

基于 NRLCTI 码和匹配子曲线的平面曲线识别

张桂梅¹⁾ 高满屯²⁾ 曾接贤³⁾

¹⁾(南昌航空大学航空与机械工程学院,南昌 330063) ²⁾(西北工业大学机电学院,西安 710072)

³⁾(南昌航空大学计算机学院,南昌 330063)

摘要 为了更简单、有效地进行平面曲线的识别,首次给出了一种新的 NRLCTI 码的定义,并设计了一种新的算法用来匹配目标和模型轮廓曲线上的每段子曲线,同时还提出了一种从单幅图形和图像来识别平面曲线的方法。该识别方法首先利用 NRLCTI 码初步匹配了目标和模型轮廓曲线上的关键特征点,从而解决了用穷尽搜索法寻求特征点所对应的高费率和低效率的问题;然后在 NRLCTI 码匹配的前提下,再通过匹配目标和模型轮廓曲线上的每小段,从而解决了用多边形或圆锥曲线来近似曲线的不准确性问题。实验结果表明,该算法简单、有效。

关键词 平面曲线 匹配 关键特征点 仿射变换矩阵

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)02-0353-06

Recognizing Planar Curve Based on NRLCTI and Match Sub-curve

ZHANG Gui-mei¹⁾, GAO Man-tun²⁾, ZENG Jie-xian³⁾

¹⁾(College of Aeronautic and Mechanical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

²⁾(Institute of Mechanical and Electrical, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

³⁾(College of Computing, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract In this paper, the definition of NRLCTI (normalized run length code of conner and tangent and inflexion points) of a planar curve is given firstly. Then a new algorithm is designed to match sub-curves. Last, a novel approach is presented to recognize curves from a line drawing or an image. The proposed method has two merits. One is that the method matches feature points both on an object and models preliminarily based on NRLCTI, which can cope with the low efficiency and high cost problem for reaching feature points corresponding. The other is that the method partitions the curve into many sub-curves based on the landmarks, then matches and recognizes them. The low accuracy for curve approximated by polygon or conics curve can be overcome. Computer simulations demonstrate the effectiveness of the algorithm preliminarily.

Keywords planar curve, match, landmark, affine transform matrix

1 引言

在物体识别的许多应用中,大都是通过匹配物体的图像与模型库的图像来识别物体。如果图像轮廓包含足够的信息,那么物体识别的问题就可能转化为平面曲线的匹配问题。

传统的识别方法^[1-3]大都是先将目标和模型的轮廓用多边形近似,然后提取多边形的不变特征,再匹配两个多边形的这些特征矢量。如 Ayache 等人提出了一种在刚体变换下的曲线匹配方法^[3],该方法先将两条封闭的曲线用多边形逼近,再用多边形的边长和夹角作为特征向量进行匹配。如果这两条曲线上这些特征值都相等,那么就认为这两条曲线匹配。实际上,如果两条平面曲线的关键特征点匹

基金项目:国家自然科学基金项目(60675022);江西省自然科学基金项目(2007GZS2556);江西省教育厅科技项目(GJJ08219)

收稿日期:2007-05-10;改回日期:2007-09-08

第一作者简介:张桂梅(1970~),女,副教授,2006年于西北工业大学获博士学位。主要从事计算机图形图像、模式识别方面的研究。近几年发表论文二十余篇。E-mail: guimei.zh@163.com

配,并不一定表示这两条曲线匹配。由于在两个不变关键特征点之间,曲线的形状并不能唯一确定。Carlsson 等人提出了透视投影下平面目标的识别方法^[4],其先将目标轮廓按透视不变点进行分段,并将每条子曲线用椭圆拟合,因为从椭圆可以计算出两组不变量(共面二次曲线的迹);然后用这两组不变量构成 hash 表来进行目标和模型的索引。徐正伟等人提出了透视投影下平面曲线的识别方法^[5],其是先用具有透视不变性的点作为曲线的分段点,然后通过各曲线段的分段描述(用圆锥曲线拟合)来实现整条平面曲线的描述。但它们的方法都存在同样的问题,即每段子曲线用圆锥曲线进行拟合不仅计算复杂,也不准确。

