

文章编号 1004-924X(2015)06-1758-10

## 用于遮挡形状匹配的弦角特征描述

黄伟国, 胡大盟, 杨剑宇\*, 朱忠奎  
(苏州大学 城市轨道交通学院, 江苏 苏州 215131)

**摘要:**为了在兼顾形状匹配算法的检索率和运算效率的同时实现部分遮挡目标的精确匹配,提出了一种基于弦角轮廓特征的形状描述算法。该算法基于轮廓点的空间位置关系构造每个轮廓采样点的弦角轮廓特征描述子,利用描述子的自包含属性描述开轮廓的形状特征。采用 L1 度量方法计算两个轮廓点的弦描述子之间的距离,获得匹配代价矩阵。最后利用积分图算法计算匹配代价矩阵的相似度,实现部分遮挡目标的识别。基于 MPEG-7 形状数据库和 Kimia216 形状数据库进行了目标识别实验。实验结果表明:该算法对部分遮挡目标具有良好的鲁棒性,而且有较高的运算效率,部分匹配的检索率达到 83.63%,提高了 19.09%,实验结果优于现有部分遮挡形状匹配算法。该算法较好地满足了遮挡形状的匹配和识别对速度、准确率和抗遮挡能力等方面的要求。

**关键词:**形状匹配;部分遮挡;弦角描述;积分图

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1758

## Chord angle representation for shape matching under occlusion

HUANG Wei-guo, HU Da-meng, YANG Jian-yu\*, ZHU Zhong-kui

(School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, China)

\* Corresponding author, E-mail: jyyang@suda.edu.cn

**Abstract:** A shape description method based on chord angle representation was proposed to solve the problem of shape matching under partial occlusion, meanwhile balancing retrieval accuracy and computational efficiency. A chord angle descriptor was defined based on the angle between two chords for each sample point, which could be used to describe an open contour by its self-contained property. Then, a match cost matrix was constructed by computing the L1 distance between descriptors of all the sample points on two open contours. Finally, the similarity between two contours was obtained by the integral image algorithm and the partial shape matching result was achieved. The experimental results on MPEG-7 and Kimia216 shape databases indicate that this method is robust to the partial occlusion, and the computational efficiency and the retrieval accuracy are both essentially improved as compared with other partially occluded shape matching algorithms. The retrieval accuracy of proposed partial contour matching method reaches to 83.63% and increased by 19.09%. It concludes that this proposed method meets the requirements of shape matching and object recognition in efficiency, accuracy and ability of anti-occlusion.

**Key words:** shape matching; partial occlusion; chord angle representation; integral image

**收稿日期:**2015-02-02; **修订日期:**2015-04-10.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51405320, No. 61305020);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20130316)

## 1 引言

随着数字化多媒体信息技术的快速发展,形状匹配已成为机器视觉领域中的研究热点,在基于内容的图像检索、目标识别、机器人导航等领域中都得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。形状一般有两种表示方式:骨架和轮廓。前者利用形状的中轴树作为骨架来表示形状;后者利用从形状外边界曲线上提取的点集来表示形状。

形状匹配的关键在于能否构造出形状特征信息丰富以及具有旋转、平移、尺度不变性的形状描述子。与骨架相比,轮廓包含更丰富的特征信息<sup>[2]</sup>,因此国内外学者们基于形状的轮廓构造出了不同的具有变换不变性的特征描述子。Belongie等<sup>[3]</sup>提出了形状上下文(Shape Contexts, SC)描述方法,该方法通过轮廓上的某个点与其余轮廓点构成的线段向量集来表征该点的空间位置分布,并采用对数极坐标系对该向量集进行离散化,获得统计直方图。该方法对目标轮廓的描述能力强,但存在抑制噪声能力较弱,算法复杂度高,且无法获得轮廓点的顺序信息等问题。Ling等<sup>[4]</sup>在SC的基础上提出了内距离形状上下文(Inner-Distance Shape Context, IDSC)方法,该方法用轮廓点之间的内距离代替SC中轮廓点之间的欧氏距离。该方法对非刚性铰接物体具有较好的描述效果,但对具有复杂类内信息的目标识别精度不高,且算法复杂度较高。郑丹晨等<sup>[5]</sup>基于SC提出了一种利用角点典型形状上下文特征(Corner Representative Shape Context, CRSC)进行快速识别的方法,该方法能够降低特征点的匹配时间,有利于解决大规模形状样本的匹配问题,但该方法检索率不高。Alajlan等<sup>[6]</sup>利用轮廓点构成的三角形面积(Triangle-area Representation, TAR)来描述形状,并通过控制三角形的边长来获得形状的多尺度信息,该方法能够获得有效的形状局部和全局特征,但是该算法需要不断地改变边长,特征提取较为复杂,且对变形点较为敏感。王斌<sup>[7]</sup>提出一种多尺度拱高(Multi-scale Arc Height, MSAH)的形状描述方法,该方法用多尺度的拱高函数来度量形状轮廓线上每一个点的弯曲程度,取每个尺度上拱高函数的傅里叶变换系数作为描述形状的特征向量。

