

## 基于向量长度的 Hausdorff 距离图像匹配方法

章 薇<sup>1</sup>, 陈和平<sup>2\*</sup>, 杨玲贤<sup>3</sup>

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 武汉 430081)

(\*通信作者电子邮箱 chp@wust.edu.cn)

**摘 要:** 针对采用 Hausdorff 距离描述两组点集之间相似程度时对孤立点噪声敏感的问题, 提出一种基于向量长度的 Hausdorff 距离图像匹配方法。考虑图像中像素点之间的相互关系, 连接图像中一个像素点和其他点构成一个向量长度集合, 每个像素点对应一个向量长度集合, 进行图像匹配时, 计算模板图像中每个像素点的向量长度集合与待匹配图像中像素点向量长度集合的改进 Hausdorff 距离, 从而得到匹配的量化结果。实验表明, 新方法处理噪声图像具有较好的鲁棒性。

**关键词:** 向量长度; Hausdorff 距离; 图像匹配; 鲁棒性; 孤立点噪声; 相似度量

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

### Image matching method by using Hausdorff distance based on vector length

ZHANG Wei<sup>1</sup>, CHEN He-ping<sup>2\*</sup>, YANG Ling-xian<sup>3</sup>

(College of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China)

**Abstract:** Hausdorff distance is sensitive to acnodes when using it as the measure to describe the similarity of two point sets. Therefore, a new image matching method based on Hausdorff distance of vector length was proposed. Considering the mutual correlation of pixels in the image, one pixel was connected to the others in one image, a set of vector lengths was composed, and then each pixel corresponded to one vector length set. Then, the modified Hausdorff distance between the vector length set corresponding with each pixel in template image and matching image was computed out. At last, quantified image matching results were obtained. The experiment shows that, the efficiency of the new method to deal with image matching problems in random noisy situations is so remarkable.

**Key words:** vector length; Hausdorff distance; image matching; robust; acnodes noise; similarity degree measurement

## 0 引言

图像匹配是信息处理领域中的一重要技术,是指通过一定的匹配算法在两幅或多幅图像之间识别同名点,该技术在计算机视觉、航空摄影测量、医学图像配准、光学和雷达跟踪等领域都有广泛的应用。图像匹配一般可分为以灰度为基础的匹配和以特征为基础的匹配。

Hausdorff 距离<sup>[1]</sup>是匹配点特征的一种方法,又称最大最小距离,主要用于测量两个点集的匹配程度,受物体平移、旋转、缩放等变换的影响较小。Hausdorff 距离无需建立点之间的一一对应关系,并且对图像噪声和晃动有较好的鲁棒性。

Hausdorff 距离虽有不少优点,但对于集合中点之间的相互关系则没有加以考虑,而这一点对于图像匹配具有很重要的意义。本文提出了一种基于向量长度与 Hausdorff 距离相结合的图像匹配方法,在一定程度上弥补了 Hausdorff 距离对孤立点敏感的不足,并能充分运用图像边缘点之间的位置关系,从而提高了匹配准确率。

## 1 Hausdorff 距离

### 1.1 定义

**定义 1** 给定两个点的有限集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_a}\}$ ,  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{N_b}\}$ , 集合  $A$  中点  $a$  与集合  $B$  中点  $b$  间的距离为:

$$d(a, b) = \|a - b\| \quad (1)$$

**定义 2** 集合  $A$  中点  $a$  到集合  $B$  的最小距离为:

$$d(a, B) = \min_{b \in B} d(a, b) \quad (2)$$

**定义 3** 集合  $A$  与集合  $B$  的前向 Hausdorff 距离为:

$$h(A, B) = \max_{a \in A} d(a, B) \quad (3)$$

**定义 4** 集合  $A$  与集合  $B$  的后向 Hausdorff 距离为:

$$h(B, A) = \max_{b \in B} d(b, A) \quad (4)$$

**定义 5** 有限集合  $A$  与  $B$  之间的 Hausdorff 距离为:

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (5)$$

由定义 5 可知, Hausdorff 距离可以用来度量两个点集的匹配程度。

### 1.2 改进

传统的 Hausdorff 距离匹配方法虽容易实现,但对孤立点的噪声敏感<sup>[2]</sup>,该缺点削弱了图像匹配的准确性及算法的健壮性。目前已有不少改进的 Hausdorff 距离图像匹配方法,如部分 Hausdorff 距离 (Partial Hausdorff Distance, PHD)<sup>[3]</sup>、修正 Hausdorff 距离 (Modified Hausdorff Distance, MHD)<sup>[4]</sup>、加权 Hausdorff 距离 (Weighted Hausdorff Distance, WHD)<sup>[5]</sup>、设限 Hausdorff 距离 (Censored Hausdorff Distance, CHD)<sup>[6]</sup>、最大似然估计 Hausdorff 距离 (M-estimation Hausdorff Distance, M-HD)<sup>[7]</sup> 和最小切边平方 Hausdorff 距离 (Least Trimmed Square Hausdorff Distance, LTS-HD)<sup>[8]</sup> 等。其中, LTS-HD 测度

收稿日期: 2012-05-16; 修回日期: 2012-06-27。 基金项目: 武汉市科技技术局资助项目 (201110821236)。

**作者简介:** 章薇 (1988 -), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理、模式识别与智能系统; 陈和平 (1956 -), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能信息处理、软件工程; 杨玲贤 (1978 -), 女, 浙江绍兴人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 图像处理、模式识别与智能系统。

综合了 PHD 与 MHD 两者的优点,对噪声、出格点及遮挡都比较鲁棒<sup>[9]</sup>。

定义 6 有向的 LTS-HD 定义如下:

$$h_{\text{LTS}}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^H d(\mathbf{a}, \mathbf{B})_{(i)} \quad (6)$$

其中:参数  $H = \lfloor h \times N_a \rfloor$   $h$  是一个给定的分数,  $h \in [0, 1]$ ,  $N_a$  表示集合  $\mathbf{A}$  中点的个数,  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整运算;  $d(\mathbf{a}, \mathbf{B})_{(i)}$  表示序列  $d(\mathbf{a}, \mathbf{B})_{(1)} \leq d(\mathbf{a}, \mathbf{B})_{(2)} \leq \dots \leq d(\mathbf{a}, \mathbf{B})_{(N_a)}$  中的第  $i$  个值。LTS-HD 将较大距离值剔除,再对剩下的距离求平均值。因此,即使图像遭到严重干扰,仍然能产生令人满意的结果<sup>[10]</sup>。

## 2 基于向量长度的 Hausdorff 距离

Hausdorff 距离及改进的 Hausdorff 距离只考虑了两幅图像之间的匹配程度<sup>[11]</sup>而非点之间的位置关系。本文提出了一种基于向量长度的 Hausdorff 距离方法。

### 2.1 计算向量集合

定义 7 给定两个有限特征点集合  $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_a}\}$ ,  $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_{N_b}\}$ 。二维坐标中点表示为  $a_i(x_{a_i}, y_{a_i})$ ,  $b_j(x_{b_j}, y_{b_j})$ 。取集合  $\mathbf{A}$  中一点  $a_i$ , 与  $\mathbf{A}$  中其余点一一连接, 组成向量集合

$$\mathbf{U}_i = \{u_{ik} = a_i a_k \mid k = 1, 2, \dots, M; k \neq i\} \quad (7)$$

$\mathbf{U}_i$  的长度集合为

$$\begin{aligned} D^{a_i} &= \{|a_i a_k| \mid k = 1, 2, \dots, M; k \neq i\} = \\ &= \{|a_i a_1|, |a_i a_2|, \dots, |a_i a_k|, \dots, |a_i a_M|\} (k \neq i) = \\ &= \{d_1^{a_i}, d_2^{a_i}, \dots, d_k^{a_i}, \dots, d_{M-1}^{a_i}\} \end{aligned} \quad (8)$$

