

文章编号: 1000-582X(2011)12-126-06

# 统计骨架信息的形状描述新方法

汤 进, 陈展展, 罗 斌

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

**摘 要:** 针对形状描述与识别问题, 提出了骨架结构特征直方图, 利用提取的形状骨架信息, 解决了形状轮廓的起点选择、旋转、平移以及缩放等不变性。首先, 计算每对骨架点关于骨架中心的测地路径长度比例特征和骨架点圆盘半径比例特征, 然后结合上述 2 个特征统计构造直方图矩阵来描述图像形状。实验结果表明, 该形状描述不仅具有刚性变化不变性, 在一些非刚性变化下也能够实现高效率和高精度的形状检索。

**关键词:** 形状描述; 骨架结构直方图; 测地路径; 图像检索

**中图分类号:** TP391.41

**文献标志码:** A

## New shape descriptor with skeleton information statistics

TANG Jin, CHEN Zhan-zhan, LUO Bin

(Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, Anhui, P. R. China)

**Abstract:** Two-dimensional structure-histogram based on skeleton is proposed for shape descriptor and shape recognition. The descriptor utilizes the shape skeleton information to achieve invariance of starting point, rotation, translation and scale of shape contour. The shape descriptor calculates the geodesic path distance ratio based on skeleton center and maximal disk radius ratio for each pair of skeleton points. The two structural features are combined to construct a new two-dimensional histogram matrix statistically for describing shape. The experimental results show that this shape descriptor not only has the characteristic of rigid invariance, but also achieves higher efficiency and retrieval precision in non-rigid situation.

**Key words:** shape descriptor; skeleton structure-histogram; geodesic path; image retrieval

形状描述和识别在计算机视觉领域中起着至关重要的角色, 关于形状的几何、拓扑和统计特征的深入研究, 前人们提出了很多形状描述符, 大致分为两类: 一类是基于形状边界轮廓的, 一类是基于形状区域的。在基于形状边界轮廓的方法中, 简单的全局描述子有面积、圆度(周长平方/面积)、离心率(主轴长度/次轴长度)、主轴方向、外张量、欧拉数等<sup>[1]</sup>。前人们提出傅里叶描述子<sup>[2]</sup>、小波描述子<sup>[3]</sup>和经典

的 CSS 算法<sup>[4]</sup>, Belongie 等人提出使用 Shape Context 来描述轮廓特征点周围所有特征点的相对空间分布, 利用二维直方图来统计特征点的分布信息<sup>[5]</sup>。Ling 等人提出形状轮廓点之间的内部距离, 该距离更加能够描述形状的几何特征, 使用内部距离代替欧式距离计算轮廓点的 Shape Context, 其中内部距离是轮廓点间在形状轮廓内的最短路径长度<sup>[6]</sup>。在基于区域的形状描述方法中, 前人们提出

收稿日期: 2011-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60772122); 安徽省教育厅自然科学基金重点资助项目(KJ2008A033&KJ2009A1501); 安徽省高校优秀青年人才基金资助项目(2009SQRZ221)

作者简介: 汤 进(1976-), 男, 安徽大学副教授, 博士, 主要从事图像处理与模式识别方向研究, (Tel)13955173284; (E-mail)ahhtang@gmail.com。

用不变矩<sup>[7]</sup>来描述形状,还有其他一些区域的方法比如网格法<sup>[8]</sup>,形状矩阵<sup>[9]</sup>,凸包<sup>[10]</sup>和中轴(骨架)<sup>[11]</sup>等等。骨架整合了形状的几何和拓扑特征,在形状识别中是一种重要的描述。Wai-Pak Choi 等人利用骨架最大圆盘半径直方图进行形状检索<sup>[12]</sup>。S. C. Zhu 和 A. L. Yuille 提出了使用分支限界法进行形状的骨架图匹配<sup>[13]</sup>,但只能处理静止不动的对象。K. Siddiqi 等人提出了 Shock graph<sup>[14]</sup>。T. B. Sebastian 等人提出了计算 Shock graph 之间的 edit distance 方法<sup>[15]</sup>,这种方法匹配效果较好,但计算复杂度较大。S. Yang 提出了基于骨架的三角形统计直方图序列来描述形状<sup>[16]</sup>。随后 X. Bai 等人利用边界曲线演化来修剪骨架<sup>[17]</sup>,在此基础上提出了基于路径相似的骨架图匹配方法<sup>[18]</sup>,这种方法可以处理带圈的骨架,不考虑骨架图的拓扑结构。

