

基于分支特征点的导航用实时图像匹配算法

冷雪飞¹ 刘建业¹ 熊智¹

摘要 为了满足景象匹配辅助导航系统需要同时获取飞行器位置和航向偏差的需要, 提出了一种基于分支特征点提取的图像匹配算法. 传统的图像匹配算法需要全局搜索匹配特征点, 耗时巨大, 而只提取分支特征点来匹配能满足导航系统实时性的要求. 在匹配算法方面, 提出了采用加权 Hausdorff 距离算法来进行匹配. 同时, 根据分支特征点的特性, 推导了相应的权值求解公式. 仿真结果表明, 本文提出的匹配算法耗时较短, 能满足导航系统实时性的要求, 且定位参数的求解也完全正确.

关键词 加权 Hausdorff 距离, 特征点提取, 景象匹配辅助导航系统
中图分类号 TP391.41

A Real-time Image Matching Algorithm for Navigation System Based on Bifurcation Extraction

LENG Xue-Fei¹ LIU Jian-Ye¹ XIONG Zhi¹

Abstract In order to ensure that the scene matching aided navigation system can acquire the aircraft position errors and yawing errors simultaneously, here we propose an image matching algorithm based on bifurcation extraction. Replacing the global search, which in image matching is a highly time consuming task, a method of extracting bifurcation for matching is presented to solve the duration problem. In this paper, an approach of the weighted Hausdorff distance algorithm is described to handle large search spaces. Moreover, based on the characteristics of the bifurcation, the corresponding weight formula in the weighted Hausdorff distance is put forward. Simulation results show that the matching algorithm takes 0.5 seconds (reference image being 160×160 pixels, query image being 80×80 pixels), and that the location parameters calculation is correct.

Key words Weighted Hausdorff distance, feature points extraction, scene matching aided navigation system

1 引言

精确打击武器作为现代战争的产物在未来将占据越来越重要的地位. 应用在精确打击武器中的景象匹配辅助导航系统是将实测图与预先存储在机载计算机中的二维数字地图相匹配来确定飞行器位置的. 由于图像匹配具有很高的精度, 可以用来消除惯导系统长时间工作所产生的累积误差, 以此来改善惯导系统的定位精度. 在导航定位系统中, 数字地图一般是由光学传感器获取的, 因此, 卫星图像和数字地图的匹配从本质上说是多传感器图像匹配. 由于这两类图像是在不同时间, 从不同的观测角度, 在不同气候条件下获取的, 因此图像匹配算法必须有足够的鲁棒性.

为此, 国内外研究者在图像匹配算法方面开展了大量的研究. 在景象匹配辅助导航系统中, 由

于从不同的传感器获取的图像灰度不一致甚至相反, 因此必须提取图像的边缘特征进行匹配. 同时, 由于图像中不可避免的存在噪声和几何畸变, 图像匹配算法必须具有一定的鲁棒性. 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. Hausdorff 距离用来度量两个点集之间的匹配程度, 受平移、旋转和尺度变化的影响较小, 且易于计算. Huttenlocher 在研究目标检测时首先提出了 Hausdorff 距离^[1], 但它受物体遮挡和外部点的影响较大. 因此, 研究者们又提出了部分 Hausdorff 距离 (Partial Hausdorff distance, PHD)、平均 Hausdorff 距离 (Weighted Hausdorff distance, WHD) 等理论^[2]. 但这些传统的 Hausdorff 距离算法只能克服零均值高斯噪声对图像的影响^[3], 而在多传感器图像匹配中, 噪声源通常情况下并非单纯的零均值高斯噪声^[4]. 并且, 传统 Hausdorff 距离算法基本上是采用全局搜索特征点, 耗时较大, 难以满足景象匹配辅助导航系统实时性的要求. 基于以上原因, 提高匹配速度、精度和鲁棒性的关键就在于特征点的选取. 虽然在图像匹配算法方面已经开展了大量的研究, 但在如何提取合适的特征点匹配以满足导航系统的特殊要求方面仍然有待探索.

