

文章编号: 1001-0920(2006)01-0042-04

加权 Hausdorff 距离算法在 SAR/INS 景象匹配中的应用

冷雪飞, 刘建业, 熊智, 邢广华
(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 提出了一种基于特征图像分支点提取的加权 Hausdorff 距离图像匹配算法, 并给出了相应的权值求解公式。为满足景象匹配导航系统实时性的要求, 给出了细化处理的预处理方法, 减少了特征文件的冗余度, 提高了匹配搜索的快速性。同时, 基于细化后提取出的分支特征点, 应用加权 Hausdorff 距离算法进行图像匹配, 克服了斑点噪声对合成孔径雷达 (SAR) 图像匹配的影响。仿真分析表明, 该算法能满足 SAR/INS 景象匹配辅助导航系统实时性和准确性的要求。

关键词: 加权 Hausdorff 距离; 合成孔径雷达; 组合导航; 图像匹配
中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Application of Weighted Hausdorff Distance Algorithm in SAR/INS Scene Matching

L EN G X ue-fei, L IU J ian-ye, X ION G Zhi, X IN G Guang-hua

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
Correspondent: L IU J ian-ye, E-mail: nuaanrc@nuaanrc.com)

Abstract: A weighted Hausdorff distance image matching algorithm based on extracting bifurcating points on feature image is proposed. The corresponding weight formula is also put forward. A preprocessing of thinning the binary image is presented to meet the real-time need of scene matching aided navigation system. This preprocessing can reduce the redundancy of the database and speed up the global search time. Then, based on the bifurcating points extracted from thinning image, the application of the weighted Hausdorff distance algorithm to image matching can overcome the effect of speckle noise in the synthetic aperture radar (SAR) image. Simulation shows that this algorithm meet the real-time and accuracy needs of SAR/INS scene matching aided navigation system.

Key words: Weighted Hausdorff distance; Synthetic aperture radar; Integrated navigation; Image matching

1 引言

精确打击武器作为现代战争的产物已成为未来武器发展的趋势, 在用于精确打击武器的合成孔径雷达 (SAR)/惯性 (INS) 组合导航系统中, 需利用机载 SAR 实时获取地面景物图像, 并与机载计算机中预存储的二维景象数字地图比较, 确定出飞行器位置^[1]。由于图像匹配定位的精度很高, 因此可以利用这种精确的位置信息来消除惯导系统长时间工作的累计误差, 以大大提高惯导系统的定位精度^[2]。

为此, 国内外学者在用于 SAR 图像的图像匹配

算法上开展了大量的研究工作。其中, 基于 Hausdorff 距离的边缘图像匹配算法因其计算的简便性而得到广泛的应用, 如部分 Hausdorff 距离算法, 平均 Hausdorff 距离算法等。但这些传统的 Hausdorff 距离算法只能部分克服零均值高斯噪声对图像匹配的干扰, 而 SAR 图像受斑点噪声干扰严重, 并非高斯噪声^[3]。景象匹配辅助导航系统还有实时性的特殊要求。

针对以上情况, 本文提出了利用指纹特征提取算法中的细化方法作为 SAR 图像匹配的预处理算

收稿日期: 2004-12-24; 修回日期: 2005-03-18

基金项目: 国防科技预研跨行业基金项目 (51409040201HK0206)。

作者简介: 冷雪飞 (1978—), 女, 江苏扬州人, 博士生, 从事惯性技术、图像特征匹配导航与组合导航系统的研究;
刘建业 (1957—), 男, 浙江乌镇人, 教授, 博士生导师, 从事惯性技术、GPS、组合导航系统等研究。

法 由于在指纹算法中也要求特征文件尽可能小, 以减少搜索时间^[4,5], 所以采用指纹特征提取算法中的细化算法来减少特征信息的冗余量, 理应获得满意的效果 同时, 本文利用指纹特征提取算法提取出的边缘图像的分支点, 进行加权 Hausdorff 距离匹配, 并给出了相应的权值求解公式, 能有效解决斑点噪声对图像匹配精度的干扰 仿真分析表明, 此改进算法能满足 SAR/NS 组合导航系统的要求

