

一种用于形状描述的拱高半径复函数

王 斌^{1,2}

(1.南京财经大学电子商务省级重点实验室,江苏南京 210046; 2.东南大学生物医学工程学院,江苏南京 210096)

摘 要: 提出了一种新的用于形状描述的轮廓线函数——拱高半径复函数(AHRC). AHRC用中心距离和带正负号的拱高来分别描述形状的全局特征和局部细节.用 AHRC的傅立叶变换系数构成描述形状的特征向量.在 MPEG-7标准测试集上对该方法进行图像检索实验,并将其实际应用于植物叶片图像的检索,同现有的分别基于中心距离、三角形面积、最远点距离、角度半径的傅立叶描述子和小波傅立叶描述子进行性能比较.实验结果表明,本文提出的方法性能最优,表明了该方法的有效性和实际应用价值.

关键词: 图像检索; 形状描述; 傅立叶描述子; 拱高半径复函数

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0831-06

Shape Description Using Arc-Height Radius Complex Function

WANG Bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electronic Business, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

2. School of biomedical engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: A novel contour function, Arc-Height Radius Complex function (AHRC), is proposed for shape description. AHRC captures the global feature and local detail information of the shape through extracting the centroid distance and signed arc-height features from the shape contour. The Fourier coefficients of AHRC are utilized to construct the feature vector for shape description. The performance of the proposed method is evaluated on the standard MPEG-7 shape database and the leaf shape database which is captured from the real world. The experimental results of image retrieval show that the proposed method outperforms the other Fourier descriptors including centroid distance, triangle area, farther-point distance, angle radius and wavelet Fourier descriptors.

Key words: image retrieval; shape description; Fourier descriptors; arc-height radius complex function

1 引言

基于内容的图像检索(CBIR)^[1]是图像分析和模式识别研究领域的热点问题.描述图像的内容可以是颜色、纹理、形状和空间布局等视觉特征^[2].在 CBIR 研究领域,有一类问题是基于形状特征的图像检索^[3](简称形状检索),即在图像数据库中检索与查询形状最相似的图像.形状描述和形状匹配是形状检索的两个重要的步骤.形状描述是抽取目标的有效形状特征,而形状匹配则是依据抽取的形状特征,通过某种方法进行形状相似性的度量.显然,形状描述是形状检索最为关键的一步,决定着形状检索的性能.

一类形状描述方法是基于形状区域的,即在抽取形状特征时,考虑形状区域的所有像素点.几何不变矩^[4]

是一种经典的基于区域的形状描述方法,它通过构造7个不变的统计特征矩来描述形状,这种描述子的最大优点是满足不变性,但存在的问题是描述精度不够,只能反应形状的全局特征,而无法描述形状的细节.其他一些矩描述方法如 Zernike 矩^[5]、Tchebichef 矩^[6],虽然具有很高的描述精度,但存在的问题是计算这些矩的复杂度太高.

大量的形状描述方法是基于形状轮廓线^[7],这类方法仅用形状边界上的像素点来产生形状描述子.曲率尺度空间法(CSS)^[8]、傅里叶描述子^[9]是两种常用的基于轮廓的形状描述方法.其中曲率尺度空间法被选作为 MPEG-7 标准的基于轮廓的形状描述子^[10],但有研究表明^[11],傅立叶描述子在检索的精确率和效率方面要优于曲率尺度空间方法.近些年来,在形状检索研究领

域,又提出了一些新的基于轮廓的形状描述方法,如多尺度凹凸描述(MCC)法^[12]、形状上下文方法(shape contexts)^[13]、三角形面积描述方法^[14].这些方法在 MPEG-7 的标准的测试集上,都取得了较高的检索精度.但这些方法在形状匹配阶段的计算复杂度较高,由于需要采用动态规划方法进行形状的相似性度量,其在形状匹配阶段的计算复杂度一般在 $O(n^3)$ 左右,这里 n 是形状轮廓线上的点的个数.然而检索效率是评价检索方法优劣的另一个非常重要的性能指标,因为许多实时应用,例如图像的在线检索,需要很高的检索效率.因此这些方法在实际应用中,存在一定的局限性.