本文研究了一种仿射投影下平面曲线的识别方法,即首先提取模型和待识别轮廓曲线上的关键特征点,并基于规一化 RLCTI 码(NRLCTI)的定义分别计算模型和待识别目标轮廓曲线的 NRLCTI 码;然后利用 NRLCTI 码来初步匹配待识别目标和模型轮廓曲线,并根据特征点的匹配关系估计出最佳仿射变换矩阵,以便为下一步的匹配子曲线做准备;最后在 NRLCTI 码匹配的前提下,根据精度要求细分每小段曲线(直线段除外),同时考察每小段上的细分点是否匹配,并匹配曲线上所有子曲线,再通过匹配每段子曲线来实现对整条平面曲线的识别。

2 RLCTI 码的定义

在平面曲线的投影中,其面积、弧长等量都会因投影而出现很大的变化,唯有平面曲线的关键特征点(角点、切点、拐点)是不变的,它们的具体定义和不变性的证明可参阅文献^[6],根据关键特征点的投影不变性,本文首次定义了一个新的关键特征点的游程码,并用 RLCTI(run length code of corner and tangent and inflexion points)来表示。这里的关键特征点是指角点、切点和拐点。RLCTI 码是表征平面曲线环路特征点的结构信息码。

如图 1 所示,沿逆时针方向对平面曲线的关键特征点进行编号,从关键特征点 A 开始,关键特征点的排列顺序为 ABCDEFGHI。规定角点用“+”表示,切点用“-”表示,拐点用“*”表示,其关键特征点的属性为“+-+--+-*”,因此从关键特征点 A 开始编码,该平面曲线的游程码为 1111221(*),其中第 1 位数字“1”表明第 1 个游程为角点,

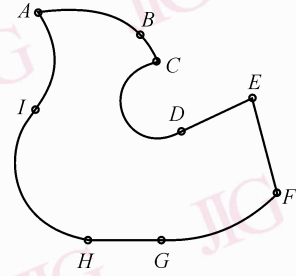


图 1 RLCTI 编码

Fig. 1 RLCTI code

长度为 1;第 2 位数字“1”表明第 2 个游程是切点,长度为 1;依此类推,第 5 位数字“2”表示第 5 个游程是角点,长度为 2,第 6 位数字“2”表示第 6 个游程是切点,长度为 2,最后一个游程码为拐点,长度为 1,在拐点的后面加一个“*”。如果从关键特征点 E 开始,则平面曲线的关键特征点的排列顺序为 EFGHIABCD,关键特征点的属性为“++--*+-+”,其 RLCTI 码为 221(*)1111。这样从不同的关键特征点开始编码同一条平面曲线时,其 RLCTI 码出现不一致的情况。为了使平面曲线唯一对应一个 RLCTI 码,特提出以下两个约定:

(1) 从角点开始编码,如果曲线上不存在角点,则从切点开始编码;

(2) 如果一个回路有几个间断的角点,则计算编码值(CV),CV 值为最大值的 RLCTI 码即为该回路所对应的 RLCTI 码。

CV 的定义为 $CV = \sum_{i=1}^N a_i B^{N-i}$,其中, a_i 是码字中第 i 位的数值, N 是码字的长度, B 是基准值,该值由下式决定: $B = \max_{i=1,2,\dots,N} \{a_i\} + 1$ 。

经过这样处理后的 RLCTI 码称为归一化的 RLCTI 码,即 NRLCTI 码。平面曲线回路对应唯一 RLCTI 码。如图 1 所示,按上面的约定,与该平面曲线对应的 RLCTI 码有 1111221(*)、11221(*)11 和 221(*)1111 等,由于与 221(*)1111 对应的码值最大,故该平面曲线的 NRLCTI 码为 221(*)1111。用 NRLCTI 码描述平面曲线的拓扑结构信息的优点有:(1) 唯一性,即每一条平面曲线回路对应着唯一的 NRLCTI 码;(2) NRLCTI 是投影不变量,由于 NRLCTI 码只考虑了平面曲线关键特征点的个数和特性,所以只能用来初步匹配两条平面曲线,对于一些形状相近,而两关键特征点间的小段曲