该算法复杂度较低,但形状检索率不高。

上述的形状匹配算法均是针对整个形状或称闭合轮廓的形状匹配,当轮廓出现遮挡或者部分丢失,即仅能获得形状的部分轮廓时,上述闭合轮廓的形状匹配算法均无法较好地解决该问题。在无法获得完整轮廓的情况下,为了实现形状的匹配,学者们提出了不同的部分形状描述子以及部分匹配算法,并将他们广泛应用于基于轮廓的目标检测中<sup>[8-9]</sup>。Saber等<sup>[10]</sup>提出基于导向图标记的部分形状识别算法,该算法首先利用图像分割将待识别的目标分割为几个区域,接着对区域进行B-样条拟合以获得局部最大曲率特征矩阵,最后利用一种种子矩阵方法来匹配两个区域的距离矩阵,从而获得轮廓段的匹配结果。Cao等<sup>[11]</sup>提出一种基于马尔科夫链蒙特卡罗(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)的抽样算法来处理部分形状匹配和轻度非刚性变形问题。该算法以有序的标记点集表示部分轮廓,然后利用一个由匹配概率和先验分布构造的后验分布模型来评估模板形状中与该部分轮廓最相似的部分,并采用一种轮廓细分技术获取更精确的匹配概率。Cui等<sup>[12]</sup>提出一种有效的全局到全局、部分到部分的形状匹配算法。该算法以轮廓线绝对曲率的积分作为描述子,并利用归一化互相关(Normalized Cross Correlation)来匹配形状中的轮廓段,该算法不适用于存在较大变形的部分形状匹配。Latecki等<sup>[13]</sup>提出一种弹性部分形状匹配技术,用于对形状的部分遮挡和扭曲情况进行建模。该算法将形状中的一部分作为索引,在另一个形状上寻找最佳的对应部分,该最佳对应部分被认为是索引发生扭曲后的版本。该算法通过计算轮廓上采样点的切线与 $x$ 坐标轴的夹角作为描述子,并采用最小方差匹配(Minimum Variance Matching, MVM)算法<sup>[14]</sup>对描述子进行匹配,该匹配算法能够自动忽略不相似的点。Michel等<sup>[15]</sup>提出一种用于开轮廓和闭轮廓间的形状匹配算法,该算法通过计算轮廓段上的采样点到指定方向上离该点最近点的距离作为描述子,然后利用改进的动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)算法<sup>[16]</sup>寻找轮廓段的最佳对应映射,并将2个闭合轮廓的匹配看成是轮廓段匹配的特例。该算法能够较好地实现部分形状的匹配,但是算法复杂度较高。

为了在形状存在部分遮挡的情况下获得更精确的形状匹配结果,针对现有形状轮廓特征描述方法存在特征描述不完整、形状特征获取复杂度较高、抗遮挡能力差的问题,本文提出一种自包含弦角表示(Chord Angle Representation, CAR)的部分形状描述方法以及积分图匹配算法。首先基于轮廓点的空间位置关系构造每个轮廓点的弦角向量,根据反余弦公式计算角度值。接着将该向量变换到对数空间中获得更符合人类视觉特征的描述子。然后采用 L1 距离作为描述子的相似性度量,获得形状的匹配代价矩阵。最后通过积分图(Integral Image)算法对代价矩阵进行处理得到最终的部分形状相似度。

## 2 弦角轮廓特征表示

### 2.1 弦角描述子构造

图 1 为不同遮挡情况下大象的可视部分。

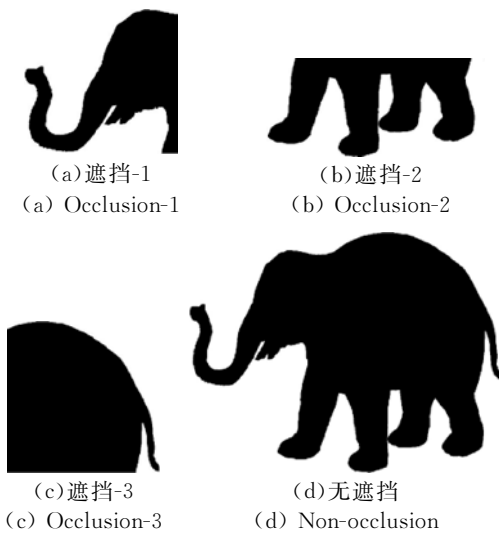


图 1 遮挡后目标的可视部分

Fig. 1 Visible parts under different occlusion conditions

当形状出现部分遮挡时,轮廓特征的不完整会给形状匹配带来较大难度。为了能够在轮廓段与模板形状轮廓之间找到部分映射关系,形状描述子应能同时表征开轮廓(open contour)和闭轮廓(closed contour)的特征,即该描述子应具有自包含(self-contained)属性;另外,该描述子要满足旋转、平移、缩放等形状变换的不变性。因此本文

基于轮廓点之间的弦角度提出一种能够同时描述开轮廓和闭轮廓的弦角 CAR 方法。该描述子能够对完整的轮廓以及断开轮廓段进行描述,具体过程如下:

首先对轮廓进行逆时针等间隔采样,获得  $n$  个轮廓点的序列,即:  $S = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , 其中  $p_i = (x_i, y_i)$  为二维平面坐标。考虑到在所有几何图形参数中,角度是不随着角的两条边的长度变化的参数,该参数自然满足缩放、旋转、平移等变换不变性,因此本文基于轮廓采样点之间的空间位置关系利用角度向量  $\{\theta_{ij}\}$ ,  $j = 1, \dots, n$  描述  $p_i$  点的特征。角度  $\theta_{ij}$  为弦向量  $\mathbf{p}_i \mathbf{p}_j$  和弦向量  $\mathbf{p}_{j+\Delta} \mathbf{p}_j$  之间的夹角( $\Delta$  为索引位移参数),其中  $p_i$  点和  $p_j$  为轮廓上(包括开轮廓和闭轮廓)的任意一点,而第三个点的选择方式依赖于前两个点的位置,并且要保证其总是落在轮廓上。为了达到上述目的,  $\theta_{ij}$  应分两种情况构造:如图 2(彩图见期刊电子版)中两条红色实线标记所示。

