

# 一种 SAR 图像与光学图像匹配算法研究

海 深<sup>1</sup>, 韩志斌<sup>2</sup>, 王 余<sup>2</sup>

(1. 铜陵学院数学与计算机学院, 安徽 铜陵 244000; 2. 92857 部队, 北京 100083)

**摘 要:**INS/SAR 组合导航系统对 SAR 实时图像与光学参考图像的匹配算法提出了较高的实时性和准确性要求。针对以往直线匹配算法与角点匹配算法的缺陷, 首先提取 SAR 实时图像与光学参考图像直线中的直线与角点特征, 然后在干线对粗匹配的基础上利用精确的角点特征进行小参数变化下 SAR 图像与光学图像的精匹配。经实验验证, 该方法实时性与匹配精度高, 可较好的应用于 INS/SAR 组合导航系统的图像匹配中。

**关键词:**组合导航系统; 图像匹配; 直线特征; 角点特征

**中图分类号:**TP391.4

**文献标志码:**A

## 引 言

随着组合导航技术的发展, 图像匹配导航技术受到越来越多的重视。合成孔径雷达(SAR)能够全天候、全天时成像, 并且对地面覆盖物具有一定的穿透能力, 其图像的空间分辨率与波长、载机飞行高度无关。利用 SAR 所获取的地面实时图像与飞行器上存储的光学参考图像匹配确定飞行器的具体位置, 以纠正 INS 的累积误差, 可以实现飞行器自主高精度的导航。

在 INS/SAR 组合导航系统中, SAR 实时图像与光学参考图像的匹配算法是影响其性能的关键因素。由于 SAR 图像与光学图像是非同源图像, 二者在灰度特性上存在很大差异, 基于像素灰度的图像匹配算法很难适用于该组合导航系统, 因此基于特征的图像匹配算法成为当前研究的主要方向。

针对 SAR 图像与光学图像的特征匹配, 目前主要有直线特征匹配<sup>[1-2]</sup>与角点特征匹配<sup>[3-4]</sup>两类方法。直线特征匹配方法通常速度较快, 但由于图像直线边缘特征与实际边缘存在误差, 严重影响了匹配精度。角点特征定位准确, 匹配精度较高, 但对于存在较大参数变换的

SAR 实时图与光学基准图, 该方法耗时较长, 很难满足实时性要求。

针对当前特征匹配算法的缺陷, 本文提出了一种结合直线与角点特征的图像匹配算法, 根据边缘直线特征匹配速度快的优势, 首先对 SAR 实时图与光学基准图进行直线粗匹配, 在此基础上, 利用精确的角点特征进行小参数变化下 SAR 图像与光学图像的精匹配, 有效地提高了图像匹配的准确性和实时性。

## 1 特征提取

### 1.1 直线特征提取

本文采用 Dusan 的小波多尺度边缘检测法对 SAR 图像进行边缘提取。对提取出的边缘, 定义直线弯曲度与阈值  $r$ <sup>[5]</sup>, 采用如下步骤进行边缘直线拟合:

- (1) 将每一条闭合边缘分为两条非闭合边缘;
- (2) 求所有非闭合边缘的弯曲度, 若弯曲度大于阈值  $r$ , 将非闭合边缘分为两段;
- (3) 重复步骤(2), 直到所有非闭合边缘的弯曲度均小于阈值;
- (4) 对所有非闭合边缘进行直线拟合。

收稿日期:2014-01-17

基金项目:安徽高校省级自然科学基金项目(KJ2012Z410)

作者简介:海 深(1974-), 男, 安徽无为, 讲师, 硕士, 主要从事嵌入式系统、图像处理方面的研究, (E-mail) haishen-2004@163.com

经上述步骤,可以从边缘图像中拟合出较为明显的长直线特征。

### 1.2 角点特征提取

目前的角点提取方法多种多样,但大致上可以分为两类:基于像素的角点提取和基于边缘特征的角点提取。基于像素的角点提取方法中,Harris 算子法<sup>[6]</sup>定位精度高,但角点冗余度高,实时性差。边缘特征角点提取方法中,Mokhtarian 和 Suomela 的曲率尺度空间法<sup>[7-8]</sup>速度快,冗余角点少,稳定性高,但定位精度存在一定的不足。

