

顾及左右摆扫不同影响的航空大视场高分 红外扫描仪几何外检校方法

金雁敏, 李益峰, 宋正翔, 王超, 刘世杰, 柳思聪, 童小华

同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092

摘要: 摆扫航空大视场红外扫描仪具有视场角大、分辨率高等优点, 但因在传感器安装、运输、飞行时会受到抖动的影响, 常导致传感器的中心、安置角度发生偏移, 特别是此类扫描仪不同摆扫方向会对成像质量造成不同影响。因此, 有必要对CCD影像进行几何外检校, 以提高传感器影像的几何质量。本文针对航空大视场红外扫描仪成像特点, 构建了考虑左、右摆扫不同影响的几何外检校模型。该检校模型具有如下特点: (1) 左、右摆影像同时检校, 并分别设置不同的安置参数矩阵。扫描仪的左、右摆扫会造成成像积分方向的不同, 进而导致左、右摆影像定位精度的不一致, 因此该模型利用不同的左、右摆参数矩阵, 消除摆扫角误差对成像几何精度造成的影响。(2) 增加检校参数伪观测方程。由于该航空大视场红外扫描仪存在大摆扫角, 随着摆扫角的变化, 相机与定位定姿系统安置误差检校参数间可能存在较强相关性, 因此引入检校参数伪观测方程来解决参数间的强相关性, 提升检校参数的解算精度。实验验证结果表明该检校模型能有效提升影像的几何定位精度, 检校后左右摆影像反投影偏差降低到亚像素水平。

关键词: 遥感, 航空大视场高分红外扫描仪, 左右摆扫, 几何外检校, 检校参数, 反投影残差

中图分类号: P204/P2

引用格式: 金雁敏, 李益峰, 宋正翔, 王超, 刘世杰, 柳思聪, 童小华. 2024. 顾及左右摆扫不同影响的航空大视场高分红外扫描仪几何外检校方法. 遥感学报, 28(9): 2372-2382

Jin Y M, Li Y F, Song Z X, Wang C, Liu S J, Liu S C and Tong X H. 2024. Geometric external calibration method for the airborne large-view-field infrared scanner considering different effects of left and right pendulum directions. National Remote Sensing Bulletin, 28(9): 2372-2382 [DOI:10.11834/jrs.20242312]

1 引言

某航空大视场红外扫描仪具有大幅宽、大视场摆扫的特点, 且在自然环境监测、资源勘探等方面都有广泛应用。该红外扫描仪平台搭载了TDI CCD传感器、POS系统、大容量存储单元、陀螺仪稳定平台等, 采用了长线列探测器整机摆扫成像方式(董浩和刘会通, 2015; 叶思熔等, 2017)。所搭载的POS系统记录了扫描仪飞行过程中瞬时拍摄的位置和姿态数据。但是由于扫描平台传感器在安装、运输以及在飞行时受到平台抖动等因素的影响, 可能会导致传感器的安置中心和角度发生偏移, 导致扫描仪获取影像存在外部传感器安置引起的系统误差(李德仁等, 2007;

冷波等, 2019), 本文结合该扫描仪POS系统, 提出了相机安置误差的几何外检校方法。

目前针对线阵推扫式传感器的系统误差检校国内外已开展了较深入的研究(Fraser, 1997; Cramer, 2006; 李德仁等, 2007)。Cramer (2006)通过检校场大量的地面控制点对ADS40 (Airborne Digital Sensor 40)传感器的绝对定位精度进行了精确评估。李德仁等(2007)建立了三线阵传感器区域网联合平差模型, 其中参数包括GNSS相位中心与相机投影中心的控制位置偏移矢量以及IMU坐标轴与相机坐标轴之间的旋转偏移。赵双明和李德仁(2006)建立了顾及POS系统依时间的系统漂移的光束法平差模型。王涛等(2012)通过引入GPS观测值数学模型和IMU视轴偏向角误差,

收稿日期: 2022-06-29; 预印本: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42071372); 国家高分辨率对地观测系统重大专项(编号:30-H30C01-9004-19/21)

第一作者简介: 金雁敏, 研究方向为空间数据质量控制。E-mail: jinyanmin@tongji.edu.cn

通信作者简介: 刘世杰, 研究方向为摄影测量与遥感。E-mail: liusj@tongji.edu.cn

建立标定自检校光束法平差模型。刘军等(2009)在改进的定向片内插模型中考虑了IMU/DGPS系统误差。对于大视场的三线阵高分相机,有学者通过考虑其POS系统的安装误差,利用循环两步法标定传感器系统参数,分开解算GPS偏心矢量和IMU视轴偏心角与外方位元素,提高了参数解算的稳定性(Wang等,2019;王涛等,2020)。随着遥感卫星的发展,基于测绘卫星三线阵相机的几何标定也进行了许多研究,蒋永华等(2013)针对“资源三号”测绘卫星构建了包括载荷安装、姿轨测量系统误差的偏置矩阵及多线阵内方位元素模型的几何检校模型和方案。张艳等(2015)针对“天绘一号”卫星三线阵CCD影像构建了自检校区域网平差模型,将外方位元素和自检校参数进行整体平差,以消除其中的系统误差。王峰等(2017)针对“高分二号”卫星,提出了多重叠度无控区域网平差处理技术,以提高几何定位精度。

目前针对新型大视场摆扫式线阵航空传感器的几何外检校研究相对较少。对航空大视场红外扫描仪进行了几何成像仿真与误差分析的结果发现在摆扫角度较大时,相机部分的安置误差不能与POS系统的安装误差相合并,并提出一种约束线元素的带观测权的检校方法,以减弱待检校参数之间相关性对检校结果的影响(叶思熔,2017;叶思熔等,2017)。莫德林(2018)针对线阵大倾角摆扫航空长焦斜视相机,基于仿真成像模型,定量分析了位置、姿态测量误差、光学系统误差等对几何定位精度的影响,建立了对应的几何检校物理模型。王青(2017)针对遥感14号卫星高空间分辨率热红外相机,通过标定成像开始时刻和行积分时间,以及摆扫角度分段的方法消除由线阵摆扫时间和角度对成像模型的影响。李潇雁等(2022)利用通过光线追迹及重投影算法实现的仿真影像,提出了基于广义修正矩阵的几何检校方法,将卫星姿轨、GPS等载荷的系统误差导致的成像光线与实际光线的偏差构建为修正矩阵,通过修正定位模型提高了仿真影像定位精度。由于本文研究的该航空大视场红外扫描仪采用左右摆扫的方式成像,摆扫角度最大能达到 100° 。在大摆扫角度下,相机和POS载荷系统的安置误差的相关性增大,而且由于左摆和右摆成像积分方向的不同,造成系统误差的影响机制不同。因此本文将深入研究针对左右大角度摆扫式传感器的几

何外检校模型。

本文针对某航空大视场红外扫描仪左右大角度摆扫成像特点,建立一种顾及左右摆扫不同影响效应的几何外检校方法,并减弱多检校参数间的相关性,并利用实际采集的该扫描仪影像数据与地面控制点数据,验证附加左右摆扫不同参数的必要性并分析了检校参数的有效性,以期提升影像的几何精度。

