

# Freeman 链码描述的曲线匹配方法

余 博, 郭 雷, 赵天云, 钱晓亮

YU Bo, GUO Lei, ZHAO Tianyun, QIAN Xiaoliang

西北工业大学 自动化学院, 西安 710129

Department of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

YU Bo, GUO Lei, ZHAO Tianyun, et al. Curve matching method for FCC representation. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(4): 5-8.

**Abstract:** According to the shortage of common curve matching algorithms which can't process rotation and scaling, a curve matching method of Freeman Chain Code (FCC) is proposed. An inflection point detection algorithm based on the accumulative of FCC and chain code difference is designed. Calculating the start point and the direction of the curves, the inflection point sequence which doesn't change with rotation and scaling is obtained. The curves are matched by the length and the angle of the inflection point sequence. This method isn't suffered with rotation and scaling, it has small computation and is easy to realize. The simulation experimental results show that the algorithm is effective and reasonable.

**Key words:** Freeman chain code; accumulative of difference; chain code difference; curve matching

**摘 要:** 针对普通曲线匹配算法不能处理旋转和缩放曲线的不足, 提出 Freeman 链码描述的曲线匹配方法。该方法为 Freeman 链码设计一种基于差别累加值及链码差的拐角点快速检测算法, 能够快速地检测出曲线拐角点; 通过计算曲线起点和曲线方向, 得到不随曲线旋转、平移和尺度变化的标准拐角点序列; 根据拐角点的长度序列和夹角序列进行相似判断实现曲线匹配。Freeman 链码描述的曲线匹配方法不受曲线旋转和缩放的影响, 计算量小, 易于实现, 仿真实验证明该算法合理有效。

**关键词:** Freeman 链码; 差别累加值; 链码差; 曲线匹配

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2012.04.002 文章编号: 1002-8331(2012)04-0005-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391.4

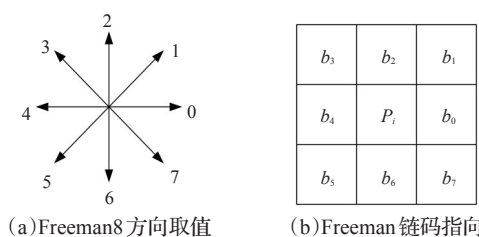
## 1 引言

在模式识别和计算机视觉中, 曲线匹配是其中一个重要的领域, 利用曲线匹配可以实现形状匹配和目标识别等<sup>[1]</sup>。目前, 有文章提出用 Fourier 描述符进行曲线匹配<sup>[2]</sup>, 该方法以 Fourier 变换系数作为曲线的特征矢量, 通过比较曲线特征矢量判断轮廓曲线之间相似性, 实现曲线匹配, 这种方法简单有效但是对存在旋转的曲线无能为力; 也有文章提出用多边形线段逼近曲线的方法进行匹配<sup>[3]</sup>, 该方法将多边形本质参数连接点作为匹配的特征集, 使得多边形匹配变为一维字符进行匹配, 这种方法根据角度或者长度的排序进行匹配, 未考虑图像几何特征; 也有利用轮廓几何信息进行匹配, 文献[4]通过计算特征段之间曲率的 Hausdorff 距离实现曲线匹配, 但其拐角点和曲率计算较为复杂, 同样也不能处理存在旋转缩放的图像。针对曲线匹配算法的上述不足, 本文提出一种基于 Freeman 链码描述的曲线匹配算法, 该算法首先利用曲线 Freeman 链码的差别累加值和链码差检测曲线拐角点; 然后计算曲线起点和曲线方向, 得到一个不随曲线旋转、平移和尺度变化而变化的标准拐角点序列; 最后根据标准拐角点序列计算长度序列和夹角序列, 对长度序列和夹角序列进行相似判断完成曲线匹配。这种算法计算简单, 易于实现, 同时还具有平移、旋转和尺度不变的特征, 是一种有效实用的曲线匹配方法。

## 2 Freeman 链码

数字化二值轮廓曲线可以用八方向 Freeman 链码表示<sup>[5-6]</sup>,

一条曲线数字化后可以形成  $n$  条链, 每条链指向八个方向中的一个, 即  $c(i) \in \{0, 1, \dots, 7\}$ , 如图 1(a), 其中  $i$  为像素索引值,  $c(i)$  表示由像素  $(i)$  指向像素  $(i+1)$  的链码方向, 最终  $n$  条链的曲线链码表示为  $\{c(i)\}^n$ 。如果当前的像素是  $p(i)$ ,  $b_7$  是曲线上的下一个像素, 则  $p(i)$  值为 7, 如图 1(b) 所示。