傅立叶描述子(FD)是一种能很好的平衡检索效率和精确率的经典的形状描述方法.该方法首先将二维形状轮廓线表示成一维的轮廓线函数,又称形状签名(shape signature),用该函数的傅立叶变换的系数构成描述形状的特征向量,在形状匹配阶段,只需要计算两个特征向量的欧氏距离就可以度量两个形状的相似性.FD具有如下特点:(1)非常紧致且对噪声不敏感,这是因为采用的是傅立叶变换系数的低频系数来作为描述子;(2)匹配阶段的计算复杂度非常低,一般为 $O(k)$,这里 k 是选用的傅立叶系数的个数;(3)非常容易对描述子进行归一化操作,以满足对形状缩放、旋转和平移的不变性.因此傅立叶描述子是一种非常适于形状检索的描述方法.Kauppinen 等^[15]比较了该方法与自回归模型,Mehre 等^[3]将该方法与链码和各种矩描述方法进行了比较,Zhang 等^[11]则将其与曲率尺度空间描述方法

进行了比较,这些比较研究的结果都证明了傅立叶描述子的优良形状描述能力.

因为傅立叶描述子(FD)产生于对一维轮廓线函数的傅立叶变换,而形状轮廓线又可以有不同的轮廓线函数表示,所以傅立叶描述子(FD)的描述能力与产生它的轮廓线函数密切相关.Zhang 等^[16]通过大量的实验比较了四种产生 FD 的不同轮廓线函数:中心距离函数、复坐标函数、曲率函数、累加角函数和两种其新提出的轮廓线函数:三角形面积函数、弦长函数的检索性能,得出中心距离和三角形面积两种函数产生的傅立叶描述子的检索性能最优.

虽然中心距离函数和三角形面积函数在现有的傅立叶描述子中,取得了最优的检索性能,但它们的形状描述能力仍然存在一定的局限性,它们都能对形状的整体特征进行较好的描述,但对形状的局部细节信息描述不足.一个例子可以来说明这个问题.图 1 中的 a 和 b 是两种不同的树叶,观察它们的形状,发现它们整体特征非常相似,但细节信息有很大的差异,相较于树叶 b,树 a 的叶缘有较明显的锯齿.在平面直角坐标系中,绘出 a 和 b 这两种树叶形状的中心距离函数(CD)、三角形面积函数曲线(TAF)(见图 1),观察这些曲线,发现两种树叶的中心距离函数曲线和三角形面积函数曲线都非常靠近,通过这两类函数曲线,很难区分这两种树叶.其原因在于形状的中心点具有全局性,使得中心距离和一个顶点在中心点的三角形面积都对轮廓线的局部变化不太敏感.

