

基于纹理谱描述子的图像检索*

施智平^{1,2+}, 胡宏¹, 李清勇^{1,2}, 史忠植¹, 段禅伦³

¹(中国科学院 计算技术研究所 智能信息处理重点实验室,北京 100080)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

³(内蒙古大学 计算机学院,内蒙古 呼和浩特 010021)

Texture Spectrum Descriptor Based Image Retrieval

SHI Zhi-Ping^{1,2+}, HU Hong¹, LI Qing-Yong^{1,2}, SHI Zhong-Zhi¹, DUAN Chan-Lun³

¹(Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

²(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Computer College, Inner Mongolia University, Huhehaote 010021, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62565533 ext 5692, E-mail: shizp@ics.ict.ac.cn, <http://www.intsci.ac.cn>

Received 2004-02-10; Accepted 2004-08-10

Shi ZP, Hu H, Li QY, Shi ZZ, Duan CL. Texture spectrum descriptor based image retrieval. *Journal of Software*, 2005,16(6):1039–1045. DOI: 10.1360/jos161039

Abstract: This paper presents a new texture spectrum descriptor for content-based image retrieval (CBIR). The relation between wavelet transition and texture spectrum method is discussed. This paper proposes the concept of texture pattern equivalent according to texture visual nature to educe more rational texture spectrum descriptor. The proposed texture patterns depict the variational pattern of pixel gray scales in a domain to descript images texture feature. It represents image content in the form of texture spectrum histogram. The symmetry invariant and rotation robusticity are discussed. Comparison with Gabor features using general image dataset indicate that the proposed texture descriptor takes lower extracting time and provides higher image retrieval accuracy.

Key words: texture; symmetry invariant; content-based image retrieval; texture spectrum descriptor

摘要: 提出一种新的纹理谱描述子应用于基于内容的图像检索中. 讨论了小波变换的思想和纹理谱概念的联系, 根据纹理的视觉特性, 提出纹理模式等价类的概念, 设计出更合理的纹理谱描述子来描述图像的纹理特征. 该纹理模式刻画了领域内像素灰度变化模式, 以纹理谱直方图方式表示图像纹理内容. 分析了纹理谱的对称不变性和旋

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60173017 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2002AA135230-D (国家高技术研究发展计划(863)); the Knowledge Innovation Program Pilot Project of the Chinese Academy of Sciences of China under Grant No.20200120024010 (中国科学院知识创新方向性项目)

作者简介: 施智平(1974—),男,内蒙古呼和浩特人,博士生,讲师,主要研究领域为基于内容的视觉信息检索,图像理解,机器学习;胡宏(1962—),男,副研究员,主要研究领域为人工智能,图像模式识别;李清勇(1979—),男,博士生,主要研究领域为机器学习,图像理解,视觉信息挖掘;史忠植(1941—),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为人工智能,机器学习,神经计算,认知科学;段禅伦(1947—),男,教授,主要研究领域为可计算性与算法复杂性.

转鲁棒性的特点.应用于图像检索,与 Gabor 纹理特征相比较,该纹理谱描述子特征提取速度快,检索准确率高.

关键词: 纹理;对称不变性;基于内容的图像检索;纹理谱描述子

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

近年来,Internet 和多媒体技术飞速发展,多媒体(包括图像、视频等)数据规模急剧膨胀.为了快速、准确地找到感兴趣的图像或视频,人们提出了基于内容的图像检索(content-based image retrieval,简称 CBIR)技术,研究让计算机对图像进行分类和检索的算法.CBIR 涉及图像内容表示、相似性度量、高维索引技术等方面.

图像内容的表示是需要首先解决的问题.为了实现对图像内容的存取、访问和检索,MPEG-7^[1,2]提出了图像内容描述子的概念,例如颜色描述子、纹理描述子、形状描述子等.

图像颜色内容通常用颜色直方图来表示,纹理特征以纹理模式区分图像,形状特征用于包含特定形状对象的图像检索.颜色直方图(或称为颜色谱)因其简单、有效的性能而在大多数 CBIR 系统中得到应用,但是颜色直方图对纹理图像的检索效果不好.不同的纹理图像可能有非常相似的颜色直方图^[3].

