

# 线阵推扫成像光谱仪几何校正误差的理论分析

徐卫明, 王建宇, 舒 嵘, 何志平, 方抗美

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**针对本课题组研制的线阵推扫成像光谱仪和 GPS/INS 组合定位的集成系统, 分析了姿态位置参数、焦距测量和安装角测量引入的几何校正误差, 并利用航空试验数据计算出了量化的误差结果。

**关键词:**成像光谱仪; 全球定位系统/惯导系统组合定位; 共线方程; 几何校正

**中图分类号:**TP751 **文献标识码:**A

## THEORETIC ANALYSIS OF GEOMETRICAL RECTIFICATION ACCURACY FOR LINEAR PUSHBROOM IMAGING SPECTROMETER

XU Wei-Ming, WANG Jian-Yu, SHU Rong, HE Zhi-Ping, FANG Kang-Mei  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** For the integration system consisting of linear pushbroom imaging spectrometer and GPS/INS integration positioning, geometrical rectification accuracy deriving from position and attitude parameters, focal length measuring and installation angles measuring were analyzed. Moreover, a quantitative result of accuracy was calculated with airborne experimental data.

**Key words:** imaging spectrometer; GPS/INS combined positioning; collinear function; geometrical rectification

### 引言

近年来,随着成像光谱仪的空间分辨率的提高,其几何校正越来越显得重要<sup>[1,2]</sup>。摄影测量上,遥感影像校正常用的数学模型有多项式模型、有理函数模型等非严格模型;严格模型是以成像几何为基础模型,例如共线方程,但是对于线阵推扫成像光谱仪,它的每一条扫描线都有一个投影中心,共线方程中需要大量外方位数据,采用常规的利用地面控制点反求的方法(立体时采用空中三角测量,单像可采用空间后方交会)难以进行,通常需要辅助仪器直接测量每行的外方位元素,常用的测量外方位元素的仪器是 GPS/INS 组合定位系统。本文依据共线方程,分析了本课题组研制的成像光谱仪和 GPS/INS 集成系统的几何校正误差。

### 1 系统介绍

本课题组研制的集成系统主要由 3 台仪器构

成:2 台成像光谱仪,1 台 GPS/INS 组合定位仪器,如图 1 所示。本系统采用 2 台成像光谱仪进行拼接,以扩大视场,2 台成像光谱仪的指标完全相同,如表 1 所列。成像光谱仪沿器件方向的瞬时视场为 0.6 mrad。GPS/INS 组合定位系统采用加拿大 Applanix 公司的 POS/AV 510,见图 2。POS/AV 510 主要由 3 部分组成:惯性测量单元 IMU(Inertial Measuring Unit)、全球定位系统 GPS(Global Positioning System)和融合前两者数据的卡尔曼滤波算法。POS/AV 510 可以提供姿态和位置参数,其主要指标见表 2,后处理时侧滚和俯仰的精度可以达到 18",航向精度为 28.8",定位精度一般都能达到 10cm。

POS/AV 510 的输出数据是一系列带有 GPS 时间标记的姿态位置数据流,成像光谱仪和 POS/AV 510 的同步采用以下办法:成像光谱仪曝光时发出一个脉冲,通过同轴电缆传输到 POS/AV 510,POS 检测到脉冲后,会记下这个脉冲对应的 GPS 时间,然后就可以通过 GPS 时间内插来得到对应的姿态

位置数据. POS/AV 510 的输出速率是 250Hz, 而成像光谱仪的工作频率是 50Hz, 实际应用发现采用线性内插算法就可以满足要求.

## 2 几何校正的原理和实现

### 2.1 本系统中成像光谱仪的成像原理

本系统中的成像光谱仪采用一个共轴的棱镜-光栅-棱镜分光方式, 如图 3 所示. 地物先成像到狭缝处, 然后再通过分光组件成像到 CCD 上. 狭缝的大小为  $10\text{mm} \times 25\mu\text{m}$ . 这种由望远镜系统和色散成像单元组成的成像方式可以简单地作为线中心投影处理, 其成像几何关系如图 4 所示.

