维普资讯 http://www.cqvip.com

基于图像能量谱直方图的纹理检索算法 RAH*)

丁 玲 王崇俊 杨育彬 陈世福
(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京210093)

摘 要 本文提出的基于纹理的图像检索算法RAH是以图像的能量谱直方图为基础,包括以下两个方面:第一,计算图像能量谱的半径和角度直方图的方法以及基于图像能量直方图的频率去提取纹理特征的算法;第二,基于纹理特征的相似度检测方程。这个实验结果表明,RAH算法优于一般的灰度共生矩阵纹理检索算法,具有较好的检索效果,比较适用于基于内容的图像检索。

关键词 基于内容的图像检索,提取纹理特征,灰度共生矩阵,相似度检测方程

RAH: A Texture Based Image Retrieval Algorithm Based on the Histogram of Image Power Spectral

DING Ling WANG Chong-Jun YANG Yu-Bin CHEN Shi-Fu
(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract A texture based image retrieval algorithm RAH based on the histogram of image power spectral in frequency domain is proposed, which mainly includes the next two parts: first, the method of computing radius histogram and angular histogram and the algorithm of texture feature extraction based on the histogram of image power spectral in frequency domain, second, the similarity measurement function based on the texture feature. The experimental results indicate that RAH is preferable to the traditional co-occurrence matrix based algorithm.

Keywords Content-based image retrieval, Texture feature extraction, Co-occurrence matrix, Similarity measurement function

1 前言

纹理是图像的一个重要属性,很多图像在局部区域内可能呈现出不规则性,而在整体上却表现出某种规律性,习惯上把图像中这种局部不规则而整体有规律的特性称之为纹理。任何物理的表面,如果一直放大下去进行观察,一定会显现出相应的纹理,从人类的感知经验出发,纹理特征主要有粗糙性、方向性、对比度和规整度等,上述特征也是用于图像检索的主要特征。因此,量化图像的纹理特征是图像检索的一种重要方法,也是基于纹理的图像检索技术研究的热点课题之一。

目前已有很多的关于图像纹理分析方法:如统计方法,是根据关于像素间灰度的统计性质对纹理给出其特征及特征与参数间的关系,可以用来分析像木纹、草坪等不规则的物体;另一种常用的是结构方法,根据纹理基元及其排列规则来描述纹理结构及特征,特征与参数间的关系,该方法可以用来分析布料等排列比较规则的图案[1]。

随着小波变换在图像纹理分析中的广泛应用,目前越来越多的研究者采用小波变换系数作为纹理特征索引。Chang等人采用树式小波变换(Tree Wavelet Transform,TWT)来进一步提高图像分类的准确度[2];Manjunath在使用Gabor小波变换提取图像纹理特征[3],通过构造一系列伸缩和旋转的Gabor函数与图像进行卷积,提取其均值和方差作为纹理特征。Manjunath使用Brodatz纹理图像和遥感图像对算法进行了实验,并比较了该特征与MRSAR和塔式小波变换(Pyramid Wavelet Transform,PWT)等特征的检索效果。结果表明,反映高频信息的特征有较好的区分能力,小波基函数的选择对检索效果影响较小,但距离函数的选择对结果影响较大。文[4]中也使用Gabor小波变换进行图像纹理分割。而文[5]则使用Daubechies小波提取图像纹理特征索引。

Ma和Manjunath等人评价了各种小波变换形式,发现基于Gabor小波变换的纹理检索方法效果最好[3]。而文[6]中详细比较了各种纹理特征表示方法,认为MRSAR和Gabor方法虽然性能较好,但复杂度较高,处理时间较长,使用基于塔式小波变换和树式小波变换的方法则更为合适。

基于小波变换的纹理特征提取就属于基于图像频域的分析方法。这类方法根据人的视觉机理,利用在空间域和频域中都能取得较好局部化特性的滤波器对纹理图像进行滤波,从而获得较为理想的纹理特征。本文在对基于图像频域的纹理特征提取技术进行相关研究的基础上,讨论并实现了一种基于图像能量谱的半径和角度直方图特征的图像纹理检索算法RAH。整个RAH算法分为两部分:

