

# 轻型飞机成像光谱图象几何校正技术研究

张杰林<sup>1),2)</sup> 岑长华<sup>1)</sup> 张静波<sup>1)</sup> **王四龙**<sup>2)</sup> 何钟琦<sup>1)</sup> 曹代勇<sup>2)</sup> 肖青<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(核工业北京地质研究院遥感中心, 北京 100029) <sup>2)</sup>(中国矿业大学资源开发工程系, 北京 100083)

**摘要** 成像光谱测量技术是近年来遥感领域的发展前沿之一,该技术以高光谱分辨率、高空间分辨率、高时相分辨率及谱像合一为主要特征,在国民经济各个领域得到广泛应用.在剖析轻型飞机成像光谱测量系统成像环境特征的基础上,深入研究了低空遥感图象几何学理论,并利用数学模型分析方法,建立了航空成像光谱图象几何畸变模式及几何校正模型;提出了适合本系统的几何处理流程.利用所建立的几何校正模型和软件,对机载可见光/短波红外成像光谱数据进行了几何特性分析及几何校正,取得较好的图象处理效果,并证实了系统的实用性.

**关键词** 成像光谱图象 畸变模式 几何校正 轻型飞机

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)06-0576-05

## Study on Image Geometric Calibration Technology of the Light Aeroplane Imaging Spectrum Data

ZHANG Jie-lin<sup>1),2)</sup>, CEN Chang-hua<sup>1)</sup>, ZHANG Jing-bo<sup>1)</sup>, **WANG Si-long**<sup>2)</sup>,  
HE Zhong-qi<sup>1)</sup>, CAO Dai-yong<sup>2)</sup>, XIAO Qing<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Remote Sensing Center, Beijing Geological Institute of Nuclear Industry, Beijing 100029)

<sup>2)</sup>(Department of Resources Exploitation Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The imaging spectrum technology is one of the foreland research field in the remote sensing development. Its main characteristics are hyperspectral resolution, high spatial resolution, high time resolution and composition of spectrum and image, It has been widely used in the civil economy. Based on analyzing imaging environment of the light aeroplane remote sensing system, this article deeply studied the geometric theory of low altitude remote sensing images. Adopting mathematics modeling method, the author established geometric distortion analysis methods and calibration models, and presents geometric processes. Using the models and software presented in this article, Geometric characteristics analysis and calibration has been carried out for the VIR/SWIR imaging spectrum data, and better processing results are achieved. Furthermore, these results also confirm the practicability of the model.

**Keywords** Imaging spectrum data, Geometric distortion model, Geometric calibration, Light aeroplane

### 0 引言

轻型飞机成像光谱测量系统集成是一个复杂的系统工程,图象几何特性分析与几何校正模式是其中的一个关键部分.由于低空遥感图象的像元尺寸较小(3m左右),扫描瞬间较小的位置与姿态变化都可能导致超过一个像元大小的图象几何变化,影

响遥感图象的几何保真性,因此,精细的几何校正对于轻型飞机成像光谱图象处理是一个必不可少的重要环节,是轻型飞机遥感图象处理工作中一项十分重要的工作.

本文针对轻型飞机成像光谱测量系统的不同集成特点和成像环境,深入研究了低空遥感图象几何学理论,并利用数学模型分析方法,建立了轻型飞机成像光谱图象的几何畸变模式及校正处理流程,为

低空成像光谱图象的高精度几何校正处理和多航带图象镶嵌提供一套实用工具。

## 1 技术路线

轻型飞机成像光谱图象几何校正技术是该测量遥感系统实用化的关键技术之一,是进行快速、高精度制图技术研究的基础,其遵循的原则是从已知到未知,整体研究与局部分析相结合的原则,首先利用数学模型方法研究轻型飞机成像光谱图象的几何特性,建立畸变模式,然后,根据畸变特性,建立各种几何校正模型,进行几何校正处理;其次是,坚持模型分析与实际应用相结合的原则,即在系统分析图象几何畸变特征,建立几何校正模型的基础上,选取实验区成像光谱图象进行几何校正处理,以检验并修正几何校正模型。

## 2 图象几何畸变模式分析

传统的遥感图象几何校正模式主要包括多项式模式、三角形线性模式和共线方程式模式<sup>[1~5]</sup>。目前,这 3 种基本几何校正模式可以较圆满地解决航天遥感图象和高空航空遥感图象的几何畸变问题,但对于低空成像光谱测量系统来讲,由于成像环境及传感器等各种因素对图象几何畸变影响的多变性和复杂性,只有在深入研究低空遥感图象几何学理论的基础之上,建立一种综合几何校正处理模式,才能成功地解决低空成像光谱图象的几何畸变特征分析和几何校正处理问题。