2 SAR 图像匹配前的细化预处理

Hausdorff 距离算法是利用图像特征进行匹配, 图像特征提取算法是图像匹配导航系统中的关键技术 由于导航系统实时性要求, 使无论对于由哪种算子提取出的特征文件, 文件内容都显庞大, 特征信息量冗余 对此本文对边缘特征二值图采用细化手段, 来减少冗余的信息量, 加快匹配搜索时间

2.1 边缘特征二值图像去噪

采用 Canny 算子作为图像特征提取算法, 通过将获得的特征进行二值化来获取所需的边缘特征二值图 但此图边缘轮廓上仍存在孔洞或“毛刺”和孤立值为 1 的像素 所以在做细化算法前, 须先进行去噪处理, 来填充和删除上述噪声点^[6]. 约定在边缘特征二值图像中, 1 为特征点, 0 为非特征点 填充过程即把原本是 0 的特征点变为 1, 填补边缘轮廓上的孔洞; 删除过程则把原本是 1 的特征点变为 0, 删除边缘轮廓上的“毛刺”和孤立值为 1 的像素, 使用 3×3 模板 (图 1). 算法的步骤如下:

- 1) 计算当前像素点 P 的 8 邻域像素点值;
- 2) 设标志位

$$flag_1 = P_1 + P_3 + P_5 + P_7,$$

$$flag_2 = (P_1 + P_2 + P_3)(P_5 + P_6 + P_7) + (P_3 + P_4 + P_5)(P_7 + P_8 + P_1);$$

- 3) 若 $P = 0$ 且 $flag_1 \geq 3$, 即 P 的 4 邻域中有 3 个以上的值为 1 的点, 则 $P = 1$; 否则, 若 $P = 1$ 且 $flag_2 = 0$, 则 $P = 0$

2.2 去噪后二值图像细化

经过去噪后的边缘特征二值图便可进行细化 因细化后的边缘轮廓宽度为 1 个像素, 所以对图像细化有助于突出图像的轮廓特征和减少冗余信息量, 同时细化也便于后面进行分支特征点的提取 但常规细化算法不能对称进行细化, 即若从左到右按行扫描图像, 西北边界的像素首先被去掉, 最后细化得到的线条为目标的东南边界^[7]. 因此本文引入改进后的细化算法, 对整幅图像分别进行两次扫描后, 再去掉了作了标记的像素

细化算法的具体实现步骤如下:

第 1 次扫描:

1) 从左到右, 从上到下顺序扫描整幅图像, 计算当前像素点 P 的 8 邻域像素点值;

2) 令 N_c 为 $P_1P_2P_3P_4P_5P_6P_7P_8P_1$ 中 0 值变 1 值的次数;

3) 令

$$N_B = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8;$$

4) 若 当前像素点为 1 (保证为特征点); $N_c = 1$ (保证连通性) 且 $2 \leq N_B \leq 6$ (排除 P 为端点和内部点); $P_1 \times P_3 \times P_7 = 0$ 且 $P_1 \times P_5 \times P_7 = 0$ (检测东南边界); 当 P_3 或 P_5 已标记时, 若视 P_3 和 P_5 为 0, 依然有 $N_c = 1$ (保证宽度为 2 的线条不断开). 上述 4 个条件全部满足, 则将该中心像素作标记

第 2 次扫描:

基本步骤同第 1 次扫描, 但从第 4) 步的第 1 小步起应改为: $P_1 \times P_3 \times P_5 = 0$ 且 $P_3 \times P_5 \times P_7 = 0$ (检测西北边界); 当 P_1 或 P_7 已标记时, 若视 P_1, P_7 为 0, 依然有 $N_c = 1$. 上述 4 个条件全部满足, 则将该中心像素作标记