收稿日期 2005-12-22 收修改稿日期 2006-4-3
Received December 22, 2005; in revised form April 3, 2006
国防科技预研跨行业基金 (51409040201HK0206) 资助
Supported by National Defence Science and Technology Pre-research Intertrade Foundation of P. R. China (51409040201HK0206)
1. 南京航空航天大学自动化学院导航研究中心 南京 210016
1. Navigation Research Center, College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016
DOI: 10.1360/aas-007-0678

本文提出了一种基于分支点提取的导航用实时图像匹配算法, 利用加权 Hausdorff 距离来获取定位信息. 并基于分支点的特性, 推导了相应的权值求解公式. 最后通过与部分 Hausdorff 距离算法 (PHD) 的对比仿真实验验证了本文算法的有效性.

2 分支点提取

本文所提出的匹配算法是基于特征点匹配的, 因此特征点的提取是关键. 为了保证导航系统的精确性和实时性, 特征数据不能太大且要包含丰富的信息量. 而图像中的分支点就是这样的特征点, 它在细化后的图像上拥有两个以上的邻点, 易于提取, 且具有较强的克服噪声的能力.

首先, 采用 Canny 算子获取图像的边缘特征二值图, 1 和 0 分别代表特征点和非特征点. 然后, 利用文献 [5, 6] 介绍的方法对边缘二值图像去噪、细化. 去噪的目的是为了填补二值图像上的空洞和去除孤立点; 而细化有助于突出图像的轮廓特征, 减小搜索空间, 使分支点更易于提取. 最后, 在处理完毕的图像中提取分支点. 在下文将要提到的加权 Hausdorff 距离算法中, 我们将根据不同特征点对 Hausdorff 有向距离的贡献大小对它们赋予不同的权值, 其中分支点的权值是大于其它特征点的.

在细化后的图像中, 利用图 1 所示的模板来提取分支点. 由图 2 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.

P4	P3	P2
P5	P	P1
P6	P7	P8

图 1 3 × 3 模板图

Fig. 1 Block of 3 × 3 pixels

1	0	1
0	P	0
0	1	0

图 2 分支点特征图

Fig. 2 The feature image of bifurcation

分支点的判断公式如下

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

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 3 的结果如图 4 所示.

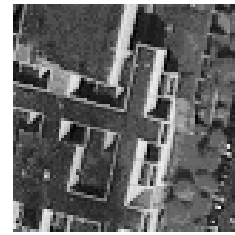


图 3 原图

Fig. 3 The original image



图 4 图像特征提取结果图 (黑色圆点为分支点)

Fig. 4 The result image for extracted bifurcations (black dots as bifurcations)

3 加权 Hausdorff 距离匹配

Hausdorff 距离算法的特点是易于计算^[7], 因此它被广泛应用于二维图像匹配中. 然而传统 Hausdorff 距离算法有其局限性, 即不能克服非高斯噪声的影响. 但在实际情况中, 噪声和几何形变都是难以避免的. 因此本文提出了将图像中的一般特征点和分支点分别加权求平均的加权 Hausdorff 距离算法, 并推导了相应的权值计算公式. 具体如下:

$$H(A, B) = \max(h_{WHD}(A, B), h_{WHD}(B, A)) \quad (2)$$

$$h_{WHD}(A, B) = \frac{1}{N_a} \sum_{a \in A} w(a) \cdot d(a, B) \quad (3)$$

$$\sum_{a \in A} w(a) = N_a \quad (4)$$

其中, A, B 是两个点集. N_a 是点集 A 中特征点的总数, a 是属于 A 的一个特征点. $d(a, B)$ 是点集 A 上特征点 a 到点集 B 的距离 (例如: 欧氏距离), $w(a)$ 表示此距离的一个权重. 因此, $h_{WHD}(A, B)$ 和 $h_{WHD}(B, A)$ 就分别代表了从点集 A 到点集 B 和从点集 B 到点集 A 的有向距离. 因为加权

Hausdorff 距离 $H(A, B)$ 结合了 $h_{WHD}(A, B)$ 和 $h_{WHD}(B, A)$ 的信息, 因此它是图像匹配的一个合理的匹配准则.