### 2.1 基于传感器成像模式的几何特性分析

轻型飞机成像光谱测量系统使用的传感器是一种多中心投影式成像光谱仪,其扫描线中心点(机下点)所扫到的地面面积与两侧所扫面积是不同的,机下像元点面积最小,从中心点到两侧,实际扫描面积不断增加,扫描线外移距离亦逐步加大(图 1)。

扫描面积计算如下:

$$\text{机下点面积: } A_0 = (\pi h^2 \tan(\beta/2))$$

其中: $h$  为航高; $\beta$  为瞬时视场角

$$\text{两侧点面积: } A_i = \pi X_i Y_i$$

$$\text{其中: } Y_i = h/2 (\tan(\theta + \beta/2) - \tan(\theta - \beta/2));$$

$$X_i = h \sec(\Omega) \tan(\beta/2);$$

$$\Omega = \tan^{-1} \{ \tan((\theta + \beta/2) + \tan(\theta - \beta/2)) / 2 \};$$

$\theta = i\beta$ ;  $i$  为扫描行第  $i$  个像元。

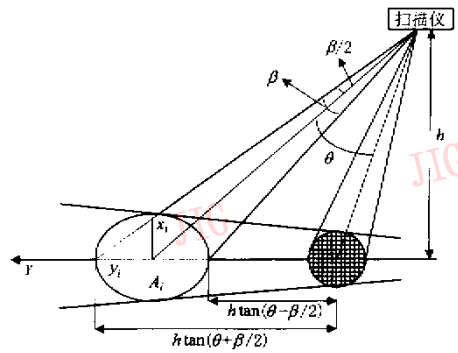


图 1 中心投影方式下像元与对地面积关系及扫描线外移距离计算示意图

扫描线整体外移距离:

$S = 2htan((\text{int}(n/2))\beta) - h\beta n$ 。其中: $n$  为扫描行像元数。

以机载可见光/短波红外扫描仪为例,该扫描仪的瞬间视场角  $\beta = 3\text{mrad}$ ,飞行航高为  $1\,000\text{m}$ ,每条扫描行  $511$  个像元,机下点像元尺度为  $3\text{m}$ ,线中心投影引起扫描线两端外移距离( $S$ )为:

$$S = 2 \times 1\,000 \times \tan(255 \times 0.003) - 1\,000 \times 0.003 \times 511 = 387\text{m}$$

### 2.2 基于飞机姿态运动变化的图象几何畸变量分析

飞机作为航空成像光谱测量系统的运载平台,是该系统的重要组成部分。在飞行作业中,飞机姿态的变化将直接影响到扫描图象的几何特征,而成像瞬间,飞机的空间位置和三轴姿态决定了遥感图象的几何畸变特性。在三维空间中,飞机瞬间的空间位置是用飞机中心点的坐标值( $x, y, z$ )确定的,飞机姿态则由俯仰角、侧滚角、偏航角( $\varphi, \omega, \kappa$ ) 3 个参数决定。

因此,影响图象几何特性的飞机姿态运动变化因素主要包括:偏航、侧滚、俯仰、飞行高度及飞行速度等,其影响方式和几何畸变量计算见表 1(图 2)。

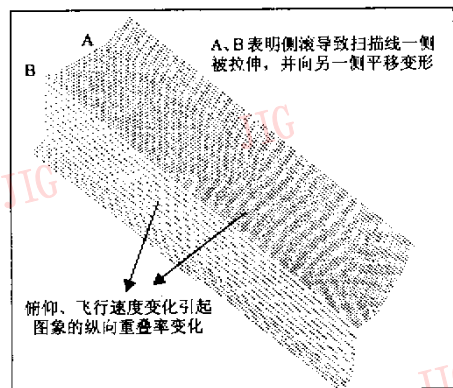


图 2 飞机姿态运动变化对图象几何特征的影响示意图

表1 飞机姿态运动变化对图象几何特征影响一览表

影响因素	影响方式	几何畸变量	备注
偏航	扫描线沿偏航方向的移位	$\Delta L = VT \sin(\kappa)$	$V$ : 地速 $T$ : 偏航时间 $\kappa$ : 偏航角
侧滚	扫描线一侧被拉伸,并向另一侧平移变形	$\Delta L_{\uparrow} = h \{ \tan(\omega + i\beta) - \tan(i\beta) \}$ $\Delta L_{\downarrow} = h \{ \tan(i\beta) - \tan(i\beta - \omega) \}$	$\Delta L_{\uparrow}$ : 向上侧滚畸变量 $\Delta L_{\downarrow}$ : 向下侧滚畸变量 $\omega$ : 侧滚角 $\beta$ : 瞬时视场角
俯仰	图象的纵向重叠率变化	$\Delta L = htan(\varphi)$	$\varphi$ : 俯仰角
飞行高度	像元大小变化及扫描线实际扫描宽度的变化	$\Delta L = \Delta htan(i\beta)$	$\Delta h$ : 高度变化量
飞行速度	图象纵向重叠率变化	$\Delta L = \Delta VT$	$\Delta V$ : 速度变化量