直方图在图形图像处理中起着非常重要的作用,如通过图像的灰度或颜色直方图来描述图像的特征<sup>[19]</sup>;通过边缘曲线的距离方向等几何特征量的直方图来描述物体的形状<sup>[20]</sup>。在文献[5]、[6]、[12]和[16]中都有用到直方图的思想。

结合形状骨架信息,统计的分析骨架的结构特征,将 2 个骨架结构特征整合到 1 个直方图矩阵中,充分的描述了形状的结构和统计信息,给出了骨架结构特征的 2 维直方图来描述形状。

## 1 形状轮廓的骨架提取

### 1.1 骨架提取和骨架点圆盘半径

采用 X. Bai 等人提出的基于离散曲线演化轮廓分割的骨架修剪方法<sup>[17]</sup>来生成形状的骨架,该方法生成的骨架保存了原形状的拓扑信息,骨架点的位置精确,骨架具有连通性,在欧式变换如旋转、缩放等变换下具有不变性,在局部微小的轮廓变形下具有稳定性,同时通往骨架端点的骨架枝代表了形状的重要的可视化部分。

骨架圆盘半径为以骨架点为圆心的包含在形状轮廓内的最大圆半径,骨架圆盘半径对应的最大圆内切于形状轮廓至少 2 个点,也就是说骨架中的点对应于轮廓上的点。图 1 显示的是一幅 carriage 图像的轮廓和骨架,以及骨架中 2 个骨架点  $s_1$  和  $s_2$  在轮廓内的最大圆,其中  $r_1$  和  $r_2$  是骨架点  $s_1$  和  $s_2$  对应最大圆半径, $p_{11}$  和  $p_{12}$  是骨架点  $s_1$  对应的轮廓切点, $p_{21}$ 、 $p_{22}$  和  $p_{23}$  是骨架点  $s_2$  对应的轮廓切点(如图 1 所示)。

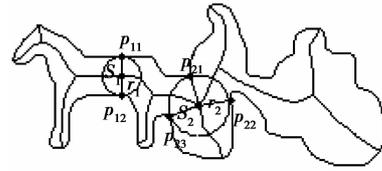


图 1 提取的骨架以及骨架点  $s_1$  和  $s_2$  对应的最大圆、轮廓切点和圆盘半径(红色线标记)

### 1.2 骨架点间测地路径和骨架中心点的定义

骨架点间的测地路径,定义为一骨架点沿着骨架到另一骨架点的最短路径。骨架中心点,定义为最大圆盘半径对应的骨架点。图 2 显示的是图 1 骨架的 2 骨架点  $s_1$  和  $s_2$  之间的测地路径及其骨架中心点  $s_c$ 。

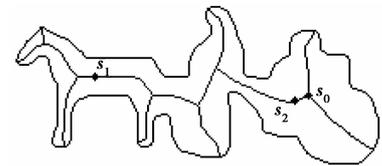


图 2 骨架点  $s_1$  和  $s_2$  之间的测地路径(红色线标记)和骨架中心点  $s_c$ (红色点标记)

## 2 形状描述符的构造

形状可以作为区分图像中物体的突出特征,一般把形状表示成 1 个闭合的轮廓。为了形成具有刚性变换不变性和对轮廓变形具有较强鲁棒性的形状描述符,采用基于轮廓的骨架信息来构造形状的描述符,构造骨架点之间的结构特征信息,根据结构特征信息的分布情况,将不同的结构特征信息统计的整合到 1 个直方图中,并用这个直方图来描述形状。