所谓图像纹理,它反映的是图像的一种局部结构化特征,具体表现为图像像素点某邻域内像素点灰度级或者颜色的某种变化,而且这种变化是空间统计相关的,它由纹理基元和基元的排列两个要素构成^[4].纹理分析方法有统计方法、结构方法和基于模型的方法.

在 20 世纪 70 年代初期,Haralick 等人^[5]提出了纹理特征的共生矩阵表示,但用共生矩阵提取的纹理性质缺少视觉相似性.90 年代初期,在引入小波变换并建立它的理论框架后,许多研究者开始研究在纹理表示中使用小波变换.Manjunath 和 Ma^[6]评价了各种小波变换,他们发现,Gabor 小波变换最符合人类的视觉特征.小波分析因其突出的局域特性和多尺度特性而在纹理分析中大显其能,其共同的缺点是计算量大,不能满足海量图像检索系统的实时性要求.Mandal 等人^[3]提出了小波系数直方图索引技术.

刘继敏^[7]提出了图像特征谱的概念,并指出了图像特征谱表示图像内容的优越性.He 及 Wang^[8], Ojala T^[9], 万华林等人^[10]提出用纹理谱方法进行纹理分析,并取得了很好的实验结果.纹理谱方法的主要思想是利用局部纹理模式作为纹理单元来进行纹理分析,通过刻画图像像素点邻域内灰度的变化来描述图像的纹理结构特征.纹理谱直方图是对局部纹理结构的统计方法.本文针对 Ojala T^[9],万华林等人^[10]的局部纹理模式,给出局部纹理模式的新的定义形式,揭示纹理谱和小波方法的联系,并进一步分析局部纹理模式的特点,根据纹理模式对称不变性将 256 个局部纹理模式划分为 51 个等价类,这样,256 维的纹理谱直方图就量化为 51 维,量化后的纹理谱特征更紧凑、也更加符合纹理的视觉特性.

1 基本二值纹理模式

Ojala T 等人^[9]引入了局域二值模式(local binary pattern,简称 LBP)作为纹理算子来分析图像纹理特征,本节给出新的定义方法.小波分析的基本思想是,通过小波变换将图像分解为不同的频率域.计算频率域的能量等作为纹理描述子.由于具有良好的局域特性,频率域仍然具有原图的视觉特性^[4],如图 1 所示.

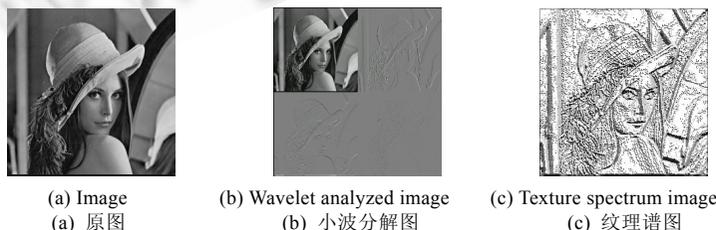


Fig.1 The wavelet analyzed image and texture spectrum image of the image
图 1 图像的小波分解图和纹理谱图

给定图像函数 $I(i, j)$, 其小波变换如下:

$$W(x, y) = \iint I(i, j)g \times (x - i, y - j) didj \quad (1)$$

因为图像是离散的,所以式(1)写成如下形式:

$$W(x, y) = \sum_i \sum_j I(i, j)g(x - i, y - j) \tag{2}$$

其中, $g(x, y)$ 是小波变换系数.