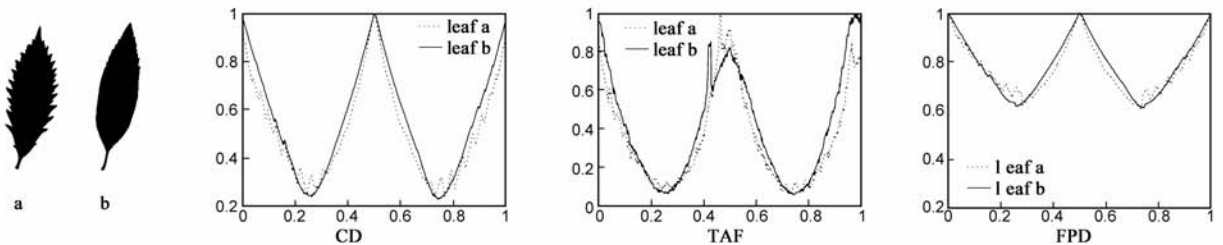


图1 两种树叶的中心距离(CD)、三角形面积(TAF)、最远点距离(FPD)函数曲线

近来,El-ghazal 等^[17]提出了一种最远点距离(Farthest point distance)函数(FPD)来产生傅立叶描述子并用于形状检索.该方法对轮廓线上的每一个点,在轮廓线上找距离其的最远的点,然后将这两个点到形状中心点的距离和定义为弧长的函数.该方法旨在在中心距离函数中加入轮廓线的角点信息,但最远点不一定是角点,而且最远点距离函数仍然使用的是中心距离这一几何特征,所以它同中心距离函数一样,不能很好的描述形状的细节信息.图 1 给出的最远点距离函数(FPD)曲线也说明了这一点.为了在中心距离函数中加入轮廓线的方向信息,以加强对形状细节的描述能力,Kunttu 等^[18]提出了一种角度半径复函数,该方法将由

轮廓线上的点到形状几何中心的距离(也称半径)和在该点的切角构成的复数(前者构成实部,后者构成虚部)定义为弧长的函数.虽然切角能反应轮廓线各个局部的方向信息,但无法描述轮廓线上的凹凸信息,例如,圆上的各点的凹凸性和弯曲程度是完全一样的,但在各点的切角都是不一样的.而人的视觉系统对形状轮廓线的凹凸信息非常敏感,是用来区分不同形状非常有价值的信息.

为使轮廓线函数对形状的整体特征和局部细节信息都能进行很好的描述,以进一步提高傅立叶描述子(FD)在形状检索中的性能,本文提出了一种新的轮廓线函数—拱高半径复函数(AHRC).AHRC 抽取轮廓线

的带符号的拱高特征来描述形状的凸凹信息,用半径来刻画形状的整体特征.用 AHRC 产生的傅立叶描述子(AHRFD),在 MPEG-7 的标准测试集上作形状检索实验,并实际应用于植物叶片的检索.实验结果表明该方法要优于基于中心距离、三角形面积、最远点距离、角度半径的傅立叶描述子和小波傅立叶描述子.

2 拱高半径复函数(AHRC)

从目标轮廓线的一个点出发,沿逆时针方向追踪轮廓线,最后回到始发点,得到一个有序点集 $C = \{p_i = (x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, N-1\}$,这里 x_i, y_i 分别是点 p_i 的横、纵坐标, N 是轮廓线上的点的个数.因为轮廓线是闭合的,所以有 $p_{i+k} = p_j$,这里 $j = (i+k) \bmod N$.下面给出有关的几个定义.

定义 1 轮廓线形状的中心点 O 的横、纵坐标 x, y

定义为: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i$.

定义 2 对于轮廓线上的任一点 $p_i = (x_i, y_i)$,轮廓线在该点的半径定义为 $r_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}$.

定义 3 对于轮廓线上的任一点 $p_i = (x_i, y_i)$,将其作为始点,沿顺时针方向追踪轮廓线,走过弧长 $r_i/2$ 到达点 p_i' ;再次以 p_i 点为始点,沿逆时针方向,走过同样的弧长到达另一点 p_i'' ,这里 r_i 是轮廓线在 p_i 点的半径.计算点 p_i 到直线段 $p_i'p_i''$ 的投影距离 h_i .将带正负号的 h_i 定义为轮廓线在点 p_i 处的拱高,正负号的取定规则为:当从 p_i 点出发,沿直线段 $p_i'p_i''$ 走向 p_i'' 点,如果 p_i 点在直线段右侧时, h_i 取正值,位于左侧,则取负值.图 2 用轮廓线在 p_1 和 p_2 点的拱高,给出了拱高定义的一个示例.