两次扫描完成后, 去掉作标记的像素再重复第 1 和第 2 次扫描, 直到所有点都不可删除为止, 即完成了二值图像细化 用此法细化后的图像进行图像匹配时, 由于特征文件减小, 提高了系统的实时性

3 SAR 图像特征点中分支点的提取

SAR 边缘特征二值图中存在分支点, 且这些分支点不易受噪声的干扰 在细化后的二值图中, 可用图 1 所示的模板来提取这些分支点, 并将其作为权值较大的特征点来计算加权 Hausdorff 距离, 可提高图像匹配的精度 分支点的 8 邻域像素特征图如图 2 所示 由图可见, 分支点周围像素的值从 0 变到 1 或从 1 变到 0 的次数 T 为 6 次, 判断公式如下:

$$T = \sum_{i=1}^8 |P_i - P_{i+1}|$$

其中: $P_i = 0$ 或 $1, P_9 = P_1$.

经过去噪、细化和分支点提取后的图像如图 3 所示

P4	P3	P2
P5	P	P1
P6	P7	P8

1	0	1
0	P	0
0	1	0

图 1 3×3 模板

图 2 分支点特征

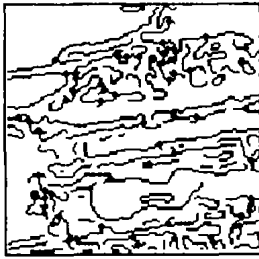


图3 SAR图像特征提取结果(分支点为黑色圆点)

4 基于加权 Hausdorff 距离的 SAR 图像匹配

由于 SAR 图像受斑点噪声影响, 所以图像匹配时需减小斑点噪声干扰^[8]。而传统 Hausdorff 距离算法对减少此干扰并不明显。为此本文提出将 SAR 图像中一般特征点和分支点分别加权求平均的加权 Hausdorff 距离算法, 并推导出相应的权值计算公式, 可明显改善斑点噪声的影响, 增强算法的鲁棒性。

4.1 加权 Hausdorff 距离算法及权值求解公式

为了匹配被斑点噪声污染的图像, 获得更加准确的目标匹配结果, 结合传统 Hausdorff 距离定义, 本文研究了加权 Hausdorff 距离 WHD 算法^[9]。具体公式如下:

$$h_{\text{WHD}}(A, B) = \frac{1}{N_{aA}} \sum_{a \in A} w(a) \cdot d(a, B),$$

$$w(a) = N_{aA} \quad (1)$$

其中: A 和 B 是两个点集, N_{aA} 是点集 A 中特征点的总数, a 是属于 A 中的一个特征点; $d(a, B)$ 是点集 A 中的特征点 a 到点集 B 的距离; $w(a)$ 是此距离的权值。

本文为了提高 SAR 图像匹配的准确性, 给出了计算相应权值的计算方法, 具体如下: 在 SAR 边缘特征二值图像中, 我们把特征点分为一般特征点、分支点和欲排除点 3 类, 分别令其权值为 $w(c)$, $w(b)$ 和 $w(e)$ 。其中: 分支点是由上述算法提取的(图 3 中的黑色圆点), 由于受斑点噪声的影响小, 则 $w(b)$ 权值较大; 欲排除的点特指那些远离中心的噪声点、漏检点, 因为 Hausdorff 距离是度量两个点集之间最不匹配点的距离, 因此它对上述噪声点、漏检点非常敏感, 故令其权值 $w(e)$ 为 0; 在所有的特征点中, 除去分支点和欲排除点, 剩下的就是一般特征点了, 可令其权值 $w(c)$ 为 1。为求出权值 $w(b)$, 可将点集 A 中所有点到点集 B 的距离按由小到大的顺序排序, 若取其中序号 k 的距离为 $d_k(A, B)$, 则可通过调整 k 的大小, 将点集 A 的一个部分与点集 B 进行匹配, 便可排除由噪声点和漏检点引起的匹配影响。其中: k

