

基于高程选择的 SAR 景象匹配系统 基准图选择准则*

赵 倩¹, 许家栋¹, 袁健全², 陈旭情²

(1 西北工业大学电子信息学院, 西安 710072; 2 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要:景象匹配技术是飞行器自主精确制导的关键技术之一,随着武器系统日益精确化,影响匹配制导精度的基准图选择得到了广泛的关注。在合成孔径雷达侧视成像机理的基础上,讨论了高程起伏对 SAR 图像的影响,引入了图像高程方差的概念。同时,以图像匹配的准确性、稳定性、可靠性为考察量,讨论了各特征参数对匹配性能的影响。文中对真实星载 SAR 图像进行匹配试验的结果表明,此准则是有效的。

关键词:SAR;景象匹配;基准图选择准则;图像高程方差

中图分类号:V249.3;TP391.41 **文献标志码:**A

Reference Image Selection Roles for SAR Scene Matching Guidance Based on Elevation Selection

ZHAO Qian¹, XU Jiadong¹, YUAN Jianquan², CHEN Xuqing²

(1 School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: The suitability of the reference image is very important in scene matching of the navigation of unmanned vehicle. In this paper, first, we analyze the influence of elevation on SAR images, and adopt the variance of elevation as a new verification parameter basing on the analysis. Second, systematically study the parameters which can affect the ability of scene matching, and choose image choice, image affirm and image test as the process of reference selection. Theory analysis and experiments show that this method is practical.

Keywords: SAR; scene matching; reference image selection role; variance of elevation

0 引言

景象匹配制导,其原理为利用飞行器传感器上获取的实时图像与飞行器上存储的基准图像进行匹配,从而获得飞行器的当前位置,以纠正 INS 的积累误差,实现飞行器的自主精确导航。而基准图的质量是影响图像匹配精度进而影响飞行器导航精度的重要因素之一。因此,为了提高 SAR 景象匹配系统的制导精度,有必要对 SAR 基准图选择准则进行研究。

基准图选择,就是指按照一定的准则选取信息量大、可匹配性高、结果可靠的数字地图作为制导基准图。匹配结果的精确性、稳定性、可靠性是制定准则的出发点。下视光学景象匹配的基准图选择准则已经进行了初步研究^[1-3],得到

了影响配准精度的图像特征参数,而 SAR 基准图的选择准则目前还没有涉及。文中在分析 SAR 景象匹配系统特性的基础上,提出了适合 SAR 景象匹配的基准图选择准则。

1 高程起伏对 SAR 图像的影响

合成孔径雷达是侧视成像,其侧视角通常比光学影像大得多。一方面,会在高地形背后产生阴影;另一方面,由于地形起伏,顶部与雷达的距离要小于底部与雷达的距离,其雷达回波先于底部被天线接收,产生像点向底点方向移动,因而带来 SAR 图像固有的顶底倒置、迎坡缩短等现象,这些现象都导致图像失真。

高程起伏引起 SAR 图像像点发生位移如图 1 所示。

* 收稿日期:2009-07-07

作者简介:赵倩(1982-),女,河北邢台人,博士研究生,研究方向:SAR 图像处理、景象匹配。

图中 S 点为 SAR 雷达所在位置, 高程为 H 。设地面点 P 高程为 h , 斜距为 R ; P' 是 P 点在地面基准面上的投影点, 其斜距可近似地表达为:

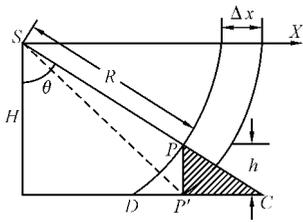


图 1 高程起伏引起 SAR 图像像点偏移

$$R' \approx R + h \cos \theta$$

其中, θ 是 P 点的成像角。由图 1 可知, P 点在地距图像上对应的像素点为 D 点, 而在正射影像图上对应的像素点为 P' 点, 两者之间的距离即为高程起伏带来的位置偏移量, 记为 Δx 。

$$\Delta x = R' - R \approx -h \cos \theta \quad (1)$$

由式(1)可见, 对于一定的入射角 θ , 若高程起伏过大则会导致图像像素点偏移量 Δx 过大, 从而导致图像整体偏差。

同时, 由于高程影响, SAR 侧视成像过程中, 会发生遮挡现象, 形成阴影区域。如图 1 中所示, 阴影部分为, $P'C = h \cdot \tan \theta$, 在入射角一定的情况下, 与高程起伏 h 成正比。