线曲率不同的平面曲线(如图2所示平面曲线)就不能达到有效的匹配,而被误认为是同一条平面曲线,所以还需要用其他的方法来进行进一步验证。

3 估计最佳仿射变换矩阵

初步匹配关键特征点后,就可以计算出仿射变换矩阵。如果2维模型点集 M 和2维目标点集 I 是成仿射对应的,则有

$$TM = I \tag{1}$$

其中,

$$M = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_i & \cdots & x_n \\ y_1 & \cdots & y_i & \cdots & y_n \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \cdots & \hat{x}_i & \cdots & \hat{x}_n \\ \hat{y}_1 & \cdots & \hat{y}_i & \cdots & \hat{y}_n \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因式(1)中的仿射变换矩阵 T 中有6个未知参数,故根据3对对应点即可以确定仿射变换矩阵 T 。

由此可见,给定两组2维点集,找到一个最优的仿射变换矩阵是一个优化问题。例如在两条平面曲线上分别选取 n 个仿射不变点,两组2维点集分别表示为 M 和 I , M 和 I 都是 $3 \times n$ 大小的矩阵,优化就是找到该两个矩阵的最优仿射变换矩阵。本文采用 Frobenius 范数来衡量两个矩阵之间的差异。Frobenius 范数的定义为

$$\|P\|_F^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{i,j}^2 = \text{tr}(PP^T)$$

估计最优仿射变换矩阵 T 的条件如下:

$$\min_T \|TM - I\|_F^2$$

满足这个最优条件的矩阵用 T_{opt} 表示,经过推导, T_{opt} 可以表示为

$$T_{opt} = IM^+ = IM^T(MM^T)^{-1}$$

其中, M^+ 是 M 的伪逆矩阵。

如果两条平面曲线成仿射对应,则在理论上说,矩阵 M 经过仿射矩阵 T 变换后应该与矩阵 I 相等,但由于2维点集和数值计算的误差,它们之间会存在一定的差异。矩阵 M 和 I 之间的距离为

Frobenius 范数,即

$$d_{aff}^2 = \text{tr} \{ (T_{opt}M - I)(T_{opt}M - I)^T \} \tag{2}$$

取 $\min(d_{aff}^2)$ 所对应的 T_{opt} 即为所求的最优仿射变换矩阵。

4 匹配模型轮廓曲线和待识别目标轮廓曲线的子曲线

如果只是两条曲线的关键特征点匹配,不一定表示这两条曲线匹配,因为在两个不变点之间,曲线的形状不唯一。如图2所示的两条封闭曲线,在特征点 B, C 和 F, G 之间可以连成任意光滑的曲线,也即是特征点表示曲线不具有唯一性。为了解决这个问题,可先对曲线上两个不变点之间的小段曲线根据精度要求进行细分(精度要求越高,细分点的个数越多,而且曲线的曲率越大,细分点的个数也越多,详细的细分算法可参阅文献[6]);然后判断两条曲线上对应的细分点是否满足同样的仿射对应关系[6]。利用 Frobenius 范数判断细分点是否一致时,其误差是采用第2节中的式(2)计算时得到的误差。

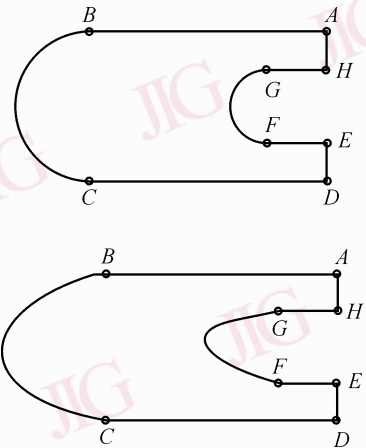


图2 两条不同的轮廓曲线具有相同的 NRLCTI 码
Fig. 2 Two different curves whose NRLCTI codes are same

如图3(a)所示,先根据精度要求将曲线 \widehat{AB} 细分,细分方法可参考文献[6],细分点为 a, b, \dots, i ; 然后过这些细分点分别作定方向的(与连接两个特征点的直线平行)扫描线。

验证相邻两个特征点间的小段是否匹配的算法如下:

(1) 根据精度要求细分相邻两特征点间的子曲线 \widehat{AB} (如图 3(a) 所示, 其中图 3 中的横坐标表示 x 坐标, 纵坐标表示 y 坐标);