针对上述两种算法的缺陷,本文采用一种结合曲率尺度空间与 Harris 算子定位的角点提取方法。由文献[7-8]可知,虽然曲率尺度空间法存在误差,但其可为边缘角点进行大致定位,真实角点存在于曲率尺度空间法检测出角点的小邻域内。因此,只要在曲率尺度空间法角点位置的  $V$  邻域内,对每一点 Harris 兴趣值进行搜索,取兴趣值的极大值作为角点,即可完成对错误角点的校正。设曲率尺度空间法检测到的第  $i$  个角点  $p_{fi}$  的位置为  $(x_{fi}, y_{fi})$ , 该角点校正后的位置为  $(x_{ci}, y_{ci})$ , 由上述分析知:

$$(x_{ci}, y_{ci}) = \text{Arg max}_V (H(x_{fi}, y_{fi})) \quad (1)$$

其中,  $H(x_{fi}, y_{fi})$  为点  $(x_{fi}, y_{fi})$  处的 Harris 兴趣值。本文将  $V$  邻域取较大的  $10 \times 10$  邻域,以确保能搜索到正确的角点。具体步骤如图 1 所示:

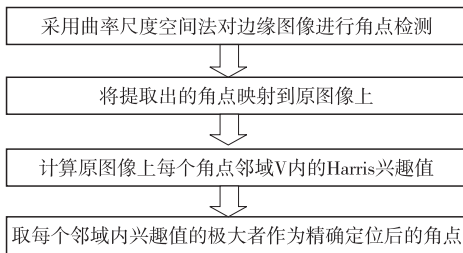


图 1 结合曲率尺度空间与 Harris 算子定位的角点提取

## 2 结合直线与角点特征的 SAR 图像与光学图像匹配算法

### 2.1 基于改进 Hausdorff 距离的干线对粗匹配

干线对是长度、夹角和距离满足下列要求的两条直线的组合:

- (1) 两条直线的长度不小于限定值  $l$ ;
- (2) 两条直线之间的夹角接近  $90$  度;
- (3) 两条直线之间的距离  $d$  不超过限定值  $D$ 。

按照要求(1)~(3)遍历所有边缘拟合出的直线,即可得到所有干线对。假设 SAR 实时图与光学参考图

像之间存在着平移和旋转关系,且 SAR 图像上的点  $(x, y)$  与光学图像上的点  $(x', y')$  一一对应,则有:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (2)$$

SAR 图像与光学图像的匹配,实质上就是寻找一组最优的变换参数对  $\theta$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ , 对 SAR 图像进行坐标变换,使得变换后 SAR 图像与光学图像中的同名干线对相重合的过程。

设 SAR 图像中  $M$  组干线对的交点  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_M\}$ , 光学图像中的  $N$  组干线对的交点为  $P' = \{P'_1, P'_2, \dots, P'_N\}$ , 定义  $P'$  与  $P$  的改进 Hausdorff 距离  $h$  为两幅图像中干线对的重合度:

$$h = \frac{1}{\#(P'_K)} \sum_{p' \in P'_K} d_p(p') \quad (3)$$

其中,  $P'_K$  表示将  $d_p(p')$  从小到大排序后的前  $K$  个值,  $K$  通常取较大的值,  $\#(P'_K)$  表示  $P'_K$  所含点的数量,  $d_p(p') = \min_{p \in P} (p' - p)$ 。