(1)基于傅里叶变换的能量谱直方图信息的纹理特征提取;(2)基于上述纹理特征的相似性度量函数。本文并给出其实验结果以及与类似算法的比较。

2 离散傅里叶变换

傅里叶变换(Fourier Transformation)在图像和信号处理领域起着非常重要的作用。频谱分析是信号处理中一个非常重要的分析手段。作为信号处理,和频谱分析最直接相关的就是傅里叶变换。使用离散傅里叶变换(DFT,Discrete Fourier

*)本课题得到江苏省应用基础基金BJ20009资助。

维普资讯 http://www.cqvip.com

Transform)可以对一幅数字图像作频谱分析，将其由空域信号转变为频域信号。傅里叶变换代表了信号的频谱密度函数。

离散傅里叶变换使用复杂的幂基函数，具有良好的压缩性能。DFT 具有以下适合于进行图像特征索引和模式匹配的优点：(1)DFT 变换系数的幅值具有变换无关的特点；(2)使用 DFT 变换系数能有效地表达图像在空间域中的相关性。在基于内容的图像检索中，傅里叶变换是进行形状特征描述的重要方法之一。此外，通过对傅里叶变换的频谱分析，还可以基于频率域提取图像的相关纹理特性。Stone 等人提出并评价了一种基于傅里叶变换域的图像检索算法，通过傅里叶系数来描述图像的亮度和纹理特征。Augustejin 等人则使用了几种基于傅里叶频谱幅值的统计量特征对卫星图像进行检索，这些特征包括：幅值的最大值、平均值、幅值能量以及幅值的方差等。此外，Augustejin 等人还对傅里叶系数的半径和角度分布进行了研究，指出傅里叶系数的半径分布对于图像纹理的细腻程度(Coarseness)敏感，而其角度分布则对图像纹理的方向性(Directionality)敏感[7]。

Celantano 等人研究了图像的傅里叶变换系数的角度分布在图像索引中的应用。首先采用低通滤波的方法对图像进行一定的预处理，然后对其进行傅里叶变换运算。沿[0°～180°]角度范围内考察其傅里叶系数的频谱分布，计算出在每个角度上图像分量的总和，得到其角度直方图。在计算角度信息总和时，只考虑中间部分的频率范围，因为它们才代表了重要的视觉信息。然后，直接使用角度直方图作为特征向量，进行纹理特征索引。实验证明，该特征具有图像区域变换无关的特点。

在数字图像处理中常用的是二维离散傅里叶变换。定义 $f(x,y)$ 是大小为 $M\times N$ 的图像离散信号，则其变换公式如(1)式如下：

$$F(u,v)=\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\exp\left[-j2\pi\left(\frac{x}{M}u+\frac{y}{N}v\right)\right] \quad (1)$$

其中，$u=0,1,\cdots,M-1$；$v=0,1,\cdots,N-1$

二维傅里叶反变换公式如(2)式所示：

$$F(u,v)=\frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(u,v)\exp\left[j2\pi\left(\frac{u}{M}x+\frac{v}{N}y\right)\right] \quad (2)$$

其中，$x=0,1,\cdots,M-1$；$y=0,1,\cdots,N-1$

式(1)和式(2)形成如下的傅里叶变换对：

$f(x,y)\Leftrightarrow F(u,v)$

其中，$\exp\left[-j2\pi\left(\frac{x}{M}u+\frac{y}{N}v\right)\right]$和 $\exp\left[j2\pi\left(\frac{u}{M}x+\frac{v}{N}y\right)\right]$分别是正反变换核，$x,y$ 为空间域采样值，u,v 为频率域采样值。$F(u,v)$称为离散信号 $f(x,y)$的频谱。

