

基于图分割与 Hausdorff 距离的多分辨率影像匹配

陈沈轶¹⁾ 钱 徽¹⁾ 吴 铮¹⁾ 潘莉莉²⁾ 朱淼良¹⁾

¹⁾(浙江大学计算机学院, 杭州 310027) ²⁾(浙江大学土木工程系, 杭州 310027)

摘 要 针对具有复杂场景的航拍图像提出了一种基于图分割理论与 Hausdorff 距离的多分辨率影像匹配方法。在高斯金字塔图像模型中,低分辨率的图像通过图分割方法,充分考虑图像中的局部和全局的信息,提取到稳定和完整的图像区域边界,并以区域边界作为待匹配的曲线。再通过计算曲线的统计特性作为图像间待匹配特征,并由信号相关的度量方法粗估计出图像间全局仿射变换参数。利用粗估计的参数在高分辨率层次上进一步通过基于 Hausdorff 距离的匹配方法搜索到精确的变换参数。实验结果表明,该方法在较大变形和强噪音干扰的情况下对复杂场景的图像也能有效地完成匹配。

关键词 图分割 曲线匹配 Hausdorff 距离

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)06-1185-06

Multiresolution Image Matching Method Based on Graph-cut and Hausdorff Distance

CHEN Shen-yi¹⁾, QIAN Hui¹⁾, WU Zheng¹⁾, PAN Li-li²⁾, ZHU Miao-liang¹⁾

¹⁾(College of Compute Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

²⁾(Civil Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract This paper proposes a multiresolution image matching framework based on graph cut theory and Hausdorff distance for aerial images with complex scene. After the establishment of Gaussian pyramid image model, we adopt graph-cut segmentation in the lowest level and extract robust and integral region boundaries with full consideration of both local and global information. The output region boundaries will be used as candidate curves for further matching. After calculating the statistical information of curves as matching features, we can evaluate the coarse affine transformation parameters using simple correlation measure. The coarse affine transformation parameters estimated can be further used to search in fine levels based on the Hausdorff distance measure. The experiment shows that our method can overcome great distortion and suppress strong noise, and successfully match the images of complex scenes.

Keywords graph-cut, curve matching, Hausdorff distance

1 引言

图像匹配是图像处理中的一个基本问题,在计算机视觉和模式识别、医学图像分析、遥感信息处理等方面有着重要的应用。一般来说,图像匹配技术包括与之相关的配准技术主要从以下4个角度^[1]来考虑:特征空间、搜索空间、搜索策略、相似性度量。

针对不同的应用背景,不同算法的适应性相差很大。

具有复杂场景的卫星图像或者航拍图像是影像匹配问题中最困难的实验对象。其中,基于灰度相关的算法^[2]、基于 FFT 的算法^[3]、基于 Hausdorff 距离的算法^[4-7]和基于 SVD(奇异值分解)^[8,9]的算法最为常见。然而在实际的应用当中,简单的灰度互相关算法和基于 Hausdorff 距离的算法往往只适用于平移参数的估计,对旋转和尺度变换都未能很好

解决;基于 Fourier-Mellin 变换虽然可以构造平移、旋转和尺度不变的频域匹配算法,但是 FFT 对图像中出现的遮挡物与强噪音干扰非常敏感,对复杂图像几乎不实用;基于 SVD 的算法在仿射变换条件下,尤其是当旋转和尺度变换参数较大时(尺度参数 σ 大于 1.2,旋转参数 θ 大于 30°)不够稳定。文献[10]中为解决旋转角度问题提出了曲线匹配的一种策略,但是曲线提取步骤仍然采用常规的边缘

检测算子,而至今所有的边缘检测算子都是建立在仅仅使用局部灰度信息的基础上,所以对复杂纹理图像会产生很多伪边,从而影响进一步匹配的效果。为解决复杂景象图像的仿射变换匹配问题,提出一种新的基于图分割与曲线特征的多分辨率匹配算法,能够在变换参数较大以及强噪音存在的情况下仍然准确的检测出变换参数。该算法框架如图 1 所示。