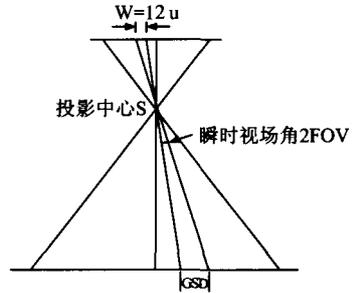


图 4 线中心投影  
Fig. 4 Linear central projection

系统等效焦距  $f$  为 20mm, 成像几何面上 CCD 像元大小为  $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ .

### 2.2 共线方程

由摄影测量的基本原理可知, 线中心投影的几何关系可以用共线方程表述(详见文献[3])

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}^m = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}^m + k \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta z_p \end{bmatrix}^m = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}^m + kR \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}^i \quad (1)$$

$(X_c, Y_c, Z_c)$  是投影中心在制图坐标系中的坐标,  $(x, y, -f)$  是像点像空间坐标,  $(X_p, Y_p, Z)$  是相应地面点在制图坐标系中的坐标,  $k$  是点依赖比例因子, 可定义成  $k = H/f$ ,  $H$  是航高.  $R$  是像空间坐标系到制图坐标系的旋转矩阵.

### 2.3 获取 $(X_c, Y_c, Z_c)$ 和矩阵 $R$

在本系统中, POS/AV 510 的主要作用就是用于获取  $(X_c, Y_c, Z_c)$  和矩阵  $R$ <sup>[1]</sup>. POS/AV 的输出数据主要由两类构成: IMU 中心在 WGS84 坐标系中的三维坐标; IMU 的计算坐标系相对于该点的局部水平坐标系的 3 个旋转角. 由图 1 可知, 成像光谱仪和 POS/AV 刚性连接, 因此, 可以把 IMU 的三维坐标变换为成像光谱仪的光学中心的 WGS84 三维坐标, 同时根据 POS 的测量原理可以得到计算矩阵  $R$  的方法:

$$R = C_E^m C_g^E C_b^g C_i^b C_c^c C_i^c \quad (2)$$

其中, 各参数定义如下:

角标  $^m, ^E, ^g, ^b, ^c, ^i$  分别表示制图坐标系, WGS84 坐标系, 局部水平坐标系(或称地理坐标系), IMU 坐标系, 相机坐标系(即成像光谱仪仪器坐标系), 影像坐标系;  $(x_i, y_i, z_i)^b$  是成像光谱仪的光学中心在 IMU 坐标系中的坐标;  $C_b^g(\Phi, \Theta, \Psi)$  是 IMU 坐标系变换到当地水平坐标系的转换矩阵,  $(\Phi, \Theta, \Psi)$  是 POS/AV 510 输出的 3 个姿态角: 侧滚、俯仰和航



图 1 系统安装图  
Fig. 1 The installation diagram of system

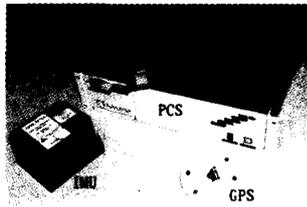


图 2 POS/AV 510  
Fig. 2 POS/AV 510

表 1 成像光谱仪指标

Table 1 Specifications of imaging spectrometer

总波段数	124
光谱范围( $\mu\text{m}$ )	420 ~ 900
光谱采样间隔	~ 3.8 nm
光谱分辨率	$\leq 5\text{nm}$
瞬时视场(mrad)	沿轨 1.5 穿轨 0.6
总视场( $^\circ$ )	21
扫描率	50 Fr/S
数据编码(bit)	12
数据记录速率(MB/S)	1
探测器	652 × 494 面阵 CCD