根据不同类型特征点的特性, 本文推导了加权 Hausdorff 距离算法中的权重计算公式. 在细化后的图像中, 我们将特征点分为普通特征点、分支点和欲排除的点三大类. 令 $w(c)$ 、 $w(b)$ 和 $w(e)$ 分别为普通特征点、分支点和欲排除点的权值. 由于分支点相对于其他特征点更稳定、不易受噪声和旋转的干扰, 因此 $w(b)$ 的权重应比较大. 因为 Hausdorff 距离度量的是两个点集之间的最不匹配点的距离, 它对噪声点和漏检点非常敏感, 我们需排除它, 因此令 $w(e)$ 为 0. 除了上述两类点, 余下的即为一般特征点, 令 $w(c)$ 为 1.

将点集 A 到点集 B 的所有距离从小到大排序, 其中, 比较大的距离一般是由远离中心的噪声点和漏检点引起的, 我们可以设法排除它们. 设 $d_k(A, B)$ 是排序后的第 k 个距离, 通过调整 k 的大小可以将点集 A 的一部分与点集 B 相匹配, 即 $k = f \times N_a$, $0 \leq f \leq 1$. 由此可以将由于噪声点和漏检点所引起的误匹配最大程度的避免. 在点集 A 中, 我们共排除了 $(N_a - k)$ 个点, 且 $w(e) = 0$, $w(c) = 1$, 设 N_o 为提取出的分支点总数, 可得如下权重求解公式

$$w(b) = \frac{N_a - k}{N_o} + 1 \quad (5)$$

由此我们得到了分支点的权重求解公式.

本文所提出的算法不仅能改善非高斯噪声的影响, 而且考虑到了漏检点对图像匹配的影响, 即能克服遮挡对图像的影响. 所以, 该算法能增强图像匹配的鲁棒性.

4 导航用实时图像匹配算法总流程

基于分支点的特性, 我们提出了导航用加权 Hausdorff 距离算法, 此算法能明显提高导航系统的精度和实时性. 其匹配的主要流程如下:

1) 采用 Canny 算子分别提取参考图和实测图的边缘, 得到参考图特征二值图和实测图特征二值图;

2) 将两幅特征二值图分别去噪、细化, 得到预处理后的参考图 A 和实测图 B ;

3) 在参考图 A 和实测图 B 中, 采用 3-4DT 算法进行特征点集在二维空间中的距离转换, 得到图像距离转换矩阵 J_A 和 J_B ;

4) 提取参考图 A 和实测图 B 中的分支点, 并分别存储到矩阵 $|flag-fA|$ 和 $|flag-fB|$ 中;

5) 根据式 (2), 结合 J_A 、 J_B 、 $|flag-fA|$ 和 $|flag-fB|$ 来求取加权 Hausdorff 距离, 其中权重

的求解公式参见式 (5);

6) 具有最小 Hausdorff 距离的点就是最终匹配点. 由此获取初步的定位信息;

7) 最后, 利用最小二乘算法对所有的匹配点对进行一一对应, 来获取更为精确的位置信息.

5 图像匹配仿真结果和讨论

为了验证本文算法的有效性, 利用光学卫星 IKONOS 图像和合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 图像进行匹配仿真实验. 编程工具选用 Visual C++ 6.0, 在主频为 Pentium 2.80GHz, 内存为 512M 的 PC 机上进行测试. 在图像匹配算法中, 参考图的参数 f 设为 0.85, 实测图的参数 f 设为 0.8.

