

某大视场机载摆扫红外扫描仪几何成像仿真与误差分析

叶思熔¹, 江万寿¹, 李金龙², 刘晓波²

(1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 天津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: 为了分析大视场高空间分辨率红外多光谱扫描仪系统误差的影响, 为检校方案的确定提供依据, 通过利用严格成像模型对机载摆扫红外扫描仪进行成像仿真分析。针对红外扫描仪摆扫系统中相机投影中心与稳定平台回转中心不重合的设计特点, 重点研究相机安置误差与 POS 系统安置误差的相关关系。仿真实验表明: 相机安置误差与 POS 系统安置误差对定位精度影响规律基本一致, 两者存在较强相关性但随着摆扫角度增大而减小; 在摆扫幅度小于 20° 时, 相机安置误差可合并到 POS 系统安置误差。该结论可为后期的检校方案设计提供参考。

关键词: 成像仿真; 大视场摆扫; 红外影像; 误差分析; 定位精度

中图分类号: TP73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0420005

Imaging simulation and error analysis of large field of view airborne infrared scanner

Ye Sirong¹, Jiang Wanshou¹, Li Jinlong², Liu Xiaobo²

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying and Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: To analyze the effect of the system error on a large field of view infrared multispectral scanner, and provide the basis for determining calibration program, airborne infrared scanner imaging simulation was completed by using strict imaging model. For the un-coincidence of camera projection center and the rotation center of stable platform, the relationship between camera placement errors and POS system placement errors was focused on. Simulation results show that the effect of camera placement errors and POS system placement errors on the positioning accuracy are basically the same, there is a strong correlation between the two but it decreases with the sweep angle increases; when the sweep amplitude is less than 20°, the camera placement error can be incorporated into the POS system placement errors. This conclusion can provide reference for later calibration program design.

Key words: imaging simulation; large field of view of scanner; infrared images; error analysis; positioning accuracy

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-15

基金项目: 国家高分专项

作者简介: 叶思熔(1992-), 女, 硕士生, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究。Email: Yesirong@whu.edu.cn

导师简介: 江万寿(1967-), 男, 研究员, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究。Email: jws@whu.edu.cn

0 引言

某大视场红外多光谱扫描仪是民用高分支持下研制的高空间分辨率、高几何定位精度、大成像幅宽的红外遥感仪器^[1]。其成像方式为长线列探测器的整机摆扫式，在飞机飞行的过程中中线阵列探测器垂直于飞行方向摆扫，完成地面场景的成像^[2]。由于扫描平台最终安装在飞机上，飞机的运动会导致每一次扫描影像对应的地面位置沿着飞行方向向前移动，使最终的扫描影像带不垂直于飞机的飞行方向，也使 TDI 积分无法进行，因此必须在相机侧摆的同时进行俯仰来补偿前向像移，保证扫描的影像能够在垂直于飞行的方向上进行对齐^[3-6]。

为了减小飞机飞行时姿态抖动的影响，扫描仪设计成扫描和姿态稳定一体化的圆柱形的结构，设计时相机投影中心与稳定平台回转中心不完全重合。扫描时外筒滚动带动相机侧摆，随着扫描角度的变化，内筒进行俯仰进行移动补偿，完成垂直于飞行方向的扫描成像^[7]。IMU 姿态数据为扫描平台的姿态稳定提供姿态抖动信号，扫描平台在摆扫和俯仰时进行根据 IMU 信号进行补偿。

由于在 IMU 安装时不能保证其轴系与扫描平台的轴系严格平行，也不能保证相机视轴与扫描平台的轴系严格平行，其间的不平行度是扫描仪的关键系统误差。参考文献[8]中，将 IMU 坐标系和航摄仪坐标系之间的角度偏差称为视准轴误差。与参考文献[8]不同，该扫描仪中 POS 系统与相机之间是通过扫描平台进行连接的，故文中将 IMU 坐标系和扫描平台坐标系之间的角度偏差，称为 IMU 坐标系与扫描平台坐标系轴系误差。将 GPS 天线中心与扫描平台回转中心的偏差称为位置偏差^[9]。下文将两者统称为 POS 系统安置误差。将相机投影中心与扫描平台回转中心的偏移及相机坐标系与扫描平台坐标系两坐标轴系的角度偏差统称为相机安置误差^[10]。除上述误差外，红外扫描仪还存在相机镜头畸变、CCD 安装、时间同步、GPS 定位、IMU 漂移等系统误差。这些误差的影响规律总体上与传统线阵推扫或面阵相机相似，不作赘述。