### 2.1 骨架点间的结构特征计算

记一幅图像骨架的骨架中心点为  $s_c$ ,骨架上除骨架中心点外其余点的集合为  $S = \{s_i | i = 1, 2, \dots, K\}$ ,以骨架点集合  $S$  为圆心的最大圆的圆盘半径集合记为  $R = \{r_i | i = 1, 2, \dots, K\}$ ,其中  $r_i$  是骨架点  $s_i$  对应的圆盘半径。基于骨架中心点  $s_c$ ,对于任意 2 个非骨架中心点的骨架点  $s_i$  和  $s_j$ ,计算从骨架中心点到骨架点  $s_i$  和  $s_j$  的测地路径,记为  $p(s_c, s_i)$  和  $p(s_c, s_j)$ ,分别用  $l_{p(s_c, s_i)}$ 、 $l_{p(s_c, s_j)}$  表示测地路径  $p(s_c, s_i)$  和  $p(s_c, s_j)$  的长度。

图 3 显示的是一幅 horse 图像的 2 个非骨架中心点  $s_1$ 、 $s_2$  到骨架中心点  $s_c$  的测地路径  $p(s_c, s_1)$ 、 $p(s_c, s_2)$  和骨架点  $s_1$ 、 $s_2$  对应的圆盘半径  $r_1$ 、 $r_2$ 。计算这 2 个骨架点的结构特征,定义测地路径比例  $r_{\text{path}}$  和圆盘半径比例  $r_{\text{radius}}$  如下

$$r\_path(s_1, s_2) = \min\left(\frac{l_{p(s_c, s_1)}}{l_{p(s_c, s_2)}}, \frac{l_{p(s_c, s_2)}}{l_{p(s_c, s_1)}}\right), \quad (1)$$

$$r\_radius(s_1, s_2) = \min\left(\frac{r_1}{r_2}, \frac{r_2}{r_1}\right), \quad (2)$$

其中  $r\_path(s_1, s_2) \in (0, 1]$ ,  $r\_radius(s_1, s_2) \in (0, 1]$ 。其中  $r\_path$  反映的是骨架点关于骨架中心点的测地路径长度之间的结构关系,  $r\_radius$  反映的是骨架点对应的圆盘半径之间的结构关系。显然可以看出提出的骨架点间的结构特征在形状缩放情况下不需要进行归一化, 而且对于刚性变换下的平移、旋转和缩放具有不变性。

由图3可以看出文中定义的骨架点  $s_1$  和  $s_2$  之间的结构特征对应于轮廓点  $p_1$  和  $p_2$  之间的关系特征, 间接地利用骨架点到骨架中心的骨架测地路径和圆盘半径来刻画轮廓点之间的关系。

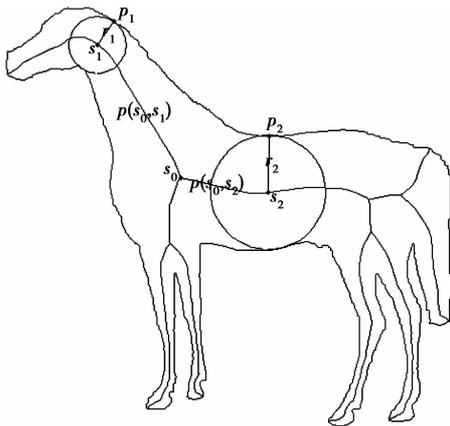


图3 骨架测地路径和圆盘半径特征

## 2.2 骨架结构直方图的构造

在文献[6]中, 对于形状轮廓每个端点的特征描述是通过轮廓上其余端点关于该端点的分布情况得到的, 而该轮廓端点与其余端点的关系通过内部距离来刻画, 其中内部距离定义为2轮廓端点间局限在形状轮廓内的最短路的长度, 该距离不同于欧式距离, 对于形状关节变化具有鲁棒性且能捕捉到形状局部的结构。不同于文献[6]中的方法, 一方面, 考虑的是骨架点集合, 利用了骨架点到骨架中心点测地路径和骨架点对应的圆盘半径特征, 另一方面是对骨架点对关系的2个特征进行统计分析, 是通过骨架点对的分布来描述整个骨架图, 不是通过其余骨架点的分布来描述当前骨架点。对形状骨架的描述是通过骨架图上骨架点间的关系来刻画的, 下面统计骨架点对结构特征的分布, 把2个结构特征统计地整合到1个二维直方图中, 充分地描述了形状骨架的结构和统计信息。