定义 8 同理, 取集合  $\mathbf{B}$  中一点  $b_j$ , 与  $\mathbf{B}$  中其余点一一连接, 组成向量集合

$$\mathbf{V}_j = \{v_{jl} = b_j b_l \mid l = 1, 2, \dots, N; l \neq j\} \quad (9)$$

$\mathbf{V}_j$  的长度集合为

$$\begin{aligned} D^{b_j} &= \{b_j b_l \mid l = 1, 2, \dots, N; l \neq j\} = \\ &= \{|b_j b_1|, |b_j b_2|, \dots, |b_j b_l|, \dots, |b_j b_N|\} \\ &= \{d_1^{b_j}, d_2^{b_j}, \dots, d_l^{b_j}, \dots, d_{N-1}^{b_j}\} \end{aligned} \quad (10)$$

### 2.2 计算向量长度的 Hausdorff 距离

如果  $a_i$  与  $b_j$  是一对匹配点, 那么  $\mathbf{U}_i$  和  $\mathbf{V}_j$  将具有很强的相似性。即使有噪声点, 由非噪边缘点构成的向量是不会变化的, 仅多出一些与噪声点构成的向量。如图 1 所示, 图 1(a) 为点  $a_1$  到  $a_2, a_3, a_4$  组成的无噪向量集合  $\mathbf{U}_1(u_{11}, u_{12}, u_{13})$ 。图 1(b) 中  $b_1$  与图 1(a) 中  $a_1$  是对应点,  $b_1$  与  $b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  组成加噪向量集合  $\mathbf{V}_1(v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15})$ 。  $\mathbf{V}_1$  中前三个向量分别与  $\mathbf{U}_1$  中的向量一一对应, 多出了由噪声点  $b_5, b_6$  构成的向量  $v_{14}$  及  $v_{15}$ 。

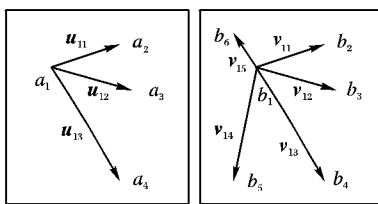


图 1 向量对照图

定义 9 集合  $D^{a_i}$  中任一向量长度  $d_m^{a_i}$  与  $D^{b_j}$  中任一向量长度  $d_n^{b_j}$  之间的距离为:

$$d(d_m^{a_i}, d_n^{b_j}) = |d_m^{a_i} - d_n^{b_j}| \quad (11)$$

定义 10 集合  $D^{a_i}$  中任一向量长度  $d_m^{a_i}$  到集合  $D^{b_j}$  的最小距离为:

$$d(d_m^{a_i}, D^{b_j}) = \min_{d_{bj} \in D^{b_j}} d(d_m^{a_i}, d_{bj}^{b_j}) = \min_{d_{bj} \in D^{b_j}} |d_m^{a_i} - d_{bj}^{b_j}| \quad (12)$$

定义 11 集合  $D^{a_i}$  与集合  $D^{b_j}$  的前向 LTS-HD 为:

$$h_{\text{LTS}}(D^{a_i}, D^{b_j}) = \frac{1}{H} \sum_{s=1}^H d(d_m^{a_i}, D^{b_j})_{(s)} \quad (13)$$

如定义 6 所述,  $H = \lfloor h \times N_A \rfloor$ ,  $h \in [0, 1]$ ,  $N_A$  表示集合  $D^{a_i}$  中项的个数;  $d(d_m^{a_i}, D^{b_j})_{(s)}$  表示序列  $d(d_m^{a_i}, D^{b_j})_{(1)} \leq d(d_m^{a_i}, D^{b_j})_{(2)} \leq \dots \leq d(d_m^{a_i}, D^{b_j})_{(N_A)}$  中的第  $s$  个值。

定义 12 集合  $D^{a_i}$  与集合  $D^{b_j}$  的 LTS-HD 为:

$$H_{ij}^{\text{LTS}} = H_{\text{LTS}}(D^{a_i}, D^{b_j}) = \max(h_{\text{LTS}}(D^{a_i}, D^{b_j}), h_{\text{LTS}}(D^{b_j}, D^{a_i})) \quad (14)$$