2 研究方法

2.1 航空大视场红外扫描仪成像模型及传感器安置误差

该红外扫描仪平台是一个圆柱形平台并集成了扫描仪和稳定器,如图1所示。扫描平台由滚动环和俯仰环组成,可围绕纵向稳定轴和横向稳定轴两轴进行旋转。俯仰角是基于纵向稳定轴量测得,摆扫角是基于横向稳定轴量测得。摄像机安装在圆柱形平台的底部。扫描过程中,内圆柱体滚动,将相机侧摆,完成扫描和成像。飞机由于一直在向前飞行,得到的影像条带方向不垂直于飞行的方向,这会导致无法进行时间延迟积分TDI,因而通过传感器的俯仰来补偿相移。从图1可见,相机投影中心(即相机的主焦点)与扫描仪平台中心存在着偏心位移,扫描仪平台中心与GPS相位中心存在一定量的偏心位移。相机坐标系的坐标轴($Z_{sen}, Y_{sen}, X_{sen}$)与扫描平台稳定轴($Z_{plat}, Y_{plat}, X_{plat}$),IMU的测量轴($Z_{IMU}, Y_{IMU}, X_{IMU}$)也都存在偏差。这些误差参数往往不能通过测量得到,需要进行扫描仪的检校进行获取。

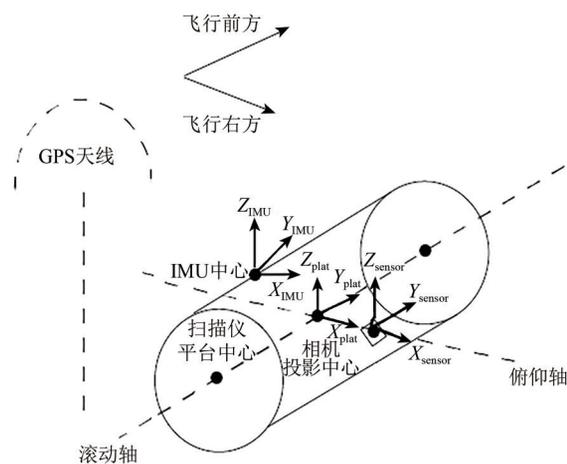


图1 扫描仪平台各载荷位置关系图

Fig. 1 Position relationships among platform loads

集成 POS 系统的航空大视场红外扫描仪的成像模型可表达为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} + \lambda \mathbf{R}_m \mathbf{R}_g \mathbf{R}_{IMU} \mathbf{R}_{scan} \begin{pmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, (X_s, Y_s, Z_s) 为经过差分误差改正在切平面坐标系下 GPS 所记录的相位中心。由于每条摆扫线的成像时刻不一样, 摆扫相机由线元素与角元素组成的外方位元素是在时刻变化的, 因此通过对长时间序列 POS 数据线性插值得到对应于扫描线不同扫描时刻的外方位姿态; \mathbf{R}_{scan} 为像空间辅助坐标系与 IMU 载机坐标系的转换矩阵, \mathbf{R}_{scan} 为由滚动角和俯仰角构成的旋转矩阵; \mathbf{R}_{IMU} 为 IMU 载机坐标系和导航坐标系之间的转换矩阵; \mathbf{R}_g 为导航坐标系与地心坐标系之间的转换矩阵; \mathbf{R}_m 为将地心坐标系转到切平面坐标系的旋转矩阵; x_i, y_i 为像点在影像坐标系下的坐标; x_0, y_0 为投影中心在影像坐标系下的坐标; f 为焦距; λ 为比例系数; (X, Y, Z) 为像点对应的地面点的坐标。由于该航空大视场红外扫描仪在大摆扫角的情况下, POS 系统与相机的安置误差的相关性会下降 (叶思熔等, 2017), 因此本文分别针对 POS 系统和相机的安置误差设置不同的检校参数。

POS 系统的安置误差包括在 IMU 载机坐标系中 GPS 天线相位中心与扫描平台旋转中心的偏心矢量 $(u_{GPS}, v_{GPS}, w_{GPS})$ 和 IMU 与平台基座坐标系的旋转偏角构成的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{platform}^{IMU}$, 其表达式为

$$\mathbf{R}_{platform}^{IMU} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_{pos}) & -\sin(\omega_{pos}) \\ 0 & \sin(\omega_{pos}) & \cos(\omega_{pos}) \\ \cos(\varphi_{pos}) & 0 & \sin(\varphi_{pos}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_{pos}) & 0 & \cos(\varphi_{pos}) \\ \cos(\kappa_{pos}) & \sin(\kappa_{pos}) & 0 \\ \sin(\kappa_{pos}) & \cos(\kappa_{pos}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $(\omega_{pos}, \varphi_{pos}, \kappa_{pos})$ 为待求的基座坐标系与 IMU 坐标系之间的旋转偏角。

相机的安置误差包括扫描坐标系中相机坐标系原点 (即投影中心) 的偏心矢量 $(u_{sensor}, v_{sensor}, w_{sensor})$ 和相机坐标系与平台基座坐标系之间的旋转偏角构成的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{sensor}^{platform}$, 其表达式为

$$\mathbf{R}_{sensor}^{platform} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_{sen}) & -\sin(\omega_{sen}) \\ 1 & \sin(\omega_{sen}) & \cos(\omega_{sen}) \\ \cos(\varphi_{sen}) & 0 & \sin(\varphi_{sen}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_{sen}) & 0 & \cos(\varphi_{sen}) \\ \cos(\kappa_{sen}) & \sin(\kappa_{sen}) & 0 \\ \sin(\kappa_{sen}) & \cos(\kappa_{sen}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $(\omega_{sen}, \varphi_{sen}, \kappa_{sen})$ 为相机坐标系与平台基座坐标系的旋转偏角。

2.2 基于成像方程的几何外检校模型

将上述误差作为检校参数加入到成像模型中, 得到考虑 POS 和相机系统安置误差的成像模型 (叶思熔, 2017) 如下:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_m \mathbf{R}_g \mathbf{R}_{IMU} \begin{pmatrix} u_{GPS} \\ v_{GPS} \\ w_{GPS} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{platform}^{IMU} \mathbf{R}_{scan} \begin{pmatrix} u_{sensor} \\ v_{sensor} \\ w_{sensor} \end{pmatrix} + \lambda \mathbf{R}_{sensor}^{platform} \begin{pmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (4)$$

将式 (4) 进一步展开, 可以得到:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_m \mathbf{R}_g \mathbf{R}_{IMU} \begin{pmatrix} u_{GPS} \\ v_{GPS} \\ w_{GPS} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_m \mathbf{R}_g \mathbf{R}_{IMU} \mathbf{R}_{platform}^{IMU} \mathbf{R}_{scan} \begin{pmatrix} u_{sensor} \\ v_{sensor} \\ w_{sensor} \end{pmatrix} + \lambda \mathbf{R}_m \mathbf{R}_g \mathbf{R}_{IMU} \mathbf{R}_{platform}^{IMU} \mathbf{R}_{scan} \mathbf{R}_{sensor}^{platform} \begin{pmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (5)$$