除上述因素外,风速、地形变化、GPS 定位数据精度、平台工作状态以及方式等对图象几何特性也会产生一定的影响。

### 3 图象几何校正模式

成像光谱图象几何保真性和几何畸变恢复问题是遥感图象几何学的主要研究内容之一,而几何校正技术则是解决轻型飞机成像光谱图象几何畸变恢复的主要途径。为此在分析研究图象畸变模式的基础上,建立了轻型飞机成像光谱图象多因素几何校正模型和几何畸变综合校正模型。

#### 3.1 基于传感器线中心投影的正切校正模式

线中心投影图象的几何性质是以扫描线中心像元点为起点,向扫描线两侧,像元点之间的距离逐渐增大,这种畸变造成了扫描线中心部分图象比例尺比两侧图象的比例尺大。由于两侧像元到中心像元点的畸变距离是一个正切函数,因而这种几何校正被称做正切校正。

扫描行第  $i$  个像元畸变距离计算公式为

$$\Delta L = 2h(\tan(i\beta - \beta/2) - \tan((i-1)\beta))$$

以机载可见光/短波红外扫描仪为例,其瞬间视场角为  $\beta$ ,航高为  $h$ ,每扫描行 511 个像元,正切校正过程如下:

(1) 首先利用航高数据、扫描行像元数和瞬时视场角来计算原始图象像元的实际大小  $x_i$  及校正后图象的像元大小  $x'$

$$x_i = 2(h \tan((i-255)\beta) - h \tan((i-255-1)\beta)) - x_{i-1}/2$$

$$x' = h \tan(\beta)$$

(2) 计算任一像元点到机下点的距离  $L_i$  及校正后像元数  $n$

$$L_i = (x_{i-1} + x_i)/2$$

$$n = \text{int}(2 \tan(255\beta)/\beta)$$

(3) 计算插值点  $T_i (T_i = ix', i = 1, 2, 3, \dots, n)$  处

的灰度值  $Z_i$ 。选取靠近插值点  $T_i$  的 3 个结点,即如果  $L_k < T_i < L_{k+1} (k = 1, 2, 3, \dots, 255)$ , 当  $|L_k - T_i| > |T_i - L_{k+1}|$  时,取 3 个结点为第  $k, k+1, k+2$  个像元点;而当  $|L_k - T_i| < |T_i - L_{k+1}|$  时,取 3 个结点为第  $k-1, k, k+1$  个像元点;利用抛物线插值算法计算像元点灰度值<sup>[6]</sup>。

$$Z_i = \sum_{m=i}^{i+2} Y_m \prod_{n=i, m \neq n}^{i+2} \left( \frac{T_i - L_n}{L_m - L_n} \right)$$

其中:  $|L_k - T_i| > |T_i - L_{k+1}|$  时,  $m = k (k = 1, 2, 3, \dots, 255)$ ;  $|L_k - T_i| < |T_i - L_{k+1}|$  时,  $m = k-1$ ;  $Z_i$  为插值点  $T_i$  处的灰度值;  $Y_m$  为第  $m$  个像元的原始灰度值;  $L_m, L_n$  为第  $m, n$  个像元到机下点的距离。

#### 3.2 基于飞机姿态变化的几何校正模型及几何畸变量校正技术

基于飞机姿态变化的几何校正技术主要是通过几何畸变量的计算,把扫描航带在飞行方向或扫描方向上的不等间距转换为像元大小的等间距。以偏航校正为例:

偏航对图象几何特征的影响主要包括两个方面,一是偏航使得扫描线向偏航方向整体移动,破坏图象原有的几何特征;二是扫描线的扫描方向与设计扫描方向偏离,造成图象的几何畸变。这里已知飞机的偏航参数,但无扫描仪扫描方向的测量值,故校正模式是基于飞机偏航,而扫描仪扫描方向不变的前提设计的。