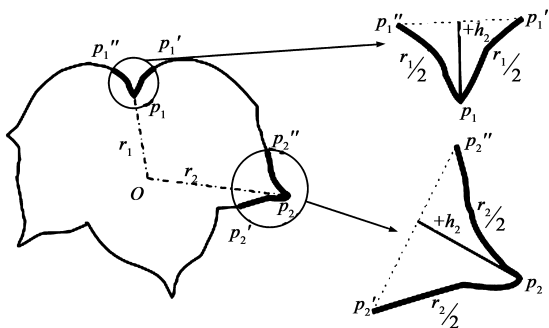


图2 轮廓线在 p_1 和 p_2 点的拱高

从定义 3 可以看出,轮廓线在某点的拱高反应了轮廓线在该点的弯曲程度和凸凹性,当拱高取正值,则表明轮廓线在该点是凸的,否则是凹的.用拱高来度量轮廓线的弯曲程度的合理性来源于如下经验:当一段圆弧的长度给定,使该弧段变得更弯曲,则拱高值会更大.下面介绍拱高半径复函数(AHRC)的产生过程.

从轮廓线始点 p_0 出发,沿逆时针方向追踪轮廓线,

走过长度为 l 的弧,到达点 p_l ,计算轮廓线在该点的半径 r_l 和拱高 h_l ,将 r_l 作为实部, h_l 作为虚部,得到复数 $z_l = r_l + h_l \cdot j$,这里 $j = \sqrt{-1}$.因对于轮廓线上的任一点 p_l ,可以由从 p_0 出发,沿逆时针方向到达该点,所走过的弧长 l 唯一确定,而且 l 发生改变, z_l 也随之发生改变,所以 z_l 可以表示为弧长 l 的函数.这样就得到了一个自变量是弧长 l ,因变量是由半径 r_l 作为实部、拱高 h_l 作为虚部,组成的复数的复函数,我们称之为拱高半径复函数(AHRC).

AHRC 函数显然满足平移和旋转的不变性,因为当形状轮廓线发生平移和旋转时,形状轮廓线在其上的任一点的半径和拱高并不发生改变,但 AHRC 轮廓线函数并不满足缩放不变.为使 AHRC 达到缩放不变,用半径的最大值即 $\max r_l$,拱高的绝对值的最大值 $\max |h_l|$ 和轮廓线的周长,分别将半径、拱高和弧长归一到区间 $[0, 1]$.通过归一化处理, AHRC 满足对轮廓线的平移、旋转和缩放的不变性,但由于轮廓线是闭合的,轮廓线的始点发生改变, AHRC 函数也随之发生改变.我们将通过对 AHRC 的傅立叶变换,消除其对轮廓线始点的依赖性.

这里仍然以图 1 中树叶 a 和 b 为例,分析 AHRC 的形状描述能力.因为 AHRC 是复函数,我们在三维直角坐标系中绘出树叶 a 和 b 的 AHRC 函数曲线(见图 3(a)),其中 z 轴是弧长, x 轴是中心距离(AHRC 的实部), y 轴是拱高(AHRC 的虚部).图 3 中的(b)图和(c)图则在平面直角坐标系中,分别绘出了两种树叶的 AHRC 的实部和虚部曲线.从(b)图可以看出, AHRC 的实部能够有效的描述树叶 a 和 b 的整体特征的相似性.将 AHRC 的虚部曲线(图 3(c))与其他三种轮廓线函数 CD、TAF、FPD 的函数曲线(图 1 中的右边三个图)进行比较,发现前者更能反应树叶 a 和 b 的形状在局部细节上差异.

3 用 AHRC 的傅立叶变换系数产生形状描述子(AHRFD)

轮廓线函数存在对轮廓线始点的依赖性,而且不紧致,还易受噪声的干扰,因此一般不直接用于形状匹配,而是对其作傅立叶变换,用低频系数来描述和匹配形状.设一个形状的轮廓线函数 AHRC 的离散形式为 $z(l_0), z(l_1), \dots, z(l_{N-1})$,这里 N 是轮廓线上的点的个数.对该函数直接使用一般的离散傅立叶变换的时间复杂度为 $O(N^2)$,使用快速傅立叶变换(FFT)的时间复杂度为 $O(N \log_2^N)$,但 N 需满足 $N = 2^T$ 时,算法才能达到最高效率^[18].为此这里将 AHRC 的自变量区间 $[0, 1]$ (即弧长区间),进行等间隔离散化,重新采样成 M 个