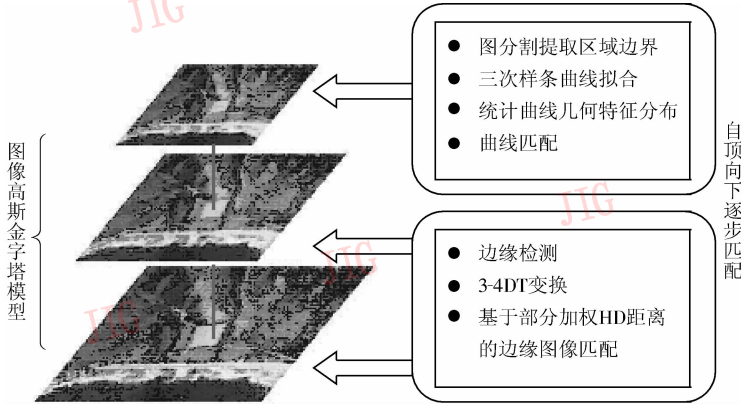


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

2 基于图分割算法的曲线粗匹配

图分割的思想^[11]综合了图像的局部与全局信息,可以有效地压制纹理区域产生的伪边,同时,图分割提取的区域边界一般表达了图像中的主要结构信息,在噪音和遮挡物干扰下具有一定稳定性。因此,利用图分割方法提取分割区域的边界作为待匹配的曲线,并使用曲线的统计几何特征进行图像间的粗匹配。

2.1 图分割算法框架

定义图 $G = \{V, E, W\}$, V 代表顶点集合, E 代表边集。在图像上 V 就对应每个像素点, E 对应了像素点之间的连接, W 代表 E 的连接强度,它决定了像素是否在归类中属于同一类。给定图像的 N 个像素,分割问题就可以转化为将 V (点集) 分解成 K 个无交集的子集:

$$V = \bigcup_{l=1}^K V_l, \text{ 且 } V_l \cap V_k = \emptyset, k \neq l;$$

符合条件的一种分割就记作: $\Gamma_V^K = \{V_1, \dots, V_K\}$

具体联系到图像上,首先定义深度矩阵

$$D = \text{Diag}(W \mathbf{1}_N) \quad (1)$$

式中, Diag 表示根据参数矢量构造对角矩阵, $\mathbf{1}_N$ 表示 N 行都是 1 的列向量。

另记 X 代表分割 Γ_V^K , $X: [X_1, X_2, \dots, X_k]$, X_l 是 V_l 的一个二值标注向量,由于每个像素被分配且只分配到 K 类中的一类,所以又可以加上约束条件:

$$X: X \mathbf{1}_K = \mathbf{1}_N \quad (2)$$

直观上一个好的分割结果,应该保证每个子类内部连接尽可能地紧密,而子类与子类之间连接尽可能疏散,由此得到图像分割的目标函数:

$$\max \mathcal{E}(X) = \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K \frac{X_l^T W X_l}{X_l^T D X_l} \quad (3)$$

约束条件为

$$X \in \{0, 1\}^{N \times K}, X \mathbf{1}_K = \mathbf{1}_N \quad (4)$$

式(3)中分母起到归一化作用,整个分式表示某子类的内部连接程度,目标函数优化的是所有子类的内部连接平均值。求解这个分配问题是 NP 难问题,根据 Rayleigh 商的性质可以转化为求一个广义特征值求解问题,文献[11]给出了近似解的求法如下式:

$$WV = \lambda DV \quad (5)$$

2.2 连接强度矩阵的建立

如何基于像素合理构造连接矩阵 W 是 Graph Cut 中最重要的步骤,如图 2 所示。

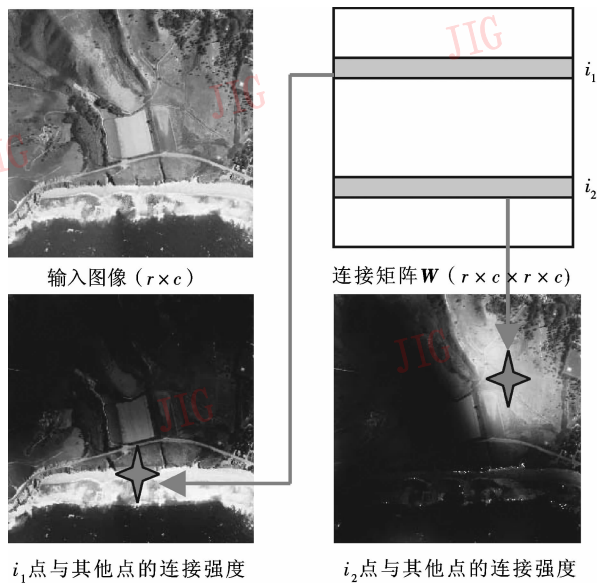


图 2 连接矩阵示例

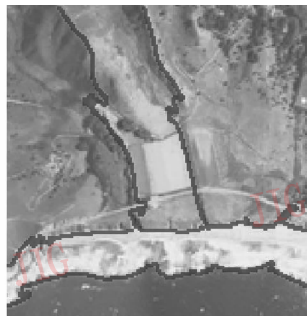
Fig. 2 Joint matrix demonstration

本文采用的 W 计算如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} e^{-\frac{\|histI(i) - histI(j)\|_2^2}{\sigma_I}} \times e^{-\frac{\|histT(i) - histT(j)\|_2^2}{\sigma_T}} \times e^{-\frac{\|X(i) - X(j)\|_2^2}{\sigma_X}} & \|X(i) - X(j)\|_2 < r \\ 0 & \|X(i) - X(j)\|_2 > r \end{cases} \quad (6)$$



(a) 原始航拍图像



(b) Graph Cut 的分割结果



(c) Canny算子输出的边缘

图 3 图分割提取特征曲线示例

Fig. 3 Feature curve extraction comparison

2.3 曲线特征提取与匹配

设参考图像曲线上的点为 P , 对应变换图像曲线上的点为 \hat{P} , 仿射变换模型为

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \left(P + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \right) \quad (8)$$

这里有 4 个变换参数, s, θ, t_x, t_y 分别代表尺度参数, 旋转参数和平移参数。

首先应估计尺度参数, 在计算出尺度参数后将

式(6)表示, 对图像上任意两个像素点, 分别在一个小半径的圆域内计算该点统计信息, 式中 $histI, histT, X$ 分别代表该点邻域内的灰度直方图、纹理能量直方图和该点位置。可以看出, 按此式构造的矩阵为一大型稀疏矩阵。对其中的纹理特征, 采用 Daubechies 小波变换后 3 个高频子带能量作为纹理特征矢量, 而直方图距离函数则定义如下:

$$\chi^2(g, h) = \frac{1}{2} \sum \frac{(g_i - h_i)^2}{g_i + h_i} \quad (7)$$

式中, g, h 为直方图, g_i, h_i 为它们对应的 Bin。

还需要说明的是, W 矩阵的最优设计应当在正确分割之后才计算, 但是 W 本身又是为了求解分割问题的, 所以这里似乎存在着鸡生蛋还是蛋生鸡的问题。一般来说做图像分割的学者都会以循环的方式: 生成 W 矩阵求解分割问题 → 根据分割结果更新 W 矩阵。如果 W 矩阵的计算鲁棒性较好, 一般不需要迭代很多次 (考虑到求解时的计算量, 多次迭代也是难以忍受的)。为节约计算时间, 这里只构造一次 W 矩阵求解。图 3 给出在本文定义的 W 矩阵下利用基于 Graph Cut 的区域边界提取效果和 Matlab 版本 Canny 算子提取边缘的对比。

原始图像相应地做尺度变换补偿; 再估计旋转参数, 在经过尺度变换补偿后的图像上继续做旋转补偿; 最后估计平移参数, 平移量可以通过常见的归一化相关系数来计算。

(1) 设旋转角度为 θ , 对提取的曲线中的任意一点, 记该点切线斜率为 ψ , 且在另外一条曲线上的对应点的切线斜率为 $\hat{\psi}$, 显然有

$$\arctan\hat{\psi} = \arctan\psi + \theta \quad (9)$$

上述关系符合曲线上每一个点,那么也应符合整体分布关系,即待匹配的两曲线关于斜率对应倾角统计直方图之间存在常数偏移量 θ ,此常数可通过信号互相关求得。

(2) 设尺度参数为 s , 由于曲线上任意一点的曲率半径 R 正比与尺度变换参数, 即 $R(\hat{P}) = sR(P)$, 则有如下关系:

$$\ln |R(\hat{P})| = \ln |R(P)| + \ln s \quad (10)$$

上述关系符合曲线上每一个点, 同样也应符合整体分布关系, 即待匹配的两曲线关于曲率半径对数统计直方图之间存在常数偏移量 $\ln s$, 此常数同样可通过互相关求得。

3 基于 Hausdorff 距离的精匹配

有两个主要原因限制了曲线粗匹配的精确度。一是因为图分割方法的计算量和占用的内存都很大, 使得它只适合在 Gaussian 金字塔模型的低分辨率上进行; 另外一个原因是曲线匹配中对曲线斜率和曲率的计算误差, 以及遮挡物和噪音的影响, 使得粗匹配的结果往往与真实值仍然存在偏差。所以, 在较高分辨率层次上继续采用基于 Hausdorff 距离的进一步搜索方法, 获得最终准确的变换参数。