令:

$$\begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_m \mathbf{R}_g \mathbf{R}_{IMU} \begin{pmatrix} u_{GPS} \\ v_{GPS} \\ w_{GPS} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_m \mathbf{R}_g \mathbf{R}_{IMU} \mathbf{R}_{platform}^{IMU} \mathbf{R}_{scan} \begin{pmatrix} u_{sensor} \\ v_{sensor} \\ w_{sensor} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_Z = \mathbf{R}_m \mathbf{R}_g \mathbf{R}_{IMU} \mathbf{R}_{platform}^{IMU} \mathbf{R}_{scan} \mathbf{R}_{sensor}^{platform} \quad (7)$$

将式 (6) 和 (7) 式代入式 (5), 可得:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix} + \lambda \mathbf{R}_Z \begin{pmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (8)$$

通过对式 (8) 做矩阵变换, 可写成共线方程式为

$$\begin{cases} x_i - x_0 = -f \frac{a_{11}(X - X_1) + a_{12}(Y - Y_1) + a_{13}(Z - Z_1)}{a_{31}(X - X_1) + a_{32}(Y - Y_1) + a_{33}(Z - Z_1)} \\ y_i - y_0 = -f \frac{a_{21}(X - X_1) + a_{22}(Y - Y_1) + a_{23}(Z - Z_1)}{a_{31}(X - X_1) + a_{32}(Y - Y_1) + a_{33}(Z - Z_1)} \end{cases} \quad (9)$$

式中, a_{11} 至 a_{33} 是式 (8) 中旋转矩阵 R_z 的 9 个元素, 该式说明了控制点像点坐标与待检校参数之间的函数关系, 是扫描仪检校的基础方程, 将其进一步写为函数形式为

$$\begin{cases} x_i = F_x(\boldsymbol{\theta}) \\ y_i = F_y(\boldsymbol{\theta}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\boldsymbol{\theta}$ 即为待检校参数向量, 利用式 (10) 对所有检校参数求一阶导数进行线性化, 可得到:

$$\begin{cases} V_{x_i} + x_i^0 = F_x(\boldsymbol{\theta}^0) + \frac{\partial F_x(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} V_0 \\ V_{y_i} + y_i^0 = F_y(\boldsymbol{\theta}^0) + \frac{\partial F_y(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} V_0 \end{cases} \quad (11)$$

由式 (11) 可得到线性化后的误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{\text{sensor}} + \mathbf{B}\mathbf{X}_{\text{pos}} - \mathbf{l}, \quad \mathbf{P}_0 \quad (12)$$

式中, $\mathbf{X}_{\text{sensor}}$ 为 6×1 维的关于相机安置参数 $u_{\text{sensor}}, v_{\text{sensor}}, w_{\text{sensor}}, \omega_{\text{sen}}, \varphi_{\text{sen}}, \kappa_{\text{sen}}$ 的改正数向量; \mathbf{X}_{pos} 为 6×1 维的关于 POS 系统 6 个安置参数 $u_{\text{GPS}}, v_{\text{GPS}}, w_{\text{GPS}}, \omega_{\text{pos}}, \varphi_{\text{pos}}, \kappa_{\text{pos}}$ 的改正数向量; \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为 $n \times 6$ 维的系数矩阵; \mathbf{l} 为方程线性化后的常数项; \mathbf{P}_0 为 \mathbf{l} 的权重矩阵, 为单位阵; \mathbf{V} 为 $n \times 1$ 维的控制点像点坐标改正数; n 为误差方程的个数。

上述模型中待检校的参数包括 12 个参数, 当参数之间具有很强的相关性时, 会导致检校结果不合理, 有必要引入伪观测方程 (Mikhail, 1976), 在本文中将待检校的参数都作为伪观测值, 得到如下的伪观测方程:

$$\mathbf{V}_G = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{X}_{\text{sensor}} + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{X}_{\text{pos}} - \mathbf{l}_G, \quad \mathbf{P}_G \quad (13)$$

式中, \mathbf{V}_G 为 12×1 的参数伪观测值的改正数向量, $\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_6 \\ \mathbf{0}_6 \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_6 \\ \mathbf{I}_6 \end{bmatrix}$, \mathbf{I}_6 是 6×6 的单位阵, $\mathbf{0}_6$ 为 6×6 的零矩阵; \mathbf{l}_G 为对应的常数项; \mathbf{P}_G 为伪观测值权重矩阵。

在本文中, 将待检校的参数都列入到伪观测方程中, 以防止参数改正数出现不合理的异常偏大值。伪观测值的权重根据没有加入伪观测方程的检校结果进行调整, 如果出现较大的不合理检校参数改正数, 则使用较大的权重。

2.3 顾及左右摆扫不同影响的几何外检校模型

该航空扫描仪的摆扫方向是垂直于飞行方向, 在获取影像的同时会进行左右方向的摆扫, 并且采用 TDI CCD 扫描成像方式。但是由于左右方向摆扫时积分方向不同 (图 2), 如果使用左摆影像得到的几何外检校参数应用到右摆影像上, 会导致一定的定位偏差。因此有必要针对左右摆影像设置不同的检校参数。

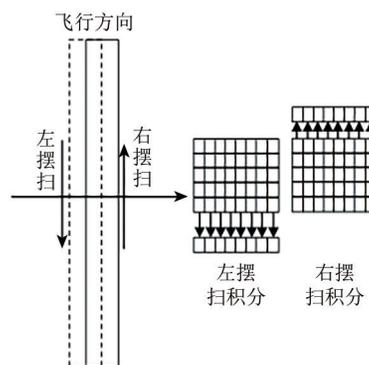


图2 左右摆扫不同积分方向示意图

Fig. 2 Different integration directions of left and right pendulum images

这里针对左右摆扫设置不同的 IMU 的安置角度偏差, 即左摆影像设置 IMU 安置角度偏差参数为 $\omega_{\text{posl}}, \varphi_{\text{posl}}, \kappa_{\text{posl}}$, 右边影像设置 IMU 安置角度偏差参数为 $\omega_{\text{posr}}, \varphi_{\text{posr}}, \kappa_{\text{posr}}$ 。每个摆扫方向的检校参数还是 12 个, 只有 IMU 的安置角度偏差部分不同。值得强调的是, 虽然左右摆扫方向设置了不同的 IMU 安置角度偏差参数, 以补偿不同积分方向造成的影响, 但是不论是向左摆扫还是向右摆扫, IMU 的安置角度不会出现太大的偏差, 这意味着分别利用左右摆扫影像得到的 IMU 的安置角度偏差应该比较接近, 这也是作为检查结果合理性的一个条件。

下面进一步构造针对左右摆扫设置不同的 IMU 的安置角度偏差的几何外检校模型。

左摆影像和右摆影像的误差方程可分别表示为

$$\mathbf{V}_l = \mathbf{A}_{l1}\mathbf{X}_{\text{GPS}} + \mathbf{B}_l\mathbf{X}_{\text{sensor}} + \mathbf{A}_{l2}\mathbf{X}_{\text{posl}} - \mathbf{l}_l, \quad \mathbf{P}_l \quad (14)$$

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{A}_{r1}\mathbf{X}_{\text{GPS}} + \mathbf{B}_r\mathbf{X}_{\text{sensor}} + \mathbf{A}_{r2}\mathbf{X}_{\text{posr}} - \mathbf{l}_r, \quad \mathbf{P}_r \quad (15)$$