由于高程误差的均值对整幅图像的影响相同, 因而文中引入图像高程方差 σ_H 的概念来衡量图像高程起伏的程度:

$$\sigma_H = E(h_{ij} - \bar{H})^2 \quad (2)$$

其中: h_{ij} 表示 SAR 图像的像素点所对应的实际高程值, 在工作中由与之对应的高程图像获得, \bar{H} 表示 SAR 图像的平均高程, 单位均为 m 。

考虑到高程起伏对图像的影响, 将高程方差 σ_H 作为基准图选择的首要标准, 即首先对待选基准图进行高程筛选, 选择图像高程方差满足 $\sigma_H < T$ 。其中 T 是经过大量样本图像的匹配试验得到的经验阈值, 待选区的高程方差小于 T 时可以作为匹配区, 大于 T 则不宜选作匹配区。

由于带有高程数据的 SAR 图像短缺, 文中通过仿真手段, 在真实 SAR 图像上模拟添加高程误差, 来具体衡量高程起伏对图像匹配性能的影响。经过大量实验, 取阈值 T 为 40, 单位 m 。

2 特征参数对图像匹配性能的影响

研究表明, 景物信息量、稳定性和重复模式是影响一个区域适配性的主要因素^[1]。本节从这

三方面入手, 选择灰度标准差、独立像元数、主次峰值比及景象匹配信噪比作为衡量图像适配性的特征参数。

在计算特征参数时, 考察图像大小为实时子图大小, 步长定义为子图大小的 1/3。

2.1 景物信息量的衡量

景物信息量是基准图特征量的衡量指标, 文中选择灰度标准差和独立像元数来衡量。

2.1.1 灰度标准差

首先对候选图像分块进行直方图均衡化预处理, 然后在预处理后的图像上, 按子图步长, 计算子图大小区域的均衡化灰度标准差, 记录并输出计算结果。均衡化灰度标准差的定义为:

$$\sigma_1 = \sqrt{D(X)} = \sqrt{E(X_{i,j})^2 - E^2(X)} \quad (3)$$

其中, $X_{i,j}$ 为给定区域中图像坐标 (i, j) 处像素均衡化后的灰度值, 无单位。

由标准差的统计意义可知, 灰度标准差越大, 图像所含像素灰度值分布范围越广, 图像所能表征的信息越丰富, 信息量越大。

2.1.2 独立像元数

独立像元数 N 的定义如下:

$$N = \left(\frac{N_1}{L_v}\right) \left(\frac{N_2}{L_h}\right) \quad (4)$$

其中: N_1 和 N_2 分别为给定区域图像在横向和纵向上的像元数, 单位为个。 L_v 和 L_h 分别为横向和纵向的相关长度, 相关长度具体定义见文献[2]。

从定义可以看出, 独立像元数从统计角度反映了子图内包含的独立景物的多少, 直观而言, 如果实时图内包含较多的能够明显分辨的景物, 该图配准概率一般都较高。

2.2 重复模式的衡量

重复模式主要是指在参考图中重复出现的一些子区域, 它们在灰度或某些其他特征(如边缘)上有相似之处。景象匹配中基准图中存在的重复模式可能会造成误匹配或定位偏差, 因此重复模式的多少是衡量基准图品质好坏的重要指标, 直接影响配准概率和定位精度。

考虑到 SAR 图像匹配算法多采用边缘特征作为特征空间, 互相关特性作为相似性度量, 文中采用边缘图的相关面特性来衡量图像的重复模式, 选择主次峰值比作为衡量参数。

$$MSR = \frac{C_{\max}}{C_{\text{sub max}}} \quad (5)$$

主次峰值比定义为相关曲面上,主峰(最高局部峰)的峰值与次高局部峰的峰值的比值,它表征的是次高峰对应的图像区域与实时图的相似程度,用来衡量图像特征的重复模式。若有一个或多个次高峰与最高峰的差别较小,则说明基准图中存在一个或多个相似区域,从而降低了匹配定位的可信度。