根据定义(1)~(3)寻找图像中的干线对,运用式(2)与式(3)进行直线匹配,求解步骤如图 2 所示。

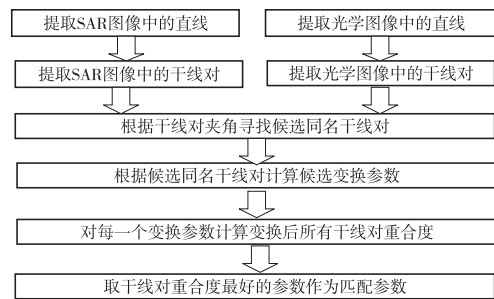


图 2 直线匹配参数求解步骤

### 2.2 基于角点特征的图像精匹配

设 SAR 实时图与光学基准图提取出的角点分别为  $C_s = \{C_{s1}, \dots, C_{si}, \dots, C_{sv}\}$  与  $C_g = \{C_{g1}, \dots, C_{gi}, \dots, C_{gu}\}$ , 对  $C_s = \{C_{s1}, \dots, C_{si}, \dots, C_{sv}\}$  经直线粗匹配(即经参数  $\Delta\theta$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  刚体变换)后,得到的角点为  $C'_s = \{C'_{s1}, \dots, C'_{si}, \dots, C'_{sv}\}$ 。

对于  $C'_{si}$  与  $C_{gi}$ , 若其为同名角点,则有:

#### (1) 距离约束

直线粗匹配后两幅图像中的同名角点应该对齐。定义阈值  $\Omega$ , 若两点距离在  $\Omega$  内,则其为候选同名角点。理论上,  $\Omega$  的值应与直线匹配误差相等,为保持算法稳健性,实际中  $\Omega$  值应略大于匹配误差,取  $15 \sim 20$  像素为宜。

#### (2) 边缘约束

同名角点在两幅图像上所对应的边缘必须一致。

采用如下方法定义一致边缘:对于 SAR 图像中的某条边缘,在其上均匀取  $n$  个点。分别计算这  $n$  个点到光学图像所有边缘的单向 Hausdorff 距离的均值,均值最小值所对应的光学边缘与该 SAR 图像边缘为一致边缘。

(3) 弯曲度约束

每一个角点在其边缘支持域内对应一弯曲度  $\alpha$ <sup>[5]</sup>,若  $C'_s$  与  $C_g$  匹配,则二者对应的  $\alpha$  值相同。鉴于 SAR 图像与光学图像成像机理不同以及噪声、图像离散化等因素的影响,  $\alpha$  值的计算存在一定的波动,因此,在角点值匹配时,匹配条件放宽为:

$$|\alpha(C'_{si}) - \alpha(C_{gj})| \leq \delta \tag{4}$$

在 2.1 节直线粗匹配结果基础上,根据约束条件(1)~(3),即可得到的用于校正粗匹配结果的同名角点对集。根据该角点对集,运用最小二乘法即可得到精匹配参数  $\Delta\theta'$ ,  $\Delta x'$ ,  $\Delta y'$ 。

### 3 算法匹配结果与性能分析

#### 3.1 算法匹配结果

对于一幅河流光学图像与 SAR 图像(图 3),采用 2.1 节的方法进行直线特征提取,并基于改进 Hausdorff 距离进行干线对粗匹配,结果如图 4 所示。

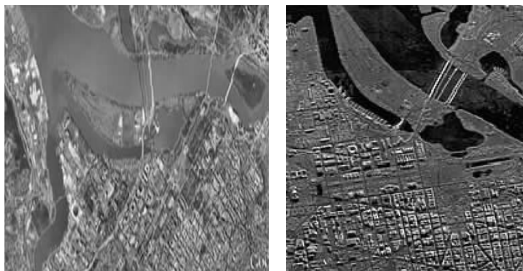


图 3 河流原始光学图像( $\times 10$ )与 SAR 图像

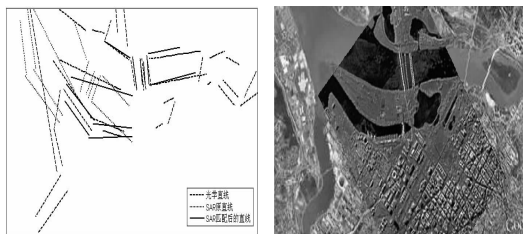


图 4 河流直线特征提取与匹配结果

在图 4 直线粗匹配结果的基础上采用结合曲率尺度空间与 Harris 算子定位的角点提取方法提取两幅图像的角点特征,运用 2.2 中约束条件(1)~(3)寻找同名角点(图 5),进行图像精匹配结果如图 6 所示。