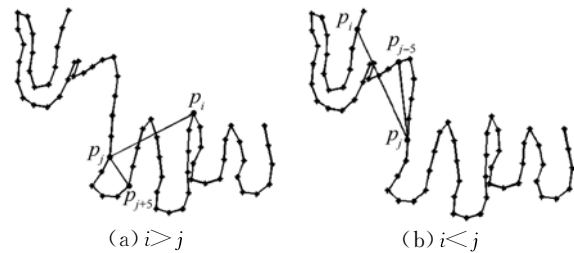


图 2  $p_i$  点的弦角描述( $\Delta=5$ )

Fig. 2 Chord angle representation of point  $p_i$  with  $\Delta=5$

另外为了保证点  $p_{j+\Delta}$  总是位于点  $p_i$  和  $p_j$  点之间,应限制第  $i$  个点和第  $j$  个点之间的编号差值。因此本文给出  $\theta_{ij}$  的计算公式:

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \angle(\mathbf{p}_i \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_{j+\Delta} \mathbf{p}_j), & i > j \\ \angle(\mathbf{p}_i \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_{j-\Delta} \mathbf{p}_j), & i < j \\ 0, & |i-j| \leq \Delta \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\theta_{ij}$  的范围为  $[0, \pi]$ , 图 3 为部分轮廓特征描述。从图 3 可以看出,轮廓上任何一部分都可以用该构造方法进行特征描述。其中任何一种情况的弦向量之间夹角,如  $\angle(\mathbf{p}_i \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_{j+\Delta} \mathbf{p}_j)$  均可采用反余弦公式计算:

$$\angle(\mathbf{p}_i \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_{j+\Delta} \mathbf{p}_j) = \left| \arccos \left( \frac{\mathbf{p}_i \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{p}_{j+\Delta} \mathbf{p}_j}{|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_j| * |\mathbf{p}_{j+\Delta} \mathbf{p}_j|} \right) \right|, \quad (2)$$

其中:“ $\cdot$ ”为向量积,“ $*$ ”为数量积。为了使该描

述子对  $p_i$  点附近的弦角度比远处的弦角度敏感,将  $\theta_{ij}$  转化到对数空间中表示,即:

$$\theta'_{ij} = \log(1 + \theta_{ij}). \quad (3)$$

$p_i$  点处完整的特征描述子为向量  $\{\theta'_{i1}, \theta'_{i2}, \dots, \theta'_{im}\}$ , 由于角度不随角的平移、旋转、缩放而变化,因此该描述子满足旋转、平移、缩放不变性。特别值得注意的是角度所具有的缩放不变的良好性质使 CAR 描述子无需进行归一化即能够具有形状缩放变换不变性,该性质是以线段长为基础的描述子所没有的,如 SC 描述子(SC 需要进行归一化才具有缩放不变性)。对轮廓上每个采样点构造弦角描述子,则可得到整个轮廓的  $n \times n$  维描述符矩阵  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \theta'_{11} & \dots & \theta'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta'_{m1} & \dots & \theta'_{mn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

CAR 描述矩阵提供了轮廓的全局和局部描述信息:靠近矩阵对角线处的像素为轮廓的局部信息,远离矩阵对角线处的像素为轮廓的全局信息。而  $\Delta$  的值可以控制矩阵对角区域的宽度,其值过大会导致轮廓的局部信息丢失;其值过小,又会使得轮廓的全局特征丢失。实验测试发现,  $\Delta$  取 3~5 时效果较好。

### 2.2 弦角描述的自包含属性

由上述弦角描述子的构造方式可知,该描述子并不要求轮廓是闭合的。而比较著名的 SC、IDSC 和 TAR 描述子则多用于描述闭合轮廓,当用于部分轮廓(未遮挡的形状部分)描述时,这些算法描述出来的轮廓段特征偏差较大。以 SC 为例,图 3 分别画出了闭合完整轮廓(a)和部分轮廓段图(b)的 SC 描述符矩阵的灰度图,如图 3(c)和图 3(d)所示,可以发现,轮廓段的 SC 特征描述符与完整的 SC 描述符特征相差较大,即闭合轮廓的 SC 描述符中并没有包含部分轮廓段的特征。而本文提出的 CAR 描述符对图 3(a)和图 3(b)的描述灰度图如图 3(e)、图 3(f)所示,其中,闭合轮廓的 CAR 描述符完全包含了轮廓段的 CAR 描述特征,即 CAR 描述子具有自包含属性,该属性是对轮廓进行部分匹配的前提。