为了刻画图像像素点在某邻域内的灰度变化,考虑将像素点的 3×3 邻域如图 2 所示,并给出如下变换公式:

$$W(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 I'(x - i, x - j)G(i, j) \tag{3}$$

这里, $I'(x - i, y - j)$ 表示图像在像素点 (x, y) 的领域内的灰度变化.

$$I'(x - i, y - j) = \begin{cases} 0 & \text{if } I(x, y) - I(x - i, y - j) \leq 0 \\ 1 & \text{if } I(x, y) - I(x - i, y - j) > 0 \end{cases} \tag{4}$$

将二值矩阵 $I'(i, j)$ 看成一个二值纹理模式(纹理基元),来刻画邻域内像素点的灰度相对中心点的变化情况. G 是变换系数矩阵,将 3×3 领域的纹理基元变换为一个 $[0, 255]$ 的值,易于表示和计算.

$$G = \begin{bmatrix} 2^5 & 2^6 & 2^7 \\ 2^4 & 0 & 2^0 \\ 2^3 & 2^2 & 2^1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$I_{x-1,y-1}$	$I_{x,y-1}$	$I_{x+1,y-1}$
$I_{x-1,y}$	$I_{x,y}$	$I_{x+1,y}$
$I_{x-1,y+1}$	$I_{x,y+1}$	$I_{x+1,y+1}$

Fig.2 3×3 neighborhood of image pixel
图 2 图像像素的 3×3 邻域

将纹理模式的值作为像素值,可以得到纹理谱图像(如图 1 所示).由于纹理谱的局域特性,纹理谱图像也具有原图的视觉特性.人类视觉系统对纹理的感知与平均灰度(亮度)无关^[4].二值纹理模式方法注重像素灰度的变化,这符合人类视觉对图像纹理的感知.

这时, $w(x, y)$ 即可唯一地表示图像在此像素点处的纹理模式,即像素灰度在此 3×3 邻域中相对 (x, y) 的变化状况,而且对应了一种具体的视觉纹理模式,如图 3 所示.

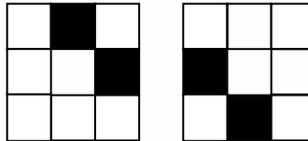


Fig.3 The two graphs which are coherent in vision are regard as the same pattern

图 3 两个图具有视觉一致性归为同一纹理模式

上述算法中的 3×3 领域的像素可以看作 3×3 个小窗口,一个窗口可以是任意尺度的像素块,窗口颜色用像素块的平均颜色表示,以体现局域分析和多尺度分析的特性.

根据式(3)易知, $w(x, y)$ 的取值范围为 $[0, 1, 2, \dots, 255]$,统计图像各像素点的纹理值 $w(x, y)$ 的频数,就可以得到图像的纹理谱直方图.假设用 $w(i, j)$ 表示图像在像素点 $I(i, j)$ 处的纹理值, $\{h[k]\} (k = 0, 1, 2, \dots, 255)$ 表示图像的纹理谱直方图,则有

$$h[k] = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(i, j)}{m \times n} \tag{6}$$

其中, $f(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } w(i, j) = k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$, m, n 分别为图像的高度和宽度.容易看出, $\sum_{i=0}^{255} h[k] = 1.0$.直方图因其简单有效而被广泛使用.纹理谱方法有效结合了结构方法和统计方法,纹理基元表示了纹理的微小结构,而纹理谱直方图是这种微小结构的分布统计.

2 基于视觉一致性的纹理模式的等价类划分

上述纹理模式的定义可以重新描述如下:一个 3×3 方格的图,不管中间一格,周围 8 格涂白色或黑色(对应 0 或 1),共有 256 种不同的图.

但从纹理的视觉本质出发,一些对称不变的图应该视为相同的模式(如图3所示).由此可以将相同模式的图定义为同一种纹理基元.那么哪些图可以看作同一纹理基元呢?这样的纹理基元有多少种呢?因为经过旋转(0°, 90°, 180°, 270°)、翻转(水平、垂直、对角线)变换之后相同的图,具有视觉一致性.我们引入纹理模式置换群和纹理模式等价类的概念^[11].

定义 1. 集合 $S=\{t_0, t_1, t_2, \dots, t_{255}\}$ (表示上述的对应 256 种图)为纹理模式集合,在集合 S 上的置换集合 $G=\{\text{旋转 } 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, \text{水平翻转, 垂直翻转, 正对角线翻转, 反对角线翻转}\}$ 是一个置换群,称为纹理模式置换群.

