

文章编号: 1672-8785(2017)12-0027-05

# 稳定平台对机载线阵相机 成像质量的影响

陈 伟<sup>1</sup> 刘哲华<sup>2</sup> 刘 岩<sup>3</sup>

(1. 康迪泰克大洋管件(长春)有限公司, 吉林 长春 130011;

2. 吉林省实验中学, 吉林 长春 130021;

3. 科世达(长春)汽车电器有限公司, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 在线阵传感器的航空摄影过程中, 飞机姿态变化会对成像造成影响, 导致成像模糊。因此根据航空投影的坐标变换方程, 采用 Monte Carlo 算法分析了曝光时间、稳定平台位置补偿残差以及角速度补偿残差等参数对线阵相机成像质量的影响。结果表明, 高性能机载线阵相机必须配备高性能稳定平台; 同时, 灵敏度高、曝光积分时间短的线阵探测器对于成像质量的提升具有重要意义。

**关键词:** 线阵传感器; 稳定平台; 线阵探测器

**中图分类号:** P231.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.12.006

## Influence of Stabilized Platform on Image Quality of Airborne Line Scan Camera

CHEN Wei<sup>1</sup>, LIU Zhe-hua<sup>2</sup>, LIU Yan<sup>3</sup>

(1. ContiTech Grand Ocean Fluid (Changchun) Co., Ltd., Changchun 130011, China;

2. Jilin Province Experimental Middle School, Changchun 130021, China;

3. KOSTAL (Changchun) Automotive Electric Co., Ltd., Changchun 130033, China)

**Abstract:** In the aerial photography using linear array detectors, the variation of aircraft attitude may affect imaging and hence result in image blurring. According to the coordinate transformation formula of aviation projection, the Monte Carlo algorithm is used to analyze the influences of the factors such as exposure time, stabilized platform position residual compensation and angular velocity residual compensation on the imaging quality of linear array cameras. The results show that high performance airborne linear array cameras should be equipped with high performance stabilized platforms. Meanwhile, the linear array detectors with high sensitivity and short exposure time are of significance to the improvement of imaging quality.

**Key words:** linear array sensor; stabilized platform; linear array detector

**收稿日期:** 2017-08-30

**作者简介:** 陈伟(1982-), 男, 吉林辽源人, 硕士, 工程师, 主要从事机械设计、压电发电以及测绘等方面的研究。

E-mail: w\_chen@163.com

## 0 引言

采用测绘相机实现影像的数字化获取和全数字化处理,是获取地理信息基础数据的一项新式测绘技术。测绘相机是一种能够同时获得高分辨率立体影像和彩色多光谱影像的航空遥感用多功能数字成像设备。自 2000 年以来,测绘相机已陆续开始在国内外的测绘行业中应用,进而开启了数字测绘相机替代胶片航测相机的新时代。

与面阵测绘相机相比,线阵测绘系统具有结构简单、成本低等优点。本文利用 Monte Carlo 算法对线阵测绘系统中不同条件及参数对成像质量的影响情况进行了分析。

## 1 机载线阵测绘系统

机载线阵测绘系统主要由航空测绘相机和稳定平台构成,如图 1 所示。其中,ADS80 相机采用单一主光轴设计,惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)的理论中心与光学镜头的光轴重合;稳定平台用于维持相机工作时垂直对地,以有效保证图像质量。外业飞行时,该系统可同时获取完全重叠的全色、RGB 以及近红外波段的图像。