偏航校正主要是利用相邻行中心点的 GPS 坐标,计算行距 ( $D$ ) 及偏航角 ( $\kappa$ ), 求出偏航距离,然后利用机下点像元大小 ( $x$ ), 计算出偏航像元数 ( $\Delta x$ ) 进行校正。

校正公式:

$$\Delta x = \text{int} \left( \frac{\Delta d_i + D \sin(\kappa)}{x} \right)$$

其中:  $D$  为  $i, j$  行距离;  $\kappa$  为偏航角;  $x$  为机下点像元大小;  $\Delta d_i$  为第  $i$  行的偏航量,由第  $i$  和  $i-1$  行的

GPS 坐标计算得到。

### 3.3 基于三轴测角系统(POS)与 GPS 系统集成的共线方程校正模式

共线方程校正模式是一种局部的、完全的几何畸变校正模式,其是在已知扫描线扫描瞬间机下点三维空间位置和三轴姿态值的情况下,利用建立的共线条件式对成像光谱数据几何畸变进行校正。

由于扫描仪的扫描速率在 20 行/s~50 行/s 之间,属于高频变化,在完成单根扫描线扫描成像的时间内(0.02s~0.05s),姿态和位置变化较小,因此,扫描线每个像元与地面对应点之间具有相同姿态参数的中心投影关系,并且,所有像元都在一个平面内。扫描线投影中心可以用 6 个方位元素表示。据此地面上的任一点与其在扫描线所在平面上对应点坐标值之间,可以建立共线条件式<sup>[1]</sup>,然后,利用 6 个方位元素值及扫描线像元参数值联立求解共线方程,计算出扫描线每个像元对应的地面坐标值。

具体计算方法如下:

首先利用 POS(三轴测角系统)提供的 3 个方位元素( $\varphi, \omega, \kappa$ )计算共线方程的 9 个待定系数( $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ ):

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

然后,利用上述 9 个系数和 GPS( $X_0, Y_0, -h$ )坐标,计算每个像元点的地理坐标

$$\begin{cases} X = (-h) \frac{a_1 y + b_1 x - c_1 h}{a_3 y + b_3 x - c_3 h} + X_0 \\ Y = (-h) \frac{a_2 y + b_2 x - c_2 h}{a_3 y + b_3 x - c_3 h} + Y_0 \end{cases}$$

最后,以坐标大小重新排列像元,以机下点像元大小为步长,网格化离散数据,形成校正图象。

## 4 轻型飞机成像光谱数据几何校正处理流程

轻型飞机成像光谱数据几何校正处理效果的优劣,主要在于系统获取的几何参数的有无、多少及精度。在实际工作中,由于获取的校正参数不同,其相应的几何校正模式、校正处理流程亦不同。

基于三轴测角系统(POS)与 GPS 系统集成条件,几何校正处理流程如图 3 所示。

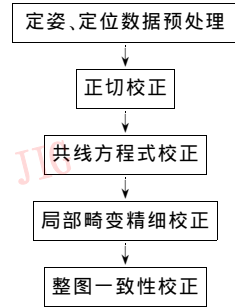


图 3 轻型飞机成像光谱数据几何校正处理流程图

## 5 成像光谱数据处理实例

基于轻型飞机可见光/短波红外成像光谱仪获得的高分辨率的低空成像光谱影像,通过对定姿、定位数据的处理分析与评价及图象的几何校正、地理编码等,有效地消除了图象畸变,恢复了成像光谱图象几何保真性。

### 5.1 定姿、定位数据质量评价

对所获得的飞机姿态数据、扫描仪姿态参数及定位数据的统计分析(表 2,图 4)表明,成像时扫描仪姿态控制较好,定位数据精度较高,如: X 方向统计方差为 3.436。另外,从飞机飞行状态看,航高变化基本控制在 18m 之内,地速变化为 15km/h,满足作业要求。

表 2 姿态及定位数据的统计分析表

	最大值	最小值	极值	方差
X(m)	21430.47	21418.46	12.01	3.436061
Y(m)	4508.937	4498.397	10.54	3.95108
高度(m)	1515.85	1498.83	17.02	4.198891
地速(km/h)	210.9	195.4	15.5	2.923029
偏航(°)	5.5	-4.399994	9.9	1.920317
侧滚(°)	3.153611	-1.966944	5.12	0.7954982
俯仰(°)	6.704722	1.563611	5.14	0.7145546

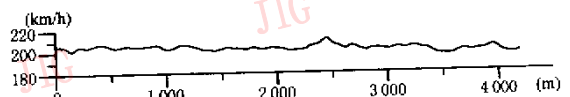


图 4 地速变化曲线图

### 5.2 几何校正及精度评价

根据实际飞行情况和获取的几何参数的数量和精度,本次几何校正工作主要包括正切校正、共线方程法校正及地理编码等。校正前后的图象(图 5)对比分析表明:采用几何校正技术,有效地消除了横向