定义 2. 对于给定的关于纹理模式集合 $S=\{t_0, t_1, t_2, \dots, t_{255}\}$ 的纹理模式置换群 G ,

(a) 若存在置换 $p_1 \in G$, 使 t_k 变为 t_l , 则存在 $p_2 = p_1^{-1}$, 使 t_l 变为 $t_k, p_2 \in G$.

(b) 若存在 $p_1 \in G$, 使 t_k 变为 t_l , 又存在 $p_2 \in G$, 使 t_l 变为 t_m , 则存在置换 $p_3 = p_1 p_2$, 使 t_k 变为 $t_m, p_3 \in G$.

由(a),(b)得知, t_k 在 G 作用下的“踪迹”形成一个封闭的类,称为纹理模式等价类.

因此,256 种纹理模式可以按群 G 的置换分成若干个等价类,同一等价类中的纹理模式具有视觉一致性.一个等价类作为一种纹理基元.

直接求等价类的数目非常繁琐.因此这一问题可以转换为不同着色方案的计数问题,用 Polya 定理求解^[11].

Polya 定理. 设有 n 个对象, \bar{G} 是这 n 个对象上的置换群,用 m 种颜色涂染这 n 个对象,则不同的染色方案数为

$$l = \frac{1}{|\bar{G}|} \left[m^{c(a_1)} + m^{c(a_2)} + \dots + m^{c(a_g)} \right] \tag{7}$$

其中, $\bar{G} = \{a_1, a_2, \dots, a_g\}$, $c(a_k)$ 为置换 a_k 的循环节数.

本文的问题中, $n=8, m=2, \bar{G}$ 为对应 G 的置换群:

a_1 对应旋转 0°, 为不动置换, $a_1=(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8), c(a_1)=8$;

a_2 对应旋转 90°, $a_2=(1\ 3\ 5\ 7)(2\ 4\ 6\ 8), c(a_2)=2$;

a_3 对应旋转 180°, $a_3=(1\ 5)(2\ 6)(3\ 7)(4\ 8), c(a_3)=4$;

a_4 对应旋转 270°, $a_4=(1\ 7\ 5\ 3)(2\ 8\ 6\ 4), c(a_4)=2$;

a_5 对应水平翻转, $a_5=(1\ 5)(2\ 4)(3)(6\ 8)(7), c(a_5)=5$;

a_6 对应垂直翻转, $a_6=(1)(2\ 8)(3\ 7)(4\ 6)(5), c(a_6)=5$;

a_7 对应主对角翻转, $a_7=(1\ 3)(2)(4\ 8)(5\ 7)(6), c(a_7)=5$;

a_8 对应副对角翻转, $a_8=(1\ 7)(2\ 6)(3\ 5)(4)(8), c(a_8)=5$,

可得染色方案数为

$$l = \frac{1}{8} [2^8 + 2^2 + 2^4 + 2^2 + 2^5 + 2^5 + 2^5 + 2^5] = 51.$$

纹理模式等价类数等于染色方案数 51. 可见, 256 个二值纹理模式可以分为 51 个等价类, 每个等价类内的纹理模式具有视觉一致性, 因此可看作一个纹理单元, 这样, 256 个纹理模式转化为 51 个纹理单元. 256 维的纹理谱据此量化为 51 维.

6	7	8
5		1
4	3	2

Fig.4 Dyeing of 8 grids

图 4 8 个方格的涂色

一个纹理模式是按如图 4 所标顺序排成的 8 位二进制串, 每种置换都可以通过字符串操作实现. 若用树型结构表示等价类^[12], 确定纹理模式等价类的算法如下:

(1) 约定 $S=\{0, 1, 2, \dots, 255\}$ 表示 256 个二值纹理模式集合. 以纹理模式为结点构造树. 初始时, 每个纹理模式各自形成一个只含根结点的树, 记作 T_0, T_1, \dots, T_{255} , 下标取根结点成员的值, 每棵树的根结点都是该树的成员值最小的结点.