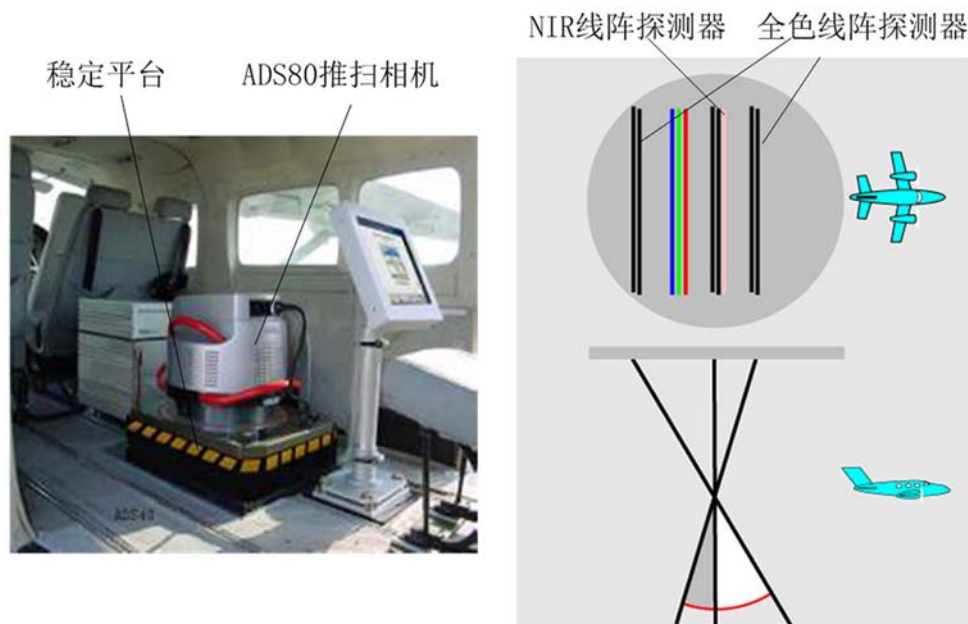


图 1 ADS80 机载线阵测绘相机

## 2 载机姿态对成像质量的影响

由于相机按照速高比值  $\eta$  进行前向像移补偿,当飞机不存在姿态角即相机光轴保持垂直对地成像时,这种补偿是准确的。但是,当飞机存在俯仰、滚动或偏流姿态角时,在理论上需要补偿的像移速度与速高比值存在误差,从而造成像移速度补偿残差。而且姿态角越大,速度补偿残差越大。这种残差在曝光时间内会产生像移,进而降低成像质量。

只有当载机垂直地面工作,且飞行速度为  $V$ 、高度为  $H$  时,线阵探测器的行频才能对前向像移进行补偿。当载机姿态角、飞行速度以及高度发生变化时,将会导致像移。为此,定义了两个坐标系,并采用坐标变化的方法对这种像移进行了分析。

图 2 为坐标系定义的示意图。 $o-xyz$  为飞机坐标系。其中, $oy$  为飞机的纵轴; $ox$  为飞机的横轴; $oz$  轴由右手坐标系确定,一般与相机光轴重合。 $O-XYZ$  为飞机的航迹坐标系。其中, $OY$  轴为载机的飞行方向; $OZ$  轴垂直于水平面向上; $OX$  轴由右手坐标系定义。图 2 中, $H$  为飞机的飞行航高, $f$  为相机的焦距。

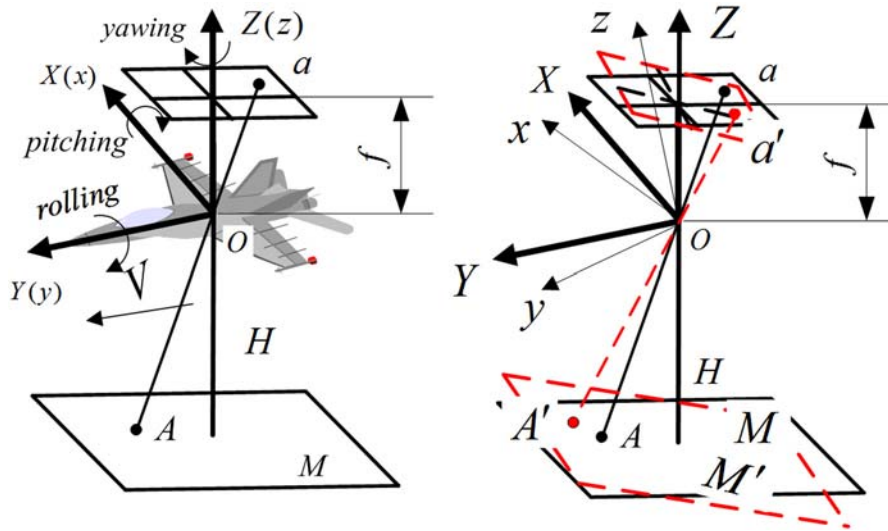


图 2 坐标系定义的示意图

在正直摄影过程中, 地面 A 在 O-XYZ 坐标系下的坐标为  $[X, Y, -H]^T$ , 经过光学系统后成像在焦点点 a 上, 其在 o-xyz 飞机坐标系下的坐标为  $[x, y, f]^T$ 。设定在成像过程中载机的飞行姿态发生了变化, 使相机光轴绕 OY 坐标轴旋转了  $\beta$  角度, 绕旋转后的 OX 轴旋转了  $\alpha$  角度, 最后绕旋转后的 OZ 轴旋转了  $\gamma$  角度, 并且均是逆时针旋转, 因此可以得到旋转矩阵  $R_1$  :

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

转动后, 理论像点 a 的坐标变为  $a'(x_1, y_1, f)$ 。通过坐标变换可以得到  $a'$  及物点 A' 的坐标  $[x_2, y_2, z_2]^T$  和  $(X_2, Y_2, Z_2)^T$  :

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = R_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ f \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \frac{-H}{z_2} R_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ f \end{bmatrix} \quad (3)$$