和纵向的畸变,使图象横向和纵向的比例尺归一化,图象的几何结构得到恢复和改善。

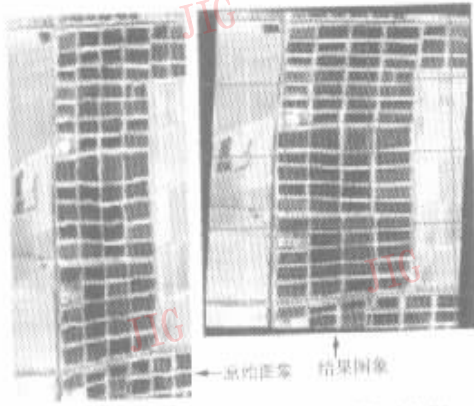


图5 几何校正前后成像光谱影像对比图

为了评价图象的校正精度,在工作区选取了5个野外测量点,进行数据定位精度检验<sup>[7]</sup>(表3)。分析结果表明,像元点的平均偏差都在一个像元左右,精度满足应用要求。

表3 定位精度分析表

单位:m				
点号	点 位	X 方向偏差	Y 方向偏差	点位差
1	垡头粮库西南角	2.8	3.1	4.18
2	大北关村十字路口交点	-2.5	1.8	3.08
3	小耕南水渠桥东北角	3.5	2.7	4.42
4	于家务东北两路交点	1.6	-1.9	2.48
5	西堡南东西向水泥路 与南北土路交点	2.3	-1.2	2.6
	均值	0.62	0.9	3.35
	均方差	2.54	2.06	0.80

## 6 主要结论

几何校正处理是轻型飞机成像光谱测量系统最终产业化和实用化的关键技术之一。本文在该方面进行了较为深入细致的研究工作,初步建立了轻型飞机成像光谱图象几何畸变模式、几何校正模型及处理流程。主要成果如下:

(1) 在剖析轻型飞机成像光谱测量系统成像环境特征的基础上,建立了像元级图象几何特性分析方法,提出了轻型飞机成像光谱图象几何畸变的基本类型以及各种影响因素。这些工作为校正模式的建立与优化提供了可靠的、直接的、量化的依据。

(2) 在讨论分析基本几何校正模型的数学原理及适用性的基础上,借鉴现有的卫星遥感图象几何校正模型与高空航空遥感图象几何校正模型,建立了轻型飞机成像光谱图象几何校正模型,提出了适

合本系统的几何处理流程。

(3) 在实际的轻型飞机成像光谱图象几何校正处理方面,利用所建立的几何校正模型和软件,对实验区成像光谱数据进行了几何特性分析及几何校正,取得了较好的图象处理效果。

## 参 考 文 献

- 李树楷. 遥感图象对地定位技术研究[M]. 北京:测绘出版社, 1991.
- 郭得方,吕松棠,杨小勤等. 遥感图象计算机处理和模式识别[M]. 北京:电子工业出版社, 1987.
- 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- 张庸. 遥感成像原理及图象特征[M]. 北京:地质出版社, 1994.
- Ehlers M. Geometric registration of airborne scanner data using multiquadric interpolation techniques[A]. In Proceeding of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition[C], Strasbourg France, 1994, 2:492~502.
- 施吉林,刘淑珍,陈桂芝等. 计算机数值方法[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
- 史文中. 空间数据误差处理的理论和方法[M]. 北京:科学出版社, 1998.



张杰林 1970年生,核工业北京地质研究院高级工程师,中国矿业大学在职博士研究生。目前主要研究领域为成像光谱图象处理及其应用研究。已发表论文20余篇,专著1部。



岑长华 1965年生,硕士,研究员,核工业北京地质研究院遥感中心副主任。研究领域为计算机图象处理,遥感地学应用及GIS等。

张静波 1954年生,高级工程师,核工业北京地质研究院遥感中心副主任。研究领域为计算机图形学。

王四龙 1965年~1999年,博士,中国矿业大学副教授。研究领域为遥感技术。

何钟琦 1933年生,研究员,核工业北京地质研究院博导。研究领域为遥感技术。

曹代勇 1955年生,教授,博士生导师,中国矿业大学资源开发工程系副主任。研究领域为数学地质、计算机图形学及GIS应用等。

肖青 1971年生,核工业北京地质研究院工程师,中国科学院遥感所博士生。研究领域为遥感技术。