式中, $\mathbf{V}_l, \mathbf{V}_r$ 分别为 $n_1 \times 1$ 和 $n_2 \times 1$ 维的左摆和右摆影像的控制点像方坐标的改正数向量; n_1 和 n_2 分别是左右摆影像中控制点的数量的两倍; \mathbf{X}_{GPS} 为 3×1 的 GPS 偏心矢量参数 $u_{\text{GPS}}, v_{\text{GPS}}, w_{\text{GPS}}$ 的改正数

向量; X_{sensor} 为相机安置偏心矢量和角度安置偏差参数 $u_{\text{sensor}}, v_{\text{sensor}}, w_{\text{sensor}}, \omega_{\text{sen}}, \varphi_{\text{sen}}, \kappa_{\text{sen}}$ 的改正数; X_{posl} 为 3×1 的左摆影像 IMU 安置角度偏差 $\omega_{\text{posl}}, \varphi_{\text{posl}}, \kappa_{\text{posl}}$ 的改正数向量; X_{posr} 为右摆影像 IMU 安置角度偏差 $\omega_{\text{posr}}, \varphi_{\text{posr}}, \kappa_{\text{posr}}$ 的改正数; A_{l1}, A_{l2}, B_l 分别为 $n_1 \times 3, n_1 \times 3, n_1 \times 6$ 的系数矩阵; A_{r1}, A_{r2}, B_r 分别为 $n_2 \times 3, n_2 \times 3, n_2 \times 6$ 的系数矩阵; l_l, l_r 为对应的方程线性化后的常数项; P_l 和 P_r 分别为 $n_1 \times n_1$ 和 $n_2 \times n_2$ 的控制点像点坐标的正定权重矩阵。

同时, 由于参数之间具有相关性时, 会导致检校结果出现异常偏大等不合理情况, 有必要引入伪观测方程如下:

$$V_G = \overline{A}_1 X_{\text{GPS}} + \overline{B} X_{\text{sensor}} + \overline{A}_2 X_{\text{posl}} + \overline{A}_3 X_{\text{posr}} - l_G, \quad P_G \quad (16)$$

式中, V_G 为 15×1 的参数伪观测值的改正数向量, $\overline{A}_1 = [I_3 \quad 0_{3 \times 6} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}]^T$, $\overline{A}_2 = [0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 6} \quad I_3 \quad 0_{3 \times 3}]^T$, $\overline{A}_3 = [0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 6} \quad 0_{3 \times 3} \quad I_3]^T$ 和 $\overline{B} = [0_{6 \times 3} \quad I_6 \quad 0_{6 \times 3} \quad 0_{6 \times 3}]^T$, I_i 为 $i \times i$ 的单位阵, $0_{i \times j}$ 为 $i \times j$ 的零矩阵; l_G 为伪观测方程常数向量; P_G 为参数伪观测值的权重矩阵。

3 实验验证与分析

3.1 左右摆扫影像检校参数差异分析

为了验证左右摆扫对于定位精度的影响, 本文设计了如下的实验: 首先利用左摆影像计算得到几何外检校参数; 再将得到的检校参数分别应用到左、右摆影像的定位中, 并使用控制点反投影残差的平均值和标准差来评价几何定位精度。

基于 2.2 节中的检校模型利用一景左摆影像 (记为影像 A) 计算得到的检校参数如表 1 所示。检校后该景左摆影像 (A) 上的控制点的反投影残差的均值和方差如表 2 所示。由表 1 与表 2 可知, 待检校参数由于加入了伪观测方程并没有出现不合理的情况, 并且经过检校后, 控制点的反投影残差在 x -坐标 (飞行方向) 和 y -坐标方向 (摆扫方向) 都大幅减小了。

然后分别用另外两景右摆 (记为影像 B) 和左摆影像 (记为影像 C), 基于以上获得的检校参数 (表 1) 进行控制点的反投影, 并计算反投影残差, 结果如表 3 和图 3 所示。可知: 基于表 1 中的检校参数, 利用右摆影像 (B) 进行反投影时, 在 y -坐

标方向上有明显的偏差; 而左摆影像 (C) 的残差就不存在这样的情况, 由此实验可见, 有必要针对左右摆影像设置不同的检校参数。

表 1 基于左摆扫影像 A 估计得到的检验参数

Table 1 Estimated calibration parameters based on the left pendulum image A

待检验参数	参数估计值
u_{GPS}/m	0.11769176
v_{GPS}/m	-0.20226726
w_{GPS}/m	0.94924788
$\omega_{\text{pos}}/(\text{°})$	2.74530517
$\varphi_{\text{pos}}/(\text{°})$	0.00568162
$\kappa_{\text{pos}}/(\text{°})$	-0.11126237
$u_{\text{sensor}}/\text{m}$	0.12143093
$v_{\text{sensor}}/\text{m}$	0.220243216
$w_{\text{sensor}}/\text{m}$	-1.68039402
$\omega_{\text{sen}}/(\text{°})$	0.00870534
$\varphi_{\text{sen}}/(\text{°})$	-0.46989301
$\kappa_{\text{sen}}/(\text{°})$	-0.11122231

表 2 检校前后左摆影像 A 控制点反投影残差均值与标准差

Table 2 Averages and standard deviations of back-projection residuals of the control points in image A before and after the calibration

指标	几何外检校前		几何外检校后	
	x 方向残差	y 方向残差	x 方向残差	y 方向残差
平均值	-83.55439	516.95416	-0.07687	0.05065
标准差	10.26817	2.39046	3.079024	2.14255

表 3 检校前后影像 B 和 C 控制点反投影残差均值与标准差

Table 3 Averages and standard deviations of back-projection residuals of the control points in images B and C before and after the calibration

指标	右摆影像 B		左摆影像 C	
	x 方向残差	y 方向残差	x 方向残差	y 方向残差
平均值	-2.78105	-8.95798	-0.38246	0.45621
标准差	3.75642	1.18556	2.11527	2.23550