点 x_0, x_1, \dots, x_{M-1} , 这里 M 满足 $M = 2^T$. AHRC 经过重新采样后的离散形式为 $z(x_0), z(x_1), \dots, z(x_{M-1})$. 将其进行快速傅立叶变换, 得到傅立叶变换系数如下:

$$Z(m) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} z(x_k) e^{-\frac{j2\pi mk}{M}}, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

由于 AHRC 已满足旋转、缩放和平移不变, 所以其傅立叶变换的系数, 也满足同样的特性, 但也同样存在对轮廓线始点的依赖性问题. 因为轮廓线函数是一个周期函数, 当轮廓线的始点发生改变时, 相当于轮廓线

函数在 x 轴方向发生水平移动, 所以仅仅改变了傅立叶系数的相位信息, 而其幅度值保持不变. 因此, 为达到对轮廓线始点的不变性, 对于得到的傅立叶系数 $Z(m)$ 计算它的模 $|Z(m)|$, 同时为使描述子更加紧致和对噪声的鲁棒性, 取 M 个系数中的前 $T (T < M)$, 构造向量 $(|Z(0)|, |Z(1)|, \dots, |Z(T-1)|)$. 该向量即为最终得到的基于 AHRC 轮廓线函数的形状描述子 AHRFD. 两个形状的差异度定义为它们的相应的 AHRFD 之间(即两个特征向量之间)的欧氏距离.

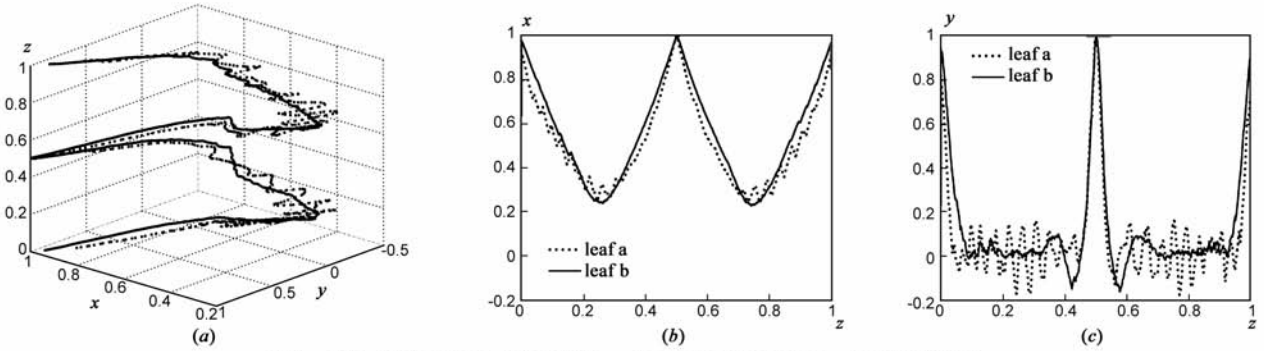


图3 树叶a和b的AHRC函数曲线(a)、AHRC的实部曲线(b)、和虚部曲线(c)

4 实验结果和讨论

本节用一个常用的 Benchmark 测试集和我们从野外采集的植物叶片图像库, 对 AHRFD 进行性能评估, 以测试其在图像检索中的性能和实际应用能力.

4.1 形状测试集

这里选用的标准测试集是常用的 MPEG-7 图像数据库^[16]. 该数据库总共有 70 种形状图像, 每种形状有 20 个存在类内差异的样本(如图 4(a)所示). 同时为测试 AHRFD 的实际应用能力, 我们从野外采集了 90 种植物的叶片, 对每种植物采集了 12 个在叶形上有一定类内差异的叶片. 对采集到的叶片, 进行图像预处理, 最后得到一个二值化的叶片图像库. 该图像库总共有 90 种植物叶形, 每种叶形有 12 个样本(如图 4(b)所示)).