(2) 对每棵非空树重复:

a) 树的每个结点 t_k 作纹理置换群中的各个置换操作, 得到 t_i ;

b) 假设 $t_k \in T_i, t_l \in T_j$, 若 $T_i \neq T_j$, 则

若 $i < j$, T_j 并入 T_i, T_j 置空; 反之, T_i 并入 T_j, T_i 置空;

(3) 最后形成 51 棵非空树, 树的下标按从小到大的顺序, 为 0~50.

每棵树的下标就是该树中结点(与纹理模式一一对应)的共同的纹理谱直方图维值(bin),量化后的纹理谱用 51 维的直方图表示,视觉上一致的纹理在同一维上统计,避免了冗余信息,显著降低了存储和计算代价.人类对图像纹理的认识,是整体-局部分层进行的,维数低的特征向量更加有利于多尺度提取图像特征.

3 纹理谱的特点分析

由上节可知,量化后的纹理谱在图像旋转 0° 、 90° 、 180° 、 270° 以及水平翻转、垂直翻转、正对角线翻转、反对角线翻转的情况下是不变的.这一特性不仅使纹理谱特征具有对称不变性,而且对纹理旋转非常鲁棒.作者的实验证明了这一点.从 Brodatz^[14]纹理图像中挑选 13 幅纹理图像,每幅图像再生成 6 幅旋转图像(30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 、 200°),称原图及其旋转图像共 7 幅属于同族,共 13 族 91 幅图像组成实验的纹理图像库.分别提取 51 维的量化纹理谱和 256 维的原纹理谱作为图像特征向量.实验以 13 幅原图作为测试例统计平均查准率.对每个测试例计算其与纹理图像库中所有图像的相似性,按相似性排序并统计返回的前 7 幅最相似的图像.如果返回图像和测试图像属于同族,则认为是正确的,反之是错误的.检索查准率定义为 $precision=c/t$,这里 c 为系统返回的图像中正确的图像数目, t 为系统返回的图像数目(本实验定为 7).

本文纹理谱的相似性度量采用直方图交的形式^[13].设测试例图像为 Q ,其纹理谱直方图特征矢量为 $H_q(h_q[0],h_q[1],\dots,h_q[N])$,图像库中图像为 T ,其纹理谱直方图特征矢量为 $H_t(h_t[0],h_t[1],\dots,h_t[N])$,则图像相似性度量定义如下:

$$S(H_q, H_t) = \sum_{i=0}^{N-1} \min(h_q[i], h_t[i]) \quad (8)$$

$S(H_q, H_t)$ 的值在 0 和 1 之间, $S(H_q, H_t)$ 越大,直方图 H_q 与 H_t 越相似,当 $S(H_q, H_t)=1$ 时, H_q 与 H_t 相同.

实验结果是 51 维的量化纹理谱平均查准率为 80.2%,256 维的原纹理谱平均查准率为 41.8%.图 5、图 6 显示了部分实验结果.

如果修改公式(4)为

$$I'(x-i, y-j) = \begin{cases} 0 & \text{if } |I(x, y) - I(x-i, y-j)| \leq \text{threshold} \\ 1 & \text{if } |I(x, y) - I(x-i, y-j)| > \text{threshold} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $threshold$ 为阈值常数,纹理越细密,则纹理模式值越大.由图 7 可以看到,对于同质纹理图像而言,纹理谱直方图对纹理粗糙度有很好的区分度.

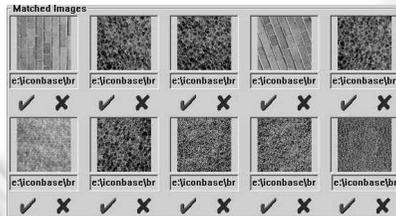


Fig.5 The retrieval results of 256 bins texture spectrum, top-left image is the example image

图 5 256 维原纹理谱的检索结果,左上图为检索范例图

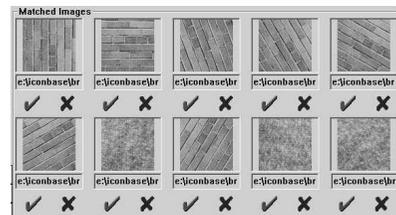


Fig.6 The retrieval results of 51 bins texture spectrum, top-left image is the example image