因此本文通过对左右摆影像设置不同的检校参数, 以减少左右摆扫影像使用相同传感器安置参数造成的反投影精度差异。

3.2 检校验证及分析

针对该扫描仪几何外检校, 共采集了 6 景影像 (3 对左右摆扫影像), 本节运用所有 6 景影像的检校实验来验证检校方案的有效性。所使用的影像

是2018年10月采集于江苏省海安市。控制点数据使用RTK方式采集，其平面和高程精度达到10 cm

以下，满足检校需求。控制点分布范围较均匀地分布在影像覆盖区域内。

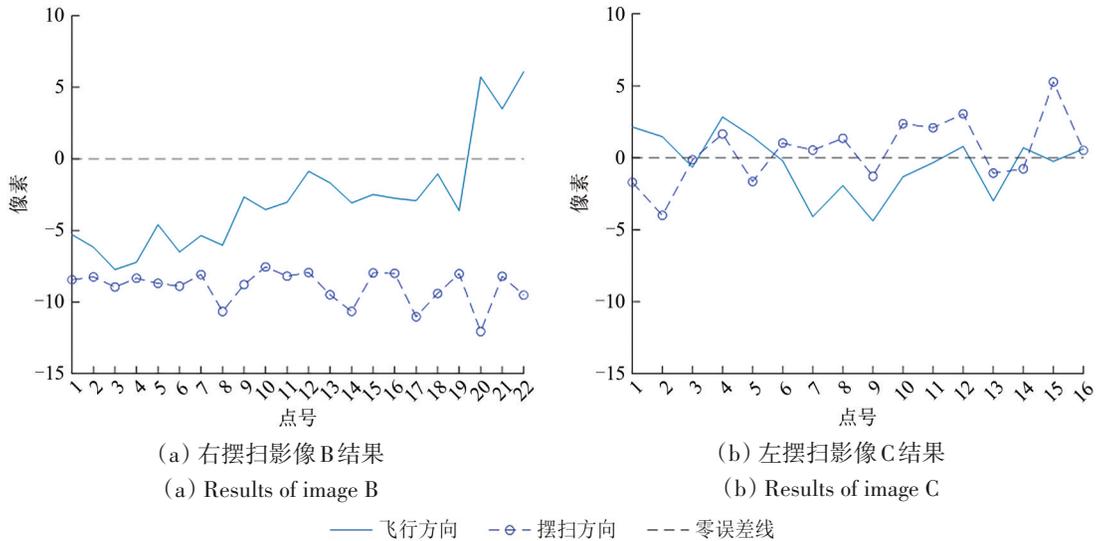


图3 检校后右摆扫影像B与左摆扫影像C控制点反投影残差折线图
Fig. 3 Line chart of back-projection residuals of the control points in images B and C

本实验将两景左右摆影像一起进行检校，将第一对两景影像分别记为L1和R1。通过2.3节的检校模型计算，可以得到针对左右摆扫影像相同的相机安置误差参数 $u_{\text{sensor}}, v_{\text{sensor}}, w_{\text{sensor}}, \omega_{\text{sen}}, \varphi_{\text{sen}}, \kappa_{\text{sen}}$ 以及POS系统安置偏心误差参数 $u_{\text{GPS}}, v_{\text{GPS}}, w_{\text{GPS}}$ ，但是IMU安置角度偏差分为针对右摆影像的参数 $\omega_{\text{posr}}, \varphi_{\text{posr}}, \kappa_{\text{posr}}$ 和针对左摆影像的参数 $\omega_{\text{posl}}, \varphi_{\text{posl}}, \kappa_{\text{posl}}$ 。在这组实验中左右摆扫影像各有65个控制点参与检校参数的计算，同时各有10个未参与检校参数估计的控制点作为检查点。计算得到的几何外检校的参数估值如表4所示。由表4的检校参数估值可以看出，其中IMU安置角度偏差参数 $\omega_{\text{posr}}, \varphi_{\text{posr}}, \kappa_{\text{posr}}$ 和 $\omega_{\text{posl}}, \varphi_{\text{posl}}, \kappa_{\text{posl}}$ 相差不大，在 0.5° 以内，与实际情况相符合。并且其他参数也都在比较合理的范围内。右摆扫影像R1的控制点和检查点的反投影残差的均值和标准差统计结果如表5所示。同时，左摆影像L1的检查点和控制点的反投影残差的均值和方差如表6所示。

由表5—6可见，通过对左右摆影像设置不同的IMU安置角度偏差参数，左右摆影像L1和R1在x-坐标方向和y-坐标方向上控制点反投影残差均有大幅减少。

为了对得到的检校参数估值进行进一步的验证，即验证其对于其他景影像是否同样适用，进

一步利用后续获取的另外4景左摆和右摆影像（依次记为L2和R2，L3和R3）基于所得到的检校参数进行控制点的反投影验证。影像L2，R2，L3，R3上分别分布有16，22，21，22个控制点。

表4 左右摆扫影像L1、R1几何外检校参数估值
Table 4 Estimated calibration parameters based on images L1 and R1

检校参数	参数估值
u_{GPS}/m	-0.0781331
v_{GPS}/m	0.2358455
w_{GPS}/m	0.9108226
$\omega_{\text{posr}}/(\text{^\circ})$	2.6763542
$\varphi_{\text{posr}}/(\text{^\circ})$	-0.0052515
$\kappa_{\text{posr}}/(\text{^\circ})$	-0.0681410
$\omega_{\text{posl}}/(\text{^\circ})$	2.7263512
$\varphi_{\text{posl}}/(\text{^\circ})$	0.0023865
$\kappa_{\text{posl}}/(\text{^\circ})$	-0.1098404
$u_{\text{sensor}}/\text{m}$	-0.0664281
$v_{\text{sensor}}/\text{m}$	-0.1090689
$w_{\text{sensor}}/\text{m}$	-2.0103571
$\omega_{\text{sen}}/(\text{^\circ})$	0.0277391
$\varphi_{\text{sen}}/(\text{^\circ})$	-0.4715333
$\kappa_{\text{sen}}/(\text{^\circ})$	-0.0442568

表5 检校前后R1影像控制点与检查点反投影残差均值与标准差

Table 5 Averages and standard deviations of back-projection residuals of control and check points in image R1

/像素

指标	几何检校前		几何检校后			
			控制点		检查点	
	x方向残差	y方向残差	x方向残差	y方向残差	x方向残差	y方向残差
平均值	-84.12383	507.50707	-0.0321	0.00650	-0.56318	0.21002
标准差	6.71241	2.38129	1.65396	2.27606	1.94998	1.65745

表6 检校前后L1影像控制点与检查点反投影残差均值与标准差

Table 6 Averages and standard deviations of back-projection residuals of control and check points in image L1

/像素

指标	几何检校前		几何检校后			
			控制点		检查点	
	x方向残差	y方向残差	x方向残差	y方向残差	x方向残差	y方向残差
平均值	-83.55438	-516.95415	0.03602	0.03808	-0.90932	-0.06469
标准差	10.26816	2.39046	3.24190	2.36275	2.86406	1.94121

首先针对左摆影像L2和L3,分别附加表4中左摆影像和右摆影像的两组检校参数(IMU安置角偏差参数不同,其他左右摆影像参数相同),并分别计算控制点的反投影残差。检校前L2和L3影像的控制点反投影残差,以及分别基于左摆和右摆检校参数的检校后反投影残差的均值和标准差如表7所示,对应的反投影残差折线图如图4和图5所示。由表7、图4与图5可见:(1)在附加几何外检校参数之前,左摆影像控制点的反投影残差在x-坐标方向和y-坐标方向上都存在一定的系统性的偏差。在控制点反投影过程附加右摆影像检校参数(CR)后,反投影残差在y-坐标方向上的均值绝对值下降为约10像素,标准差降为最大4.67像素,仍然存在一定的系统偏差;(2)而在控制点反投影过程附加左摆影像检校参数(CL)后,x-坐标和y-坐标方向上反投影残差均值绝对值均降为小于2个像素(L2<0.4像素),标准差降为最大2.3像素。

其次针对右摆影像R2和R3,分别附加表4中左摆影像和右摆影像的两组检校参数(IMU安置角偏差参数不同,其他左右摆影像参数相同),并分别计算控制点的反投影残差。检校前R2和R3影像的控制点反投影残差,以及分别基于左摆和右摆检校参数的检校后反投影残差的均值和标准差如表7所示,对应的反投影残差折线图如图6和