$= f \times N_{aA}, 0 \leq f \leq 1$ 。可见, 点集 A 中将有 $(N_{aA} - k)$ 个点被排除在外, 且其权值 $w(e) = 0$; 而一般特征点的权值为 $w(c) = 1$; 同时令 A 中分支点的个数为 n_o , 即可由式(1)得到分支点的权值

$$w(b) = \frac{N_{aA} - k}{n_o} + 1 \quad (2)$$

由于此算法不仅能改善斑点噪声的影响, 也考虑了远离中心的噪声点和漏检点的影响, 克服了遮挡对图像的影响。所以, 该算法能增强 SAR 图像匹配的鲁棒性。

4.2 SAR 图像匹配流程

SAR/NS 景象匹配辅助导航的目标是将 SAR 和光学传感器从同一景物录下的两幅图像在空间上进行对准, 并确定出两幅图像之间相对平移与旋转的相似变换参数。SAR 景象匹配辅助导航系统需实时向惯导系统提供精确的位置修正信息, 因此对图像匹配过程的实时性和准确性有较严格的要求。通过上几节对图像匹配算法的分析可看出, 本文提出的图像匹配算法能有效的提高图像匹配效率。

给定参考图像 A , 实测图像 B , 整体的 SAR 图像匹配算法的具体实现步骤如下:

- 1) 分别用 Canny 算子提取图像 A 和 B 的边缘特征并将其二值化;
- 2) 将图像 A 和 B 的边缘特征二值图去噪;
- 3) 将去噪后的图像 A 和 B 的二值图进行细化;
- 4) 提取细化后的图像 A 和 B 的分支特征点, 并分别另存于数组 $\text{flag-}f_A$ 和 $\text{flag-}f_B$ 中;
- 5) 采用 3-4D T 算法进行细化后图像中特征点集在二维空间中的距离变换计算, 从而进一步提高匹配效率^[3];
- 6) 用第 5 步得到的图像 A 和 B 的距离变换矩阵和 $\text{flag-}f_A, \text{flag-}f_B$ 数组一起进行加权 Hausdorff 距离计算, 其权值则按式(2)计算;
- 7) 寻找具有最小加权 Hausdorff 距离度量值的匹配点作为最终匹配点, 得到精确的目标。

5 SAR 图像匹配仿真

为了验证本文算法的有效性, 利用 SAR 图像进行匹配仿真实验, 分别测试了图像匹配的准确性和实时性。图像匹配算法采用 Visual C++ 6.0 语言编写, 在主频为 Pentium 2.80GHz, 内存 512M 的 PC 机上进行测试。在图像匹配过程中, 选取参考图的匹配参数为 $f = 0.85$, 实测图的为 $f = 0.8$ 。

5.1 斑点噪声对算法精确度的影响

在斑点噪声对算法精确度影响仿真实验中, 采用平均 Hausdorff 距离 (MHD) 算法作为对比分析。选用的 SAR 图像实测图、参考图像和匹配结果如图

4 所示 具体对比见表 1. 由实验结果可见, 在斑点噪声较小的阶段, 二种算法的效果差不多, 但随着斑点噪声的增大, 加权 Hausdorff 距离算法的精度好于平均 Hausdorff 距离算法

表 1 基于斑点噪声影响的图像匹配结果比较表

仿真实例	参考图大小	实测图大小	正确匹配点	斑点噪声 n	匹配结果	
					匹配点 (WHD)	匹配点 (PHD)
				0.04	46, 51	
SAR	128 × 128	64 × 64	46, 52	1.00	46, 52	46, 50
				10.0	50, 23	

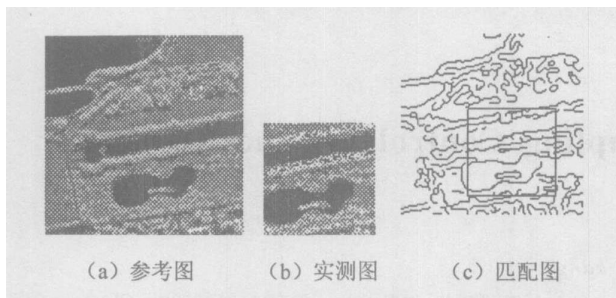


图 4 SAR 图像实测图与参考图像匹配(斑点噪声 $n=0.04$)