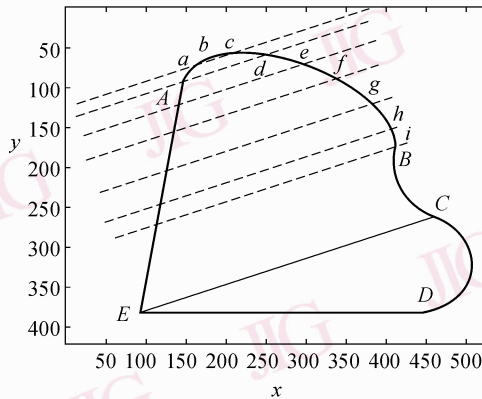
(2) 过模型轮廓曲线上的这些细分点作一系列定方向的扫描线, 且这些扫描线与模型轮廓曲线上过某两个特征点 (图 3(a) 上点 C 、点 E) 的连线平行;

(3) 再根据这些扫描线的相对几何位置将模型轮廓曲线上的扫描线, 根据仿射变换阵 T 映射到目

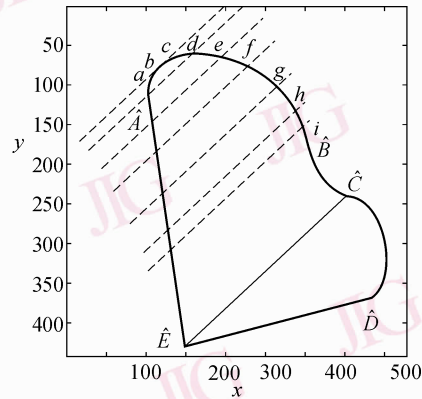
标平面上, 映射后的扫描线与目标轮廓曲线上的对应曲线段 \widehat{AB} 有一系列的交点 (如图 3(b) 所示);

(4) 验证模型轮廓曲线与待识别目标轮廓曲线对应小段上的细分点是否对应, 以及对应的细分点之间的关系是否满足前面计算出的仿射变换矩阵 T ;

(5) 若步骤 (4) 中条件满足, 则模型轮廓和待识别目标轮廓曲线的该段子曲线相互匹配。



(a) 模型轮廓(曲线 \widehat{AB} 经过细分)



(b) 与模型轮廓仿射对应的目标轮廓

图 3 曲线细分

Fig. 3 Curve sub-divided

5 平面曲线的识别算法

先将模型轮廓曲线和待识别目标轮廓曲线根据关键特征点分段, 再通过对每段子曲线进行识别来实现对整条曲线的识别。对待识别目标轮廓曲线中的每段子曲线均按照上面的方法进行匹配, 对于直线段只要两个端点匹配, 则该两条直线就匹配。具体的识别算法步骤如下:

(1) 提取待识别目标轮廓曲线的关键特征点, 并根据关键特征点将待识别曲线分段;

(2) 计算待识别曲线的 NRLCTI 码, 并根据码值匹配模型曲线和待识别曲线上的关键特征点;

(3) 根据匹配的关键特征点来估计最优的仿射变换矩阵 T ;

(4) 对于模型曲线的第 i 段子曲线 (i 的初值为 1), 先根据精度要求在其上取细分点, 并过细分点作定方向的扫描线, 再根据这些扫描线的几何相对

位置利用仿射变换阵 T 将模型曲线上的扫描线映射到目标平面上;

(5) 求映射后的扫描线与目标轮廓的对应子曲线的交点;

(6) 判断模型轮廓曲线上的细分点与目标轮廓曲线上的对应子曲线上的细分点是否满足仿射变换矩阵 T ;

(7) 如果不满足仿射变换矩阵 T , 则模型曲线与目标曲线不匹配; 否则模型曲线与目标曲线的第 i 段子曲线对应;

(8) $i = i + 1$, 转步骤 (4);

(9) 如果模型曲线与目标曲线的所有对应子曲线都匹配, 则目标曲线与该模型曲线匹配。

6 算例

算例 1 已知的模型曲线和目标曲线如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 判断这两个图形是否具有仿射对应关系, 若是, 则确定两个图形特征点具有对应

关系,并计算仿射变换矩阵。

图 3(a)与图 3(b)的 NRLCTI 码均为 112(*)1, 根据 NRLCTI 码的性质可知,特征点的对应关系为 $A - \hat{A}, B - \hat{B}, C - \hat{C}, D - \hat{D}, E - \hat{E}$ 。先假设这两个图形是成仿射对应的,则根据式(1)就可以计算得到以下仿射变换矩阵:

$$T = \begin{pmatrix} 0.774 2 & -0.327 7 & 51.900 7 \\ 0.201 7 & 1.258 0 & 23.461 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据式(2)计算出的图 3(a)与图 3(b)的距离为 $d_{\text{aff}}^2 = 6.542 3 \times 10^{-5}$ 。由于 d_{aff}^2 值很小,因此可以认为图 3 中两个图形的关键特征点均满足同一仿射变换矩阵 T 。