3 基于图像能量谱直方图的纹理检索算法 RAH

计算机图像处理主要采用两大类方法：一类是空间域中的处理，即在图像空间域中对图像进行各种处理；另一类是把空间域的图像经过傅里叶变换等方法变换到频率域，在频率域中进行各种处理，然后再变回到图像的空间域，形成处理后的图像。

图像可以被视为在空间距离上有周期变化的信号。当周期固定时，其周期的倒数就表示为空间频率。在图像中这个周期性变量表示图像明暗变化的快慢，如图1所示。水平方向上三幅图都有明暗的变化。图1(a)中空间频率低，图1(c)中空间频率高，图1(b)中的空间频率介于两者之间。

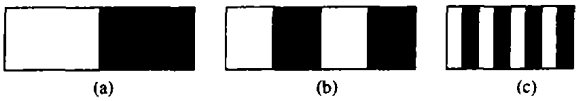


图1 具有不同空间频率的图像

可以发现，空间频率高的图像主要表征图像的细微变化或细节内容；空间频率低的图像则表征图像中大的物体轮廓或变化趋势，这个概念是图像的频域处理技术的基础。

图像检索并不需要图像的全部细节及灰度信息。只要能保存图像中感兴趣的特征信息，无用信息都可丢弃。变换域特征提取的关键是寻求一种可逆的线性变换，从看似复杂的数据中找出一些直观的信息，再对它进行分析。其结果往往是使图像数据经过这种变换之后，可以用一组不相关数据，通常是一组系数来代替。把这些系数按其含有图像信息及对图像主观质量影响的重要程度顺序排列，删除一些不重要的系数将不会对图像内容的描述产生很大影响。由于图像信号往往在频域具有比在空域更加简单和直观的特性，所以，大部分信号分析的工作是在频域中进行的。

3.1 纹理特征提取

3.1.1 *能量谱* 一个信号的傅里叶频谱包括两部分，一是幅度(Magnitude)特性，一是相位(Phase)特性。令 $F(u,v)=R(u,v)+jI(u,v)$，则有下列各式：

幅度：$|F(u,v)|=\sqrt{R^2(u,v)+I^2(u,v)}$ (3)

相位：$|\phi(u,v)|=\tan^{-1}(I(u,v)/R(u,v))$ (4)

能量谱：

$$|E(u,v)|=R^2(u,v)+I^2(u,v)=|F(u,v)|^2 \quad (5)$$

根据幅度$|F(u,v)|$可以判断图像的相关性。若两幅图像幅度相等，则其完全相关。正是基于此点，我们提出了一种基于图像傅里叶变换的纹理分析法。它的基本思路是对图像进行傅里叶变换，得到图像的能量谱。使用图像的能量谱能在一定程度上反映图像纹理的某些特征。

因为 $F(u,v)$为周期函数，令 $U=\frac{2\pi}{N}u$，$V=\frac{2\pi}{N}v$，则 U,V 的周期均为2π，通常在图像显示的时候，这两个变量的取值范围为$-\pi\leqslant U,V\leqslant\pi$。根据傅里叶变换的位移定理，函数位移不会改变其傅里叶变换的幅度。因此，为方便取值，傅里叶变换后对其频谱向后移动半个周期，则有$0\leqslant U,V\leqslant 2\pi$，令：

$$U=2\pi\Delta\omega_1,V=2\pi\Delta\omega_2 \quad (6)$$

则 ω_1,ω_2的取值范围均为[0,1]。再对 ω_1,ω_2进行极坐标变换可得式(7)：

$$\begin{cases}\rho=\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2}\\ \theta=arctg\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)\end{cases} \quad (7)$$

其中，ρ 为极坐标半径，θ 为极角大小。

由式(5)可知，一幅图像的傅里叶变换的能量谱为$|F(u,v)|^2$。经过坐标变换，该能量谱$|F(u,v)|^2$转换成以 ρ 和 θ 为变量的函数$|F(\rho,\theta)|^2$。可以证明，一幅图像的纹理是粗糙还是细腻，与纹理灰度变化的快慢(即半径 ρ 的大小)以及纹理的方向性(即角度 θ 的大小)是相关的。因此在提取图像纹理特征的时候，我们分别从半径 ρ 和角度 θ 两方面的度量来考虑。