图 6 51 维原纹理谱的检索结果,左上图为检索范例图

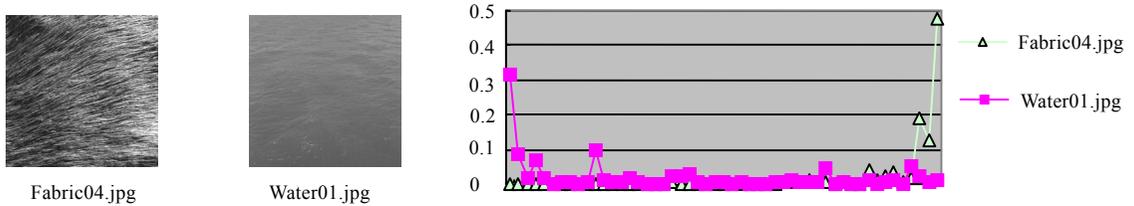


Fig.7 The texture spectrum histograms of the two distinct texture images (the images is from Brodatz image dataset^[14])

图 7 不同纹理粗糙度的纹理谱直方图(原图来自 Brodatz 纹理库^[14])

4 基于纹理谱描述子的图像检索实验

本文提出的纹理谱描述子在基于内容的多媒体检索系统 MIRES 中实现,并与 Gabor 纹理描述子作性能比较,结果令人满意.

MIRES 系统是在 Windows 2000 下用 Visual C++开发的,图像特征存放在 SQL Server 数据库中.系统图像库中的图像来自“Corel Image Gallery”和 Internet.作者从中挑选了 10 个语义类共 1 031 幅图像作为测试库,每类不少于 100 幅.从每类中随机选定 10 幅图像作为固定的测试例,用于比较不同特征描述子的检索性能.

Table 1 Image semantic classes used in the experiment

表 1 实验中使用的图像语义类

Image class No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Class semantic	Building	Stamp	Tools	Women	Bird	Traditional Chinese painting	Flowers	Fashionable dress	Seabed	Mountain

实验中,对每个测试例计算其与测试库中所有图像的相似性,按相似性排序并返回 15 幅最相似的图像(系统界面每页显示 15 幅).如果返回图像和测试图像属于同一语义类,则认为是正确的,反之是错误的.统计平均查准率作为实验结果.

本文对提出的 51 维纹理描述子提取了单像素尺度纹理谱直方图以及 10×10 像素尺度的纹理谱直方图.同时提取 Gabor 纹理描述子 4 种尺度 6 个方向上的特征向量 48 维(24 个均值 24 个方差).提取图像 Gabor 纹理的源代码从网络地址 <http://www-iplab.ece.ucsb.edu/texture/software/feature/> 下载,以 Tex51-1 表示单像素尺度纹理谱直方图,以 Tex51-1-10 表示单像素尺度纹理谱直方图以及 10×10 像素尺度纹理谱直方图的组合,以 Gabor48 表示 Gabor 纹理特征,作对比实验.纹理谱的相似性度量同上节,采用直方图交的形式(作者实验表明,使用欧氏距离的效果不如直方图相交法).Gabor 纹理特征的相似性度量采用 Manjunath^[6]给出的方法.

从图 8 可以直观地看出,本文提出的纹理谱描述子用于图像检索,准确率高于 Gabor 纹理描述子的方法.而且,本文提出的纹理谱描述子的提取速度很快.在 Intel PIII 800,Windows 2000,256M 内存环境下,对一幅 800×800 彩色自然图像,提取本文的纹理谱特征用时 1.2s,而提取 Gabor 纹理用时 125s.另外,提取图像两个尺度下的纹理谱特征,检索准确率明显提升,也体现了本纹理谱特征多尺度局域分析的特点.

