

文章编号:1671-8860(2009)09-1068-04

文献标志码:A

# 基于有理多项式系数的线阵 卫星近似核线影像的生成

张永军<sup>1</sup> 丁亚洲<sup>1,2</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 湖北省电力勘测设计院,武汉市红旗渠路95号,430024)

**摘要:**分析了线阵卫星影像投影轨迹法计算局部范围近似核线影像的基本原理,提出利用分段直线拟合近似核线;基于RPC和物方经纬度的线阵卫星近似核线影像重采样方法,以便在密集影像匹配生成高精度数字高程模型(DEM)时缩小匹配搜索范围,并降低误匹配率。试验结果表明,利用投影轨迹法可以确定立体像对局部范围内的近似同名核线,且分段直线拟合方法精度更高;基于物方经纬度方法进行核线影像重采样后,非常有利于同名点的高可靠性匹配,且核线影像上的同名点坐标到原始影像坐标的反算精度优于0.04像素,验证了重采样方法的可行性。

**关键词:**线阵卫星影像;RPC;近似核线;重采样;密集影像匹配

**中图法分类号:**P231.5;P236

随着航天技术、计算机技术、传感器技术、空  
间定位技术等的发展,高分辨率卫星遥感影像已  
成为人类获取地球空间信息的重要数据源<sup>[1-3]</sup>。  
但是,线阵卫星影像繁琐的姿态控制技术导致影  
像的严格几何模型形式极其复杂;同时为了保密  
核心技术参数,常用有理函数模型替代以共线条  
件为基础的严格几何模型,其有理函数系数则称  
为RPC(rational polynomial coefficients)<sup>[3]</sup>。目  
前,多个商业卫星如IKONOS、QuickBird等只提  
供RPC作为影像方位参数。

核线是摄影测量中分析立体成像几何关系的  
重要概念,现有的匹配算法大都利用核线约束条  
件来限制匹配的搜索范围,以便缩短匹配时间,提  
高匹配结果的可靠性。但是线阵卫星影像的成像  
方式复杂独特,不可能同框幅式影像一样具有严  
格意义的核线,只能产生近似的核线及相应的近  
似核线影像<sup>[4-9]</sup>。

## 1 投影轨迹法近似核线几何

现有的影像匹配方法在卫星影像对中匹配数

千至数万个同名点进行区域网平差等解算是非常  
容易的,匹配精度和效率都可以得到保证。但是,  
生成高精度DEM,一个立体影像往往需要匹配数  
百万个同名点,此时,传统的二维搜索匹配不仅效  
率非常低,而且误匹配概率很高。因此,核线影像  
在密集影像匹配中有着非常重要的作用,可大大  
提高同名特征匹配的速度和成功率<sup>[7]</sup>。线阵卫星  
特殊的成像方式导致每条扫描线都存在不同的方  
位元素,导致立体像对间不存在严格的核线几何  
关系。其核线一般是类似双曲线的曲线,小范围  
内表现为近似直线。一条核线上的某点 $P$ 以及  
距离该点一定范围内的相邻点,其同名像点都位  
于 $P$ 点的对应核线上。在局部范围内存在近似  
同名核线对,影像匹配时,即可将搜索过程简化为  
一维搜索。

对于线阵卫星影像,一般用投影轨迹法分析  
其近似核线几何关系。如图1所示,设一条光线  
从地面某点 $P(X, Y, Z)$ 出发,经过左影像的投  
影中心 $S$ ,成像于左影像上的点 $p$ ,其几何关系可  
用RPC表达,则这条光线上的每一点都可以被惟  
一地投影到右影像上,这些点在右影像上形成一

收稿日期:2009-07-16。

项目来源:国家973计划资助项目(2006CB701302);国家自然科学基金资助项目(40671157);国家教育部新世纪优秀人才支持计划  
资助项目(NCET-07-0645)。

条曲线,称为  $p$  点的核线,如果  $p$  为  $p$  的同名点,显然  $p$  应该位于这条曲线上。

为计算方便,常用的方法是拟合直线代替曲线。本文采用将曲线点拟合成一系列不连续的直线段,以便减小拟合误差。如图 2 所示,首先计算轨迹点所拟合直线的斜率  $k$ ,然后取这一系列点中每两个相邻点对的中点,过这些中点以斜率  $k$  生成一系列直线段,这些直线段即为右核线。