在长度为  $\Delta t$  的曝光时间内, 载机进行前向飞行, 导致 A' 与测绘相机光轴的距离发生变化。此时, 在航迹坐标系中, A' 的坐标为  $(X_2, Y_2 - V\Delta t, Z_2)^T$ 。与此同时, 载机的飞行姿态也是处在变化状态下。假设此时载机的飞行姿态导致相机光轴在原有姿态误差的基础上再次分别转动了  $\Delta v_\beta \cdot \Delta t$ 、 $\Delta v_\alpha \cdot \Delta t$  和  $\Delta v_\gamma \cdot \Delta t$ , 那么旋转矩阵  $R_2$  就变为

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos(\beta + \Delta v_\beta \cdot \Delta t) & 0 & -\sin(\beta + \Delta v_\beta \cdot \Delta t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta + \Delta v_\beta \cdot \Delta t) & 0 & \cos(\beta + \Delta v_\beta \cdot \Delta t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha + \Delta v_\alpha \cdot \Delta t) & -\sin(\alpha + \Delta v_\alpha \cdot \Delta t) \\ 0 & \sin(\alpha + \Delta v_\alpha \cdot \Delta t) & \cos(\alpha + \Delta v_\alpha \cdot \Delta t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\gamma + \Delta v_\gamma \cdot \Delta t) & -\sin(\gamma + \Delta v_\gamma \cdot \Delta t) & 0 \\ \sin(\gamma + \Delta v_\gamma \cdot \Delta t) & \cos(\gamma + \Delta v_\gamma \cdot \Delta t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在完成坐标变化后, 我们实现了载机前向飞行与姿态变化的运动分离, 简化了计算过程。

为了便于计算和分析, 本文将所有的点坐标转换到飞机坐标系中, 则在曝光  $\Delta t$  的时刻, A' 点在相机坐标系中的坐标为  $A''(X'_1, Y'_1, Z'_1)$ 。

根据坐标变换可得:

$$\begin{bmatrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ Z'_1 \end{bmatrix} = R_2^{-1} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 - V\Delta t \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$A''$  的共轭像点  $a''(x'_1, y'_1, z'_1)^T$  可由中心投影模型求得:

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix} = \frac{f}{Z'_1} \begin{bmatrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ Z'_1 \end{bmatrix} = \frac{f}{Z'_1} R_2^{-1} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 - V\Delta t \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

因为只补偿了前向像移, 所以由飞行姿态误差引起的像移量  $(v_{x1}, v_{y1})$  可根据式 (7) 和式 (8) 进行计算:

$$v_{x1} = x'_1 - x_1 \quad (7)$$

$$v_{y1} = y'_1 - y_1 - f \frac{V}{H} \Delta t \quad (8)$$

由此可见, 测绘相机应选用高性能稳定平台以补偿载机的飞行姿态变化。

### 3 基于 Monte Carlo 算法的仿真分析

根据曝光过程中稳定平台的位置稳定误差和速度补偿残差 (见表 1), 并根据线阵相机的使

用技术指标, 确定一组工作参数名义值  $H$ 、 $v$ 、 $f$ 、 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$  和  $t$ 。将上述数据代入误差数学模型, 然后采用 Monte Carlo 算法对像移量进行计算。

目前稳定平台主要有德国徕卡公司生产的 PAV80 和 PAV30 稳定平台, 其补偿的位置和速度误差见表 1。根据这两种平台的位置稳定误差和速度补偿残差分布生成随机数列  $\varphi_n, \omega_n, \dots, \kappa_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 2000$ )。

以运-12 飞机为载机, 线阵相机工作时的技术参数如下:

- (1) 航高为 2000 m;
- (2) 速高比为 0.025。

根据相机的视场角以及所用探测器的几何特性, 在像面上等间隔地选取了 41 个种子点。为了更清楚地说明探测器线数对像移量的影响, 本文分别分析了线阵探测器在 1 级、2 级、4 级和 24 级工作模式下的情况。

根据上述条件, 我们进行了 2000 次仿真。表 2 列出了像移量的统计数据。从仿真结果中

表 1 残差的影响因素及参数特征值

序号	名称	误差分布	单位	PAV80 误差 均方根值 ( $\sigma$ )	PAV30 误差 均方根值 ( $\sigma$ )	备注
1	位置稳定误差 $\varphi$	正态分布	o	0.02	0.2	PAV80/30 位置稳定精度
2	位置稳定误差 $\omega$	正态分布	o	0.02	0.2	PAV80/30 位置稳定精度
3	位置稳定误差 $\kappa$	正态分布	o	0.02	0.2	PAV80/30 位置稳定精度
5	角速度补偿残差 $\dot{\varphi}$	正态分布	o/s	0.03	0.3	PAV80/30 补偿速度残差
6	角速度补偿残差 $\dot{\omega}$	正态分布	o/s	0.03	0.3	PAV80/30 补偿速度残差
7	角速度补偿残差 $\dot{\kappa}$	正态分布	o/s	0.03	0.3	PAV80/30 补偿速度残差