5.2 算法的快速性

在图像匹配前, 先通过细化特征点来减少特征文件的冗余度, 可以加快匹配速度. 本文将没有进行细化预处理的图像进行部分 Hausdorff 距离算法匹配, 经过细化预处理的图像进行加权 Hausdorff 距离匹配, 具体匹配时间表如表 2 所示. 由实验结果可以看出, 细化处理能有效的提高系统的实时性

表 2 图像匹配实时性结果表

仿真实例	参考图大小	实测图大小	正确匹配点	斑点噪声 n	匹配结果	
					匹配点	匹配时间
WHD	256 × 256	100 × 100	117, 68	0.04	117, 68	0.479 398
PHD			117, 68		117, 70	0.997 501

6 结 语

本文针对 SAR/NS 景象匹配辅助导航系统需要实时精确获取飞行器位置的要求, 给出了一种快速有效的基于分支特征点提取的导航用图像匹配算法. 利用图像的分支特征点, 不但可以提高匹配的效率和增强了匹配的鲁棒性. 仿真分析表明, 尽管实测图与参考图相比存在着斑点噪声以及其他边缘点的干扰, 仍能快速准确地匹配图像中的目标. 同时必须看出, 图像中特征分支点数目的分布并不均匀, 某些区域数目稀少或者为零, 利用分支点来加权匹配显然不合适. 因此, 在这些区域, 如何自动的调整

合适的权值, 还需开展进一步的研究. 比如, 可利用神经网络来训练系统在不同密度的特征点区域选择不同的权值, 从而减少图像匹配的误匹配率

参考文献 (References)

- [1] 冷雪飞, 刘建业, 熊智. 合成孔径雷达在导航系统中的应用[J]. *传感器技术*, 2004, 23(10): 4-7.
(Leng X F, Liu J Y, Xiong Z. Application of Synthetic Aperture Radar in Navigation System [J]. *J of Transducer Technology*, 2004, 23(10): 4-7.)
- [2] Sim Dong-gyu, Park Rae-hong, Kim Rin-chul, et al. Integrated Position Estimation Using Aerial Image Sequences [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(1): 1-18
- [3] 熊智, 刘建业, 曾庆化, 等. 景象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(1): 29-34.
(Xiong Z, Liu J Y, Zeng Q H, et al. The Study of Image Matching Algorithm for Scene Matching Aided Navigation System [J]. *J of Image and Graphics*, 2004, 9(1): 29-34.)
- [4] Ratha N K, Karu K, Shaoyun Chen, et al. A Real-time Matching System for Large Fingerprint Databases [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(8): 799-813
- [5] Espinosa-Duro V. Minutiae Detection Algorithm for Fingerprint Recognition [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2002, 17(3): 7-10
- [6] 黄贤武, 苏鹏程, 柏培权. 基于方向滤波分割的指纹自动识别系统算法[J]. *中国图象图形学报*, 2002, 7(8): 829-834.
(Huang X W, Su P C, Bai P Q. Algorithm for an Automatic Fingerprint Identification System Based on Oriented Filtering and Segmentation [J]. *J of Image and Graphics*, 2002, 7(8): 829-834.)
- [7] 陈勇. *指纹的识别与分类*[D]. 上海: 上海交通大学, 2001: 23-25.
(Chen Y. *Fingerprint Identification and Classification* [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2001: 23-25.)
- [8] Lopez-Martinez C, Fabregas X. Polarimetric SAR Speckle Noise Model [J]. *IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2232-2242
- [9] Lu Y, Chew L T, Huang W H, et al. An Approach to Word Image Matching Based on Weighted Hausdorff Distance [A]. *Proc of the Sixth Int Conf on Document Analysis and Recognition* [C]. Seattle, 2001: 921-925.