2.3 稳定性衡量

稳定性是指所选基准图的景物未随时间发生明显变化,能与实时图很好匹配。考虑到有可能发生匹配区景物已随时间发生变化,而基准图制备尚未更新的情况,因而有必要对初步选择出的基准图的稳定性作进一步的评估。

文中采用景象匹配信噪比来衡量稳定性。此处噪声是指实时子图与基准子图区域像素灰度之间的差异。为了消除两幅图像之间整体亮度的影响,先对灰度标准差进行归一化处理。图对信噪比 SNR 的定义如下:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{STD(I_{\text{rel}})}{STD\left(I_{\text{rel}} - I_{\text{ref}} * \frac{STD(I_{\text{rel}})}{STD(I_{\text{ref}})}\right)} \quad (6)$$

其中, $STD(*)$ 是归一化后灰度标准差, I_{ref} 指基准子图, I_{rel} 代表参考子图。

3 基准图选择流程

文中将基准图选择流程分为 3 个环节:高程筛选、参数计算、参数统计。首先在预选区域计算图像的高程方差,进行高程筛选;然后在符合初步高程要求的区域范围内,计算子图大小区域的图像特征参数;最后,在参数统计环节中,按适当步长(基准图大小的 1/10),统计每个基准图内满足单幅图参数下限值(即灰度标准差、独立像元数、主次峰值比、图对信噪比均满足各自下限值)的子图数的比率,作为此基准图的单幅图参数统计概率。选择统计概率大于 80% 的图像作为适选基准图。纪录并输出适选基准图的位置及大小。

4 试验

在 RADARSAT - 1 图像上截取 $50\text{km} \times 50\text{km}$ 大小的图像作为基准图候选区,图像分辨率为 $5\text{m} \times 5\text{m}$,飞行器飞行高度为 10000m 。适选基准图大小为 $5\text{km} \times 5\text{km}$,实时图大小为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。

按照上述基准图选择流程,首先对预选区域进行高程筛选。其次,按步长(128 像素)计算子图大小区域的特征参数,最后按步长 64 像素统计每个基准图内满足单幅图参数下限值的子图数的比率,选择统计概率大于

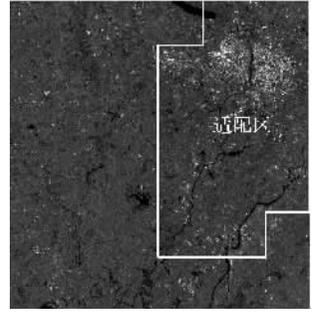


图 2 $50\text{km} \times 50\text{km}$ 候选基准图区及所选基准图

80% 的图像作为适选基准图。结果如图 2 所示。

为验证准则的正确性,从图 2 适配区中任意选取 4 幅图像作为基准图,见图 3(a)~图 3(d) (已按比例缩放)。分别以此 4 幅图像为基准图,经畸变处理后图像为实时图,进行匹配,匹配结果及相应参数见表 1,匹配误差容忍度为 2 个像素。