该扫描仪扫描角高达 100°，分辨率和几何精度要求达到 cm 级，系统安装和检校精度要求很高。为此，文中在分析 LiDAR 这种有代表性的摆扫系统的基础上，根据红外摆扫成像过程建立严格的成像几何模型，利用已有的 DEM 数据和高分辨率正射影像进行红外影像模拟仿真研究，试图通过在模拟过程中加入相机安置误差与 POS 系统安置误差，分析它们对红外影像定位精度的影响规律及相关性。文中首先给出红外摆扫的成像几何模型和纠正模型，然后在此基础上根据给定误差进行模拟影像，然后利用原影像作为参考进行误差评估。

1 成像几何模型

1.1 机载红外影像摆扫成像几何模型

如图 1 所示，根据 GPS、IMU、稳定平台和相机的安装关系，该扫描仪几何成像模型可写为：

$$R_{IMU} \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} + R_{misalign} R_{scan} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} + \lambda R_C \begin{bmatrix} \tan(\Psi_X) \\ \tan(\Psi_Y) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $[X, Y, Z]$ 为影像光束对应的地面坐标； $[X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS}]$ 为 GPS 坐标系下的坐标； $[X_C, Y_C, Z_C]$ 为相机坐标系下的坐标； λ 为畸变系数； Ψ_X, Ψ_Y 为相机安置误差。

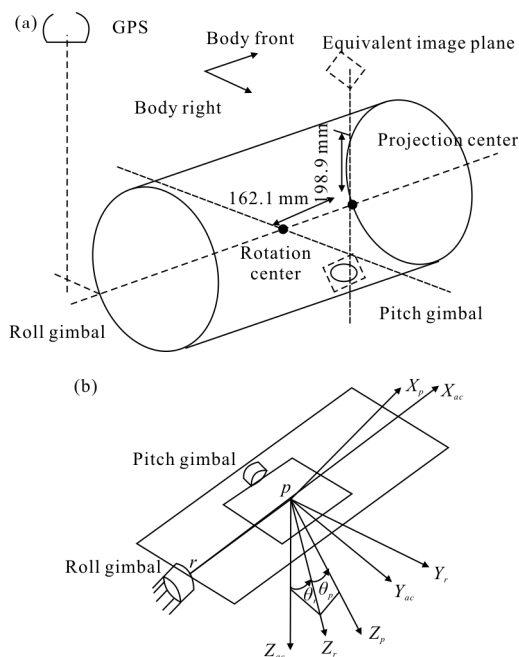


图 1 两轴扫描及稳定平台

Fig.1 Two-axis scanning and stable platform

Z_{GPS}]为 GPS 天线中心坐标; R_{IMU} 为由 IMU 姿态矩阵; $[X_r, Y_r, Z_r]$ 为扫描仪旋转中心与 GPS 相位中心的偏移; $R_{misalign}$ 为稳定平台坐标系与 IMU 偏角的旋转矩阵; R_{scan} 为扫描角旋转矩阵, 包含滚动和俯仰; $[X_c, Y_c, Z_c]$ 为相机投影中心与扫描仪旋转中心的偏移; R_c 为相机在稳定平台坐标系下的安置矩阵; λ 为投影系数, 描述了一个像点可能对应的不同三维点的尺度; (Ψ_x, Ψ_y) 为像元在镜头中的指向。