3.1.2 *能量谱半径直方图生成算法* 首先考虑能量谱半径 ρ 的分布情况，其可以作为纹理粗糙程度的度量。不考虑

维普资讯 http://www.cqvip.com

角度θ的变化，对二维频谱在环形区域内产生一个与方向无关的一维频域半径函数，定义如式(8)：

$$f(\rho)=\sum_{\theta=0}^{2\pi}|F(\rho,\theta)|^2 \tag{8}$$

$f(\rho)$函数中峰值点的大小反映了图像中纹理基元的信息。峰值点越小，图像的纹理基元越大；峰值点越大，其纹理基元越小；如果峰值点的数目很多或不明显，则表示图像纹理杂乱无章。

对于$f(\rho)$函数，对其直方图分布进行统计。半径直方图表征了能量谱半径大小的分布频率，用其可以描述图像的纹理基元的特征。其生成算法如下：

能量谱半径直方图生成算法

Step 1. 假设$f(\rho)$函数共有m个值点，其量化级数为n(例如，$n=64$)，每一半径量级记为$R_k(k=1,2,\cdots,n)$。定义其量化区间大小为：$l=\dfrac{\arg\max_{\rho} f(\rho)}{n}$。

Step 2. 将$f(\rho)$函数的所有值点$f_i(\rho)(1\leqslant i\leqslant m)$按下式进行量化：

$$R_{f_i(\rho)}=n-floor\left[\frac{\arg\max f(\rho)-f_i(\rho)}{l}\right] \tag{9}$$

其中，$R_{f_i(\rho)}$为值点$f_i(\rho)(1\leqslant i\leqslant m)$对应的量化级。

Step 3. 定义一组半径的统计值$h[R_k]$ $(k=1,2,\cdots,n)$，分别表示$f(\rho)$函数的所有值点出现在指定量级的频数，其计算公式如式(10)所示：

$$h[R_k]=\frac{\sum_{i=1}^{m}\begin{cases}1,\text{if } R_{f_i(\rho)}=k\\0,\text{else}\end{cases}}{m} \tag{10}$$

其中$h[R_k]$为R_k量级的值点频数。

Step 4. 以半径量级为横坐标，对应量级的值点频数为纵坐标绘出的图形，称为频率谱半径直方图。其定义如式(11)所示：

$$H=\{\langle h[R_1],h[R_2],\cdots h[R_k],\cdots h[R_n]\rangle|\sum_{k=1}^{n}h[R_k]=1,0\leqslant h[R_k]\leqslant 1\} \tag{11}$$

Step 5. 算法结束。

3.1.3 *能量谱角度直方图生成算法* 接下来考虑能量谱角度θ的分布情况，其可以作为纹理的方向性度量。暂时不考虑半径ρ的变化，对频谱在径向断面内取平均，获得一个仅仅显示纹理特征方向特性的角度函数，定义如式(12)所示：

$$f(\rho)=\sum_{\rho=0}^{1}|F(\rho,\theta)|^2 \tag{12}$$

$f(\theta)$函数的峰值点代表了纹理延伸的方向；如果峰值点过多或无明显值峰点，则说明纹理无方向性或排列杂乱。

对于$f(\theta)$函数，采用频谱半径直方图提取算法对其直方图分布进行统计[1]。

3.2 特征相似性度量函数

对于基于图像能量谱直方图的图像纹理特征，使用Swain 和 Ballard 提出的直方图交算法作为其相似性度量函数。由于我们提取的半径和直方图特征都是归一化的，因此，使用公式$D(x,y)=\sum_{i=1}^{n}\min(x_i,y_i)$计算这两种直方图特征的相似性[1]。整幅图像的相似性度量函数由两项组成，如式(13)所示：

$$S(X,Y)=w_1\sum_{i=1}^{16}\min(h_x[R_i],h_y[R_i])+w_2\sum_{i=1}^{16}\min(h_x[A_i],h_y[A_i]) \tag{13}$$