图7所示。

从表7、图6和图7可见,(1)在附加几何外检校参数之前,右摆影像控制点的反投影残差在x-坐标方向和y-坐标方向上同样存在一定的系统性偏差。在控制点反投影过程附加左摆影像检校参数(CL)后,反投影残差在y-坐标方向上的均值绝对值下降为约10像素,标准差降为最大3.7像素,仍然存在一定的系统偏差。(2)而在控制点反投影过程附加右摆影像检校参数(CR)后,x-坐标和y-坐标方向上反投影残差均值绝对值均降为小于2像素(R2<0.8像素),标准差降为最大5.9像素。

从表7、图4—图7可见,表4中左摆影像和右摆影像的检校参数同样适用于其他景的左右摆影像,这也进一步证明了该扫描仪内部结构的稳定性。此外,对于左右摆影像分别使用针对左右摆影像的不同检校参数,控制点反投影残差的均值和标准差会进一步降低。此外,从实验结果中也可以发现,与L1,R1成像时间相差较大的影像L3,R3的检校结果要稍差于成像时间相差较小的影像L2,R2,说明该红外扫描仪在运行过程中上述的检校参数可能存在一定的漂移,这种程度的漂移对本文中所使用的短航线的影像检校精度影响较低,但是对于较长航线的影像检校需要进一步考虑检校参数的时间漂移问题。

表7 几何外检校前后4景影像控制点反投影残差均值与标准差

Table 7 Averages and standard deviations of back-projection residuals of control in four images before and after the external geometry calibration

/像素

指标	L2 几何外检校前		L2 几何外检校后			
	x 方向残差	y 方向残差	基于右摆检校参数(CR)		基于左摆检校参数(CL)	
			x 方向残差	y 方向残差	x 方向残差	y 方向残差
平均值	-88.38606	-515.7266	-0.92216	-9.53635	-0.36094	0.04731
标准差	9.43007	2.23205	4.03313	2.4928	2.11697	2.29086

指标	R2 几何外检校前		R2 几何外检校后			
	x 方向残差	y 方向残差	基于左摆检校参数(CL)		基于右摆检校参数(CR)	
			x 方向残差	y 方向残差	x 方向残差	y 方向残差
平均值	-81.06287	506.71058	-2.64161	-9.03783	0.10917	0.70589
标准差	7.65742	2.07320	3.63255	1.16520	2.12611	1.18623

指标	L3 几何外检校前		L3 几何外检校后			
	x 方向残差	y 方向残差	基于右摆检校参数(CR)		基于左摆检校参数(CL)	
			x 方向残差	y 方向残差	x 方向残差	y 方向残差
平均值	-85.9099	-516.0925	-0.9589	-10.1106	-1.5988	-0.7042
标准差	10.7998	1.8376	4.6701	1.3952	2.2586	1.5273

指标	R3 几何外检校前		R3 几何外检校后			
	x 方向残差	y 方向残差	基于左摆检校参数(CL)		基于右摆检校参数(CR)	
			x 方向残差	y 方向残差	x 方向残差	y 方向残差
平均值	-86.7984	506.7980	-2.6196	-9.6060	-1.9693	-0.1518
标准差	11.7372	2.0932	3.0055	2.2485	5.9378	2.2250