(a) Freeman 8 方向取值 (b) Freeman 链码指向

图 1 Freeman 链码方向值和链码指向

## 3 拐角点检测

曲线的拐角点是指曲率变化足够大的点, 因此识别拐角点不可避免地要计算曲线的曲率<sup>[6]</sup>。常规方法采用计算各点曲率来判断拐角点, 对一幅图像, 由于轮廓上的点很多会导致计算量很大, 不易实现。文献[7-8]采取去除掉一些非拐点, 仅对可疑点进行曲率计算从而减少计算量, 但是这种方法所能排除的非拐点极其有限, 同时仍然需要通过计算曲率排除可疑点。本文以 Freeman 链码描述曲线为基础提出一种拐角点检测方法, 相对于文献[7]的方法, 该方法可疑点的数量能够减少一个数量级, 同时利用差分码代替曲率的计算, 避免反正切

基金项目: 航空科学基金(No.20080153002)。

作者简介: 余博(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向: 图像处理、模式识别、目标跟踪等; 郭雷(1956—), 男, 教授, 博士生导师; 赵天云(1970—), 男, 博士, 讲师; 钱晓亮(1982—), 男, 博士生。E-mail: boboy163@163.com

收稿日期: 2011-05-31; 修回日期: 2011-10-08

运算,进一步降低运算复杂度。

### 3.1 拐角点、非拐角点和可疑点分类

为了排除部分非拐角点,确定部分拐角点,定义差别累加值如下:

$$d(i) = d_1(i) + d_2(i) \quad (1)$$

其中

$$d_1(i) = \begin{cases} |c(i+1) - c(i)|, |c(i+1) - c(i)| < 4 \\ 8 - |c(i+1) - c(i)|, |c(i+1) - c(i)| > 4 \\ 4, |c(i+1) - c(i)| = 4 \end{cases} \quad (2)$$

$$d_2(i) = \begin{cases} |c(i+2) - c(i-1)|, |c(i+2) - c(i-1)| < 4 \\ 8 - |c(i+2) - c(i-1)|, |c(i+2) - c(i-1)| > 4 \\ 4, |c(i+2) - c(i-1)| = 4 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $i$  为曲线像素索引值,  $d_1(i)$  为差别值,  $d_2(i)$  为二次差别值;得到  $d(i)$  后,利用下面的准则将曲线上的点分为三类:

- (1) 如果  $d(i) > 3$ , 则认为是拐角点。
- (2) 如果  $d(i) < 3$ , 则认为是非拐角点。
- (3) 如果  $d(i) = 3$ , 此时认为是可疑点。

第一类为确定点,即认为一定是拐角点;第二类非拐角点,即一定不是拐角点;第三类可疑点,即不能确定是否为拐角点,需要进行进一步判断。经过上述准则判断后仅需要对第三类点进行判断即可得到全部拐角点。

### 3.2 链码差

本文利用三点链码差代替曲率对第三类点进行判断,这样可以避免进行浮点运算和反正切运算,减少运算量。要计算三点链码差首先需要计算Freeman链码相对链码、绝对链码以及三点链码和<sup>[9]</sup>。

曲线上每一个点都有前一点指向此点的链码  $c1$  和此点指向后一点的链码  $c2$ , 相对链码是指  $c2$  和  $c1$  的相互关系, 当其方向一致时相对链码为0, 如果  $c2$  相对于  $c1$  作顺时针旋转时, 相对链码按偏角的大小取值  $-1 \sim -3$ , 分别对应顺时针旋转  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$ ; 作逆时针旋转时, 相对链码取值  $1 \sim 4$ , 分别对应逆时针旋转  $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $180^\circ$ 。绝对链码是指从曲线起始点开始相对链码的累加和, 设定起始点的绝对链码为0, 沿着边界移动一周回到起点, 其绝对链码值增加8。引入了绝对链码的概念后, 计算链码和时就不需要考虑0和7交界处的链码取值问题。