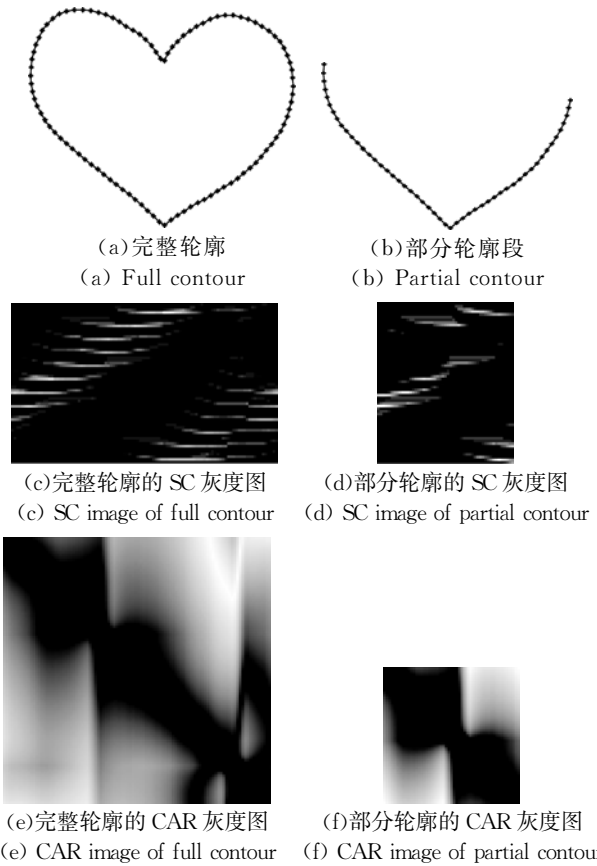


图 3 部分轮廓特征描述

Fig. 3 Partial contour description

为了进一步说明 CAR 描述子的自包含属性,本文以更复杂的大象轮廓为例进行说明,图 4 为两个轮廓  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{F}$ ,图 4(d)为图 4(b)的 CAR 描述灰度图,可以看出该灰度图与图 4(c)中虚线框标出的图像完全相同,即自包含,以集合的形式表示为:若  $\mathbf{F} \subseteq \mathbf{P}$  时,则有  $\mathbf{A}^{\mathbf{F}} \subseteq \mathbf{A}^{\mathbf{P}}$ 。

## 3 部分轮廓匹配

### 3.1 基于 CAR 矩阵的部分轮廓匹配

在获得部分轮廓的 CAR 描述子后,部分形状轮廓的匹配将直接转化为两个 CAR 描述符矩阵的匹配,即在完整形状的 CAR 矩阵中沿着对角线寻找到与轮廓段 CAR 矩阵较为相似的子矩阵,从而得到该轮廓段在完整轮廓中的匹配轮廓段。然而以不同的轮廓点作为描述起点时,得到的描述矩阵  $\mathbf{A}$  是不同的,因此不能简单地将两个矩阵进行直接相减作差,获得相似度。

$$A_k = \begin{bmatrix} \theta'_{kk} & \cdots & \theta'_{k1} & \cdots & \theta'_{k(k-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta'_{1k} & \cdots & \theta'_{11} & \cdots & \theta'_{1(k-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta'_{(k-1)k} & \cdots & \theta'_{(k-1)1} & \cdots & \theta'_{(k-1)(k-1)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式(5)为以轮廓上第  $k$  个点为起点的 CAR 矩阵  $A_k$ , 观察到该矩阵相当于是通过将矩阵  $A_1$  向下循环平移  $k-1$  行、再向右循环平移  $k-1$  列获得的, 即 CAR 矩阵与轮廓起点的位置之间具有简单的循环平移关系。CAR 的循环平移性质使得后续的部分形状轮廓的匹配变得更加简单。利用该性质, 在将长度为  $l$  的轮廓段与完整轮廓进行匹配时, 仅需要在完整轮廓的 CAR 矩阵中以不同起点沿着主对角线寻找  $l \times l$  的子块, 找到与轮廓段的 CAR 矩阵最相似子块, 存储该子块的起点索引和大小, 即得到匹配轮廓段。为了使该搜索匹配算法对轮廓的反射变换具有匹配不变性, 实际算法中将轮廓段进行正、反两个方向的采样, 来构造 CAR 描述矩阵, 而对完整轮廓只需构造一个方向的 CAR 矩阵, 再进行搜索匹配, 取两次搜索匹配中较小的 CAR 作为最终的轮廓段匹配结果。

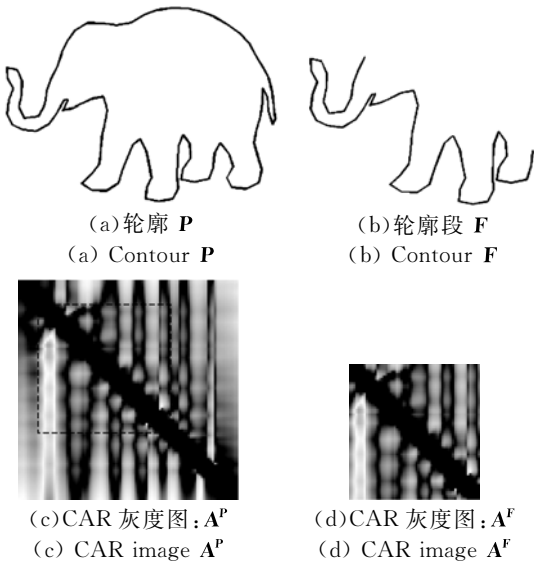


图 4 CAR 的自包含属性  
Fig. 4 Self-contained property of CAR

在图 4 中, 当闭合轮廓  $P$  被部分遮挡后, 可视的部分为轮廓段  $F$ 。为了识别该轮廓段, 将可视部分  $F$  与包含各种目标的完整的模板形状数

