

文章编号: 1007-4619 (2004)02-0097-05

线阵推扫影像的核线模型研究

巩丹超, 张永生, 邓雪清

(解放军信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 通过对线阵 CCD 推扫式影像和框幅式中心投影影像的核线理论的对比研究, 建立了线阵 CCD 推扫式影像的核线理论, 并探讨了它的基本特性, 从而为核线在线阵 CCD 推扫式影像中的应用提供了理论基础。

关键词: 核线; 线阵 CCD 推扫式; 框幅式

中图分类号: TP732 **文献标识码:** A

1 引 言

利用线阵 CCD 推扫式传感器在不同轨道上获取异轨遥感影像实现立体观测是遥感应用的一个重要方面。由于线阵 CCD 推扫式影像的不同成像方式, 自从 1986 年第一颗 SPOT 卫星发射升空以来, 人们针对该问题进行了广泛的研究, 取得了丰硕的成果。目前可以构成立体观测的异轨遥感卫星逐渐增多, 由于线阵 CCD 推扫式影像特有的辐射和几何特性, 那些适用于框幅式中心投影的立体像对的模型与方法无法应用。从现有的资料和报道来看, 大多数的方法或者较少考虑这种影像的几何和辐射特点, 或者是直接采用航空影像中有关中心投影的一些相关模型。

核线是立体摄影测量中分析像对几何关系的一个基本概念, 由核线的几何定义可知, 同名像点必位于同名核线上。20 世纪 70 年代初, 美国摄影测量学者 Helava 等^[1]提出了一维核线相关的概念, 核线的作用才在摄影测量自动化的研究中受到重视。我们在利用灰度图像自动寻找同名像点时, 只需在同名核线上进行一维搜索即可。因此它为提高匹配的精度和效率提供了一条非常有价值的线索。对于线阵 CCD 推扫式影像, 它独特的核线关系与框幅式中心投影影像的核线关系完全不同。本文通过对线阵 CCD 推扫式影像和框幅式中心投影影像的对比研究, 采用基于共线方程的传感器模型, 建立了该类影像的核线几何模型, 并推导出具有一般性的核线数学方程, 然后深入分析了该影像的核线特性, 为核线

在线阵 CCD 推扫式影像中的应用提供了理论基础。

2 核线的意义

从立体影像上提取三维信息, 一个最重要的约束条件就是核线约束, 也就是说立体像对中的左像和右像严格满足核线几何关系, 而这种核线的几何关系是由传感器的性质决定的。这种关系在立体匹配中解决相关问题时非常有用, 给定一个左像上的点, 那么它在右像上的同名点总是位于一条惟一的直线上, 这条直线则由核线的几何关系确定。许多现有的匹配算法都利用这个限制条件来限制匹配的搜索空间、减少匹配时间、获得可靠的匹配结果。

尽管核线的关系在立体图像处理中是一条非常有用的线索, 但是对于线阵推扫式传感器影像, 目前尚无成熟的有关核线的理论和实践。对于线阵 CCD 推扫式传感器所获得的卫星影像, 核线几何关系也可以提供一个非常有用的线索。然而, 这种几何关系尚未完全用于这类图像以及其他扩展类的处理中。部分是因为被广泛接受的应用于框幅式中心投影的传感器模型对于这类图像是不可用的。因为对于线阵 CCD 推扫式影像来说, 它有着特有的核线几何关系, 与框幅式中心投影影像的核线几何关系完全不同。在核线概念没有完全理解的情况下, 目前常用的做法有两种: 一种是假设线阵 CCD 推扫式影像的核线关系和框幅式中心投影的核线几何关系相同; 一种考虑这种影像关系的复杂性而完全抛弃核线理论不用。因此对于线阵 CCD 推扫式传感器, 研

收稿日期: 2002-07-23; 修订日期: 2002-12-04

基金项目: 国家 863 项目 (863-13-2002AA135130)

作者简介: 巩丹超(1975—), 男, 陕西丹凤人, 博士, 讲师。主要从事数字摄影测量方面的研究, 已发表论文 10 多篇。

究建立其特有的核线理论基础和核线应用是很有其理论意义和应用价值的。

3 框幅式中心投影影像的核线模型

3.1 核线模型的建立

首先,我们分析一下传统的框幅式中心投影的核线模型^[1]。图 1 表示处于摄影位置的立体像对, S 和 S' 分别为左像投影中心和右像投影中心; S 和 S' 的连线叫做摄影基线;地面点 Q 的投影线 QS 和 QS' 叫做同名光线;同名光线分别与两像平面的交点 q, q' 叫做同名像点。摄影基线与任一地面点 Q 构成的平面,称为核面;核面与像平面的交线称为核线;同一核面对应的左右像片上的核线称作同名核线,这就是框幅式中心投影影像核线的几何定义。不难证明如果 q 和 q' 是同名像点,那么它们一定位于同名核线对 L, L' 上。