表 1 显示了不同类型图像匹配之间的对比结果. 图 5~7 和图 8~10 分别显示了两种类型图像的匹配结果. 在类型 1 中, 参考图为光学卫星 IKONOS 图像; 在类型 2 中, 参考图为 SAR 图像. 由表 1 可见, 当斑点噪声和参考图的旋转角度增大时, 算法的定位精度开始下降, 且匹配耗时也开始增大. 然而本文所提出的加权 Hausdorff 距离算法的定位精度比 PHD 算法的定位精度下降的慢. 同时, 在匹配相同的图像时, 本文算法所消耗的时间明显少于 PHD 算法. 当斑点噪声超过 5.0 或者旋转角度大于 4 度时, PHD 算法就已经不能准确定位了, 且耗时增加. 而本文的算法在此情况下不受影响. 由此可见, 本文的匹配算法能更好的满足导航系统实时性和准确性的要求, 比传统的 Hausdorff 距离算法更为有效.

本文提出了景象匹配辅助导航系统用的基于分支点提取的加权 Hausdorff 距离算法. 仿真结果表明, 本文算法能很好的满足导航系统实时性和准确性的要求. 在非高斯噪声和旋转角度并存的情况下, 定位精度达到 1 个像素以内, 且能保持实时性. 同时, 如定位误差可以放宽至 3 个像素以内, 此算法可以测量的最大旋转角度可达 7 度, 在景象匹配辅助导航系统中, 已经能够完全满足实用要求. 仿真数据表明, 分支点的提取能够影响图像匹配算法的精度、实时性和鲁棒性.

然而, 在图像中分支点的分布并不均匀, 在分支点较多的地方, 匹配结果更准确, 耗时更少, 算法对噪声有更好的鲁棒性; 而在分支点分布较稀疏的地方, 情况相反. 因此, 不同类型的图像有可能产生不同的匹配结果. 下一步的研究将建立一种智能的搜索策略来帮助本文算法提取更为优化的分支点.