据库中的形状轮廓进行匹配。具体过程为: 设轮廓段序列为  $F = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ , 模板形状轮廓的采样点序列为  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , 对可视部分的匹配即要在模板轮廓  $Q$  中找到与轮廓段  $F$  的部分连续序列  $F(a, l) = \{p_a, \dots, p_{a+l-1}\}$  最相似的部分连续序列  $Q(b, l) = \{q_b, \dots, q_{b+l-1}\}$ , 其中  $a$  和  $b$  分别为  $F$  和  $Q$  的起点,  $l$  为部分连续序列的长度。本文定义一个 3 维张量  $T(a, b, l) = \text{sim}(F(a, l), Q(b, l))$  来表征不同起点不同长度轮廓段之间的相似度, 利用 L1 距离定义相似度  $\text{sim}$  为:

$$\text{sim}(F(a, l), Q(b, l)) = 1 - \frac{1}{l^2} \sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=0}^{l-1} |A^F(a+i, a+j) - A^Q(b+i, b+j)|. \quad (6)$$

### 3.2 利用积分图算法简化匹配复杂度

利用 CAR 描述矩阵  $A^F$  和  $A^Q$  进行匹配, 必须比较  $A^F$  和  $A^Q$  矩阵中所有可能子块的相似度, 以找到轮廓段的最佳部分匹配。然而这样穷举的搜索, 必然会大大增加算法的复杂度。为了提高相似度的计算效率, 本文将积分图<sup>[17-18]</sup>算法引入到相似度的计算过程中。对于两个  $n \times n$  的 CAR 矩阵  $A^P$  和  $A^Q$ , 利用积分图计算相似度的步骤为:

(1) 首先计算两个轮廓以不同点作为起点的差值 CAR 矩阵集合  $\{I^t, t=1, \dots, n\}$ , 其中  $I^t = A^P - A^Q(t; t+n-1, t; t+n-1)$ ;

(2) 接着采用递归的方式计算差值矩阵  $I^t$  的积分图矩阵集合  $\{SAT^t, t=1, \dots, n\}$ , 其中:

$$SAT^t(x, y) = SAT^t(x-1, y) + SAT^t(x, y-1) - SAT^t(x-1, y-1) + I^t(x, y). \quad (7)$$

积分图  $SAT$  中每个元素本质上存储的是  $I^t$  左上方的所有元素之和;

(3) 最后将  $n$  个  $SAT$  矩阵的对角线元素取出并存储, 从而获得相似度矩阵  $SIM$ :

$$SIM = \begin{bmatrix} SAT^1(1, 1) & \cdots & SAT^1(n, n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ SAT^n(1, 1) & \cdots & SAT^n(n, n) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

注意到,  $SIM$  矩阵中的元素是不同长度不同起点的轮廓段的相似度值, 即行索引为长度, 列索引为起点。若轮廓长度固定, 则最佳匹配轮廓的起点为该列中值最大的元素所对应的行索引。由于 CAR 描述子的自包含属性  $A^F \subseteq A^P$ , 因此搜索  $A^F$  在  $A^Q$  中的最相似子矩阵的过程可转化为在相

似度矩阵  $SIM$  中寻找行索引为  $m$  的矩阵元素序列中的最大元素的过程,该最大元素对应的行索引即为匹配轮廓的起点,接着从该点沿采样方向遍历  $m-1$  个点组成的轮廓段即为匹配的轮廓段。图 5(彩图见期刊电子版)为利用积分图得到的部分轮廓的匹配结果,其中蓝色的轮廓段为待匹配目标,红色的轮廓段为匹配结果,可以发现利用 CAR 描述子和提出的积分图匹配算法能够很好地实现部分轮廓的匹配识别,因此能够对存在遮挡的目标进行有效识别。算法复杂度方面,若采用穷举法寻找两个轮廓的最佳匹配算法的复杂度为  $O(2^{2l})$ ,而采用积分图方式寻找最佳匹配仅需要对矩阵进行简单的加减运算,其算法复杂度仅为  $O(l^2)$ ,大大降低了轮廓段匹配的时间。

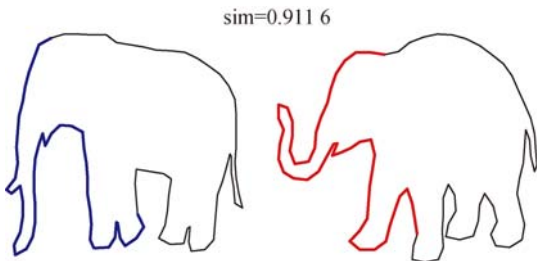


图 5 大象目标部分轮廓的匹配结果

Fig. 5 Matching results of partial contour for elephant target

### 4 实验与分析

本文算法的实验环境为:操作系统 Windows 7, 32 位,处理器: Pentium (R) Dual-Core CPU E6700,内存 4G,使用软件为 Matlab R2011b。选取两个形状识别领域常用的数据库: MPEG-7 CE-Shape-1 Part B 数据库<sup>[19]</sup>(以下简称 MPEG-7 数据库)和 Kimia216 数据库<sup>[20]</sup>作为识别对象。