#### 3.2 算法匹配性能分析

组合导航系统中,图像匹配的实时性和精度是衡量



图 5 河流角点特征提取与同名角点对



图 6 河流图像精匹配结果

匹配算法优劣的两个重要因素。分别采用基于改进 Hausdorff 距离的直线匹配法、基于遗传算法的角点特征匹配法对图 3 的两幅原始图像进行匹配,与本文方法对比,结果见表 1。

表 1 本文方法与其它两种匹配方法性能对比

方法名称	匹配时间	匹配误差
基于改进 Hausdorff 距离的直线匹配法	1.0235s	6.21 像素
基于遗传算法的角点特征匹配法	3.2678s	2.56 像素
本文方法	1.8695s	1.87 像素

分析三种方法的匹配性能可知,本文方法由于在直线粗匹配基础上进行了角点精匹配,其匹配时间略长于基于改进 Hausdorff 距离的直线匹配法,但匹配精度却提高了 4~5 个像素;由于是在粗匹配结果的基础上进行同名角点的配对,减少了角点的误匹配率,同时省去了遗传算法进行的匹配参数搜索过程,本文方法精度和速度均优于角点特征匹配法<sup>[9-10]</sup>。

### 4 结论

本文采用一种结合直线与角点特征的图像匹配算法,与已有方法相比,该方法具有以下两个特点:

- (1) 采用一种结合曲率尺度空间与 Harris 算子定位的角点提取方法,提高了角点定位精度。
- (2) 在直线粗匹配基础上进行角点精匹配,在保证算法实时性的前提下,减少了角点的误匹配率,有效地

提高了角点匹配精度。

经仿真验证,该方法匹配精度高,实时性好,可在 INS/SAR 组合导航系统中实现任意旋转角度与平移情况下的 SAR 图像与光学图像匹配。而同属于仿射变换的其他变换,如缩放、反射和剪切等方法是在下一步需要研究的内容。

#### 参考文献:

- [1] 李涛,刘肖琳.一种稳健的直线提取和匹配算法[J].计算机仿真,2008,25(9):171-173.
- [2] 席学强,王润生.基于直线特征的图像-模型匹配算法[J].国防科技大学学报,2000,22(6):70-74.
- [3] 冷雪飞,刘建业,熊智.基于分支特征点的导航用实时图像匹配算法[J].自动化学报,2007,33(7):678-682.
- [4] Ding Mingyue, Li Lingling, Zhou Chengping, et al. A multi-sensor image registration method based on Harris Corner Matching[C]//Proceeding of the 12th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Xi'an, October 18-20, 2006:174-183.
- [5] 韩志斌.INS/SAR 组合导航系统中的图像匹配方法研究[D].烟台:海军航空工程学院,2009.
- [6] 孔紫阳,吴晓红,何小海.基于改进的 Harris 角点检测在岩心图像拼接中的应用[J].微计算机信息,2010,26(11-2):193-195.
- [7] Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through Curvature Scale Space[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and machine Intelligence, 1998, 20(12): 1376-1381.
- [8] 张月婷,丁赤飏,王宏琦,等.圆柱型油罐 SAR 图像的多径散射特征和几何参数提取[J].红外与毫米波学报,2012,31(4):379-384.
- [9] 娄军,金添,周智敏,等.基于 SEEMD 的高分辨率 SAR 图像目标特征提取方法[J].电子学报,2012,40(4):793-798.
- [10] Zhao H W, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2008, 1(1): 1-41.

## Research on a Matching Arithmetic of SAR Images and Optical Images

HAI Shen<sup>1</sup>, HAN Zhibin<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>

(1. School of Mathematics and Computer, Tongling University, Tongling 244000, China; 2. 92857 Troop, Beijing 100083, China)

**Abstract:** INS/SAR integrated navigation system requires the matching method of SAR real-time images and optical reference images to be fast and precise. Aiming at the defects of the line matching method and the corner matching method, the line features and corner features of SAR real-time images and optical reference images line are extracted first, and then the precise corner features are used to perform the precise matching of SAR images and optical images on the basis of main line coarse matching results. Through experiment, the method is verified to have high instantaneity and precision, it can be better applied to the images matching of INS/SAR integrated navigation system.

**Key words:** integrated navigation system; image matching; line features; corner features