进一步验证图 3(a)与图 3(b)中曲线段 \widehat{AB} 上细分点是否匹配。验证时,根据精度要求将细分曲线段 \widehat{AB} 分为如图 3(a)、图 3(b)所示的 10 段,并将中间 9 个细分点的点集分别用矩阵 Q 和 D 表示。其距离为

$$d_{\text{aff}}^2 = \|TD - Q\|_F^2 = \text{tr}((TD - Q)(TD - Q)^T) = 9.665 1 \times 10^{-8}$$

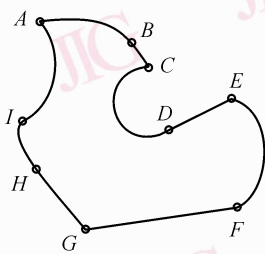
由于 d_{aff}^2 值很小,所以图 3(a)中的子曲线 \widehat{AB} 和图 3(b)的子曲线 \widehat{AB} 相匹配。

同理可验证这两条曲线的其他子曲线(直线段除外)是否匹配。验证的最后结果表明,图 3(a)与图 3(b)是成仿射对应的,仿射变换矩阵如式(3)所示。

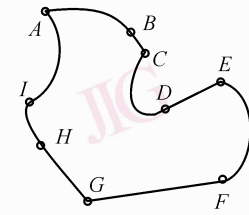
算例 2 已知图 4(a)为待识别目标的轮廓曲线,图 4(b)~图 4(f)是模型库中模型的轮廓曲线,要求从模型库中识别出与目标相匹配的曲线,其中图 4 中横坐标代表 x 坐标,纵坐标代表 y 坐标。

图 4 中小圆圈表示提取出的关键特征点。模型库中图 4(b)~图 4(f)的 NRLCTI 码分别为 13111(*)11、13111(*)11、13111(*)11、221(*)1111(图中点 E 为起点)和 6111(图中点 E 为起点)。图 4(a)的 NRLCTI 码为 13111(*)11(图中点 C 为起点)。图 4(e)、图 4(f)与图 4(a)的 NRLCTI 码不同,予以排除,图 4(a)与图 4(b)~图 4(d)的匹配结果如图 5 所示,其中图 5 中横坐标代表 x 坐标,纵坐标代表 y 坐标。根据匹配结果可知,待识别目标轮廓曲线(图 4(a))与图 4(c)对应,计算得到的模型与目标之间经历的仿射变换矩阵为

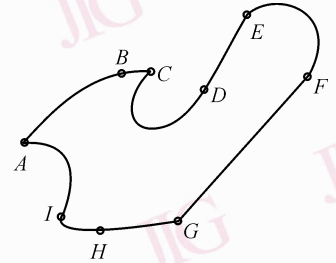
$$T = \begin{pmatrix} 0.467 0 & 0.439 2 & -131.640 6 \\ -0.713 9 & 0.758 2 & 499.702 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



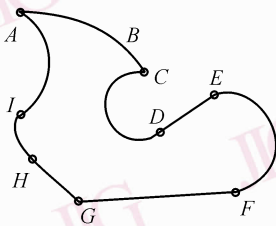
(a) 待识别目标轮廓



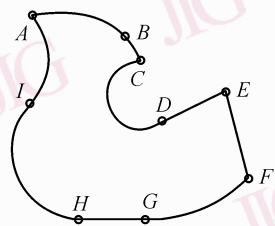
(b) 模型轮廓曲线(1)



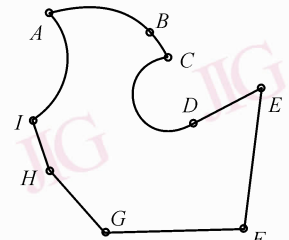
(c) 模型轮廓曲线(2)



(d) 模型轮廓曲线(3)