表 2 仿真结果

线 数	PAV80		PAV30		备 注
	横向像点位置 误差 ( $3\sigma, \mu\text{m}$ )	航向像点位置 误差 ( $3\sigma, \mu\text{m}$ )	横向像点位置 误差 ( $3\sigma, \mu\text{m}$ )	航向像点位置 误差 ( $3\sigma, \mu\text{m}$ )	
1	0.36	0.38	3.3	3.4	
2	0.66	0.67	6.8	6.9	稳定平台位置和角速度
4	1.42	1.46	13.7	14.2	稳定误差按 $3\sigma$ 计算
24	8.2	8.25	78.9	80.2	

可以看出, PAV80 稳定平台在补偿后的像移量要远远小于 PAV30 稳定平台在补偿后的像移量; 探测器的线数越少, 曝光过程中的像移量越小。结果表明, PAV80 稳定平台可以满足高精度测绘的要求。

#### 4 结束语

采用 Monte Carlo 算法分析了曝光时间、稳定平台位置和速度补偿残差等参数对线阵相机成像质量的影响。结果表明, 高灵敏度探测器在缩短曝光时间的同时, 还能减小飞行姿态对线阵相机成像质量的影响。另外, 稳定平台的性能对机载线阵相机的成像质量具有显著影响。因此, 对于高性能线阵相机而言, 应选用高性能稳定平台来补偿载机的飞行姿态变化。

#### 参考文献

- [1] 翟林培, 刘明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 490-494.
- [2] 刘明, 匡海鹏, 吴宏圣, 等. 像移补偿技术综述 [J]. *电光与控制*, 2004, 11(4): 46-49.
- [3] Lareau A G. Electro-optical Imaging Array with Motion Compensation [C]. *SPIE*, 1993, 2023: 65-79.
- [4] 刘明, 李刚, 李友一, 等. 航空相机的像移计算及其补偿分析 [J]. *光电工程*, 2004, 31(12): 12-14.
- [5] 黄静, 王岱, 高晓东, 等. 大面阵数字航测相机像移补偿的实现 [J]. *光电工程*, 2006, 33(5): 27-30.
- [6] 丁福建, 李英才. CCD 相机的像移补偿 [J]. *光子学报*, 1998, 27(10): 948-951.
- [7] 吴宏圣. TDI CCD 全景航空相机像移补偿研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [8] 李友一. 空间相机偏流角控制的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [9] 颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法 [J]. *光学精密工程*, 2000, 8(3): 203-207.
- [10] 孙丽娜. TDI CCD 的驱动实现像移补偿的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2000.
- [11] 周庆才, 王志坚. 应用动态物像矢量共轭关系计算航天相机像移 [J]. *空间科学学报*, 2003, 23(1): 74-79.
- [12] 惠守文, 远国勤, 刘立国. 一种彩色大面阵航空遥感相机前向像移补偿机构设计及精度分析 [J]. *光电工程*, 2012, 39(3): 12-18.
- [13] 张景国, 丁亚林, 田海英, 等. 一种彩色面阵 CCD 测绘相机前向像移的补偿方法 [J]. *应用光学*, 2011, 32(3): 460-463.
- [14] 杜云飞, 刘波, 胡炳, 等. 一种全帧型 CCD 航空相机像移补偿方法 [J]. *光子学报*, 2007, 36(12): 2334-2336.
- [15] 远国勤. 具有前向像移补偿功能的彩色大面阵测绘相机内方位元素标定研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.

#### 新闻动态 News

### 美国 SBIRS GEO-4 导弹预警卫星即将发射

据 [www.lockheedmartin.com](http://www.lockheedmartin.com) 网站报道, 美国洛克希德·马丁公司研制的第四颗天基红外系统 (SBIRS) 地球同步轨道 (GEO) 卫星预计于 2018 年 1 月发射升空。美国军方正期待将该卫星纳入其导弹防御策略的首道防线之中。

此前, GEO-3 卫星已于 2017 年 1 月 20 日发射升空, 并在 3 月份发回了首批图像。GEO-5 和 GEO-6 卫星目前正处于研制阶段, 它们均采用洛克希德·马丁公司生产的 LM 2100 型现代化卫星平台。这种新型卫星平台不仅可以大幅降低

成本和缩短生产周期, 而且还可以增加任务弹性并提升集成未来现代化传感器组件的潜力。



图 1 SBIRS GEO-4 卫星的实物图

□ 岳桢千