MPEG-7 和 Kimia216 数据库主要用于测试基于相似度的算法的检索率,是目前衡量形状描述子可靠性的最为重要的基准数据库。MPEG-7 数据库由 70 类图像组成,每类包含 20 个形状,共 1 400 个形状。图 6 是部分 MPEG-7 形状二值图。Kimia216 数据库由 18 类图像组成,每类有 12 个形状,共 216 个形状,所有的形状图像如图 7 所示。可以发现这两个数据库中不同类图像的形状差异较大,但具有相似的部分轮廓,如 Kimia216 中 fork 形状、hammer 形状、key 形状等均具有相似度较高的部分轮廓,使得部分遮挡形状匹配具有较大挑战性。

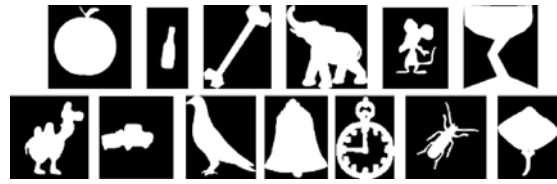


图 6 MPEG-7 数据库中的部分形状二值图

Fig. 6 Binary images of partial shapes in MPEG-7 database

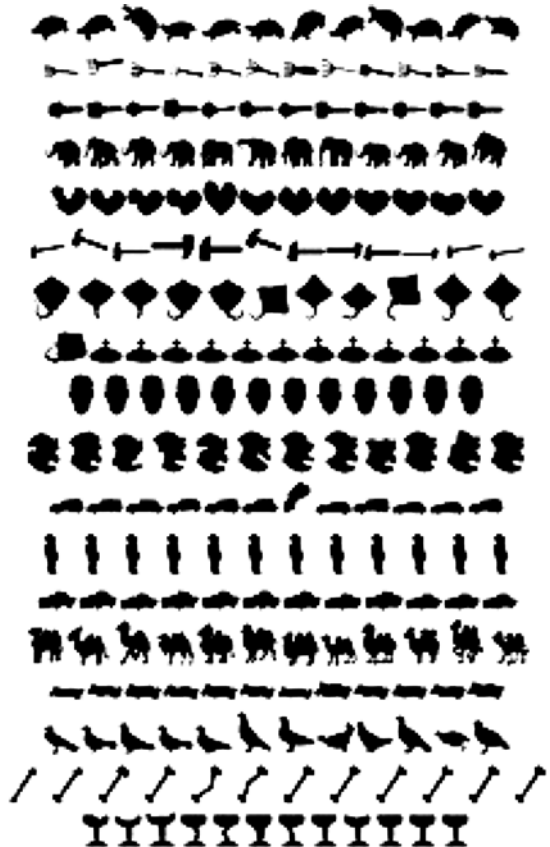


图 7 Kimia216 数据库

Fig. 7 Kimia216 database

#### 4.1 部分形状检索测试

为了测试本文的部分形状匹配算法的检索率,与参考文献[13]、[15]类似,在 MPEG-7 形状数据上进行部分形状轮廓匹配测试。参考文献[13]仅从该数据库的每类形状中选择 5 个形状(共 350 个形状)作为测试目标,而参考文献[15]在整个 1 400 个形状中进行测试。为了与上述两种算法进行对比,本文选取相同的形状目标并设置相同的轮廓段,同样在 1400 个形状上进行匹配测试,列出前 10 个最相似的结果,如表 1 所示。表 1 中第一列为索引轮廓段(蓝色粗实线),第 2~11 列为匹配结果(红色粗实线)以及对应的轮廓段相似度。

表 1 本文算法在 MPEG 数据库中 11 个形状轮廓的部分匹配结果  
Tab. 1 Partial matching results of proposed method on 11 examples from MPEG-7

索引轮廓段	前 10 个匹配轮廓段及对应的相似度									
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
										
	1	0.999 8	0.999 8	0.999 6	0.998 5	0.998 2	0.998 1	0.997 9	0.997 8	0.997 6
										
	1	0.999 7	0.999 2	0.999 2	0.998 9	0.998 8	0.998 7	0.997 9	0.996 6	0.996 5
										
	1	0.975 5	0.972 3	0.968 4	0.965 5	0.963 4	0.958 4	0.956 7	0.956 4	0.549 0
										
	1	0.999 8	0.999 3	0.998 6	0.998 4	0.998 2	0.998 2	0.997 9	0.997 3	0.997 3
										
	1	0.988 0	0.987 4	0.986 6	0.985 8	0.984 0	0.979 3	0.974 3	0.969 4	0.969 2
										
	1	0.998 7	0.987 4	0.998 6	0.998 2	0.998 1	0.998 1	0.998 1	0.998 1	0.998 0
										
	1	0.995 9	0.993 7	0.990 7	0.988 7	0.988 3	0.986 0	0.985 1	0.983 0	0.982 1
										
	1	0.999 4	0.999 3	0.999 2	0.999 2	0.999 0	0.998 9	0.998 7	0.998 7	0.998 4
										
	1	0.993 6	0.992 0	0.977 4	0.972 4	0.963 3	0.903 7	0.882 0	0.880 2	0.878 7
										
	1	0.999 1	0.999 0	0.998 8	0.998 8	0.998 8	0.998 7	0.998 7	0.998 7	0.998 0
										
	1	0.998 8	0.997 6	0.997 2	0.996 9	0.995 8	0.995 5	0.994 9	0.994 5	0.993 5

从表 1 中可以发现,本文提出的部分遮挡形状匹配算法能够较好地实现轮廓段的匹配。表 2 给出本文算法与其他两种算法的性能对比,可以看出本文算法在这 11 类形状中以相同的轮廓段进行检索,最后得到的轮廓段匹配结果均优于另