其中，X,Y表示两幅图像，$h[R_i]$和$h[A_i]$分别表示16维的能量谱半径直方图和角度直方图，w_1和w_2为各自的归一化权值，满足$0<w_1,w_2<1$且$w_1+w_2=1$。

由于直方图的交运算表示图像之间的相似程度，因此，$S(X,Y)$反映的是两幅图像在纹理上的相似性程度。当$S(X,Y)=1$时，表示两幅图像在纹理上完全相似；当$S(X,Y)=0$时，表示两幅图像在纹理上完全不相似；$S(X,Y)$的值越大，表示两幅图像在纹理上的差异越小。

4 实验结果与相关算法的比较

4.1 RAH 算法纹理特征提取实例

计算出半径和角度直方图后，将其作为图像的纹理特征向量。对于彩色图像，我们采用公式$I=0.2R+0.72G+0.07B$提取其灰度分量I矩阵进行傅里叶变换，求取其能量谱，得出其量化级数为$n=16$的半径和角度直方图，使用2个16维向量来表示图像的频域纹理特征。

图2给出了一个 RAH 算法提取的图像纹理特征实例。

4.2 RAH 算法的检索实例

图3给出了 RAH 算法的图像检索实例。从图3(a)中可以看出，对于汽车图像，RAH 算法按照其能量谱的半径和角度直方图纹理检索出纹理相近的汽车图像。而对于图3(b)中的山脉，RAH 算法检索出与原图像中的山脉具有相似纹理特征的结果图像。可以看出，RAH 算法所使用的能量谱的半径和角度直方图纹理对于纹理的刻划十分有效，但其单纯从纹理特征出发判断图像的相似性，因此，检索结果与原图像在颜色方面不一定具有相似性。

4.3 相关算法的比较

我们在5,000幅图像的通用图像库中对基于灰度共生矩阵的纹理检索算法和 RAH 算法进行了图像检索实验。图像库中包括：山脉、海洋等自然风景、建筑物、商标图案、纹理图案、森林植被、人物、汽车、飞机、花鸟等动物以及鲜花等丰富种类的图像，图像均为24位 RGB 彩色格式，图像尺寸大小不等，以 JPEG 文件格式存取。

表1中给出了对于5种不同类别的图像，使用上述二种检索算法达到的检索精度。每一种类的图像数目最少的为130幅(汽车)，最多的为285幅(纹理图案)。

表1 二种纹理检索算法的图像检索精度比较

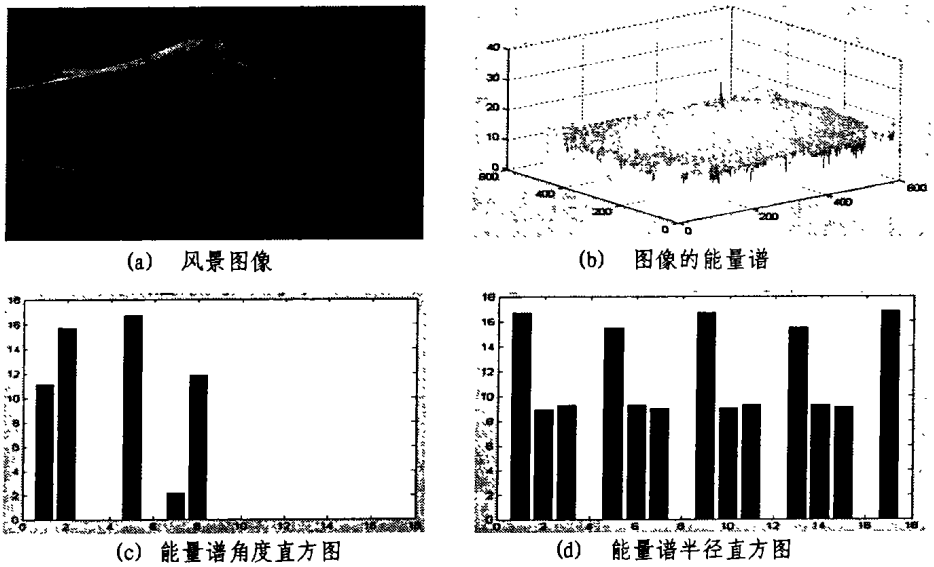
图像种类	灰度共生矩阵算法	RAH 算法
山脉	95.0%	93.2%
鲜花	65.9%	72.1%
汽车	81.2%	85.1%
纹理图案	74.3%	93.3%
建筑	69.6%	88.3%