对于骨架点集合  $S = \{s_i | i = 1, 2, \dots, K\}$ , 任意点对  $(s_i, s_j)$  都有相应的结构特征量  $r\_path(s_i, s_j)$  和  $r\_radius(s_i, s_j)$ 。因此将有  $\frac{K(K-1)}{2}$  对特征量,  $(r\_path(s_i, s_j), r\_radius(s_i, s_j))$ , 简记为  $F_{ij}$ , 其中  $i \in [1, 2, \dots, K-1], j \in [i+1, i+2, \dots, K]$ 。用该二维数据集  $F = \{F_{ij} | i \in [1, 2, \dots, K-1], j \in [i+1, i+2, \dots, K]\}$  来描述该形状。

定义二维数据集  $F$  的二维直方图如下

$$H(F, X) = \begin{pmatrix} h_{11}, h_{12}, \dots, h_{1n} \\ h_{21}, h_{22}, \dots, h_{2n} \\ \dots \\ h_{m1}, h_{m2}, \dots, h_{mn} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中  $X = \{(x_i, y_j) | i = 0, 1, \dots, m, j = 0, 1, \dots, n\}$  为直方图的参数,  $m$  和  $n$  表示将数据集两维分别分成  $m$  段和  $n$  段,  $x_{i-1} < x_i, y_{j-1} < y_j, x_i \in [0, 1], y_j \in [0, 1]$ 。  $h_{ij}$  为集合  $F$  的数据元素落入矩形区域  $([x_{i-1}, x_i], [y_{j-1}, y_j])$  的个数,  $h_{ij} = \sum_{t_1=1}^{K-1} \sum_{t_2=t_1+1}^K q(F_{t_1 t_2}, x_{i-1}, x_i, y_{j-1}, y_j)$ ,

其中

$$q(F_{t_1 t_2}, x_{i-1}, x_i, y_{j-1}, y_j) = \begin{cases} 0, & \text{其它} \\ 1, & F_{t_1 t_2}(1) \in [x_{i-1}, x_i], F_{t_1 t_2}(2) \in [y_{j-1}, y_j] \end{cases}$$

下面对二维直方图进行归一化,

$$H(F, X) = \begin{pmatrix} \frac{h_{11}}{|F|}, \frac{h_{12}}{|F|}, \dots, \frac{h_{1n}}{|F|} \\ \frac{h_{21}}{|F|}, \frac{h_{22}}{|F|}, \dots, \frac{h_{2n}}{|F|} \\ \dots \\ \frac{h_{m1}}{|F|}, \frac{h_{m2}}{|F|}, \dots, \frac{h_{mn}}{|F|} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中  $|F|$  为集合  $F$  的势。

由于骨架点间的结构特征对于平移、缩放和旋转具有不变性, 则对骨架点对的分布进行统计同样具有平移旋转不变性, 公式(5)的归一化使得提出的骨架结构特征直方图同样具有缩放不变性。

## 2.3 基于直方图的形状相似度量

设2图像骨架结构特征直方图矩阵分别为:  $H_1 = H(F_1, X), H_2 = H(F_2, X)$ , 采用直方图各元素差的加权和作为直方图之间距离。定义两图像的形状之间的距离如下

$$d(F_1, F_2) = d(H_1, H_2) =$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij} |H_1(i, j) - H_2(i, j)|, \quad (6)$$