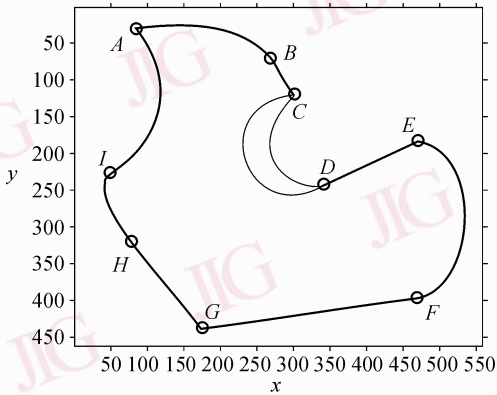
(e) 模型轮廓曲线(4)



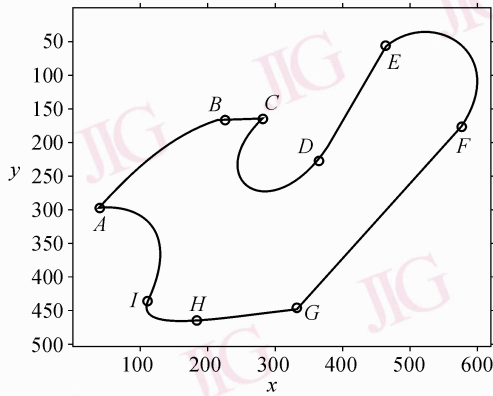
(f) 模型轮廓曲线(5)

图 4 曲线的识别算例

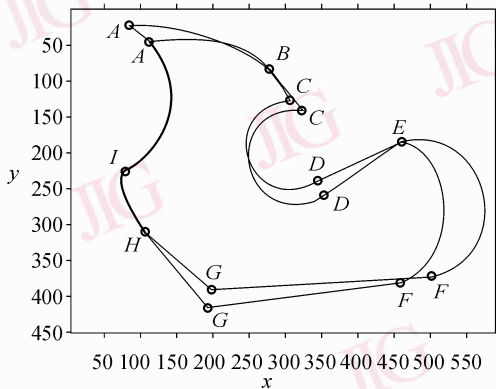
Fig. 4 Recognized experiment



(a) 图4 (a)与图4 (b)的匹配图



(b) 图4 (a)与图4 (c)的匹配图



(c) 图4 (a)与图4 (d)的匹配图

图 5 匹配结果

Fig. 5 Matches results

7 结 论

本文的研究工作和成果可概括如下:

(1) 首次给出了 NRLCIT 码的定义, 并利用 NRLCIT 码初步匹配了目标和模型轮廓上的关键特征点, 从而解决了用穷尽搜索法寻求特征点所对应的高费率和低效率的问题;

(2) 设计了一种新的算法, 用于匹配目标和模型轮廓曲线上的每段子曲线, 解决了用多边形或圆锥曲线来近似曲线不准确性的问题;

(3) 提出了一种新的仿射变换下 2 维曲线的匹配方法。

由于将 3 对对应点换成 4 对对应点, 可以估计透视变换矩阵, 因而本文的匹配算法可拓宽到透视变换下平面曲线的匹配。不足之处是, 当物体经过投影变换后, 其轮廓上保存下来的关键特征点少于 3 个时, 本文算法会失效。

参考文献 (References)

- 1 Pikaz A, Dinstein I. Optimal polygonal approximation of digital curves [J]. Pattern Recognition, 1995, **28**(3): 373-379.
- 2 Chen J M, Ventura J A. Optimization models for shape matching of non-convex polygons [J]. Pattern Recognition, 1995, **28**(6): 863-877.
- 3 Ayache N, Faugeras O D. HYPER: A new approach for the recognition and positioning of two-dimensional objects [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, **8**(1): 44-54.
- 4 Carlsson S. Projectively invariant decomposition and recognition of planar shapes [J]. International Journal of Computer Vision, 1996, **17**(2): 193-209.
- 5 Xu Zheng-wei, Wu Cheng-ke. Perspective invariant decompose of spatial planar curve [J]. Chinese Journal of Computers, 1996, **19**(8): 631-635. [徐正伟, 吴成柯. 空间平面曲线的透视不变性分段 [J]. 计算机学报, 1996, **19**(8): 631-635.]
- 6 Zhang Gui-mei. Research on the principles and algorithms for recognizing fully or partially occluded object [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. [张桂梅. 完整和部分遮挡物体的识别机理和算法研究 [D]. 西安: 西北工业大学博士学位论文, 2006.]