给出两个有限点集: $A: \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, $B: \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, 则 Hausdorff 距离定义^[4]为

$$D_H = \max(D_{AB}, D_{BA}) \quad (11)$$

式中, D_{AB} 定义为点集 A 到 B 的有向距离:

$$D_{AB} = \max_{a \in A} (d_{a,B}) \quad (12)$$

$d_{a,B}$ 又定义为点 a 到集合 B 的距离:

$$d_{a,B} = \min_{b \in B} (d_{a,b}) \quad (13)$$

由于 Hausdorff 距离 (HD) 度量了点集间最不匹配点的距离, 因此图像间 HD 距离可以作为一种快速简易的相似性度量, 当在某种变换下得到了最小 HD 距离时, 此变换便是所需的最佳变换。对传统 HD 的进一步修改, 有多种变化的 HD 距离。最常用的为部分 HD 距离, 能够排除一些外来点的干扰。为了求取部分 HD 距离, 首先要求出点集 A 中所有点到点集 B 的距离, 然后将这些距离由小到大排序, 其中序号为 k 的距离即为 K^{th} HD 距离。实际运算中 k 的值由一给定分数 f 与 A 集合的点数乘积来控制。修改 HD 距离为加权部分形式, 定义如下:

$$D_{AB}^{K^{\text{th}}} = K^{\text{th}} \min_{a \in A} \min_{b \in B} (w_{a,b} d(a,b)) \quad (14)$$

$w_{a,b}$ 是根据点 a, b 是否为图像局部边缘点还是区域边界点赋予的不同权值, 这是为了削弱纹理区域的伪边影响, 在计算 HD 距离的时候通过权值来削弱伪边缘点的贡献。

假设粗匹配步骤输出的变换参数估计值已经接近真实值, 则在精匹配步骤中只要在一个较小的区间上根据基于部分加权 HD 距离贪婪搜索更准确的变换参数, 步骤如下:

(1) 输入参考图与变换图的边缘图像、区域边界 (来自图分割)、粗匹配参数 (s^*, θ^*, t^*)

(2) 对边缘图做 3-4 型距离变换^[15]。

(3)

For 尺度参数 $s \in (s^* - \Delta s, s^* + \Delta s)$ (实验中 Δs 取 0.2, 搜索步长为 0.1)

For 旋转参数 $\theta \in (\theta^* - \Delta \theta, \theta^* + \Delta \theta)$ (实验中 $\Delta \theta$ 取 3, 搜索步长为 1)

For 平移参数 $t \in (t^* - \Delta t, t^* + \Delta t)$ (实验中 Δt 取 5, 搜索步长为 1)

将参考图根据当前参数 (s, θ, t) 做仿射变换; 根据式 (14) 计算图像间的部分加权 HD 距离;

End

End

End

(4) 记得到最小部分加权 HD 距离时的变换参数为最优估计参数。

4 实验与讨论

仿真实验中航拍图像尺寸为 256×256 pixel, 算法用 Matlab 7.0 实现, 实验环境为 P4 2.0G, 512M 内存。由于图分割步骤中要建立的相似性矩阵非常大 (虽然是稀疏矩阵), 且整个计算中最主要的计算量是图分割中特征值问题的求解, 所以通过建立 3 层图像 Gaussian 金字塔结构, 只在最低分辨率下 (64×64) 计算基于图分割的粗匹配, 其余两层采用加权部分 Hausdorff 距离精匹配。图 4 为航拍图像匹配示例, 其变换图为参考图经过仿射变换并加方差为 30 的高斯噪音得到。图 5 为图 4 中提取的区域边界的几何特征分布直方图。图 4 的示例匹配时间约为 8s。

由前文所述可以看出, 图分割算法考虑的是图像整体视觉信息, 噪音点和局部遮挡物对曲线提取步骤的影响很小; 而在精匹配步骤中用部分加权 HD 距离形式也能够剔除一部分异常点; 因此算法整体上对噪音不敏感。只要不改变图像整体结构,