4.2 用来进行对比的同类方法

因本文提出的方法 AHRFD 属于傅立叶描述方法, 所以其他傅立叶描述方法将作为主要的比较对象. 基于中心距离的傅立叶描述子(CD)是文献^[16]经过大量的实验验证得出的检索性能最好的傅立叶描述子; 而三角形面积函数(TAF)^[16]、最远点距离函数(FPD)^[17]、角度半径复函数(ARC)^[18]是近几年新提出的用来产生傅立叶描述子的轮廓线函数. 再加上文献^[20]提出的基于小波变换和傅立叶变换的形状描述子(WFD), 总共五种方法被用来同本文提出的方法 AHRFD

进行性能比较.

4.3 性能评价的方法

为了评估不同形状描述方法的检索性能, 一个有效的性能度量机制是必要的. 查全率与查准率对 (Recall and Precision Pair) 是目前被广泛使用的检索性能评估方法^[16]. 查准率 P 和查全率 R 的定义如下:

$$P = \frac{r}{n_1}, R = \frac{r}{n_2} \quad (2)$$

n_1 是一次查询返回的形状的个数, r 是返回的形状中与查询形状相似, 即属于同一类的形状的个数, n_2 是形状库中与查询形状相似的形状个数. 查准率是测量查询的精度而查全率则是测量从形状库中检索相似形状的能力. 查准率和查全率是负相关的, 即查准率一般随着查全率的增加而衰减.

4.4 实验平台和参数设置

实验平台为一台 CPU 为 Intel Core-2 Duo 2.4G Hz,

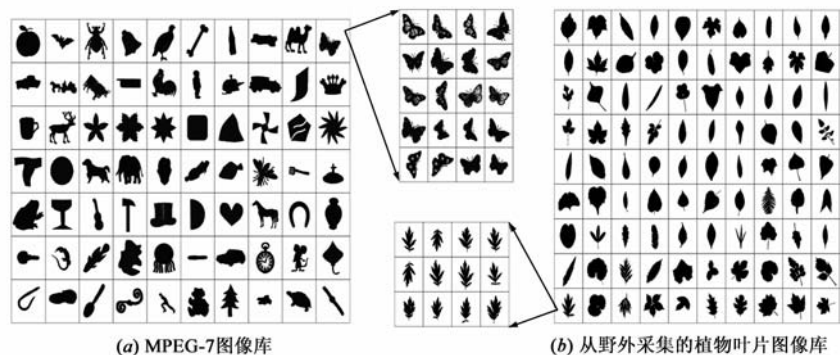


图4 用于测试的图像数据库

操作系统为 Windows XP 的计算机,编程工具为 MATLAB 6.5. 为进行快速傅立叶变换,对图像库中的所有图像,提取形状的轮廓线后,将轮廓线重新采样成 256 个点. 每一种用来比较的傅立叶描述子的长度取为 $T = 32$.

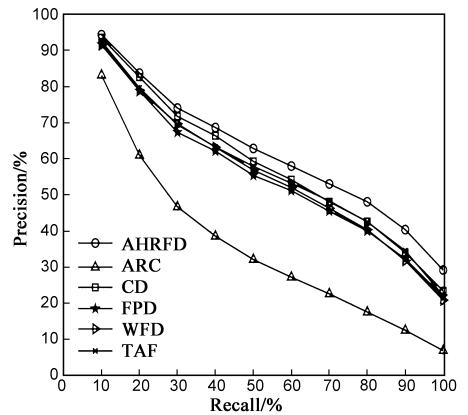
4.5 检索结果

用图像库中的每一个形状作为一个查询,与图像库中的所有形状进行匹配,即计算它们的形状差异度. 对于每一次查询,计算查全率从 10% 到 100%, 所对应的各个查准率. 首先要计算在指定的查全率下,应返回的形状的个数. 例如,要使查全率达到 20%, 即要使返回的形状中有 $20 \times m\%$ 个与查询形状相似的形状 (m 是数据库中同类形状的个数), 根据计算出的形状差异度,将数据库中所有形,按差异度从小到大的排序,以确定应返回的形状的个数. 然后依据查准率计算公式,计算查全率达到 20% 时的查准率. 最后计算所有查询的查准率的平均,得到平均查准率,并绘成查准率/查全率曲线(图 5 所示, (a) 和 (b) 分别为在 MPEG-7 图像库和植物叶片图像库中的检索结果).