如果  $c(i)$  和  $c(i-1)$  分别为当前点  $i$  与前一点  $i-1$  的链码,  $R(i)$  为它们的相对链码,  $A(i)$  和  $A(i-1)$  为当前点和前一点的绝对链码, 则绝对链码的计算过程如下。

$$A(0) = 0 \quad (4)$$

$$R(i) = [c(i) - c(i-1) + 8] \text{Mod} 8 \quad (5)$$

$$\text{当 } R(i) < 4 \text{ 时, } R(i) = R(i); \text{ 当 } R(i) > 4 \text{ 时, } R(i) = R(i) - 8 \quad (6)$$

$$A(i) = A(i-1) + R(i) \quad (7)$$

三点链码和为当前点和前两点的绝对链码之和, 即:

$$\text{Sum}(i) = A(i) + A(i-1) + A(i-2) \quad (8)$$

对于闭合曲线, 计算起始两点时, 前面点的值应该绕到尾部取值, 此时需要考虑绝对链码的调整值8, 即:

$$\text{Sum}(0) = A(0) + A(N-1) + A(N-2) - 16 \quad (9)$$

$$\text{Sum}(1) = A(1) + A(0) + A(N-1) - 8 \quad (10)$$

得到  $\text{Sum}(0)$  后, 再将所有的  $\text{Sum}(i)$  值减去原  $\text{Sum}(0)$  值, 即可得到以0开始的三点链码和序列, 三点链码差是指离开此

点与进入此点的三点链码和之差, 三点链码差计算如下:

$$\text{Diff}(i) = \text{Sum}(i+3) - \text{Sum}(i) \quad (11)$$

### 3.3 可疑点的判断

利用三点链码差对可疑点进行进一步判断, 首先设置一个阈值  $T$ , 由于是三点链码差, 所以其差值为1代表此点曲率差为  $15^\circ$ , 如果三点链码差值为3则认为曲率差为  $45^\circ$ , 如果三点链码差为  $-3$ , 则认为曲率差为  $-45^\circ$ , 此处正负表示了拐角点的凹凸性。在进行可疑点判断时, 阈值根据对拐角点判断的严厉程度取不同的值, 一般取  $3 \sim 6$  较为合适, 小于阈值的点认为是拐角点, 否则为非拐角点。最后将准则判断出的确定点和从可疑点判断出的真拐角点进行合并, 即可得到曲线的全部拐角点。

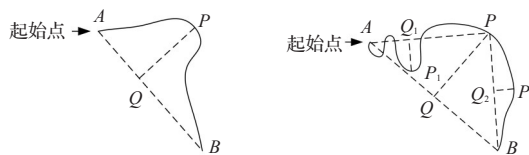
由于Freeman链码本身包含顺序特征, 因此本方法检测得到的拐角点也包含着顺序特征, 按照Freeman链码编码走向的不同, 拐角点排列顺序也不同, 如Freeman链码编码是采用顺时针方向进行, 得到的拐角点序列也是按照曲线顺时针方向排列, 反之一样, 这样带有顺序特征的序列信息为后面的曲线匹配提供了便利。

## 4 曲线匹配

### 4.1 计算曲线起始点和曲线方向

由于采用Freeman链码描述曲线, 因此计算点和直线之间的距离非常容易<sup>[5]</sup>, 本文利用点到直线距离判断曲线起始点和曲线方向, 所述曲线方向是以Freeman链码编码方向作为参考。

对于开曲线, 假设点  $P$  是曲线  $\overline{AB}$  上距离线段  $AB$  最远的点, 本文定义该距离为曲线到直线距离。点  $Q$  为点  $P$  在  $AB$  上的投影点, 文中简称该点为投影点, 将距离投影点  $Q$  较近的端点作为曲线起始点, 如图2(a)所示; 如果点  $Q$  距离点  $A$  和点  $B$  有相同的距离, 如图2(b)所示, 线段  $AQ$  与  $BQ$  长度相等, 此时分别计算曲线  $\overline{AP}$  到线段  $AP$  的距离  $Q_1P_1$  以及曲线  $\overline{BP}$  到线段  $BP$  的距离  $Q_2P_2$ , 取  $Q_1P_1$  与  $Q_2P_2$  中距离较大的点作为曲线起始点。曲线的方向为从曲线起点至曲线另一个端点的方向。