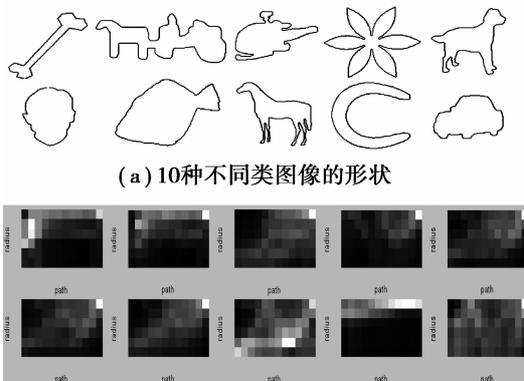
其中  $w_{ij} = \frac{\cos\left(\frac{H_1(i,j) + H_2(i,j)}{Z} \frac{\pi}{2}\right)}{\sum_{k=1}^{mn} \cos\left(\frac{H_1(i,j) + H_2(i,j)}{Z} \frac{\pi}{2}\right)}$ ,  $Z$  是使得  $\frac{H_1(i,j) + H_2(i,j)}{Z} < 1$  的常数。

### 3 实验结果与分析

笔者用到的实验图像均来自形状测试数据库 MPEG-7 B。MPEG-7 B 数据库包括 70 类共 1 400 幅形状图像。在实验中把骨架结构特征空间分成  $6 \times 12$  块,即等分圆盘半径比例特征  $(0,1]$  区间为 6 bins,等分骨架测地路径比例特征  $(0,1]$  区间为 12 bins。

#### 3.1 基于直方图的形状描述和描述符计算时间复杂度分析

实验中先取 MPEG-7 B 中 10 个类的图像,这 10 类分别是 Bone、carriage、chopper、device1、dog、face、flatfish、horse、horseshoe 和 personal\_car。选取每类中的一幅图像,显示如图 4(a),图 4(b)显示 4(a)中形状对应的骨架结构特征直方图。从图 4(b)中可以发现,不同类形状的骨架结构特征直方图是不一样的。



(b) 与图 4(a) 对应的骨架结构直方图

图 4 实验图库中 10 种不同类的形状

骨架提取算法的时间复杂度为  $O(mn)$ , 其中  $m, n$  分别为二值图像的宽和高。设提取的骨架总共有  $s$  个骨架点,求骨架中心到骨架点的测地路径的时间复杂度为  $O(s)$ ,则计算每对骨架点的结构特征的时间复杂度  $O(s^3)$ 。设骨架结构特征空间分成  $M \times N$  块,则构造直方图需要的时间复杂度为  $O(\max(M, N) \times s^2)$ ,远小于  $O(s^3)$ 。综上所述,提出的形状描述符构造的时间复杂度为  $O(mn) + O(s^3)$ 。

#### 3.2 算法的鲁棒性分析

为了检验算法的鲁棒性,实验中对原始图像分别进行方向变换、尺度变换和轮廓部分变形。选取

形状测试数据库 MPEG-7 B 中 personal\_car 类图像作为原始图像,进行不同方向和不同尺度的变换。图 5 显示 personal\_car 图像进行角度旋转、尺度变换后的图像轮廓和骨架及其对应的骨架结构特征直方图。其中图 5(a)中第一幅为原始图像,第二幅为旋转  $35^\circ$  的图像,第三幅为尺度缩放 0.5 变换后的图像,第四幅为旋转  $160^\circ$ 、尺度缩放 0.7 变换后的图像。可以看出,形状在方向和尺度变换后,各形状的骨架结构特征直方图非常相近,这说明提出的描述符对旋转和尺度变换具有不变性。