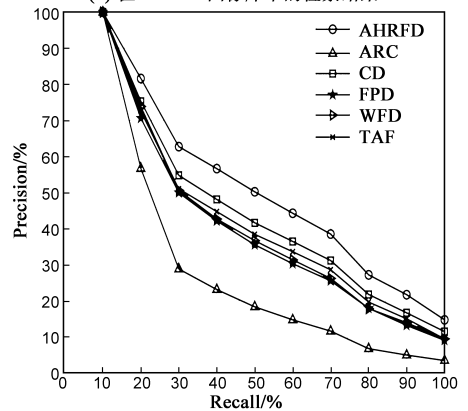
从图 5 可以看出,我们提出的 AHRFD 方法,无论是在 MPEG-7 图像库,还是在植物叶片图像库,在各个查全率下的查准率均高于其他参与比较的五种方法,而且在高查全率情况下,查准率要高出的更多. 如当查全率达到 50% 时, AHRFD 的查准率比性能排第二的方法 (CD) 在 MPEG-7 图像库中高出了近 4 个百分点,在植物叶片图像库中则高出了近 9 个百分点. 图 6 则给出了 AHRFD 和检索性能排第二的方法 CD 的部分检索结果的对比. 在该图中,每一个表格的左上角为查询的形状,其余 19 个 (植物叶片取的是 11 个) 是检索到的差异度最小的形状 (不包括查询形状自身), 其中用圆圈住形状是错误查询到的形状. 从该图看出,对于相同的查询, AHRFD 检索到的正确的形状的个数要多于 CD 方法. 以上结果表明 AHRFD 的检索性能要优于参与比较的其他同类方法.

5 结论

本文提出了一种新的用于形状描述的轮廓线函数—拱高半径复函数 (AHRC). AHRC 用中心距离描述形状的全局特征,用带正负号的拱高描述形状的局部细节信息和凹凸特征. 用 AHRC 产生的傅立叶描述子 (AHRFD) 在 MPEG-7 的标准测试集上的检索实验结果表明了该方法要优于现有的分别基于中心距离、三角形面积、最远点距离、角度半径的傅立叶描述子和小波傅立叶描述子. 用从野外采集的植物叶片图像库进行



(a) 在 MPEG-7 图像库中的检索结果



(b) 在植物叶片图像库中的检索结果

图 5 AHRFD 和其他参与比较的五种方法的查准率/查全率曲线

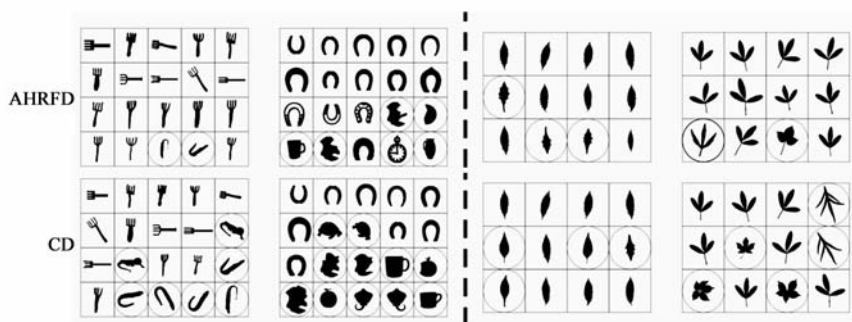


图 6 AHRFD 和 CD 在 MPEG-7 图像库 (虚线左边的图) 和植物叶片图像库 (虚线右边的图) 中部分检索结果的对比

性能测试,也在同这些方法的比较中,取得了更好的检索结果,表明该方法具有实际应用价值.