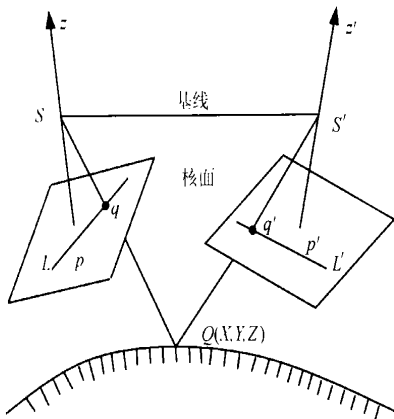


图 1 核线的几何关系

Fig. 1 The geometry of epipolarity

对框幅式中心投影影像来说,核线的方程可以直接由共线方程推导出来。

由于同一核线上的点均位于同一核面上,即满足共面条件:

$$\vec{B} \cdot (\vec{S}_p \times \vec{S}_q) = 0 \text{ 或者 } \begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ x_p & y_p & -f \\ x & y & -f \end{vmatrix} = 0$$

由此可得左片上通过任意一点 p 的核线 L 的数学方程

$$y = \frac{A}{B}x + \frac{C}{B}f$$

A, B, C 均为恒量,其中

(C)1994-2021, China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$A = f \cdot B_y + Y_p \cdot B_z$$

$$B = f \cdot B_x + X_p \cdot B_z$$

$$C = Y_p \cdot B_x - X_p \cdot B_y$$

可用同样的方法求得右核线的数学方程, L 的同名核线 L' 的数学方程可用下式表示:

$$v' = (A'/B')u' + (C'/B')f$$

其中 A', B', C' 均为恒量,上式表明框幅式中心投影影像的核线是直线,该特性已被广泛地应用于框幅式中心投影影像的处理中。

3.2 核线模型的特性

(1) 核线是直线。

(2) 一幅影像上一条核线上的所有点都被投影到立体像对另一幅影像的一条直线上。利用这个特性,两个立体像对之间的匹配问题的搜索过程就可由二维转换为一维。

(3) 同名核线对的存在,如果两个点是同名像点,那么他们所对应的两条核线是一一对应的,这两条核线上的点也是一一对应。

这 3 条特性,也意味左右影像可以通过一个仿射变换实现重采样而生成核线影像,使图像的列方向与核线方向一致,在列方向没有上下视差。

4 线阵 CCD 推扫式影像核线模型^[2]

一般来讲,线阵 CCD 推扫式影像的核线模型不容易建立,原因主要有:

- 一个描述两个像空间、一个目标空间之间的几何关系被广泛接受的数学模型没有建立。

- 线阵 CCD 推扫式影像复杂独特的成像方式。

针对该类影像,我们认为它的核线几何模型是可以建立起来的。通过以下两项内容的研究来完成线阵 CCD 推扫式传感器影像核线理论的建立。

4.1 核线的几何定义

假设一条光线从地面点 $Q(X, Y, Z)$ 出发,经过左像的投影中心 $S(X_s, Y_s, Z_s)$ 成像于左像上的点 q , 那么这条光线上的每一点可以被唯一地投影到右像上,这些点在右像形成一条曲线,我们称之为 q 的核线,如果 q' 为 q 的同名点,显然它总是位于这条曲线上。这就是我们对线阵 CCD 推扫式影像核线的几何定义。

4.2 核线的数学模型

我们所建立的上述核线模型的基本特性为:左像上的点被投影到右像上一条唯一的曲线上,这条

曲线由该点及左像和右像的位置和姿态所决定,并且该点的同名像点一定在这条曲线上。这个模型可用图 2 来表示。

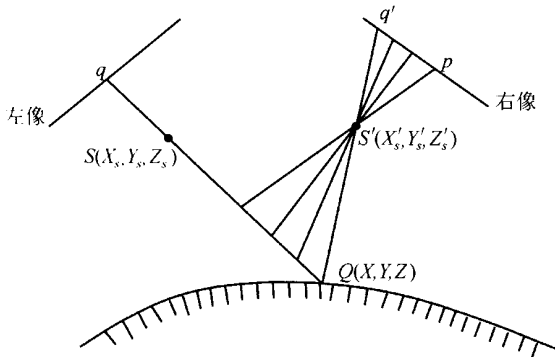


图 2 线阵 CCD 推扫式影像核线的几何关系

Fig.2 The geometry of epipolarity of linear CCD pushbroom images

下面我们来推导其数学模型。

在推导线阵 CCD 推扫式影像的核线几何关系之前,选择一个合适的传感器模型利用是很重要的。对该类型传感器的模型:从基于共线方程的传感器模型到直接线性变换等有若干模型,但目前尚无确定最优的传感器模型^[3]。