定义 13 集合  $\mathbf{A}$  与集合  $\mathbf{B}$  的向量长度集合的 LTS-HD 为

$$H_{M \times N} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1N} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1} & H_{M2} & \dots & H_{MN} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由定义 7 计算集合  $\mathbf{A}$  中每个点的向量集合  $\mathbf{U}_i$  与长度集合  $D^{a_i}$ ,  $\mathbf{A}$  中有  $M$  个点, 因此可得到  $M$  对  $\mathbf{U}_i$  及  $D^{a_i}$ 。由定义 8 可得  $\mathbf{B}$  中  $N$  对向量集合  $\mathbf{V}_j$  与长度集合  $D^{b_j}$ 。计算  $D^{a_i}$  与  $D^{b_j}$  的 LTS-HD, 即  $H_{ij}$  ( $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ ), 共得到  $M \times N$  个 LTS-HD, 组成一个距离矩阵。

定义 14 集合  $\mathbf{A}$  与集合  $\mathbf{B}$  的相似程度度量定义为:

$$S(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \sum_{i=1}^M \min\{H_{i1}, H_{i2}, \dots, H_{ij}, \dots, H_{iN} \mid 1 \leq j \leq N\} \quad (16)$$

式 (15) 中矩阵  $H_{M \times N}$  的任一项  $H_{ij}$  ( $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ ) 表示集合  $\mathbf{A}$  中点  $a_i$  与  $\mathbf{B}$  中点  $b_j$  的相似程度, 则第  $i$  行表示点  $a_i$  与  $\mathbf{B}$  中各个点的相似程度, 最小值即为与点  $a_i$  最相似点。因此, 取每行最小值相加所得和即为集合  $\mathbf{A}$  与集合  $\mathbf{B}$  的相似程度度量。

## 3 实验结果

为了测试本文提出的基于向量长度的 Hausdorff 距离匹配方法, 分别采用标准形状图以及实际图作为实验图片。Hausdorff 距离主要用于测量两个点集之间匹配程度, 在将模板与被遮挡的目标图像匹配的情况下产生较好匹配结果<sup>[12]</sup>。第 1.2 节介绍的几种改进 Hausdorff 距离中, CHD 及 WHD 主要应用于一些特定情况的图像匹配, LTS-HD 综合了 PHD 与 MHD 两者的优点, 对于加噪图像匹配鲁棒性较好。因此, 使用 Matlab 7.0<sup>[13]</sup> 计算模板与加噪图像之间的 Hausdorff 距离, LTS-HD 及本文提出的基于向量长度的 Hausdorff 距离。实验结果表明, 本文提出的方法对于噪声较其余两种方法具有很好的鲁棒性。

实验一使用正方形、六边形、八边形、圆形这四种形状作模板, 加入强度为 0.01 的高斯噪声, 原始图像和加噪图像分别如图 2、3 所示。

传统 Hausdorff 距离匹配结果如表 1 所示, LTS-HD 匹配结果如表 2 所示, 本文提出方法的匹配结果如表 3 所示。其中, \* 表示加噪图像。