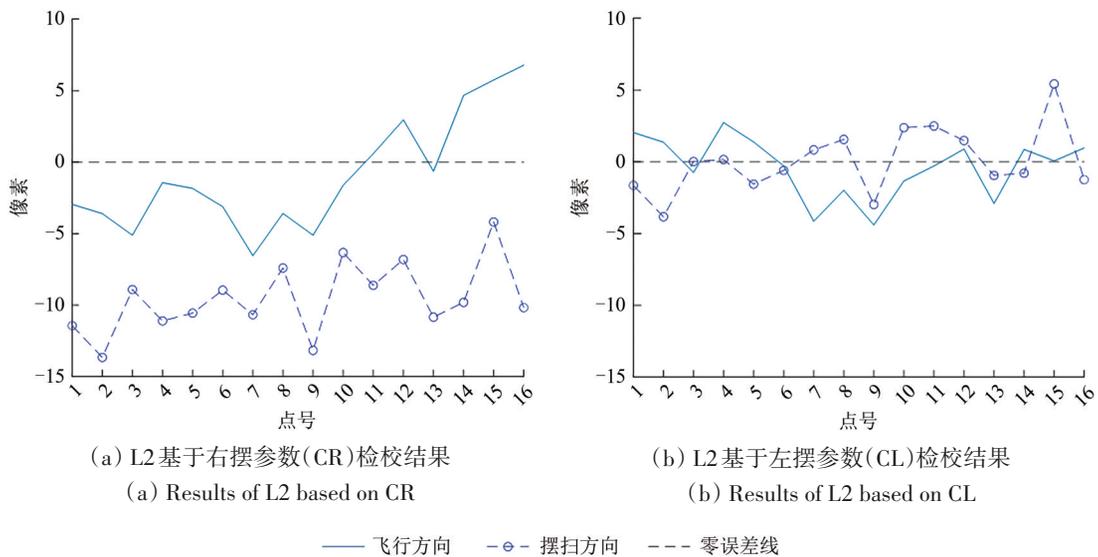


图4 检校后影像L2的控制点反投影残差折线图

Fig. 4 Line chart of back-projection residuals of the control points in image L2

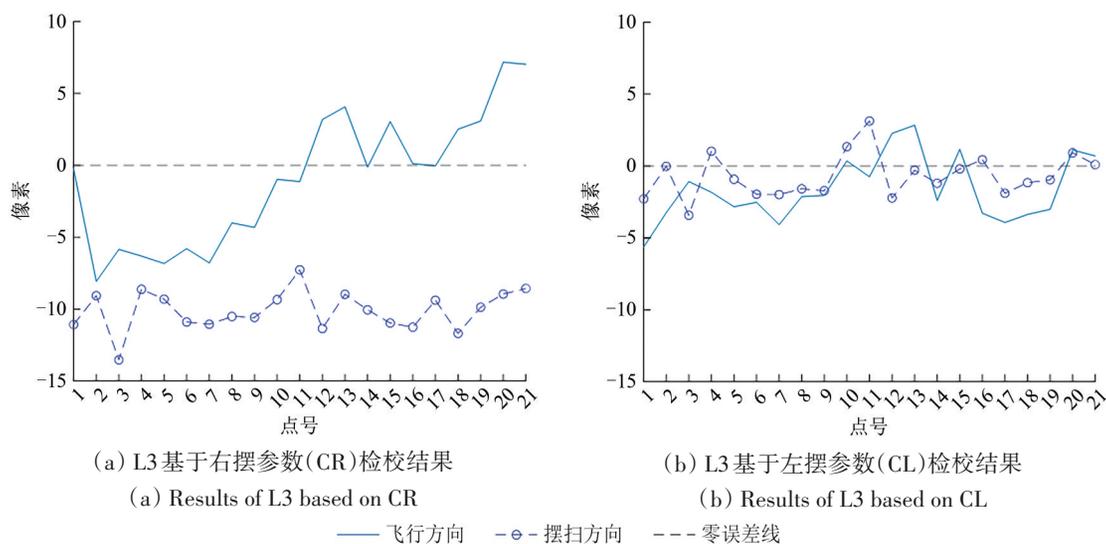


图5 检校后影像L3的控制点反投影残差折线图

Fig. 5 Line chart of back-projection residuals of the control points in image L3

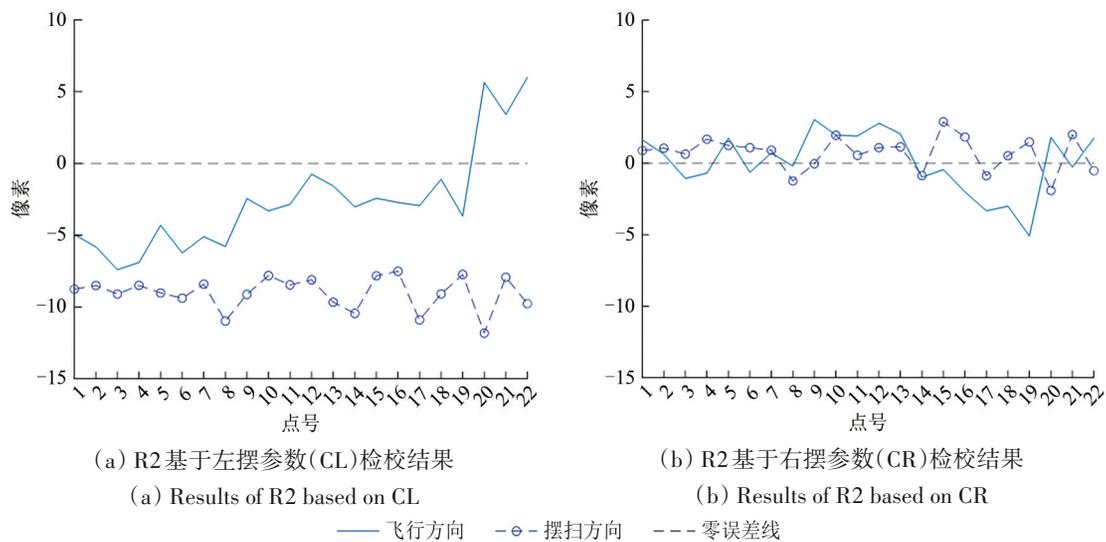


图6 检校后影像R2的控制点反投影残差折线图

Fig. 6 Line chart of back-projection residuals of the control points in image R2

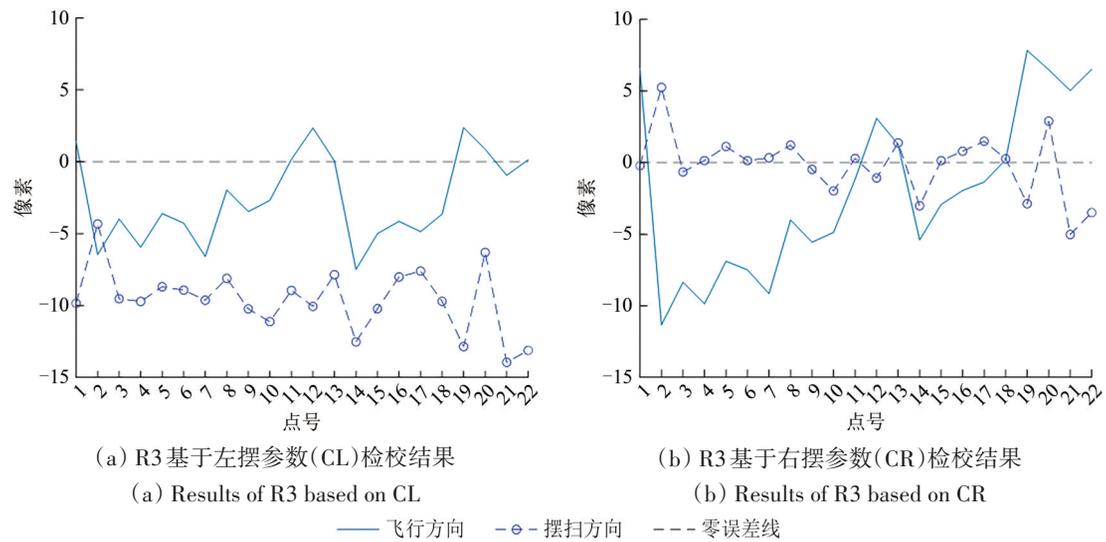


图7 检校后影像R3的控制点反投影残差折线图

Fig. 7 Line chart of back-projection residuals of the control points in image R3

4 结 论

本文针对某航空大视场红外扫描仪，构建了考虑左、右摆扫不同影响效应的几何外检校模型，其中的检校参数包括相机和POS系统的安置偏心误差以及安置角度偏差。由于左右摆扫影像成像过程的积分方向不同，针对左、右摆扫影像分别设置了不同的IMU安置角度偏差参数。此外由于检校参数间存在相关性，引入了参数伪观测方程，以防止检校参数出现较大偏差的不合理值。

利用该传感器采集的实际影像数据以及控制点数据对所提出的模型进行了综合验证和分析。主要结论如下：(1) 使用左摆影像计算得到的检校参数并不适用于右摆影像，反之亦然。本实验中，通过左摆影像参数应用于右摆影像后，控制点反投影残差均值绝对值在 y -坐标方向上仍有约10像素，仍然存在系统偏差。(2) 针对左、右摆扫影像分别设置了不同的IMU安置角度偏差参数，并分别应用于左右摆影像的定位，可以进一步降低控制点反投影残差，提高影像定位精度。(3) 同时对检校的参数进行进一步分析，发现利用两对左右摆影像(L2, R2和L3, R3)计算得到的检校的参数可以应用于其他景的左右摆影像，进一步证明了检校参数的有效性。

在本文中使用了经验结合实验结果分析的方法确定权重，权重的合理赋值需要进一步地深入研究。另外，对于成像时刻与距离较远的影像在检校时需进一步考虑检校参数的漂移问题，参数漂移对短距离的检校影响较小，但对长距离的检校结果可能会造成比较大的影响。

参考文献(References)