参考文献

[1] Arnold W M, Worring M, Santini S, Gupta A, Jain R. Content-based image retrieval at the end of the early years [J]. IEEE Transactions on PAMI, 2000, 22(12): 38 - 45.
 [2] 许相莉, 张利彪, 刘向东, 于哲舟, 周春光. 基于粒子群优化的图像检索相关反馈算法 [J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1935 - 1940.
 Xu Xiang-li, Zhang Li-biao, Liu Xiang-dong, Yu Zhe-zhou,

- Zhou Chun-guang. Image retrieval relevance feedback algorithm based on particle swarm optimization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(8): 1935 – 1940. (in Chinese)
- [3] Mehre B M, Kankanhalli M S, Lee W F. Shape measure for content based image retrieval: A comparison [J]. *Information Processing & Management*, 1997, 33(3): 319 – 337.
- [4] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(2): 179 – 187.
- [5] Khotanzad A. Invariant image recognition by Zernike moments [J]. *IEEE Transactions on PAMI*, 1990, 12(5): 489 – 497.
- [6] Mukundan R, Ong S H, Lee P A. Image analysis by Tchebichef moments[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(9): 1357 – 1364.
- [7] Loncaric S. A survey of shape analysis techniques[J]. *Pattern Recognition*, 1998, 31(1): 983 – 1001.
- [8] Mokhtarian F, Mackworth A K. Scale-based description and recognition of planar curves and two-dimensional shapes[J]. *IEEE Transactions on PAMI*, 1986, 8(1): 34 – 43.
- [9] Zahn T, Roskies R Z. Fourier descriptors for plane closed curves[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1972, 21(3): 269 – 281.
- [10] Bober M. MPEG-7 visual shape descriptors[J]. *IEEE Transactions on Circuits System Video Technology*, 2001, 11(6): 716 – 719.
- [11] Zhang D S, Lu G J A comparative study of curvature scale space and Fourier descriptors[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2003, 14(1): 41 – 60.
- [12] Adamek T O, Connor N E. A multiscale representation method for nonrigid shapes with a single closed contour [J]. *IEEE Transactions on Circuits System. Video Technology*, 2004, 14(5): 742 – 753.
- [13] Belongie S, Malik J, Puzicha J. Shape matching and object recognition using shape contexts [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis, Machine, Intelligence*. 2002, 24(24): 509 – 522.
- [14] Alajlan N, Rube I E, Kamel M S, Feeman G. . Shape retrieval using triangle-area representation and dynamic space warping [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(7): 1911 – 1920.
- [15] Kauppinen H, Seppanen T, Pietikainen M. An experimental comparison of autoregressive and Fourier-based descriptors in 2D shape classification [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1995, 17(2): 201 – 207.
- [16] Zhang D S, Lu G J. Study and evaluation of different Fourier methods for image retrieval[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(1): 33 – 49.
- [17] El-ghazal A, Basir O, Belkasim S. Farthest point distance: A new shape signature for Fourier descriptors[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2009, 24(7): 572 – 586.
- [18] Kunttu I, Lepisto L. Shape-based retrieval of industrial surface defects using angular radius Fourier descriptor[J]. *IET Image Processing*, 2007, 1(2): 231 – 236.
- [19] Albert Boguess Francis, Narcowich J. 小波与傅里叶分析基础(A First Course in Wavelets with Fourier Analysis) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [20] Yadav R B, Nishchal N K, Gupta A K, Rastogi V K. Retrieval and classification of shape-based objects using Fourier, generic Fourier and wavelet-Fourier descriptors technique: A comparative study[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(6): 695 – 708.

作者简介



王 斌 男, 1969 年 12 月生于湖北汉川。2007 年 1 月在复旦大学计算机应用技术专业获博士学位。现为南京财经大学副教授、硕士生导师, 东南大学生物医学工程博士后流动站博士后, 中国计算机学会会员, 江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象, 江苏省“六大人才高峰”培养对象, 研究方向: 智能计算、模式识别、图像处理。

E-mail: binwang@seu.edu.cn