表 2 POS/AV 510 指标

Table 1 Specifications of POS/AV 510

	C/A GPS	DGPS	后处理
位置(m)	4.0 ~ 6.0	0.5 ~ 2	0.05 ~ 0.3
速度(m/s)	0.05	0.05	0.005
侧滚和俯仰(deg)	0.008	0.008	0.005
偏航(deg)	0.07	0.05	0.008



图 3 成像光路框图  
Fig. 3 Sketch of imaging optical path

向角.  $C_k^E$  是当地水平坐标系变换到 WGS84 坐标系的转换矩阵;  $(X_{IMU}, Y_{IMU}, Z_{IMU})^E$  是 IMU 中心在 WGS84 坐标系中的坐标, 由 POS/AV 510 直接输出;  $C_E^m$  是 WGS84 坐标系到制图坐标系的转换矩阵;  $(X_c, Y_c, Z_c)^m$  是成像光谱仪的光学中心在制图坐标系中坐标;  $C_i^c$  是影像坐标系到相机坐标系的转换矩阵;  $C_c^b$  是相机坐标系到 IMU 坐标系的转换矩阵, 它表示的就是成像光谱仪和 IMU 的相对安装关系.

### 3 几何校正误差的理论分析

影响遥感影像几何校正精度的因素很多, 例如, POS/AV 510 提供的姿态参数的测量误差、成像光谱仪焦距测量误差、系统安装时的成像光谱仪和 POS/AV 510 的相对关系等等, 本文将从共线方程的角度分析各参数的影响.

#### 3.1 姿态位置参数精度对结果的影响

分析各角度的定义可以得到式(2)中各矩阵的计算式, 式(2)中的  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$  是相机坐标系相对于 IMU 坐标系的 3 个旋转角, 仪器安装后可以测定这 3 个角度, 研究姿态位置参数的影响时, 可以假定  $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ , 这表明相机坐标系的坐标轴和 IMU 坐标系的坐标轴是平行的. 又由于  $C_E^m$  涉及到具体的制图坐标系, 本文中为讨论方便, 定义制图坐标系为 WGS84 坐标系, 则  $C_E^m$  为单位矩阵. 考虑上述结果, 并求其各项相对于姿态位置参数  $(\Phi, \Theta, \Psi)$  的偏导数, 可得到:

$$\begin{aligned} \Delta x_p &= x(-a_1 \sin \lambda \cos l - b_1 \sin l - c_1 \cos \lambda \cos l) \\ &\quad - y(-a_2 \sin \lambda \cos l - b_2 \sin l - c_2 \cos \lambda \cos l) \\ &\quad + f(-a_3 \sin \lambda \cos l - b_3 \sin l - c_3 \cos \lambda \cos l), \\ \Delta y_p &= x(-a_1 \sin \lambda \sin l + b_1 \cos l - c_1 \cos \lambda \sin l) \\ &\quad - y(-a_2 \sin \lambda \sin l + b_2 \cos l - c_2 \cos \lambda \sin l) \\ &\quad + f(-a_3 \sin \lambda \sin l + b_3 \cos l - c_3 \cos \lambda \sin l), \\ \Delta z_p &= x(a_1 \cos \lambda - c_1 \sin \lambda) - y(a_2 \cos \lambda - c_2 \sin \lambda) \\ &\quad + f(a_3 \cos \lambda - c_3 \sin \lambda), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_x^2 &= (dX_c)^2 + k^2 \left[ \left( \frac{\partial \Delta x_p}{\partial \Phi} d\Phi \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta x_p}{\partial \Theta} d\Theta \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta x_p}{\partial \Psi} d\Psi \right)^2 \right], \\ M_y^2 &= (dY_c)^2 + k^2 \left[ \left( \frac{\partial \Delta y_p}{\partial \Phi} d\Phi \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta y_p}{\partial \Theta} d\Theta \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta y_p}{\partial \Psi} d\Psi \right)^2 \right], \\ M_z^2 &= (dZ_c)^2 + k^2 \left[ \left( \frac{\partial \Delta z_p}{\partial \Phi} d\Phi \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta z_p}{\partial \Theta} d\Theta \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta z_p}{\partial \Psi} d\Psi \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