从表1中可以看出，对于纯粹靠纹理判别的纹理图案，RAH 纹理特征检索算法效果较优，说明其对图像的纯纹理特性提取十分有效；对于需综合形状和纹理特征考虑的建筑类和汽车类图像，虽然灰度共生矩阵纹理建立在灰度级空间依赖关系之上，但其并不能有效提取图像中可能包含的形状信息，所以 RAH 算法的性能仍然比较好；反之，对于纹理特征在人类视觉感知中并不居于主要地位的山脉类和鲜花类图像，由于未考虑图像的颜色特性，RAH 算法的准确率并不占优。

通过对整个图像库的图像检索实验，我们得出了二种算

维普资讯 http://www.cqvip.com

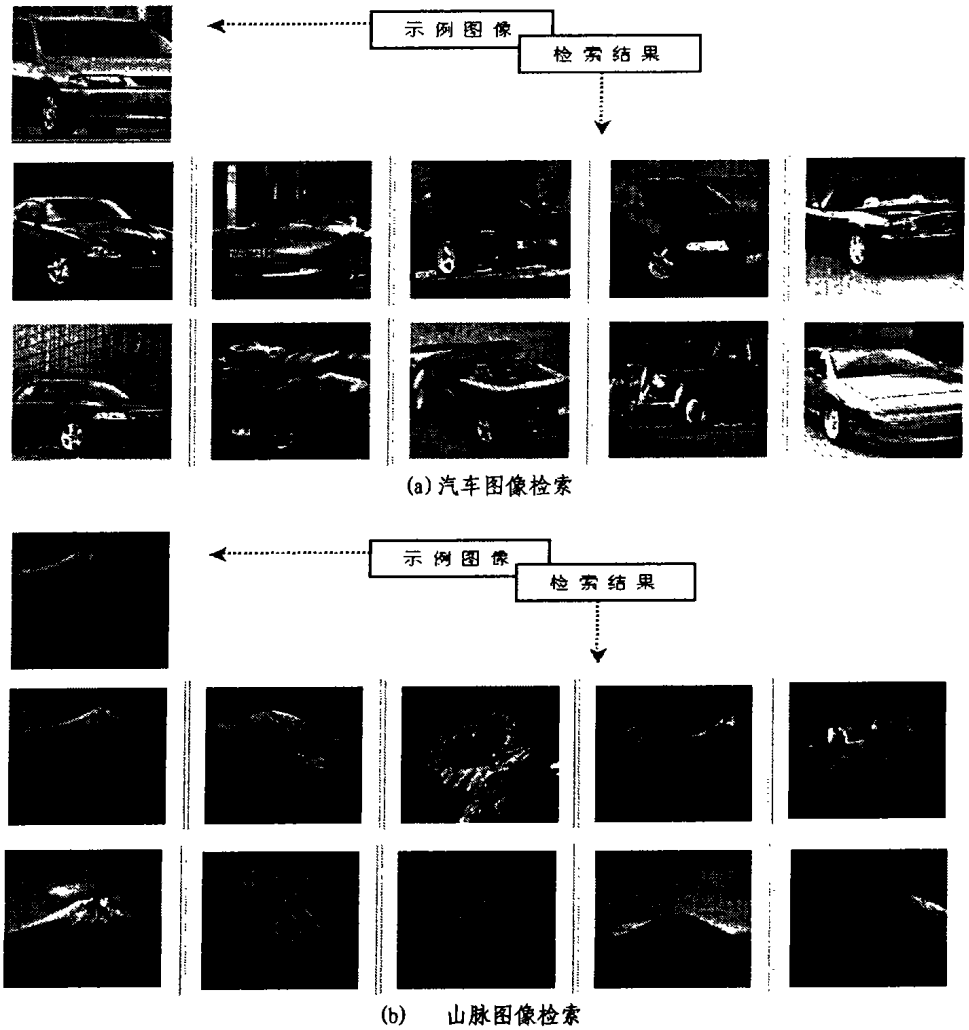
法的 P-R 曲线，如图4所示。



(a) 风景图像　(b) 图像的能量谱

(c) 能量谱角度直方图　(d) 能量谱半径直方图

图2 RAH 算法提取的图像纹理特征示意图(量化级数 n=16)



(a)汽车图像检索

(b) 山脉图像检索

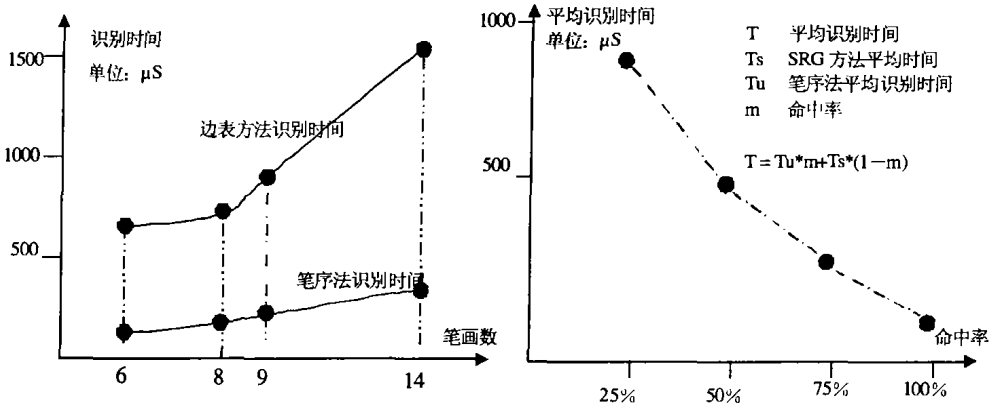
图3 基于图像能量谱的半径和角度直方图纹理的 RAH 算法检索实例