我们利用基于共线方程的传感器模型,该模型认为传感器的位置和姿态的变化可以描述成扫描行数(时间)的二阶多项式。目前这种传感器模型已经被广泛应用,并且实验表明精度较高且运算不复杂。

框幅式中心投影影像和线阵 CCD 推扫式影像的本质差别在于:前者有一个固定的投影中心,后者对每一条扫描线有一个投影中心,并且这些投影中心并不总是沿着一条直线,但是对该类影像来说,在扫描线方向共线方程依然是成立的。因此我们仍然可以利用基于共线方程的传感器模型来推导他们的核线关系^[4]。在图 2 中,从左投影中心 $S(X_s, Y_s, Z_s)$ 出发经过 $q(x_l, y_l)$ 的光线上的点在地面参考坐标系中可以表达成 k 的函数

$$(X, Y, Z) = (X_s, Y_s, Z_s) + k \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

这里 r_{ij} 是左像旋转矩阵的系数,通过这个矩阵可以实现左像像空间坐标系同地面参考坐标系的坐标转换,如果光线 SQ 上的点 (X, Y, Z) 被投影到右像上,该过程满足行中心投影的几何关系,故有下面的共线方程恒成立:

$$0 = r'_{11}(X - X'_s) + r'_{21}(Y - Y'_s) + r'_{31}(Z - Z'_s) \quad (2)$$

$$y_r = -f \frac{r'_{12}(X - X'_s) + r'_{22}(Y - Y'_s) + r'_{32}(Z - Z'_s)}{r'_{13}(X - X'_s) + r'_{23}(Y - Y'_s) + r'_{33}(Z - Z'_s)} \quad (3)$$

这里 (X'_s, Y'_s, Z'_s) 是右投影中心的坐标, r'_{ij} 是右像旋转矩阵的系数, (x_r, y_r) 是右像核线上任意点的坐标。通过这个矩阵可以实现右像像空间坐标系同地面参考坐标系坐标的坐标转换。将(1), (2), (3) 式联合合并可以得到核线的方程:

$$y_r = -f \frac{r'_{11}A + r'_{21}B + r'_{31}C}{r'_{13}A + r'_{23}B + r'_{33}C} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= X_s - X'_s + k(r_{11} \cdot x_l + r_{12} \cdot y_l - r_{13} \cdot f) \\ B &= Y_s - Y'_s + k(r_{21} \cdot x_l + r_{22} \cdot y_l - r_{23} \cdot f) \\ C &= Z_s - Z'_s + k(r_{31} \cdot x_l + r_{32} \cdot y_l - r_{33} \cdot f) \end{aligned}$$

(4) 式可简写成 $y_r = Q(x_r)$

这里, $Q(x_r)$ 是 x_r 的非线性表达式。从上式可以清楚地看出点 $q(x_l, y_l)$ 的核线是非线性的。这里需要强调,我们说某点的核线是指该点与该点所在影像的投影中心决定的这条光线在同名影像上的投影线。下面我们通过实验探讨它的若干特性。

5 数据实验

实验采用 SPOT 影像立体像对来检测线阵 CCD 推扫式影像的核线。左像摄影时间 2001-09-10 10:35, 右像摄影时间 2001-10-17 10:48。两幅影像的轨道倾角分别是 $14^\circ E, 15^\circ W$ 。利用传感器的模型参数,左像上的点 $q(3742, 2476)$ 的核线 L' 可以推导出来,核线的形状如图 3,核线的列数范围从 -250 000 到 250 000。从图上我们可以看出,核线不是直线,类似双曲线。

对于右像上的点 $p(x_r, y_r)$, 它的核线方程可以通过同样的方法推导出来。图 3 的曲线代表了左像上的点 $q(3742, 2476)$ 的核线 L' 的整个形状。为了简化所研究的问题,从而可以更容易观测和检测核线的形状及性质,在图 4 中我们给出了图像边界范围内实际的核线形状,另外我们给出了这条核线在点 q 的同名像点 $q'(3456, 2266)$ 位置的切线 L'_q 。

从图中可以看出,在图像的范围这条曲线非常接近直线,在 q' 的小领域内该直线与真实核线很接近,但在 q' 的远端则相差较大。由此我们可以断定,核线在小范围内或者在全部影像范围内可看作近似直线来处理。整幅影像内的核线只能分段采用