(a) 普通开曲线起始点计算 (b) 距离相同开曲线起始点计算

图2 开曲线起始点和曲线方向计算

对于闭曲线, 首先计算拐角点序列中每两个拐角点之间的线段距离, 将距离最大的两个拐角点记为  $A$ 、 $B$ , 连接  $A$ 、 $B$ , 此时, 线段  $AB$  将闭曲线分割成为两条开曲线, 按照4.1节计算方法分别计算闭曲线分割得到的两条开曲线的曲线到线段距离以及曲线方向, 最后将曲线到线段距离较大的开曲线作为该闭曲线起始点和方向的计算曲线, 完成闭曲线的起始点和方向的确定。对于存在多条长轴  $AB$  和  $A'B'$  的闭曲线, 计算各开曲线分别到其分割线段的距离, 将具有最长距离的分割线段作为长轴, 如图3, 由于点到线段的距离  $P'Q' > PQ$ , 所以认为分割线段  $A'B'$  是长轴, 继续进行闭曲线的起始点和方向计算即可得到有多条长轴闭曲线的起始点和方向<sup>[10]</sup>。

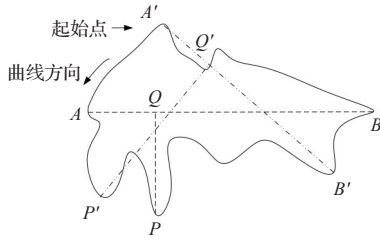


图3 闭曲线起始点和曲线方向计算

按照Freeman链码在编码方向不同,检测得到拐角点序列也是按照顺时针或者逆时针方向排列。得到曲线起始点和曲线方向后,首先将拐角点序列的起点和终点首尾相连,按照计算得到的曲线起始点和曲线方向将拐角点序列进行整理,可以得到一个标准的拐角点序列。对于普通曲线,其起始点和曲线的方向是唯一的,因此得到的拐角点序列也是唯一的,称其为该曲线的标准化拐角点序列。本文算法不适用一些特殊形状的曲线,如具有特殊对称结构,本文算法检测可能出现多个起点和方向的曲线,这类曲线需要根据其特殊的形状设计针对性的匹配算法,同时还要求检测出的拐角点数量要大于3个,否则由于拐角点数目过少,所含信息量过少导致本文算法不能匹配,因此在下面讨论和实验中都是以满足本文算法条件为基础。

## 4.2 计算长度序列和夹角序列

得到标准化拐角点序列后,计算曲线拐角点间的长度序列和夹角序列。

拐角点间的长度序列用  $\{d_i\}$  表示,则有:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (12)$$

$d_i$  为点  $g_i$  到点  $g_{i-1}$  的欧式距离,  $(x_i, y_i)$  拐角点  $g_i$  的位置坐标,  $(x_{i-1}, y_{i-1})$  拐角点  $g_{i-1}$  的位置坐标,  $g_i$  和  $g_{i-1}$  为重新排序后的拐角点序列  $G=(g_1, g_2, \dots, g_n)$  中的点,  $i=(2, 3, \dots, n)$ 。

定义重新排序后的拐角点序列为  $K=(g_1, g_2, \dots, g_n)$ , 对应的相邻两点连接的线段长度序列为  $\{d_i\}$ , 依次计算  $g_1$  和  $g_2$  的夹角  $\theta_1$ , 计算  $g_2$  和  $g_3$  的夹角  $\theta_2$ , ..., 直到计算到  $g_{n-1}$  和  $g_n$  的夹角  $\theta_{n-1}$ 。将夹角  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}$  按顺序和拐角点序列对应保存。

其中  $d_{i-1}$  和  $d_i$  分别为拐角点间长度序列  $\{d_i\}$  的第  $i-1$  和第  $i$  点值;  $z_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_{i-1})^2 + (y_{i+1} - y_{i-1})^2}$  为点  $g_{i-1}$  到点  $g_{i+1}$  的欧式距离;  $i=(2, 3, \dots, n-1)$ ; 则有:

$$z_i^2 = d_{i+1}^2 + d_i^2 - 2d_{i+1}d_i \cos \theta_i \quad (13)$$

变换后有:

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{d_{i+1}^2 + d_i^2 - z_i^2}{2d_{i+1}d_i}\right) \quad (14)$$