小结 本文对基于纹理特征的图像检索技术进行了深入研究，提出一种基于图像能量谱的半径和角度直方图特征的纹理检索算法 RAH。该算法在计算图像的傅里叶变换的能量谱的基础上，分别统计其半径和角度直方图分布，提取出反映图像纹理特性的特征量。实验表明，RAH 算法优于一般的灰度共生矩阵纹理检索算法，具有较好的检索效果，比较适用于基于内容的图像检索。该算法已应用于基于内容的图像检索系统@IMAGE，该系统采用 Java2平台编程实现，并利用 JSP (Java Servelet Page)和 Java Applet 技术实现基于 Web 浏览器的系统界面，各种算法封装成独立的 Java Bean 模块。系统可以运行于 Windows 和 Unix 或 Linux 平台。@IMAGE 系统

(下转第201页)

维普资讯 http://www.cqvip.com

说明了平均识别时间随命中率的上升而迅速降低。当命中率达到一定的高度时，就能保证平均的识别时间远低于边表法和SRG法的识别时间。



(a) 两种方法的识别时间比较　　(b) 平均识别时间与命中率的关系

图5　识别时间比较

小结　本文通过捕捉用户的绘制习惯建立起用户模型，并且根据用户模型中的用户信息创建了决策查找树，实验证明，利用决策查找树进行图形识别大大提高了识别效率，达到了快速高效准确的草图识别的目的。本文方案的特点主要在于三个方面：