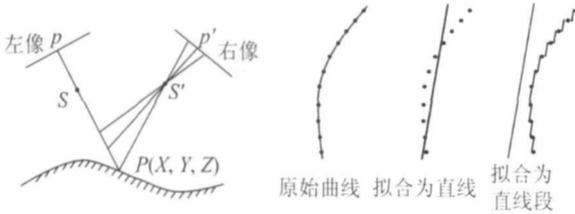


图 1 投影轨迹法示意图

图 2 近似核线拟合方式示意图

Fig. 1 Principle of Projective Locus

Fig. 2 Approaches of Approximate Epipolar Line Fitting

拟合出右核线后,在右核线上选取若干个,按照同样的方法将左影像上的轨迹点拟合成一系列不连续的直线段(则原先在左影像上任意选取的点  $p$  一定在直线段上),这一系列直线段就是右核线对应的左核线。通过这种方法可以求得影像局部范围内的近似同名核线对,进而通过近似同名核线进行核线重采样。

## 2 基于物方经纬度的近似核线几何

### 2.1 基于物方经纬度的核线影像重采样方法

投影轨迹法计算的线阵卫星影像核线几何模型是非线性的,核线对在影像的局部范围内精度较高,但是在全图范围内存在较大误差。因此,利用投影轨迹法进行核线重采样生成核线影像时,非线性的核线模型使得计算量大,采样效率低;而且生成的核线影像上下视差较大,影像匹配时,不能把二维搜索转换为一维搜索。本文提出一种基于物方经纬度的核线影像重采样方法,即沿地面纬度方向进行重采样,生成没有上下视差的核线影像<sup>[10]</sup>。其基本原理如图 3 所示,影像覆盖区内的任一点  $P(L_{\text{纬度}}, L_{\text{经度}})$  都可以通过该区域的 DEM 内插出其高程  $H$ ,从而得到地面三维坐标  $P(L_{\text{纬度}}, L_{\text{经度}}, H)$ 。当重采样过程循环到空间的某一点  $P(L_{\text{纬度}}, L_{\text{经度}}, H)$  时,可以通过随影像提供的辅助参数得到其对应的左右影像的正则化坐标  $P_l(P_l, L_l, H_l)$ 、 $P_r(P_r, L_r, H_r)$ ,然后利用 RPC 分别求得点  $P$  在左右影像上对应的像点坐标  $p_l$

$(x_l, y_l)$ 、 $p_r(x_r, y_r)$  :

$$\begin{aligned} x_l &= \frac{\text{Num}_{L_l}(P_l, L_l, H_l)}{\text{Den}_{L_l}(P_l, L_l, H_l)}, y_l = \frac{\text{Num}_{L_r}(P_l, L_l, H_l)}{\text{Den}_{L_r}(P_l, L_l, H_l)} \\ x_r &= \frac{\text{Num}_{R_l}(P_r, L_r, H_r)}{\text{Den}_{R_l}(P_r, L_r, H_r)}, y_r = \frac{\text{Num}_{R_r}(P_r, L_r, H_r)}{\text{Den}_{R_r}(P_r, L_r, H_r)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\text{Num}_L$ 、 $\text{Num}_R$ 、 $\text{Den}_L$ 、 $\text{Den}_R$  分别为左右影像 PRC 的分子和分母系数。假设重采样后影像上的像点表示为  $(x_n, y_n)$ ,则重采样时,把  $p_l$ 、 $p_r$  的灰度赋给新的影像坐标,可以令  $y_{nl} = y_{nr}$ ,则原始同名点  $p_l$ 、 $p_r$  在重采样后的影像上的对应点为  $p_{nl}(x_{nl}, y_{nl})$ 、 $p_{nr}(x_{nr}, y_{nr})$ ,二者依然为同名点,并且其坐标的  $y$  值相等。依据该思想,从物方的某一点出发,依据一定的步长逐点或分块进行重采样,就可以得到没有上下视差的核线影像。

该方法需要已知地面覆盖范围的粗略 DEM,这可以通过全球 DEM 数据提取,也可以通过初始影像匹配获得若干同名点对获取。通过同名点对获取的粗略 DEM 方法为:首先在影像重叠范围内通过传统影像匹配方法获得一定数量的同名点;利用 RPC 进行前方交会,获得同名点对应的地面点三维坐标;然后内插得到影像覆盖区域的粗略矩形 DEM。

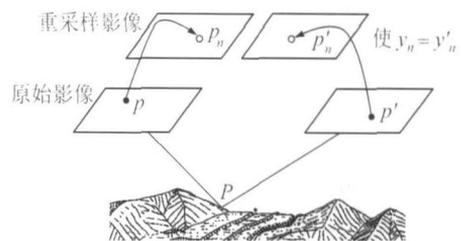


图 3 基于物方对应的核线影像重采样

Fig. 3 Approximate Epipolar Image Resampling Based on Object Space Corresponding Approach