外两种算法检索的匹配结果。在 11 类轮廓段上的总检索率为 83.63%,比另外两种算法高。该实验表明本文提出的弦角描述子以及部分形状匹配算法具有较高的可靠性和优异性。

表 2 3 种算法的部分形状匹配结果比较

Tab. 2 Comparison of partial matching results of three methods

算法	Bone	Cellphone-1	Crown	Glass	Bird	Fish	Rat	Watch	Horse	Pencil	Cellphone-检索率%	
算法[13]	8	4	4	9	1	2	2	3	2	1	4	36.36
算法[15]	10	7	3	9	10	4	10	2	10	3	3	64.54
本文算法	10	10	6	10	10	6	10	6	10	4	10	83.63

4.2 完整形状检索测试

对于 MPEG-7 中完整形状的检索,本文在 CAR 描述子的基础上采用动态规划(Dynamic programming)算法<sup>[21-22]</sup>进行匹配。通常该数据库采用 Bull-eye 度量方法获得算法的检索率,即每个形状都作为待匹配形状,统计每个待匹配形状的 40 个最相似形状中与该形状是同类的数目,最后再将每个形状的正确匹配数目相加并除以 28 000(20 \* 1 400),即得到形状描述子的检索率,该检索率又称为 Bulleye Score。本文提出的 CAR 描述算法检索率为 87.45%,高于表 3 中其他算法,这得益于 CAR 描述子良好的特征描述能力。

表 3 部分重要算法在 MPEG-7 数据库上的检索率

Tab. 3 Retrieval precisions of some important algorithms in MPEG-7 database

算法	检索率/%
CSS <sup>[23]</sup>	75.44
SC <sup>[3]</sup>	76.51
Distance sets <sup>[24]</sup>	78.38
MASH <sup>[7]</sup>	79.44
Gen. Model <sup>[25]</sup>	80.03
IDSC+DP <sup>[4]</sup>	85.40
CRSC <sup>[5]</sup>	86.65
TAR <sup>[6]</sup>	87.23
CAR	87.45

4.3 不同遮挡率下的目标识别测试

为了测试本文算法对部分遮挡的鲁棒性,本文对 Kimia216 形状数据库中的形状设置不同程度的遮挡(遮挡率分别为 0%~70%),从而构成 8 个新的不同遮挡率的目标数据库,图 8 为其中 camel 形状的不同程度的遮挡图。

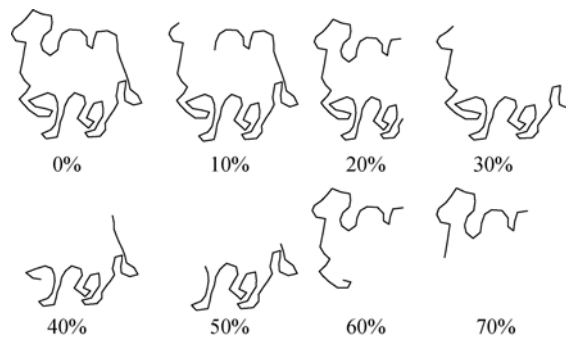


图 8 不同遮挡率的形状目标

Fig. 8 Shape targets under different levels of occlusion

对于某一遮挡率的数据库的检索方法类似 Bull-eye:以该数据库中的每一个图像作为索引图,统计每个索引图的 24 个最相似图像中与该图像是同类的数目,最后再将每个遮挡目标的匹配正确数目相加并除以 2 592(12 \* 216),即得到该遮挡率下的 Bulleye Score。为了保证识别的准确性,避免发生偶然误差,每个目标都被随机遮挡测试 20 次,取平均值作为该目标的最终 Bulleye Score。将本文方法与其它算法作比较,其检索率见图 9。从图 9 中可以看出,本文提出的方法抗遮挡能力最佳,因为只有该方法具有自包含属性,显著提高了识别的可靠度。

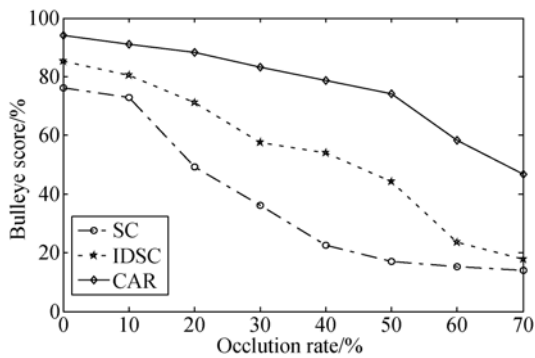


图 9 不同遮挡率下的检索率曲线

Fig. 9 Retrieval rate curves under different levels of occlusion

## 5 结 论

为了有效解决形状检索中轮廓存在部分遮挡的问题,以提高形状匹配的检索率和算法运算效

率,本文提出了基于弦角表示的形状描述算法和部分形状匹配算法。弦角描述算法利用轮廓点的空间位置关系,定义轮廓点的弦角描述子来描述轮廓点在形状识别中的贡献,该描述子不仅具有各种形状变换不变性,而且具有自包含属性,该自包含属性使得该描述子能够较好地描述开轮廓,是部分形状匹配的基础。利用积分图对相似度矩阵进行匹配,大大降低了匹配复杂度,提升了算法的计算效率。在 MPEG-7、Kimia216 形状数据库上的形状部分遮挡检索测试表明,本文提出的算法即使在轮廓被遮挡的情况下,仍能有效地匹配出目标,部分匹配的检索率达到 83.63%,提高了 19.09%,高于部分其它重要算法。