图5 光学卫星参考图

Fig.5 Optical satellite reference image

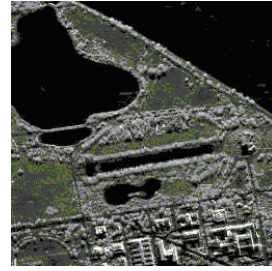


图8 合成孔径雷达参考图

Fig.8 SAR reference image

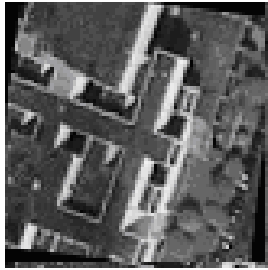


图6 光学卫星实测图

Fig.6 Optical satellite query image

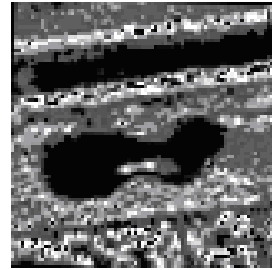


图9 合成孔径雷达实测图

Fig.9 SAR query image



图7 光学卫星图像匹配结果图

Fig.7 Matching of optical satellite image query with reference

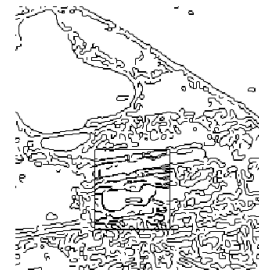


图10 合成孔径雷达匹配结果图

Fig.10 Matching of SAR image query with reference

表1 不同类型图像匹配结果对比表

Table 1 Image matching results of different cases

仿真类型	参考图尺寸 (像素)	实测图尺寸 (像素)	正确匹配点	斑点噪声	旋转角度 (度)	匹配结果			
						本文算法		PHD	
						匹配点	耗时 (秒)	匹配点	耗时 (秒)
IKONOS	128 × 128	64 × 64	(46,52)	0.04	0	(46,52)	0.093	(46,51)	0.430
	128 × 128	64 × 64	(46,52)	1	0	(46,52)	0.106	(46,50)	0.511
	128 × 128	64 × 64	(46,52)	5.0	0	(45,52)	0.250	(50,23)	0.713
	160 × 160	80 × 80	(20,48)	0.04	1	(19.9,48.4)	0.308	(18,46)	0.675
	160 × 160	80 × 80	(20,48)	0.04	4	(19.5,47.8)	0.315	(17,45)	0.787
SAR	256 × 256	80 × 80	(80,137)	0.02	2	(80.9,136.7)	1.344	(76,135)	2.150
	256 × 256	80 × 80	(122,67)	0.03	5	(122.7,67.9)	1.520	(23,60)	3.690
	256 × 256	100 × 100	(117,68)	0.04	2	(117,68)	1.479	(117,70)	1.998
	160 × 160	80 × 80	(30,40)	0.04	6	(29.4,39)	0.389	(18,46)	0.823
	160 × 160	80 × 80	(30,40)	0.04	7	(27.8,37.9)	0.489	(13,56)	0.968

6 结论

本文提出了一种基于分支点提取的导航用图像匹配算法,并推导了相应的权值求解公式.从仿真分析来看,此算法能明显减少特征数据量的冗余度,提高匹配效率.在图像存在非高斯噪声和角度偏差的情况下,算法也能够得到准确的匹配结果.然而,导航系统用实时图像匹配算法依然是一个研究的热点,进一步的探索仍需展开.

References

- 1 Huttenlocher D P, Klanderman G A, Rucklidge W J. Comparing images using the Hausdorff distance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, **15**(9): 850~863
- 2 Sim D G, Kwon O K, Park R H. Object matching algorithm using robust Hausdorff distance measures. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**(3): 425~429
- 3 Sim D G, Park R H, Kim R C, Lee S U, Kim I C. Integrated position estimation using aerial image sequences. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(1): 1~18
- 4 Xiong Zhi, Liu Jian-Ye, Zeng Qing-Hua, Lai Ji-Zhou. The study of image matching algorithm for scene matching aided navigation system. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(1): 29~34
(熊智,刘建业,曾庆化,赖际舟.景象匹配辅助导航系统中的图像匹配算法研究.中国图象图形学报,2004, **9**(1): 29~34)
- 5 Virginia E D. Minutiae detection algorithm for fingerprint recognition. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2002, **17**(3): 7~10
- 6 Ratha N K, Karu K, Chen S Y, Jain A K. A real-time matching system for large fingerprint databases. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(8): 799~813
- 7 Lu Y, Tan C L, Huang W H, Fan L Y. An approach to word image matching based on weighted Hausdorff distance. In: Proceedings of IEEE Sixth International Conference on Document Analysis and Recognition. IEEE, 2001. 921~925



冷雪飞 南京航空航天大学导航研究中心博士生研究生.研究方向为惯性技术,图像特征匹配导航与组合导航系统.本文通信作者.

E-mail: lengxuefei@nuaa.edu.cn

(LENG Xue-Fei Ph.D. candidate at Navigation Research Center, College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her research interest covers inertial technology, image feature matching for navigation and integrated navigation system. Corresponding author of this paper.)



刘建业 南京航空航天大学自动化学院教授.研究方向为惯性技术、GPS、组合导航和智能测控系统.

(LIU Jian-Ye Professor at College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interest covers inertial technology, GPS, integrated navigation, and intelligent measurement and control system.)



熊智 博士.南京航空航天大学自动化学院副教授.研究方向为惯性技术,图像特征匹配导航与组合导航系统的研究.

(XIONG Zhi Associate professor at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. He received his Ph.D. degree from the same university. His research interest covers inertial technology, image feature matching for navigation and integrated navigation.)