根据式(3), 采用 2003 年 9 月的一次试验飞行数据进行计算, 结果见表 3 所列. 图 5 是试验飞行时 POS/AV 获取的姿态数据, 横轴是扫描行  $l$ , 共采用 4 913 行, 纵轴是角度值, 可见飞行的侧滚值  $\alpha$  在  $5^\circ$  范围内, 俯仰值  $\beta$  在  $2^\circ$  范围内, 航向  $\gamma$  平均在  $130^\circ$  附近.

表 3 左侧的数值来自于 POS/AV 510 的精度范围, 由解算结果可知, POS/AV 510 对定位精度的影响在 30cm 以内, 而且对于  $30''$  以内的姿态精度, 定位精度基本和提供的位置参数精度相当, 位置参数精度越高, 姿态的影响才会越明显. 在集成系统多次

表 3 由姿态位置参数分析定位精度

Table 3 Analyze positioning accuracy by position and orientation parameters

位置精度 (cm)	姿态精度 ( $''$ )	定位精度 (m)
5	10	0.068
	20	0.104
	30	0.146
	60	0.279
	10	0.110
	20	0.136
10	30	0.170
	60	0.292
	10	0.205
20	20	0.220
	30	0.243
	60	0.340
30	10	0.304
	20	0.314
	30	0.330
	60	0.407

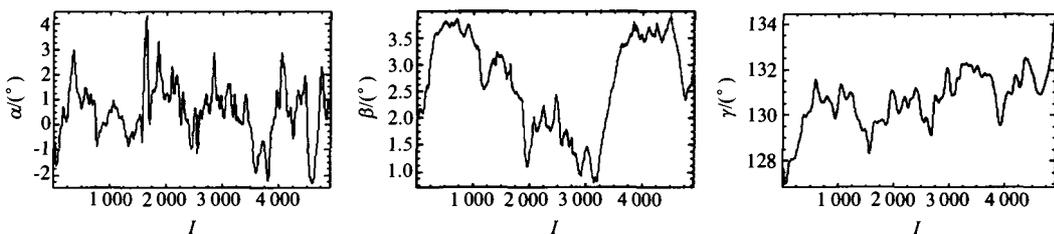


图 5 POS/AV 510 获取的位置姿态参数

Fig. 5 Position and orientation parameters provided by POS/AV 510

飞行试验中, POS/AV 510 的定位精度都可以达到 20cm 左右, 侧滚和俯仰精度一般达到 18", 航向精度通常只能达到 1', 转算到地面点精度为 0.258m.

### 3.2 焦距的测量精度对结果的影响

在实际解算中发现, 焦距的微小改变对最后的结果影响很大, 因此, 有必要分析焦距的测量精度对结果的影响. 分析焦距的影响时, 假定其它的参数是真值, 可得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta x_p}{\partial f} &= -a3 \sin \lambda \cos l - b3 \sin l - c3 \cos \lambda \cos l, \\ M_{xf}^2 &= k^2 \left( \frac{\partial \Delta x_p}{\partial f} df \right)^2, \\ \frac{\partial \Delta y_p}{\partial f} &= -a3 \sin \lambda \sin l - b3 \cos l - c3 \cos \lambda \sin l, \\ M_{yf}^2 &= k^2 \left( \frac{\partial \Delta y_p}{\partial f} df \right)^2, \\ \frac{\partial \Delta z_p}{\partial f} &= -a3 \cos \lambda - c3 \sin \lambda, \\ M_{zf}^2 &= k^2 \left( \frac{\partial \Delta z_p}{\partial f} df \right)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