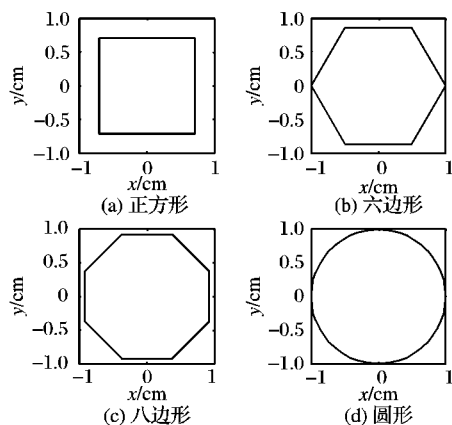


图2 不加噪声形状图

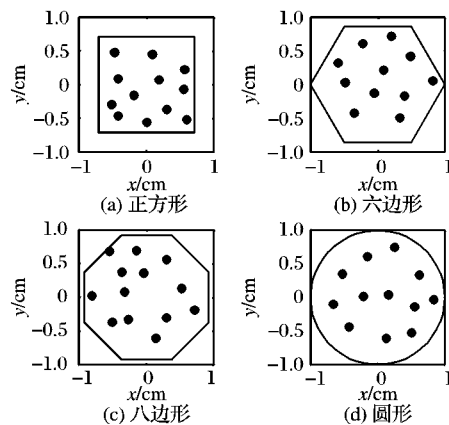


图3 加噪形状图

表1 传统 Hausdorff 距离匹配结果

形状	无噪图像				有噪图像			
	正方形	六边形	八边形	圆形	正方形( *)	六边形( *)	八边形( *)	圆形( *)
正方形	0	9.2195	15.3412	14.8855	34.8855	34.4384	35.3412	34.8855
六边形	9.2195	0	11.4005	10.4195	41.4005	40.0000	41.4005	41.4005
八边形	15.3412	11.4005	0	8.7732	41.7732	41.7732	41.7732	41.7732
圆形	14.8855	10.4195	8.7732	0	27.8029	33.6006	40.0000	30.8707

表2 LTS-HD 匹配结果

形状	无噪图像				有噪图像			
	正方形	六边形	八边形	圆形	正方形( *)	六边形( *)	八边形( *)	圆形( *)
正方形	0	2.3761	4.4279	4.4279	3.7668	4.9219	7.3729	8.2971
六边形	2.3761	0	1.8924	3.0145	4.1349	3.1002	5.1269	4.9390
八边形	4.4279	1.8924	0	0.7138	5.4391	3.4958	4.7132	4.1957
圆形	3.1972	3.0145	0.7138	0	4.7241	6.2835	4.8943	3.5751

表3 本文提出方法的匹配结果

形状	无噪图像				有噪图像			
	正方形	六边形	八边形	圆形	正方形( *)	六边形( *)	八边形( *)	圆形( *)
正方形	0	11.3019	13.6491	12.4081	1.0030	11.2013	10.4018	13.9284
六边形	11.3019	0	12.6025	10.1923	10.1021	1.3129	10.2987	14.8761
八边形	13.6491	12.6025	0	9.2195	11.5304	13.1127	2.5124	11.2195
圆形	12.4081	10.1923	9.2195	0	12.6492	12.1677	12.0761	2.7416

实验二使用一张 jpg 格式图片为模板,加入强度为 0.01 的椒盐噪声,原始图像、加噪图像及各自的灰度图、边缘图分别如图 4 所示。

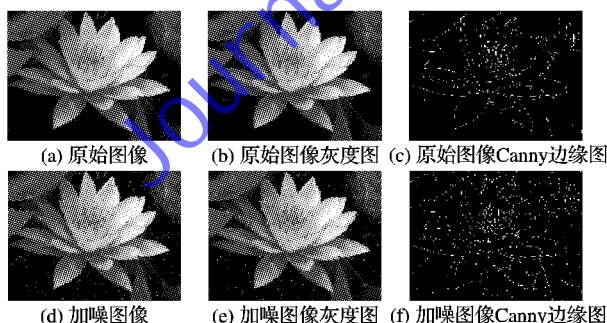


图4 原始图像及加噪图像

将灰度化、Canny 算子预处理后的原始图像及加噪图像的边缘轮廓图作为两个点集合,分别计算这两个边缘图的 Hausdorff 距离, LTS-HD 及本文提出的基于向量长度的 Hausdorff 距离,匹配结果如表 4 所示。

从表 1~表 3 中可以看出,三种方法都能准确地完成无噪图像匹配任务<sup>[14]</sup>。然而,传统 Hausdorff 距离基本不能匹配噪声图像,LTS-HD 算法中相同形状对的度量距离虽然较

