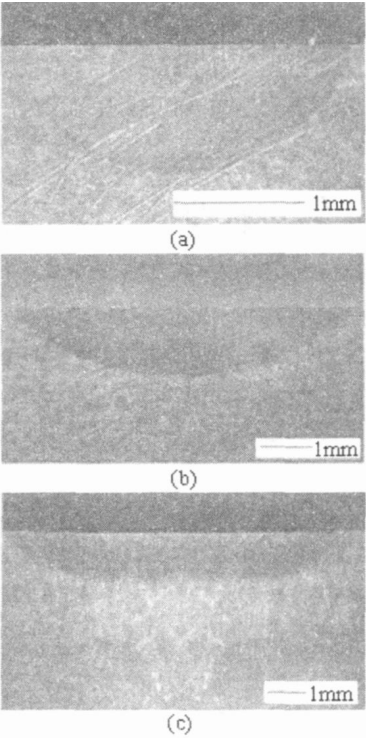


图 6 聚焦光斑与扫描环形光斑截面形貌的比较  
(a) 聚焦光斑截面形貌; (b) 环形光斑截面形貌, 扫描半径  $r=2\text{mm}$ ; (c) 环形光斑截面形貌, 扫描半径  $r=4\text{mm}$ 。

5 结 论

理论模拟了激光扫描环形光斑的温度场, 得到了其温度分布特性; 实验研究了激光扫描环形光斑的热作用效果, 得到了分布均匀的硬化层。理论及实验表明, 激光扫描环形光斑通过高频反复扫描, 使作用区吸收能量对时间的平均值接近相等, 实现了均匀的热作用, 且

环形光斑的能量分布呈现周围高中心低, 周围突起能量会因横向热传导而部分损失。另一部分移至光斑中心部位, 最终得到了分布比较均匀的硬化层, 改善了加工质量, 激光扫描环形光斑在激光热处理中有一定的应用前景。

参考文献:

[1] 李俊昌. 激光热处理现状分析[J]. 昆明理工大学学报, 1997, 22(1): 146—153.  
[2] 何芳, 吴钢, 宋光明. 曲边矩形光斑激光淬火的理论研究[J]. 天津工业大学学报, 2003, 22(5): 17—20.  
[3] Jinglun Liu, Yude Li, et al. Proposal to obtain a hollow laser beam from a hollow cone-shaped resonator[J]. Optical Engineering, 2007, 46(10): 1—5.  
[4] 吕岩, 于延宁, 万重怡. 输出环状光束的新型激光谐振腔[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1653—1657.  
[5] 常晓惠, 翁世平. 球墨铸铁的镍基合金环形光斑激光熔敷[J]. 应用激光, 1999, 19(5): 225—228.  
[6] 叶瑞方, 黄元庆, 等. 激光加工中光束变换技术研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (Supplement): 361—363.  
[7] 石磊, 赵尚弘, 等. 激光推进环聚焦数值模拟研究[J]. 半导体光电, 2007, 28 (5): 743—746.  
[8] Fatemi, Fredrik K. Bashkansky, Mark. Generation of hollow beams by using a binary spatial light modulator[J]. Optics Letters, 2006 31(7): 864—866.  
[9] Mishra S R, Tiwari S K, Ram S P, et al. Generation of hollow conic beams using a metal axicon mirror[J]. Optical Engineering, 2007, 46(8): 1—5.  
[10] WEI Ming-dai, SHIAO Wen-long, LIN Yi-tse. Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon[J]. Optics Communications, 2005, 248: 7—14.  
[11] Angelis M D, Cacciapuoli L, Pierattini G, et al. Axially symmetric hollow beams using refractive conical lenses[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 39(3): 283—291.  
[12] Sato J, Endo M, Yamaguchi S et al. Simple annular-beam generator with a laser-diode-pumped axially off-set power build-up cavity[J]. Optics Communications, 2007, 277(2): 342—348.  
[13] 王云山, 杨洗陈, 刘亚君. 激光扫描光斑温度场[J]. 中国激光, 2006 33(7): 981—986.  
[14] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998 30—34.

(上接第 827 页)

由以上的对比实验可知, 本文方法在查准率与查全率上均高于经典的共生矩阵方法, 其主要原因在于共生矩阵仅从像素点的空间邻域进行分析, 分析范围较小; 而本文算法则是在不同灰度级下, 在空间上利用图谱理论进行相关分析, 是灰度关系和空间关系的双重分析。

4 结 论

本文基于图谱理论提出了一种新的纹理图像分析方法, 使图谱理论的应用不再局限于在数据降维、聚类 and 图像分割方面的应用。实验证明, 本文方法性能优于经典的共生矩阵的纹理分析方法, 具有较好的纹理分析能力。

参考文献:

[1] Song Wang, Jeffrey Mark Siskind. Image Segmentation with Ratio Cut[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2003, 25(6): 675—690.  
[2] U von Luxburg. A tutorial on spectral clustering[M]. Statistics and Computing, Springer, 2007.  
[3] Jianbo Shi, Jitendra Malik. Normalized Cuts and Image Segmentation[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2000, 22(8): 888—905.  
[4] L Xiaobin, T Zheng. Multiscale stochastic hierarchical image segmentation by spectral clustering[J]. Science in China Series F Information Science, 2007, 50(2): 198—211.  
[5] 陶文兵, 金海. 一种新的基于图谱理论的图像阈值分割方法[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 110—118.  
[6] 李小斌, 田铮, 刘密歌, 等. 基于加权割的图像分割[J]. 电子学报, 2008, 36(1): 76—80.  
[7] 张涛, 王成儒. 窗口纹理分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 2289—2290.  
[8] 张涛, 王成儒. 基于尺度质心统计的纹理分析[J]. 光学技术, 2006, 32(3): 413—415.  
[9] Guy Smith. Brodatz Test Suite [EB/OL]. www.cssi.pu.edu.au/staff/meastex/imgs/brodatz.html, 1998—01—19/2003—10—03.