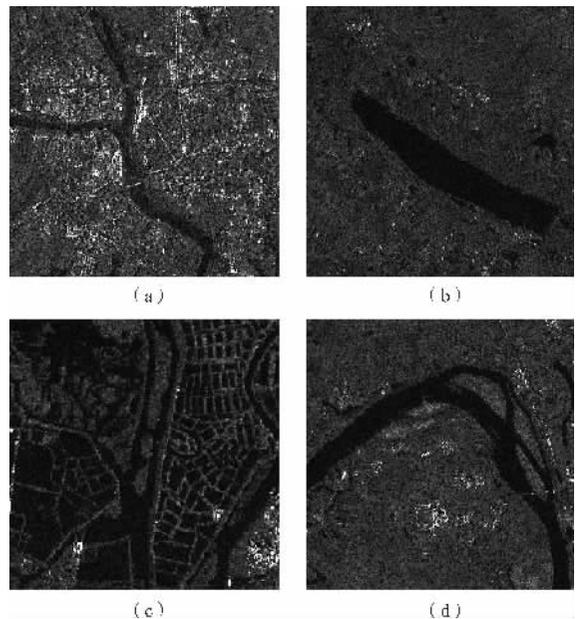


图 3 所选基准图

适用探测距离为： $15\text{cm} \leq D \leq 1000\text{cm}$

需要注意的是由于环境和硬件设备的影响，此定量关系和探测距离仅适用于本实验中所测得的相关数据。

根据实验原理任意采集三处标定距离以外位置的激光反射图像，通过相应的数字图像处理算法得到其特征面积，利用拟合的曲线估算出该处的位移，并与实际的物理位移进行误差分析。结果见表 1。同时，将文中所提出的方法应用于自适应机翼位移的测量中，能够有效测量机翼的位移变化量，提高了测量的速度，测量结果满足精度范围的要求。

表 1 测量结果分析表

实验	光斑面积/pixel	估计距离/cm	实际距离/cm	相对误差/%
1	129.875	180.2511	178	1.26
2	364.125	396.0228	392	1.03
3	578.625	567.9900	563	0.87

3 结论与展望

文中所介绍的测距方法简单易于实现，且计算速度快，在标定的距离范围内可用于位移的非

接触实时测量，并在自适应机翼的位移测量中得到了成功的应用。

在测量系统中误差的主要来源为：一方面由于环境变化和目标物体表面粗糙度对激光成像质量的影响，以及激光束固有的漂移等光学特性，使得成像光斑不稳定，从而影响光斑特征大小提取的精度；另一方面由于数码摄像头的安装调试、焦距的调准以及分辨率大小等因素的影响，导致误差的产生。因此，测量的精确度可以通过消除以上因素得到进一步的提高。

参考文献：

[1] 王富治,杨平,黄大贵.基于相机定标与亚像素算法的二维图像测量系统[J].计算机测量与控制,2005,13(12):1325-1328.

[2] 王春阳,李金石.激光光斑漂移的检测[J].应用光学,2007,28(2):205-208.

[3] 吴学功.基于 USB 摄像头的数字图像检测技术研究[D].南京:东南大学,2006.

[4] 阮秋琦.数字图像处理学[M].2版.北京:电子工业出版社,2007.

[5] Rafael C Gonzalez.数字图像处理(MATLAB版)[M].阮秋琦,译.北京:电子工业出版社,2008.

(上接第 255 页)

表 1 所选基准图参数及其匹配特性

基准图	匹配次数	灰度标准差 (σ_1)	独立像元数 N/个	主次峰值比 MSR	匹配概率 P/%	匹配精度/像素
3(a)	100	59.3	455	1.64	99	1.4
3(b)	100	45.05	341	1.54	97	1.0
3(c)	100	48.65	227	1.67	98	0.8
3(d)	100	40.29	682	1.62	97	0.9

考虑到 SAR 的成像特点，此畸变模型包括由近地点斜距测量误差、雷达高度表测高误差和高程起伏带来的灰度畸变及弹体姿态误差引起的几何失真。

5 结论

综合以上的试验结果可以看出，在高程预筛

选基础上，采用灰度标准差、独立像元数、主次峰值比、图对信噪比的选择准则是有效的，可以对原始参考图不同区域的匹配性能作出可靠的评估，从而规划出满足要求的匹配区。需要特别指出，灰度标准差是其中非常重要的衡量参数，适配区的灰度标准差要明显大于不适宜匹配区的灰度标准差，具体数值与 SAR 图像有关。

参考文献：

[1] 付文兴,王建民,金善良.一种实用的景象匹配区选择方法[J].宇航学报,2003,24(4):348-353.

[2] 沈振康.地图(图像)匹配制导技术[M].长沙:国防科技大学出版社,1983.

[3] 刘扬,赵伟峰,金善良.景象匹配区选择方法研究[J].红外与激光工程,2001,30(3):168-170.

[4] 曹菲,杨小冈.景象匹配制导基准图选定准则研究[J].计算机应用研究,2005(5):137-139.