小,但仍不足以区分不同的形状。本文的方法中,相同形状对的距离比不同形状对的距离小得多,尽管相同形状对的距离不为 0,但足以识别出形状。如表 4 所示,三种距离相比,本文提出的基于向量长度的 Hausdorff 距离最小,而且比 Hausdorff 距离小两个数量级,比 LTS-HD 小一个数量级。综上所述,本文提出的方法对于噪声图像匹配更具有鲁棒性。

表4 边缘图之间的三种距离

距离名称	Hausdorff 距离	LTS-HD	本文方法距离
距离值	111.1396	42.5739	4.9724

## 4 结语

在改进的 Hausdorff 距离基础上,本文提出了一种基于向量长度的 Hausdorff 距离匹配方法。与传统的 Hausdorff 距离及现有的改进 Hausdorff 距离匹配方法相比,本文的方法对于噪声图像的匹配效果较好。若再加上一些快速搜索算法,如遗传算法、二分哈希搜索算法、多分辨率匹配等,能提高实时性,实时处理图像。今后将重点研究图像匹配的搜索策略,进而与该匹配方法结合,在保持匹配准确性的同时提高匹配速率。

(下转第 3167 页)

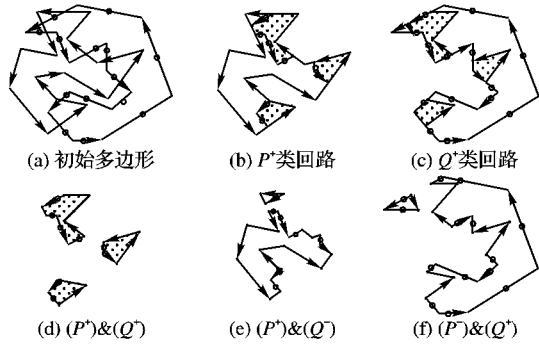


图 5 算例 1

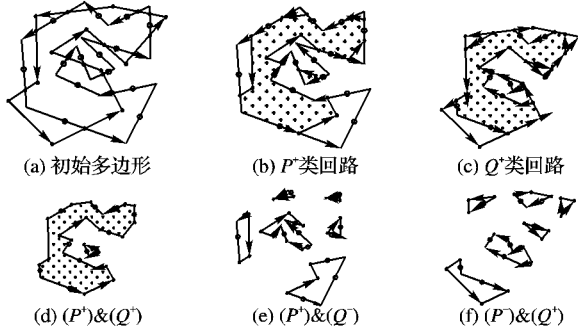


图 6 算例 2

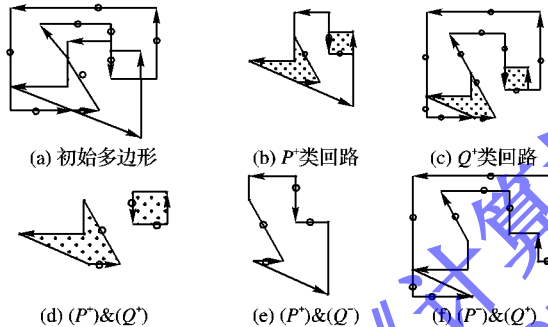


图 7 算例 3

## 6 结语

本文提出的基于最小回路方法确定两个多边形交、并、差

集的方法,其几何意义简洁,结构简单,算法复杂度低。算法以交点为枢纽,以顶点操作为核心,利用了多边形边和顶点的有序性,搜索形成于多边形内部的最小回路,确定其交、并、差集。将两个多边形交、并、差集的计算方法归一为同一个算法,同时算法适应于重叠边,以及交于顶点的奇异情况。由于充分利用了交点处关联边具有方向性和多边形的拓扑信息,使得算法时间复杂度优于同类算法。实验与分析表明该方法具有较高的计算效率与较好的适应性。