后续研究将探索如何有效地将本文的弦角特征描述算法及部分遮挡匹配算法应用到基于轮廓的自然图像目标检测中。

## 参考文献:

- [1] 史思琦,石光明,李甫. 基于轮廓特征多层描述和评价的部分遮挡目标匹配[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2804-2811.  
SHI S Q, SHI G M, LI F. Partially occluded object matching via multi-level description and evaluation of contour features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2804-2811. (in Chinese)
- [2] 周瑜,刘俊涛,白翔. 形状匹配方法研究与展望[J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 889-910.  
ZHOU Y, LIU J T, BAI X. Research and perspective on shape matching [J]. *Acta Automatic Sinica*, 2012, 38(6): 889-910. (in Chinese)
- [3] BELONGIE S, MALIK J, PUZICHA J. Shape matching and object recognition using shape contexts [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(4): 509-522.
- [4] LING H, JACOBS D W. Shape classification using the inner-distance [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(2): 286-299.
- [5] 郑丹晨,韩敏. 基于改进典型形状上下文特征的形状识别方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(2): 215-220  
ZHENG D CH, HAN M. Improved shape recognition method based on representative shape context [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(2): 215-220. (in Chinese)
- [6] ALAJLAN N, EL RUBE I, KAMEL M S, *et al.*. Shape retrieval using triangle-area representation and dynamic space warping [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(7): 1911-1920.
- [7] 王斌. 一种基于多尺度拱高形状描述的图像检索方法[J]. 电子学报, 2013, 9: 1821-1825.  
WANG B. Image retrieval using multi-scale arch height shape description [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 9: 1821-1825. (in Chinese)
- [8] MA T, LATECKI L J. From partial shape matching through local deformation to robust global shape similarity for object detection [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011: 1441-1448.
- [9] YARLAGADDA P, OMMER B. From meaningful contours to discriminative object shape [C]. *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision*, 2012: 766-779.
- [10] SABER E, XU Y, TEKALP A M. Partial shape recognition by sub-matrix matching for partial matching guided image labeling [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(10): 1560-1573.
- [11] CAO Y, ZHANG Z, CZOGIEL I, *et al.*. 2D non-rigid partial shape matching using MCMC and contour subdivision [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011: 2345-2352.

- [12] CUI M, FEMIANI J, HU J, *et al.*. Curve matching for open 2D curves[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(1): 1-10.
- [13] LATECKI L J, MEGALOOIKONOMOU V, WANG Q, *et al.*. An elastic partial shape matching technique [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40 (11): 3069-3080.
- [14] LATECKI L J, MEGALOOIKONOMOU V, WANG Q, *et al.*. Partial elastic matching of time series [C]. *Fifth IEEE International Conference on Data Mining*, 2005: 4.
- [15] MICHEL D, OIKONOMIDIS I, ARGYROS A. Scale invariant and deformation tolerant partial shape matching [J]. *Image and Vision Computing*, 2011, 29(7): 459-469.
- [16] SAKOE H, CHIBA S. A dynamic programming approach to continuous speech recognition [C]. *Proceedings of the Seventh International Congress on Acoustics.*, 1971, 3: 65-69.
- [17] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, (1)1: I-511-I-518.
- [18] 林义闯, 吕乃光, 姜小平, 等. 用于弱纹理场景三维重建的机器人视觉系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 540-549.
- LIN Y M, LÜ N G, L X P, *et al.*. Robot vision system for 3D reconstruction in low texture environment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 540-549. (in Chinese)
- [19] LATECKI L J, LAKAMPER R, ECKHARDT T. Shape descriptors for non-rigid shapes with a single closed contour [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000, 1: 424-429.
- [20] 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.
- [21] FELZENSZWALB P F, ZABIH R. Dynamic programming and graph algorithms in computer vision [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(4): 721-740.
- [22] 郭永彩, 魏朋玉, 高潮. 采用多级动态规划实现立体匹配[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1745-1751.
- GUO Y C, WEI P Y, GAO C. Stereo correspondence using multi-stage dynamic programming[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1745-1751. (in Chinese)
- [23] MOKHTARIAN F, BOBER M. *Curvature Scale Space Representation: Theory, Applications, and MPEG-7 Standardization* [M]. Springer Publishing Company, Incorporated, 2011.
- [24] GRIGORESCU C, PETKOV N. Distance sets for shape filters and shape recognition [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(10): 1274-1286.
- [25] TU Z, YUILLE A L. Shape matching and recognition-using generative models and informative features [C]. *Proceedings of the 8th European Conference on Computer Vision*, 2004: 195-209.

## 作者简介:



黄伟国(1981—),男,安徽休宁人,副教授,2004年、2010年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事数字信号处理、设备状态监测与故障诊断方面的研究。E-mail: wghuang@suda.edu.cn

## 导师简介:



朱忠奎(1974—),男,山东梁山人,博士,教授,2005年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事机械设备状态监测与故障诊断方面的研究。E-mail: zhuzhongkui@suda.edu.cn



杨剑宇(1984—),男,天津人,博士,副教授,2006年于中国科学技术大学获得学士学位,2012年于香港城市大学获得博士学位,主要从事计算机视觉与模式识别方面的研究。E-mail: jyyang@suda.edu.cn