$\{\theta_i\}$  即为拐角点间的夹角序列。

## 4.3 曲线匹配

对于曲线  $m$  和曲线  $l$  的角度差异度按式(15)计算。

$$T = \sum_{i=2}^n (\theta_{mi} - \theta_{li}) \quad (15)$$

式中  $T$  为曲线角度差异值;  $\theta_{mi}$  为曲线  $m$  夹角序列  $\{\theta_{mi}\}$  中的第  $i$  个角度值;  $\theta_{li}$  为曲线  $l$  夹角序列  $\{\theta_{li}\}$  中的第  $i$  个角度值。

为了防止有的曲线拐角点较少而造成误匹配,对曲线的长度序列也进行差异度衡量:

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \frac{D_{mi}}{D_{li}} - \frac{D_m}{D_l} \right) \quad (16)$$

式(16)中  $S$  为曲线长度差异值;  $D_m = \sum_{i=2}^n d_{mi}$  为曲线  $m$  的

长度序列和;  $D_l = \sum_{i=2}^n d_{li}$  为曲线  $l$  的长度序列和;  $d_{mi}$  为曲线  $m$  长度序列  $\{d_{mi}\}$  中第  $i$  点值;  $d_{li}$  为曲线  $l$  长度序列  $\{d_{li}\}$  中第  $i$  点值。

对于存在尺度变换的曲线,其各个拐角点间曲线长度的变换比例是一致的,上面长度相似性的计算方法计算的是一个比值的差值,因此对于存在尺度变换的曲线,上面的长度相似性判断也适用。

最后设定角度阈值  $T_{\text{thre}}$  和长度阈值  $S_{\text{thre}}$ , 一般  $T_{\text{thre}}$  取值为 5~20,  $S_{\text{thre}}$  取值为 3~15, 如果  $T < T_{\text{thre}}$ ,  $S < S_{\text{thre}}$  认为两个曲线相匹配, 否则认为不匹配。

## 5 仿真实验

为了验证本文方法的有效性,利用Matlab进行仿真实验。图4是阈值  $T=4$  时拐角点检测实验结果,实验中文献[7]算法与本文算法进行对比,图4(a)和图4(e)分别为文献[7]和本文算法得到的确定点,由于文献[7]将大量确定为拐角点的点作为可疑点进行判断,所以其确定点较少;图4(b)和图4(f)分别为文献[7]和本文算法处理得到的可疑点,实验结果可知本文算法得到的可疑点数目较文献[7]少,需要进行进一步判断的