### 2.2 核线影像坐标到原始影像坐标的反算

由于核线影像没有相应的 RPC,因此,必须将匹配后的同名点坐标反算到原始影像坐标系下。但原始影像坐标和核线影像坐标之间不存在严格的转换关系,只能通过近似方法将重采样后的像点到其对应的原始像点进行反算。本文采用局部仿射变换的方法进行像点坐标的反算,假设已知影像上的若干对同名点,其原始影像坐标和对应的核线影像坐标都为已知。对于重采样后的核线影像上的任一点,可以搜索该点周围 4 个象限内距离该点最近的 4 个已知点,由这 4 个点的核线影像坐标和原始影像坐标通过最小二乘法确定局部仿射变换关系:

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y \\ y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为仿射变换的 6 个参数;  $(x, y)$ 、 $(x, y)$  分别为重采样后的核线影像和原始影像的像点坐标。由式(2)即可将核线影像上匹配的同名点坐标反算到原始影像坐标系下,进而利用已知的 RPC 进行前方交会等后续处理。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 投影轨迹法计算同名核线

试验数据为 2003 年澳大利亚南海岸的一个 IKONOS 立体影像对。首先在左影像上选取任意一点  $p$ , 依据投影轨迹法, 找出其在右影像上的投影轨迹点, 利用这些点拟合一组直线段, 即为该点对应的右核线, 然后在右核线上选取若干点, 按照同样的方法投影到左影像上, 获取左核线, 通过这种方法可以求得影像局部范围内的近似同名核线对。图 4 所示为两对局部的近似核线影像对, 可以看出, 同名特征点都严格位于同名核线上。

试验过程中, 在左右影像核线轨迹点中选取 21 个轨迹点, 分别统计这些点拟合为直线、直线段所生成的核线的距离, 则左右影像拟合为直线、直线段的距离分别为 (0.041 44 像素, 0.000 66 像素) 和 (0.002 53 像素, 0.000 53 像素)。可以看出, 对于线阵卫星影像, 利用 RPC 和投影轨迹法计算的核线关系均具有较高的精度; 并且将核线拟合为直线段时, 在保证核线处理效率的同时, 拟合精度也可提高数倍。

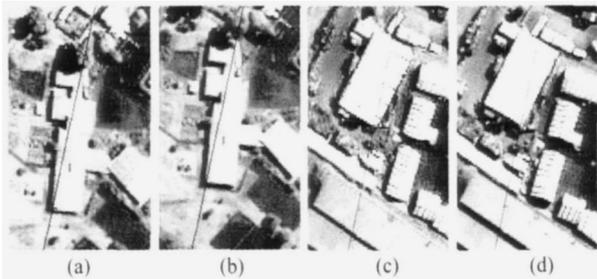


图 4 左右影像的近似同名核线对

Fig. 4 Approximate Epipolar Line Pair

#### 3.2 基于物方经纬度的核线重采样与坐标反算

在根据自动影像匹配获得的同名点内插出影像覆盖范围的粗略 DEM 后, 利用本文提出的依据物方经纬度的重采样方法对立体影像进行近似核线重采样。为准确评价影像重采样的精度, 以及重采样后的近似核线影像上匹配得到的同名点

坐标反算至原始影像时的精度, 本文利用影像匹配获得的 5 246 对同名点解算地面三维坐标, 并内插粗略 DEM, 然后利用 RPC 进行核线影像重采样, 并利用检查点评价核线影像坐标到原始影像坐标的反算精度。重采样后的近似核线影像如图 5 所示, 将重采样后的左右近似核线影像利用红绿立体叠合后, 平坦地区几乎完全重叠, 建筑物等高出地面的物体则存在一定的左右视差, 图 6 所示为红绿立体叠合后的影像块。

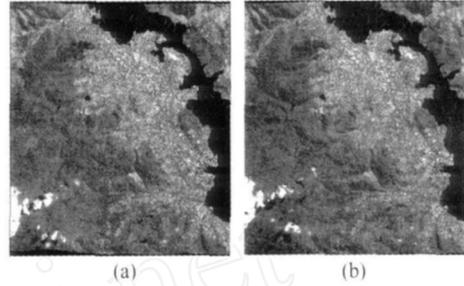


图 5 重采样后的近似核线影像对

Fig. 5 Re-sampled Approximate Epipolar Image Pair

在重采样后的近似核线影像上匹配获得的同名点坐标必须反算到原始影像后才能利用 RPC 进行前方交会等计算。试验中, 利用原始影像上匹配获得的 1 089 对同名点作为检查点, 将这些同名点前方交会获得的对应地面坐标按照本文方法纠正获得其核线影像坐标后, 再通过局部仿射变换反算到原始影像上, 并统计其与原始影像坐标的差值, 可得  $x$  和  $y$  方向的中误差分别为 0.029 像素和 0.033 像素, 最大误差分别为 0.098 像素和 0.099 像素, 均优于 0.1 像素。可见, 利用本文方法进行核线重采样后, 不仅可以大大缩小核线影像密集匹配的搜索范围, 降低误匹配率, 而且核线影像中的同名点反算到原始影像时几乎没有精度损失, 充分说明所提出的核线重采样算法的可行性。