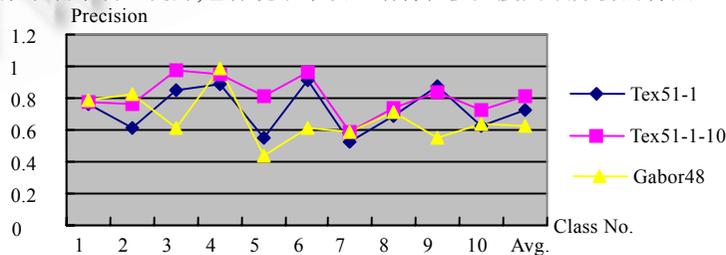


Fig.8 The average precisions with three feature respectively when top 15 result images are take into account

图 8 3 种特征返回 15 幅图像的平均查准率比较

5 结 论

本文给出纹理模式新的定义形式,探讨了小波变换和纹理谱方法的联系,依据纹理视觉特性提出了纹理模式等价类的概念,从而得到更合理的纹理谱描述子.该纹理谱描述子可以在不同尺度下很好地描述领域内图像像素的灰度变化情况,具有良好的视觉一致性.纹理谱特征的和相似性计算采用直方图方法,计算简单,易于理解.按等价类量化后的纹理谱描述子,特征维数低,大幅度降低了存储和相似计算开销,有利于多尺度纹理特征的使用,而且量化后的纹理谱在图像旋转 0° 、 90° 、 180° 、 270° 以及水平翻转,垂直翻转,正对角线翻转,反对角线翻转的情况下是不变的,具有很好的旋转鲁棒性.基于纹理谱的图像检索实验表明,该纹理谱描述子具有很好的分类性能,在多尺度下提取纹理谱特征,分类性能可进一步提高.对纹理粗糙度不同的图像,选取合适的尺度提取纹理特征,应该有更好的效果.下一步的工作是研究自适应的选取合适的尺度以针对纹理粗糙度不同的图像.

References:

- [1] Manjunath BS, Ohm JR, Vasudevan VV, Yamada A. Color and texture descriptors. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001,11(6):703–715.
- [2] Borber M. MPEG-7 visual shape descriptors. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001,11(6):716–719.
- [3] Mandal MK, Aboulnasr T. Fast wavelet histogram techniques for image indexing. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999,75(1/2):99–110.
- [4] Castleman KR. *Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [5] Haralick RM, Shanmngam K, Dinstein I. Texture feature for image classification. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973,3(6):610–621.
- [6] Manjunath BS, Ma WY. Texture features for browsing and retrieval of image data. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996,18(8):837–842.
- [7] Liu JM. Shape-Based image retrieval [Ph.D. Thesis]. Beijing: Institute of Computing Technology, the Chinese Academy of Sciences, 2000 (in Chinese with English abstract).
- [8] He DC, Wang L. Texture features based on texture spectrum. *Pattern Recognition*, 1991,24(5):391–399.
- [9] Ojala T, Pietikäinen M, Harwood D. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions. *Pattern Recognition*, 1996,29(1):51–59.
- [10] Wan HL, Chowdhury MU, Hu H, Shi ZZ. Texture feature and its application in CBIR. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003,15(2):195–199 (in Chinese with English abstract).
- [11] Lu KC. *Combinatorics*. 2nd ed., Beijing: Tsinghua University Press, 1991 (in Chinese).
- [12] Yan WM, Wu WM. *Data Structure*. C version, Beijing: Tsinghua University Press, 1997 (in Chinese).
- [13] Swain M, Ballard D. Color indexing. *International Journal of Computer Vision*, 1991,7(1):11–32.
- [14] Brodatz P. *Textures: A Photographic Album for Artists and Designers*. New York: Dover Publications, 1966.

附中文参考文献:

- [7] 刘继敏.基于形状检索的研究[博士学位论文].北京:中国科学院计算技术研究所,2000.
- [10] 万华林,Chowdhury MU,胡宏,史忠植.图像纹理特征及其在CBIR中的应用.计算机辅助设计与图形学报,2003,15(2):195–199.
- [11] 卢开澄,组合数学.第2版,北京:清华大学出版社,1991.
- [12] 严蔚敏,吴伟民.数据结构.C语言版,北京:清华大学出版社,1997.