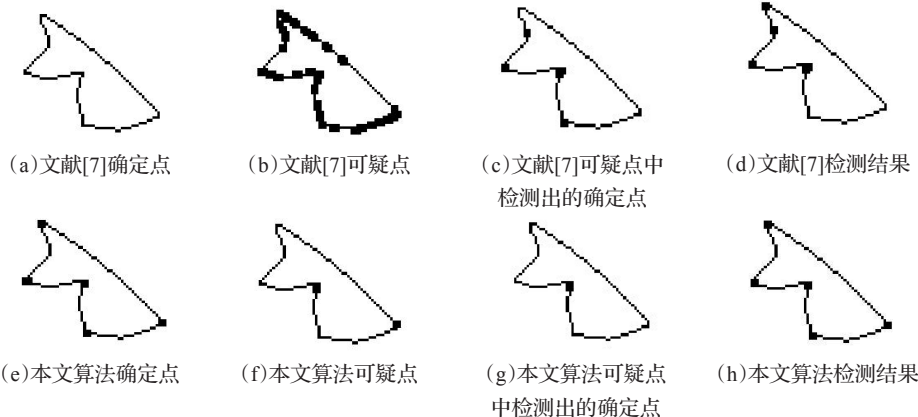


图4 拐角点检测对比实验



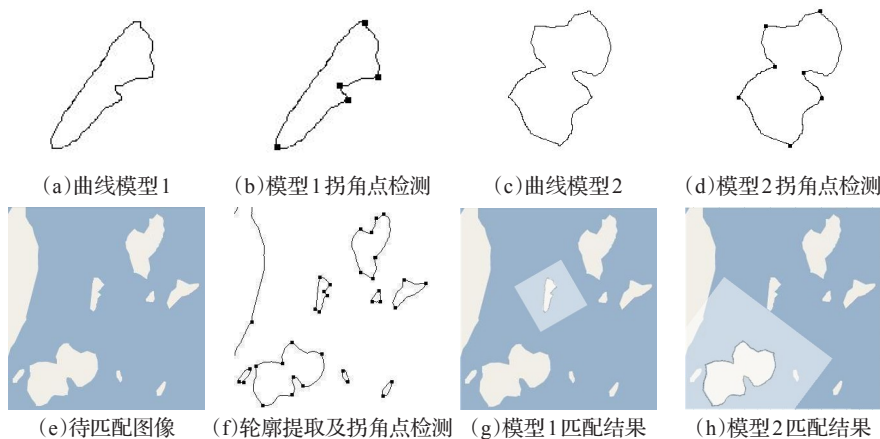


图5 曲线匹配实验

点少,因此计算量小;图4(c)和图4(g)分别为文献[7]和本文算法从可疑点中检测出的拐角点,由于本文算法可疑点较少,因此从可疑点中仅检测出一个确定点,而文献[7]由于将部分确定点和大量的非拐角点作为可疑点判断,因此检测出的确定点较多;图4(d)和图4(h)分别为文献[7]和本文算法最终拐角点检测结果,从检测结果看文献[7]的方法在检测出虚假拐角点时仍然有真正的拐角点未检测出,这样使得阈值设置较为困难,本方法能够克服上述不足,准确地检测出全部拐角点。

图5为曲线匹配仿真实验,已知两个不同形状的岛屿轮廓曲线模型如图5(a)和图5(b)所示,需要将两个岛屿模型分别与图5(e)的岛屿地图进行匹配,图5(b)为本文方法对图5(a)检测出拐角点,图5(d)为本文方法对图5(c)检测出拐角点,图中检测出的拐角点数目大于3个,因此可以利用本文算法进行匹配运算,图5(d)为岛屿地图轮廓曲线检测结果,图5(f)显示了岛屿轮廓曲线中检测出的拐角点,图5(g)为模型1匹配结果,图5(h)为模型2匹配结果,在匹配运算中  $T_{\text{thre}}=10$ ,  $S_{\text{thre}}=5$ , 两个模型的匹配结果证明本文算法有效。由于本文算法利用曲线的特征点——拐角点进行匹配,因此不受曲线旋转和尺度变换影响,如果设定合理的角度阈值和长度阈值,对于存在幅度较小的仿射变换曲线本文方法也能进行正确匹配。

## 6 结论

本文对计算机视觉的一个重要领域——曲线匹配进行了讨论,并且提出一种Freeman链码描述的曲线匹配方法,本文方法有如下优点:(1)计算量小,通过差别累加值能够排除大量的非拐角点和确定点,仅仅对部分可疑点进行曲率的判断;(2)计算简单,链码差仅仅需要进行加减法运算,采用链码差

来代替曲率计算,避免了计算曲率这种需要进行浮点和反正切的运算;(3)通过拐角点对曲线进行描述,使其具有缩放、旋转不变性;(4)有利于工程实现。本文方法能够有效地利用Freeman检测出的拐角点进行曲线匹配,计算量小易于实现,并且可以对发生比例、缩放和旋转变化的曲线进行匹配。

## 参考文献:

- [1] Kindratenko V V. On using functions to describe the shape[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2003, 18(3): 225-245.
- [2] 周术斌. 基于多尺度Fourier描述符的二维轮廓曲线匹配[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2009, 38(2): 216-220.
- [3] 茹少峰, 杜建丽, 耿国华. 基于轮廓线匹配的2D碎片物体复原方法[J]. 西北大学学报:自然科学版, 2004, 34(3): 275-293.
- [4] 钱文光, 林小竹, 赵国庆. 二维轮廓曲线匹配算法研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2007, 15(3): 8-12.
- [5] Freeman H. Computer processing of line drawing images[J]. ACM Computing Surveys, 1974, 6(1): 57-97.
- [6] Hermilo S C, Ernesto B, Ramon M R D. Efficiency of chain codes to represent binary objects[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(6): 1660-1674.
- [7] 张小莉, 王敏, 黄心汗. 一种有效的基Freeman链码的拐角检测法[J]. 电子测量与仪器学报, 1999, 13(2): 14-19.
- [8] 汪剑, 皮佑国, 刘明友. 基于Freeman链码的汉字图像轮廓曲线拐角点检测方法[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(1): 88-92.
- [9] 谭建豪, 章兢. 基于链码差的边界凹凸性判别[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(5): 769-772.
- [10] 赵宇, 陈雁秋. 曲线描述的一种方法: 夹角链码[J]. 软件学报, 2004, 15(2): 300-307.