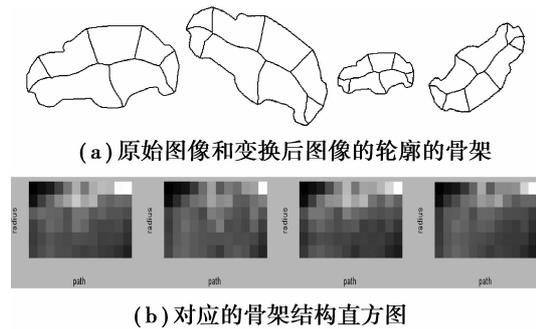
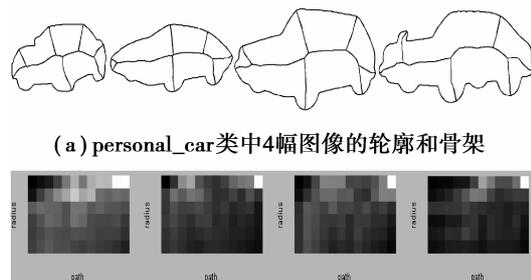


图 5 方向和尺度变换对骨架结构直方图的影响

图 6(a)显示的是来自形状测试数据库 MPEG-7 B 中 personal\_car 类的 4 幅图像,这 4 幅图像的轮廓有局部变形,其中图 6(a)中第 4 幅图像的骨架拓扑结构与其他三幅图像的不同,提出的描述符考虑的是骨架点对结构特征的分布,与骨架拓扑结构无关,在骨架拓扑结构受骨架化算法影响下,文中构造的描述符会有很小的差别,但类内形状描述符的差别远小于类外的形状。所以提出的形状描述符对于形状轮廓局部变形具有一定的鲁棒性。图 6(b)中显示的是对应的骨架结构特征直方图。可以看出各形状的骨架结构特征直方图也很相近,算法对轮廓部分变形不敏感,显然本算法的这种对轮廓部分变形的不敏感得益于骨架提取算法和提出的骨架结构特征直方图的描述。



(b) 对应的骨架结构直方图

图 6 轮廓部分变形对骨架结构直方图的影响

### 3.3 算法的性能分析

从形状测试数据库 MPEG-7B 中选取 18 类图像,每类包括 20 幅图像,组成了一个由 360 幅图像组成的实验数据库。该 18 类包括 Bone、Heart、camel、carriage、children、chopper、device1、device8、dog、face、flatfish、fork、fountain、hammer、horseshoe、key、personal\_car 和 tree。图 7 显示了每类中的 2 幅图像。以此图像数据库作图像检索实验,图 8 显示了部分检索实验结果,给出 9 幅源图像,分别从图像数据库中检索 10 幅最相似的图像。从检索结果看,该算法能实现高精度的形状检索。表 1 显示算法在实验数据库上的识别精度,每一行表示的是最相似的图像准确度。可以看出算法的总体识别精度是高于 Shape Context<sup>[5]</sup>的,但是低于文献[15]和[18]中的算法,文献[15]和[18]中的算法比较复杂,计算规模大,而提出的算法容易实现,识别精度稍微低点是可以接受的。表 1 显示如下,表 1 中数据的单位是%。



图 7 实验数据库中的部分图像

Query	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th

图 8 部分检索实验结果

表 1 实验数据库的识别精度

算法	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	%
SC	100	99.07	96.76	94.91	91.20	88.43	82.41	74.54	66.67	60.65	
研究方法	100	99.44	97.22	95.28	91.94	91.11	88.60	87.78	87.50	84.44	
参考文献[15]	100	100	100	100	99.54	97.22	97.22	95.83	94.44	92.59	
参考文献[18]	100	100	100	99.54	100	98.61	97.22	97.22	95.83	94.91	

## 4 结 语

提出了一种新的形状描述方法,结合形状的骨架信息,统计骨架的结构特征,充分利用骨架的结构和统计特征,整合结构特征到二维直方图中,形成形状具有缩放旋转不变性和对轮廓局部变形不敏感的描述。实验结果表明,算法能够实现高精度的形状检索。

### 参考文献:

[1] YONG I T, WALKER J E, BOWIE J E. An analysis technique for biological shape [J]. Information and Control, 1974, 25(4): 357-370.  
 [2] 贾永红. 数字图像处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.