·在线训练。本方法虽然需收集用户信息，对用户建立模型，但是收集信息的过程是在用户的使用过程中完成的。即实现了训练的透明性。这一点，对于用户来说是极其方便自然的。

·旋转无关性。由于本方法将图形拆分成直线、弧线和椭圆三种基本图元，利用其绘制时间和空间关系来表示图形。这三种基本图元及其关系都是旋转无关的。从而实现了识别方法的旋转无关性。

·模板库的不敏感性。本方法以决策树的形式组织用户模型，不需要对模板库进行线性的搜索，所以识别所费时间不会随模板数的增加而增加，这大大提高了识别的效率。

在用户模型管理的评价机制中，本文仅采用了最简单的基于频率统计的方法，这可能使模型不能准确地代表用户的习惯。在我们下一步的工作中，将采用机器学习方法的评价机制，以求达到更好的效果。

参考文献

1 Revankar S, Yegnanarayana B. Machine Recognition and Correction of Freehand Geometric Line Sketches. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 1991,1:87～92

2 孙正兴，徐晓刚，孙建勇，金翔宇. 支持方案设计的图形输入工具. 计算机辅助设计与图形学学报，2003,15(9):1145～1152

3 Xu X G, Sun Z X, Liu W Y. Matching Spatial Relation Graphs Using a Constrained Partial Permutation Strategy. Journal of Southeast University, 2003,19(3):236～239

4 Takayuki D K, Ajay A, Van V. Recognizing Multi-stroke Geometric Shapes: An Experimental Evaluation. In: Proc. of 6th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 1993. 121～128

5 Fonseca M J, Jorge J A. Using Fuzzy Logic to Recognize Geometric Shapes Interactively. In: Proc. 9th IEEE Conf. on Fuzzy Systems, 2000, 1:291～296

6 Liu W, Qian W, Xiao R, Jin X. Smart Sketchpad-An On-line Graphics Recognition System. In: Proc. of ICDAR2001, Seattle, Sep. 2001

(上接第197页)

已在医院系统投入应用，其效果良好。

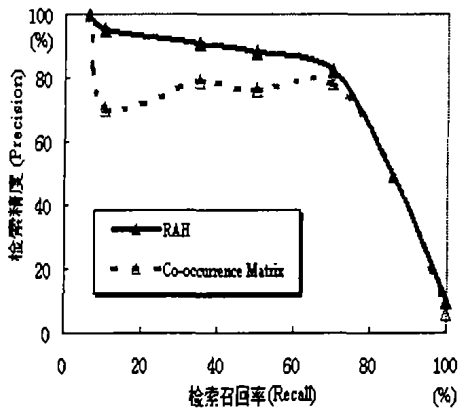


图4　二种纹理特征检索算法

参考文献

1 杨育彬. 基于内容的图像检索关键技术及其应用研究. 南京大学计算机科学与技术系：[博士论文]. 2003(6)

2 Chang T. Kuo J. Texture analysis and classification with tree-structured wavelet transform. IEEE Transactions on Image Processing, 1993,2(2):429～441

3 Ma W Y, Manjunath B S. Texture features and learning similarity. In: Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1996. 425～430

4 Jain A K, Farrokhnia F. Unsupervised texture segmentation using Gabor filters. Pattern Recognition, 1991,24:1167～1186

5 Wang J Z, Wiederhold G, Firschein O, Sha X W. Content-based image indexing and searching using Daubechies' wavelets. International Journal of Digital Libraries, 1998,1(4): 311～328

6 Ma W Y, Zhang H J. Benchmarking of image features for content-based retrieval. In: Proc. 32nd Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, California, US, Jan. 1998. 253～257

7 Augusteijn M, Clemens L E, Shaw K A. Performance evaluation of texture measures for ground cover identification in satellite images by means of a neural network classifier. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995,33(5): 616～626