直线段近似处理。

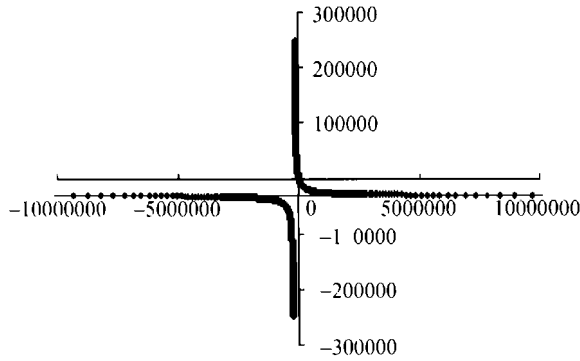


图 3 核线形状

Fig. 3 The shape of epipolarity

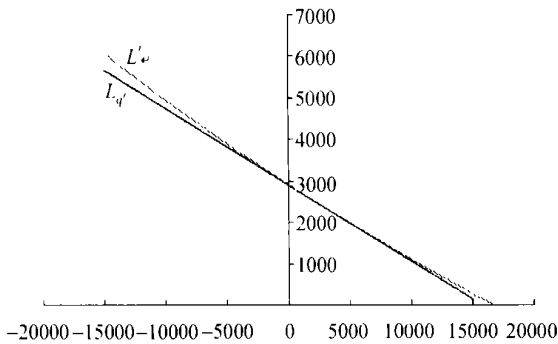


图 4 影像范围内的核线形状

Fig. 4 The shape of epipolarity in the image boundary

框幅式中心投影影像的核线几何关系其可利用的特性就是一个影像上的一条核线在相关影像上有它惟一的一条同名核线,因此一条核线上的所有点都被投影到它的相应核线上,但对于线阵 CCD 推扫式影像来说,我们可以通过图 5 来验证这个性质是否成立。首先在左像的一条核线上选取距离相对比较远的两个点 $q_1(1168, 2838)$ 和 $q_2(5230, 2267)$,然后画出这两个点对应的核线形状 L_1, L_2 。在图 5 中我们所显示的即为两条核线整个曲线的形状,从图上可以看出,这两条曲线不相同,因此我们不难确定对于线阵 CCD 推扫式影像,任何一个点都有它惟一的一条核线,但是不存在核线对的概念,也就是说图像上的一条核线上的每一个点都有不同的核线。同上述一样的理由,在图 6 中我们画出了两条核线在图像边界范围内的形状。