[3] TIENG Q M, BOLES W W. Recognition of 2D object contours using the wavelet transform zero-crossing representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19 (8): 910-916.  
 [4] MOKHTARIAN F, BOBER M. Curvature scale space representation: theory, applications, and MPEG-7 standardization [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.  
 [5] BELONGIE S, PUZHICHA J, MALIK J. Shape matching and object recognition using shape contexts [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(4): 509-522.  
 [6] LING H B, JACOBS D W. Shape classification using

- the inner-distance [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29 (2): 286-299.
- [7] ZHANG D S. Image retrieval based on shape [D]. Australia: Monash University, 2002.
- [8] LU G J, SAJJANHAR A. Region-based shape representation and similarity measure suitable for content-based image retrieval [J]. Multimedia Systems, 1999, 7(2): 165-174.
- [9] GOSHTASBY A. Description and discrimination of planar shapes using shape matrices [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(6): 738-743.
- [10] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. Image processing, analysis and machine vision [M]. United States: Cengage-Engineering, 2007.
- [11] BLUM H. A transformation for extracting new descriptors of shape; from models for the perception of speech and visual forms [M]. Cambridge: MIT Press, 1967: 362-380.
- [12] CHIO W P, LAM K M, SIU W C. Maximal disk based histogram for shape retrieval [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'03), April, 2003. Hong Kong, China: IEEE, 2003: 9-12.
- [13] ZHU S C, YUILLE A L. FORMS: a flexible object recognition and modeling system [J]. International Journal on Computer Vision, 1996, 20(3): 187-212.
- [14] SIDDIQI K, SHKOUFANDEH A, DICKINSON S, et al. Shock graphs and shape matching [J]. International Journal on Computer Vision, 1999, 35(1): 13-32.
- [15] SEBASTIAN T B, KLEIN P N, KIMIA B B. Recognition of shapes by editing their shock graphs [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(5): 550-571.
- [16] YANG S. Symbol recognition via statistical integration of pixel-level constraint histograms: a new descriptor [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(2): 278-281.
- [17] BAI X, LATECKI L J, LIU W Y. Skeleton pruning by contour partitioning with discrete curve evolution [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(3): 449-462.
- [18] BAI X, LATECKI L J. Path similarity skeleton graph matching [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(7): 1282-1292.
- [19] 张恒博, 欧宗瑛. 一种基于色彩和灰度直方图的图像检索方法 [J]. 计算机工程, 2004, 30(10): 20-22. ZHANG HENG-BO, OU ZONG-YING. Method of content base image retrieval based on color and grey level histogram [J]. Computer Engineering, 2004, 30 (10): 20-22.
- [20] 任平红, 陈 鑫. 基于改进的边缘直方图的图像检索方法 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(8): 183-186. REN PING-HONG, CHEN CHU. Methods of image retrieval based on improved edge histogram [J]. Computer Technology and Development, 2007, 17(8): 183-186.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 114 页)

- [10] LI Q Z, MOON B K. Indexing and querying XML data for regular path expressions [C]// Proceedings of the 27th International Conference on Very Large Data, September 11-14, 2001, Roma, Italy. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2001: 361-370.
- [11] WANG G R, SUN B, LV J H, et al. RPE query processing and optimization techniques for XML databases [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2006, 19(2): 224-237.
- [12] WANG J, MENG X F, WANG S. Integrating path index with value index for XML data [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2642: 95-100.
- [13] TIAN F, DEWITT D J, CHEN J J, et al. The design and performance evaluation of alternative XML storage strategies [J]. ACM SIGMOD Record, 2002, 31(1): 5-10.
- [14] FLORESCU D, KOSSMANN D. Storing and querying XML data using an RDBMS [J]. Bulletin of the Technical Committee on Data Engineering, 1999, 22 (3): 27-34.
- [15] JMCHUGH J, ABITEBOUL S, GOLDMAN R, et al. Lore: a database management system for semistructured data [J]. SIGMOD Record, 2006, 26 (3): 54-56.

(编辑 侯 湘)