仍然采用 3.1 中的试验数据, 计算结果见表 4 所列. 由表中可知, 焦距的测量精度对定位精度的影响很大, 必须采用高精度的测试工具. 系统使用精密测角法来测定焦距, 测量时使用的经纬仪精度为 1", 读数显微镜的精度为 5 $\mu$ m, 测量精度优于 10 $\mu$ m. 由表 4 的计算结果可知, 焦距的测量精度对结果的影响相当明显, 测量时必须非常准确. 但是应该注意到, 焦距的影响是一种系统误差, 通过最后对结果的系统校正可以减小这种影响.

### 3.3 安装角的测量精度对结果的影响

POS/AV 510 提供的姿态参数要转换为成像光谱仪的姿态参数, 需要测定成像光谱仪和 IMU 的相对安装姿态, 从而得到相机坐标系到 IMU 坐标系的转换矩阵  $C_c^b$ . 得到公式(5)

$$\begin{aligned} M_{\Theta_x}^2 &= k^2 \left[ \left( \frac{\partial \Delta x_p}{\partial \Theta_x} d\Theta_x \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta x_p}{\partial \Theta_y} d\Theta_y \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta x_p}{\partial \Theta_z} d\Theta_z \right)^2 \right], \\ M_{\Theta_y}^2 &= k^2 \left[ \left( \frac{\partial \Delta y_p}{\partial \Theta_x} d\Theta_x \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta y_p}{\partial \Theta_y} d\Theta_y \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta y_p}{\partial \Theta_z} d\Theta_z \right)^2 \right], \\ M_{\Theta_z}^2 &= k^2 \left[ \left( \frac{\partial \Delta z_p}{\partial \Theta_x} d\Theta_x \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta z_p}{\partial \Theta_y} d\Theta_y \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta z_p}{\partial \Theta_z} d\Theta_z \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

表 4 焦距测量精度对结果的影响

Table 4 The focal length measuring accuracy's effect on final results

焦距测量精度( $\mu$ m)	定位精度(m)
30.00	0.907
10.00	0.302
5.00	0.151

表 5 安装角测量精度对结果的影响

Table 5 The installing angles measuring accuracy's effect on final results

安装角精度(")	定位精度( $\mu$ m)
20	1.09
60	3.27
120	6.54

采用同 3.1 的试验数据, 计算结果见表 5. 实际应用中, 安装角是用经纬仪测量的, 测量精度优于 1', 由表 5 的计算结果可知, 对于本系统, 可以忽略安装角对结果精度的影响.

## 4 结语

线阵推扫成像光谱仪和 GPS/INS 组合定位的集成系统, 是当前遥感研究的一个较新的方向, 成功应用还需进一步的探讨, 本文对该种集成系统影像的几何校正的误差源进行深入研究, 从理论上分析各种误差源导致的校正影像几何误差的大小, 并给出相应的计算结果.

致谢 本文得到同事张海洪和郑州信息工程大学刘军的热情帮助, 特此感谢.

## REFERENCES

- [1] XU Wei-Ming. Study on key technique of linear array multi-sensors integration based on POS [D]. Shanghai Institute of Technical Physics, Master Dissertaion (徐卫明. 基于 POS 的线列多传感器集成的关键技术研究. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所硕士学位论文), 2003.
- [2] GUO Qiang, XU Jian-Min, CHEN Gui-Lin. Study on improving image spatial resolution of optical instruments with linear sensors in three-axis body-stabilized platform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭强, 许健民, 陈桂林. 三轴稳定平台下提高线列探测器光学遥感仪图像空间分辨率的方法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(1): 39-44.
- [3] LI De-Ren, ZHOU Yue-Qin, JIN Wei-Xi. *Photogrammetry and Remote Sensing Generality* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press (李德仁, 周月琴, 金为铣. *摄影测量与遥感概论*. 北京: 测绘出版社), 2001. 1.