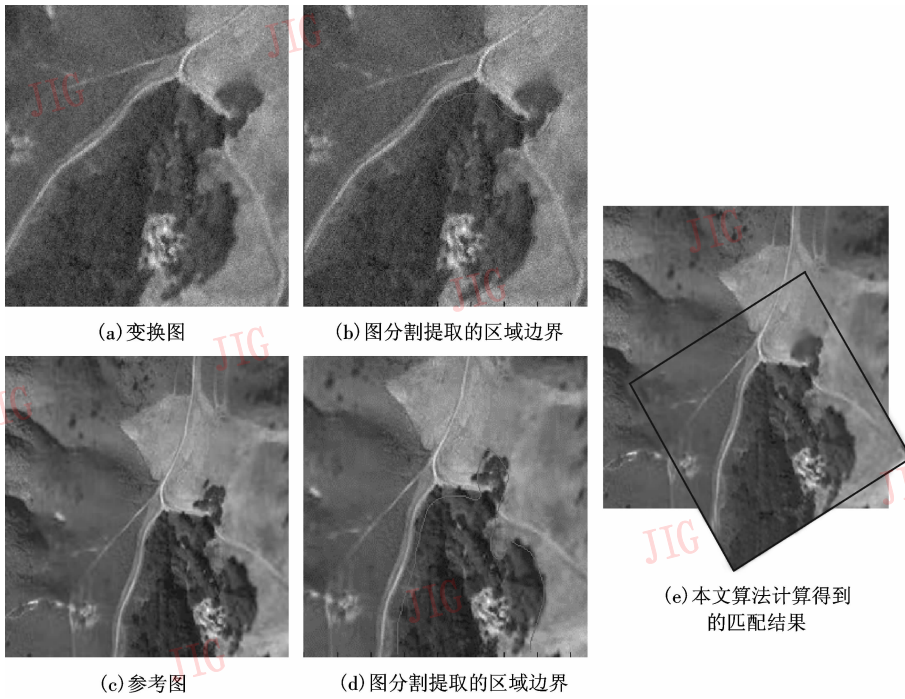


图 4 航拍图像匹配示例

Fig. 4 Pictures from plane

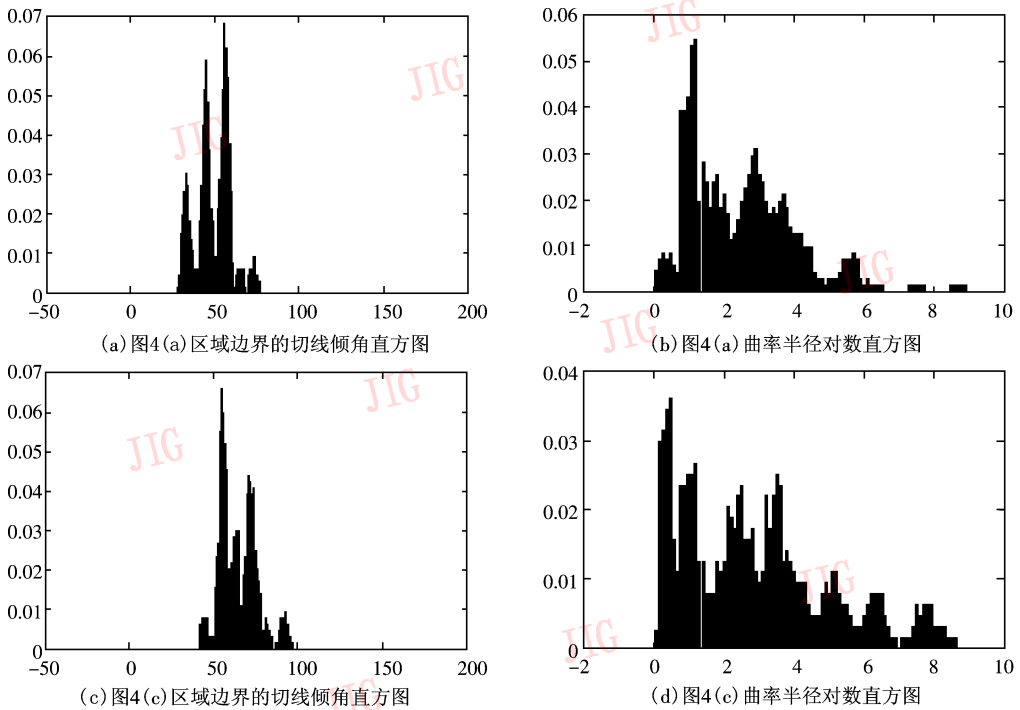


图 5 图 4 曲线几何特征分布示例

Fig. 5 Geometrical feature distribution

亮度改变也不会影响匹配过程。因此本文算法思想能够克服之前各种匹配算法对强噪音与遮挡物处理不足的弱点,其整体框架可以借用在多种应用背景

中,适合航拍图像、遥感图像、医学图像等匹配。

目前算法有 3 个方面需要进一步改进:

(1) 曲率半径的计算误差问题 尽管实验中对

离散曲线点做了 3 次样条插值,由于曲率半径计算需要 2 阶导数,且还需要进一步的 \log 计算,曲线提取和曲线拟合中的误差会在多次复杂的数值计算中被放大,使得最终曲率半径对数直方图很容易出现偏差,因此本算法对曲率多处为 0 的曲线(曲率半径无法得到)和大尺度变换(<0.7 或 >1.5)的情况下不够稳定。

(2)图分割提取区域边界不一致问题 该问题是图像处理领域至今没有解决的基本问题。由于变换图和参考图可能存在多处不重叠的区域,这些差异会导致两幅图像分割结果不一致,也就是提取的区域边界不一致。如果两条曲线本身就是不同区域边界,则无法正确估计变换参数。本算法一般要求图像重叠区域在 75% 以上。另外,还要求测试的图像要有明显的区域边界,否则可能不能产生较好的分割去帮助配准。

(3)影像匹配的实时性要求问题 图分割计算归结为大型矩阵的广义特征值求解,一般的求解算法计算量非常大。本文算法实现中采用的是 Lapack 库,其算法优化还有很大的提高余地。

5 结 论

针对具有复杂场景的图像提出一种基于图分割与 Hausdorff 距离的多分辨率图像匹配方法。在曲线提取步骤中采用图分割理论代替传统的边缘检测算子,能够合理地抑止纹理复杂区域的伪边。在曲线匹配步骤中通过计算曲线的切线倾角和曲率半径对数的分布,利用互相关求解变换参数。与常见的 2D 图像匹配方法相比,该算法能够处理一定范围内的缩放、任意的旋转和平移变换。

今后的研究方向在于如何进一步提高图分割提取曲线步骤的鲁棒性与计算效率,并需要提高对大尺度变换下的计算精确性。

参考文献 (References)

1 Brown L. A survey of image registration techniques[A]. In: ACM

Computing Surveys[C], New York, 1992: 325 ~ 376.

2 Kim Jeongtae, Fessler A Jeffrey. Intensity-based image registration using robust correlation coefficients [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2004, 23(11): 1430 ~ 1444.

3 Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation and scale invariant image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1266 ~ 1271.

4 Huttenlocher Daniel P, Klanderman Gregory A, Rucklidge William J. Comparing images using the hausdorff distance [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(9): 850 ~ 863.

5 Wang Hui-yan, Cheng Yi-yu. An image matching strategy based on information measures and hausdorff distance[J]. Journal of Image & Graphics, 2004, 9(11): 1314 ~ 1319. [王慧燕,程翼宇.基于信息测度特征和 Hausdorff 距离的图像匹配策略[J].中国图象图形学报, 2004, 9(11):1314 ~ 1319.]

6 Xiong Zhi, Liu Jian-ye, Zeng Qing-hua, et al. The study of image matching algorithm for scene matching aided navigation system[J]. Journal of Image & Graphics, 2004, 9(3): 29 ~ 34. [熊智,刘建业,曾庆化等.影像匹配辅助导航系统中的图像匹配算法研究[J].中国图象图形学报, 2004, 9(3):29 ~ 34.]

7 Wang Ya-ming. Image matching based on robust hausdorff distance [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(3): 238 ~ 241. [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.]

8 Shinji Umeyama. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(4): 376 ~ 380.

9 Rui Ting, Ding Jian, Wang Jin-yan, et al. Fast image matching method based on SVD [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(2): 212 ~ 216. [芮挺,丁健,王金岩等. SVD 特征的快速影像匹配方法[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(2): 212 ~ 216.]

10 Nie Xuan, Zhao Rong-chun, Kang Bao-sheng. A precise image registration method by utilizing the geometric feature of edges[J], Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(12): 1668 ~ 1673. [聂焜,赵荣椿,康宝生.基于边缘几何特征的图像精确匹配方法[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(12): 1668 ~ 1673.]

11 Shi J, Malik J. Normalized cuts and image segmentation[A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C], San Juan, Puerto Rico, 1997: 731 ~ 737.