### 参考文献:

- [1] PREPARATA F P, SHAMOS M I. Computational geometry: An introduction [M]. Berlin: Springer, 1985.
- [2] O'ROURKE J. Computational geometry in C [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [3] RIVERO M, FEITO F R. Boolean operations on general planar polygons [J]. Computer & Graphics, 2000, 24(6): 881 - 896.
- [4] 周培德. 计算几何—算法分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [5] 董未名, 玛依拉, 周登文, 等. 平面扩展简单多边形的布尔运算[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(9): 1134 - 1140.
- [6] FEITO F, RIVERO M. Geometric modeling based on simplicial chains [J]. Computers & Graphics, 1998, 22(5): 611 - 619.
- [7] 朱雅音, 王化文, 万丰, 等. 确定两个任意简单多边形交、并、差的算法[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(4): 576 - 583.
- [8] MARTINEZ F, RUEDA A J, FEITO F R. A new algorithm for computing boolean operations on polygons [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(6): 1177 - 1185.
- [9] 崔璨, 王结臣. 一种基于梯形分割的多边形布尔运算方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 104 - 110.
- [10] 朱二喜, 何援军. 一种利用图形内角的多边形布尔运算新算法[J]. 工程图学学报, 2011, 32(2): 10 - 19.
- [11] PARK S C, SHIN H. Polygonal chain intersection [J]. Computer & Graphics, 2002, 26(2): 341 - 350.
- [12] 陈正鸣, 李春雷. 多边形链求交的改进算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(12): 1713 - 1718.
- [13] 赵军, 张桂梅, 曲仕茹. 利用极点顺序的多边形顶点凹凸性判别算法[J]. 工程图学学报, 2007, 28(1): 55 - 59.

(上接第 3163 页)

### 参考文献:

- [1] HUTTENLOCHER D P, KLANDERMAN G A, RUCKLIDGE W J. Comparing images using the Hausdorff distance [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(9): 850 - 863.
- [2] KWON O K, SIM D G, PARK R H. Robust Hausdorff distance matching algorithm using pyramidal structures [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(7): 2005 - 2013.
- [3] 郝万里, 王琰. 基于改进的部分 Hausdorff 距离的图像配准[J]. 沈阳理工大学学报, 2011, 30(2): 72 - 73.
- [4] 高品, 孙继银, 刘婧. 基于邻域灰度信息的 Hausdorff 距离图像匹配方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(3): 741 - 744.
- [5] 徐遵义, 晏磊, 宁书年, 等. 基于 Hausdorff 距离的海底地形匹配算法仿真研究[J]. 计算机工程, 2011, 33(9): 6 - 9.
- [6] 汪亚明. 图像匹配的鲁棒型 Hausdorff 方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(3): 238 - 241.
- [7] KANG JIANXIN, QI NAIMING, HOU JIAN. A hybrid method combining Hausdorff distance, genetic algorithm and simulated annealing algorithm for image matching [C]// ICCMS'10 Proceedings of the 2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010, 2: 435 - 436.
- [8] 沈大伟, 段会川. 基于 LTS Hausdorff 距离与遗传算法的图像配准方法[J]. 电子技术应用, 2007(7): 64 - 65.
- [9] ADRIAN B, COSMIN C, CORNELIU L. An Hausdorff distance based approach for evaluation of image moments in servoing applications [C] // Proceedings of the 2010 IEEE 6th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 255 - 258.
- [10] 符艳军, 程咏梅, 潘泉, 等. 基于 LTS-HD 的像素跳跃式快速景象匹配算法[J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1284 - 1285.
- [11] SIM D G, KWON O K, PARK R H. Object matching algorithm using robust Hausdorff distance measures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(3): 425 - 429.
- [12] ANDREY A, NIKOLAY K. Word image matching based on Hausdorff distances [C] // 2009 10th International Conference on Document Analysis and Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 396 - 400.
- [13] 彭晓明, 丁明跃, 周成平. 一种基于 Hausdorff 距离的高效目标搜索算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(1): 23 - 28.
- [14] HUTTENLOCHER D P, RUCKLIDGE W J. A multi-resolution technique for comparing images using the Hausdorff distance [C]// IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1993: 705 - 706.