- Cramer M. 2006. The ADS40 Vaihingen/Enz geometric performance test. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(6): 363-374 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2006.05.004]
- Dong H and Liu H T. 2015. Simulation analysis of large FOV infrared scanning imaging quality on aircraft yawing rotation. *Infrared and Laser Engineering*, 44(3): 810-815 (董浩, 刘会通. 2015. 载机偏航运动对大视场红外扫描装置成像质量影响的仿真分析. *红外与激光工程*, 44(3): 810-815) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2015.03.004]
- Fraser C S. 1997. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(4): 149-159 [DOI: 10.1016/S0924-2716(97)00005-1]
- Jiang Y H, Zhang G, Tang X M, Zhu X Y, Qin Q Q, Li D R and Fu X K. 2013. High accuracy geometric calibration of ZY-3 three-line image. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 42(4): 523-529, 553 (蒋永华, 张过, 唐新明, 祝小勇, 秦前清, 李德仁, 付兴科. 2013. 资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校. *测绘学报*, 42(4): 523-529, 553)
- Leng B, Wang F, You H J and Hu Y X. 2019. Research on improvement method of positioning accuracy of area array image. *GNSS World of China*, 44(4): 8-15 (冷波, 王峰, 尤红建, 胡玉新. 2019. 面阵图像定位精度提升方法研究. *全球定位系统*, 44(4): 8-15) [DOI: 10.13442/j.gnss.1008-9268.2019.04.002]
- Li D R, Zhao S M, Lu Y H and Hu W Y. 2007. Combined block adjustment for airborne three-line CCDScanner images. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 36(3): 245-250 (李德仁, 赵双明, 陆宇红, 胡文元. 2007. 机载三线阵传感器影像区域网联合平差. *测绘学报*, 36(3): 245-250) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2007.03.001]
- Li X Y, Hu Z Y, Jiang L Y and Chen F S. 2022. In-orbit geometric imaging simulation based on ray-tracing for long-linear-array and whisk-broom thermal infrared imager. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 41(1): 199-209 (李潇雁, 胡璋悦, 江林逸, 陈凡胜. 2022. 基于光线追迹的长线列摆扫式热像仪在轨几何成像仿真方法. *红外与毫米波学报*, 41(1): 199-209) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2022.01.014]
- Liu J, Wang D H, Liu J X and Zhang L. 2009. IMU/DGPS supported block adjustment of ADS40 three line imagery data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 38(1): 55-60 (刘军, 王冬红, 刘敬贤, 张莉. 2009. IMU/DGPS系统辅助ADS40三线阵影像的区域网平差. *测绘学报*, 38(1): 55-60) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2009.01.010]
- Mikhail E M. 1976. *Observations and Least Squares*. New York: IEP-A Dun-Donnelley Publisher.
- Mo D L. 2018. Research on Imaging Model and Geometric Calibration Method for Airborne Long Focal Wiskbroom Camera. Zhenzhou: Information Engineering University (莫德林. 2018. 航空长焦斜视相机成像模型与几何检校方法研究. 郑州: 战略支援部队信息工程大学)
- Wang F, Yao X H, You H J and Li F F. 2017. Geometric positioning accuracy improvement method based on multi-observation of GF-2 satellite//The 4th of China High Resolution Earth Observation Conference. Wuhan: [s.n.]: 1579-1588 (王峰, 姚星辉, 尤红建, 李芳芳. 2017. 基于高分二号卫星多重观测的几何定位精度提升方法//第四届高分辨率对地观测学术年会论文集. 武汉: [s.n.]: 1579-1588)
- Wang Q. 2017. Research on Geometric Calibration of Linear Array Whisking Broom Thermal Infrared Camera. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (王青. 2017. 线阵摆扫式热红外相机几何定标研究. 南京: 南京航空航天大学)
- Wang T, Zhang Y, Zhang Y S, Jiang G W, Zhang Z H, Yu Y and Dou L J. 2019. Geometric calibration for the aerial line scanning camera GFXJ. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 85(9): 643-658 [DOI: 10.14358/PERS.85.9.643]

- Wang T, Zhang Y, Zhang Y S, Mo D L and Yu Y. 2020. Geometric calibration of domestic airborne wide-field three-linear CCD camera. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(6): 739-751 (王涛, 张艳, 张永生, 莫德林, 于英. 2020. 国产机载大视场三线阵 CCD 相机几何标定. *遥感学报*, 24(6): 739-751) [DOI: 10.11834/jrs.20208277]
- Wang T, Zhang Y S, Zhang Y and Fan D Z. 2012. Airborne linear CCD sensor geometric calibration based on self-calibration. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 41(3): 393-400 (王涛, 张永生, 张艳, 范大昭. 2012. 基于自检校的机载线阵 CCD 传感器几何标定. *测绘学报*, 41(3): 393-400)
- Ye S R. 2017. Study on Geometric Exterior Calibration Method for Infrared Scanner with Large Field of View. Wuhan: Wuhan University (叶思榕. 2017. 大视场机载摆扫红外扫描仪几何外检校方法研究. 武汉: 武汉大学)
- Ye S R, Jiang W S, Li J L and Liu X B. 2017. Imaging simulation and error analysis of large field of view airborne infrared scanner. *Infrared and Laser Engineering*, 46(4): 420005 (叶思榕, 江万寿, 李金龙, 刘晓波. 2017. 某大视场机载摆扫红外扫描仪几何成像仿真与误差分析. *红外与激光工程*, 46(4): 420005) [DOI: 10.3788/IRLA201746.0420005]
- Zhang Y, Wang T, Feng W F, Yuan Z P and Wang S X. 2015. Self-calibration block adjustment for Mapping Satellite-1 three linear CCD image. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 19(2): 219-227 (张艳, 王涛, 冯伍法, 元朝鹏, 王淑香. 2015. “天绘一号”卫星三线阵 CCD 影像自检校区域网平差. *遥感学报*, 19(2): 219-227) [DOI: 10.11834/jrs.20153334]
- Zhao S M and Li D R. 2006. Experimentation of adjustment math model for ADS40 sensor. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 35(4): 342-346 (赵双明, 李德仁. 2006. ADS40 机载数字传感器平差数学模型及其试验. *测绘学报*, 35(4): 342-346) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2006.04.009]

Geometric external calibration method for the airborne large-view-field infrared scanner considering different effects of left and right pendulum directions

JIN Yanmin, LI Yifeng, SONG Zhengxiang, WANG Chao, LIU Shijie, LIU Sicong, TONG Xiaohua

College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: An airborne pendulum large-view-field infrared scanner has the advantages of large view field and high-resolution images. However, it may be affected by various factors during sensor installation, transportation, and flight, which may cause the position centers and angles of the sensor and the POS system to be changed. Therefore, geometric calibration must be performed to improve the geometric quality of the images acquired by the sensor. Furthermore, this scanner produces left-pendulum and right-pendulum images, respectively, during the flight. Moreover, the left-pendulum and right-pendulum images have different imaging integration directions, which may cause different influence on imaging quality. Therefore, this study presents an external geometric calibration method considering different influences of the different pendulum directions.

By considering different influences of the different pendulum directions of this airborne pendulum large-view-field infrared scanner, a geometric external calibration model is introduced, and it is characterized by the following: (1) The installation errors of the sensor and POS are considered. Moreover, the left- and right- pendulum images are used to calculate the installation parameters. Especially, different calibration parameters are used for the right- and left-pendulum images. The aim is to compensate for the different influences caused by different imaging integration directions. (2) Furthermore, calibration parameters for the installation errors of the sensor and POS are regarded as pseudo-observations because the installation errors of the sensor and POS are generally small. By regarding the calibration parameters as the pseudo-observations, the calibration model can avoid large unreasonable estimated parameters.

The proposed method is applied in the calibration of the images collected by this airborne pendulum large-view-field infrared scanner. Experimental results show that the calibration model can effectively improve the geometric positioning accuracy of the images. The absolute average back-projection residuals of the control points in the left- and right- pendulum images are improved to be subpixel level.

Key words: remote sensing, airborne pendulum large-view-field infrared scanner, left- and right- pendulum images, geometric external calibration, calibration parameters, back-projection residuals

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42071372); High-Resolution Earth Observation Major Special Aviation Observation System (No. 30-H30C01-9004-19/21)