在图 5 和图 6 中,我们显示了这两点对应的两条核线的差异(整个形状和图像边界范围内的形状),这时我们所选的两点距离相对较远。

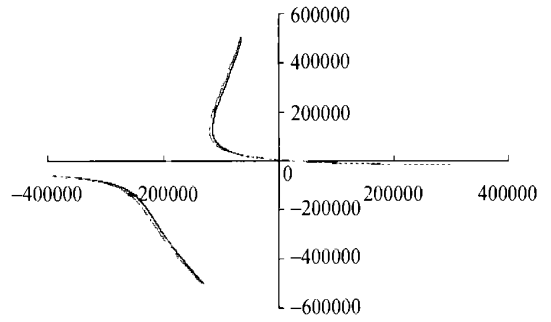


图 5 q_1 和 q_2 核线

Fig. 5 Two epipolarities of q_1 and q_2

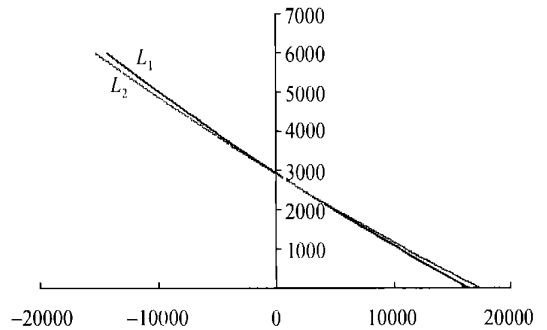


图 6 影像范围内的 q_1 和 q_2 的核线形状

Fig. 6 Two epipolarities of q_1 and q_2 in image boundary

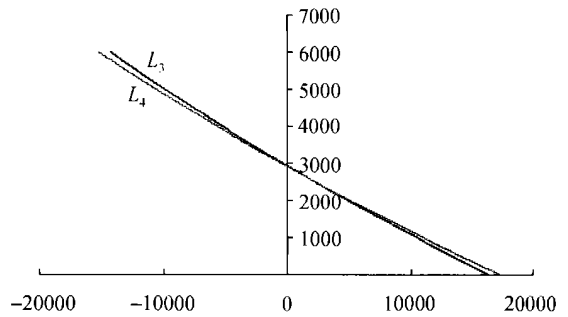


图 7 影像范围内的 q_3 和 q_4 的核线形状

Fig. 7 Two epipolarities of q_3 and q_4 in image boundary

但是如果选择两个点的距离较近,我们会发现一个比较有趣的性质。实验中所选两个点的坐标为 $q_3(1168, 2838)$ 和 $q_4(1268, 2824)$,在图 7 中我们只画出了图像边界范围内两条核线的形状。实验结果表明:尽管从整体上来看,两条曲线的形状互不相同,但是在图像的边界范围内他们的形状几乎是完全相同的。因此对于一条核线上两个比较接近的点,可以近似认为它们的核线是相同的,也就是说,这条核线上小范围的所有点,被投影到一条相应核线上,同框幅式中心投影影像相比,这种核线对在局部范围

内是存在的。

6 结 论

通过上面的实验,对于线阵 CCD 推扫式影像我们可以得出下述的结论。

(1) 通常情况下,核线是类似双曲线的曲线,但在小范围内可看作近似直线来处理。

(2) 对于一幅图像中一条核线上的某点 q 以及距离该点一定范围内的相邻点,其同名像点都位于 q 点的核线上。这个结论在局部范围内是成立的,根据该结论和结论(1),两个立体像对之间的匹配问题的搜索过程就可由二维转换为一维。

(3) 同名核线对是存在的。如果两个点是同名像点,那么他们所对应的两条核线是一一对应的,这两条核线上的点也是一一对应的,这个结论可由结论(2)以及立体像对的共轭特性推导出,因此该结论也是在局部范围内成立,也就是说这种核线对在局部范围内是存在的。

框幅式中心投影影像和线阵 CCD 推扫式影像的核线几何模型是不同的。本文建立了线阵 CCD

推扫式影像的核线理论基础,并推导出线阵 CCD 推扫式影像核线严格的数学关系。通过对该核线理论与框幅式中心投影影像的核线理论的对比研究,我们采用了简化和近似的方法得出了几条非常有用的核线特性,这些特性为核线在影像匹配中的应用提供了理论基础。

参 考 文 献 (References)

- [1] Zhang Y S. Digital Photogrammetry [M]. Beijing: The PLA Publishing House, 1997. [张永生. 数字摄影测量 [M]. 北京:解放军出版社,1997.]
- [2] Al-Rousan N, Cheng P, Petrie G, et al. Automated DEM Extraction and Orthoimage Generation from SPOT Level 1B Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1997, 63(8):965-974.
- [3] Brockelbank D C, Tam A P. Stereo Elevation Determination Techniques for SPOT Imagery. [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1991, 57(8):1065-1073.
- [4] Kim S, Kim T, Park W, et al. An Optimal Interpolation Scheme for Producing a DEM from the Automated Stereo Matching of Full-scale SPOT Images [A]. Proceedings of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing conference on Sensors and Mapping from Space [C]. Hanover, German, 1999.

A Study on the Epipolarity of Linear CCD Push-broom Images

GONG Dan-chao, ZHANG Yong-sheng, DENG Xue-qing

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In general, two or more images of a single scene are related by the so-called epipolar geometry. Since the epipolar geometry contains all geometric information that is necessary for establishing correspondence, it is commonly used for the extraction of three-dimensional information in computer vision, photogrammetry and remote sensing. The epipolar geometry means that a point (a) in the image is mapped to the point on the known linear line (epipolar line) or non-linear curve (epipolar curve) in the other image. In case of aerial and perspective imagery, the epipolar geometry is mathematically well founded and widely used in computer vision and aerial photogrammetry. It is told that the epipolar geometry of the linear push-broom sensor is different from that of the perspective one and that the epipolar geometry of perspective imagery cannot be applied to linear push-broom imagery.

This paper addresses the epipolar geometry of linear push-broom imagery. Compared with the epipolar geometry of frame perspective images, we qualitatively analyze the epipolarity model of perspective and aerial imagery and propose an epipolarity model of linear push-broom sensor images. The proposed epipolarity model is a non-linear hyperbola curve, based on the approach of track of projection and depends on the sensor model of collinear equation. We discuss the properties of epipolar curves of linear push-broom sensor images, experiment with a kind of classical linear push-broom sensor images; SPOT, draw a conclusion about the epipolar geometry of linear push-broom sensor images, and build the theoretical basis for the application of epipolar curves.

Key words: epipolarity; linear CCD push-broom; frame perspective