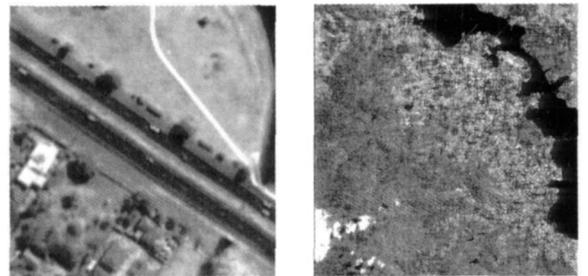


图 6 左右近似核线影像红绿立体观测

Fig. 6 Red+green Stereo of Epipolar Image Pair

图 7 检查点分布  
Fig. 7 Distribution of Check Points

## 4 结 语

本文分析了线阵卫星影像按投影轨迹法计算局部范围近似核线影像的可行性及其改进方法。试验表明,利用投影轨迹法可以确定立体像对局部范围内的近似同名核线,精度可以达到子像素级,并且将近似核线拟合为直线段的精度更高。

### 参 考 文 献

- [1] 张剑清,张勇,郑顺义,等. 高分辨率遥感影像的精纠正[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(11): 994-998
- [2] 张永军,张勇. SPOT-5 HRS 立体像对无控制绝对定位技术研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(11): 941-944
- [3] 李德仁,张过,江万寿,等. 缺少控制点的 SPOT-5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(5): 377-381
- [4] Morgan M. Epipolar Resampling of Linear Array

Scanner Scenes[D]. Canada: University of Calgary, 2004

- [5] Habib A F, Morgan M, Jeong S. Analysis of Epipolar Geometry in Linear Array Scanner Scenes[J]. The Photogrammetric Record, 2005, 20(109): 27-47
- [6] 周月琴. SPOT 影像近似核线的研究 [D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1988
- [7] 巩丹超,张永生,邓雪清. 线阵推扫影像的核线模型研究 [J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 97-101
- [8] 巩丹超,张永生,陈筱勇. 线阵 CCD 推扫式影像的扩展核线模型 [J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(4): 246-249
- [9] 苏俊英. 基于匹配约束的多项式拟合 SPOT 核线影像研究 [J]. 遥感信息, 2002(4): 11-14
- [10] 丁亚洲. 基于 RPC 参数的线阵卫星影像核线重采样研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2008

第一作者简介:张永军,教授,博士,博士生导师。主要从事数字摄影测量与遥感、计算机视觉方面的研究。

E-mail: zhangyj@whu.edu.cn

## Approximate Epipolar Image Generation of Linear Array Satellite Stereos with Rational Polynomial Coefficients

ZHANG Yongjun<sup>1</sup> DING Yazhou<sup>1,2</sup>

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Hubei Electric Power Survey and Design Institute, 95 Hongqiqiu Road, Wuhan 430024, China)

**Abstract:** The basic principle of projective locus method to calculate local approximate epipolar image of linear array satellite stereo is discussed. A Line segment fitting approach is proposed to improve the precision of epipolar image. A new object space longitude and latitude based approximate epipolar image re-sampling approach is put forward. The proposed approach has well potential in dense image matching for generating high precision digital elevation models. Both searching range and mismatch possibility can be decreased. The experimental results show that the projective locus method is qualified for calculating local epipolar lines. The precision of line segment fitting is superior to that of traditional line fitting method. There is no  $y$ -parallax on re-sampled epipolar image with the proposed approach, which is advantageous for dense image matching. The precision of reverse calculation from epipolar image coordinates to original image coordinates is better than 0.04 pixel, which verifies the correctness of the proposed re-sampling approach.

**Key words:** linear array satellite image; rational polynomial coefficients; approximate epipolar image; re-sampling; dense image matching

**About the first author:** ZHANG Yongjun, professor, Ph.D., Ph.D supervisor, majors in digital photogrammetry, remote sensing, and computer vision.

E-mail: zhangyj@whu.edu.cn