如图 1(b)中扫描产生的旋转矩阵 R_{scan} 由滚动角 θ_r , 俯仰角 θ_p , 俯仰轴与滚动轴的不垂直度 θ_s 共同决定, 如下:

$$R_{scan}=(\theta_r, \theta_s, \theta_p)=R_x(\theta_r)R_z(\theta_s)R_y(\theta_p) \quad (2)$$

1.2 摆扫影像纠正模型

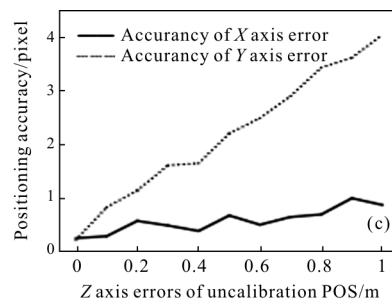
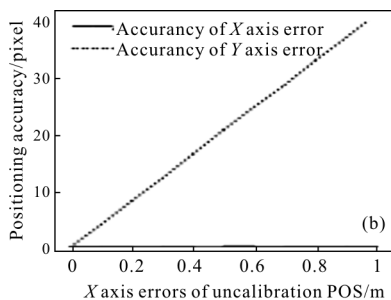
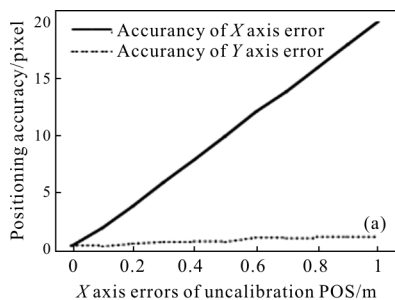
摆扫影像纠正是影像仿真分析中的重要环节, 可以和输入的影像构成一个闭环, 用于检测各种系统误差引起的定位误差。摆扫影像纠正的核心在于计算三维地面点在给定扫描行的像平面坐标。把有关外方位元素的变量移动方程左边, 公式(1)可以改写为:

$$R_c^{-1} \left(R_{scan}^{-1} R_{misalign} \left(R_{IMU}^{-1} \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (3)$$

最终得到地面点 (X,Y,Z) 在给定时刻像平面上的像点坐标:

$$\begin{cases} x=f \cdot \tan(\Psi_x)=f \cdot U/W \\ y=f \cdot \tan(\Psi_y)=f \cdot V/W \end{cases} \quad (4)$$

在实际纠正过程中, 由于无法直接知道地面点 (X,Y,Z) 所对应的扫描行, 因此需要一个迭代过程来精确确定对应的扫描行。



2 基于成像几何模型的影像仿真与误差分析

2.1 相机安置误差和 POS 系统安置误差对定位结果的影响

利用某测区的 ADS40 轨迹及姿态数据和对应的 DEM、DOM 数据, 在摆扫过程中加入相机安置误差和 POS 系统安置误差, 通过公式(1)可模拟摆扫影像。根据公式(4)可获得带误差的纠正影像, 最后将得到的纠正影像与初始的正射影像做匹配即可获得不同误差项和误差幅度对定位精度的影响。

2.1.1 实验过程与结果

以某大视场红外多光谱扫描仪的近红外波段为例, 其 TDI 级数为 128, 焦距 492.826 mm, 摆扫角度分辨率为 0.025 mrad。模拟飞行航高为 2 114.89 m。模拟影像分辨率为 0.05 m, 扫描角为 30, 模拟地区平均高程为 2 510 m。相机安置误差与 POS 系统安置误差的取值范围如表 1 所示。

表 1 相机安置误差与 POS 系统安置误差范围

Tab.1 Placement error range of camera and POS systems

Errors	Range of values
Stability platform and camera attitude angle error/($''$)	0-12
Projection center and rotation center offset/m	0-1
IMU and stable platform attitude error/($''$)	0-12
Rotation center of the platform and the GPS phase center error/m	0-1

由公式(1)可知 RIMU 和 Rscan 不断变化着, 相机安置误差、POS 系统安置误差和扫描角是相关的。下面对相机安置误差和 POS 系统安置误差对定位精度的影响进行仿真定量的分析。各项误差对定位精度随误差的变化曲线如图 2 所示。

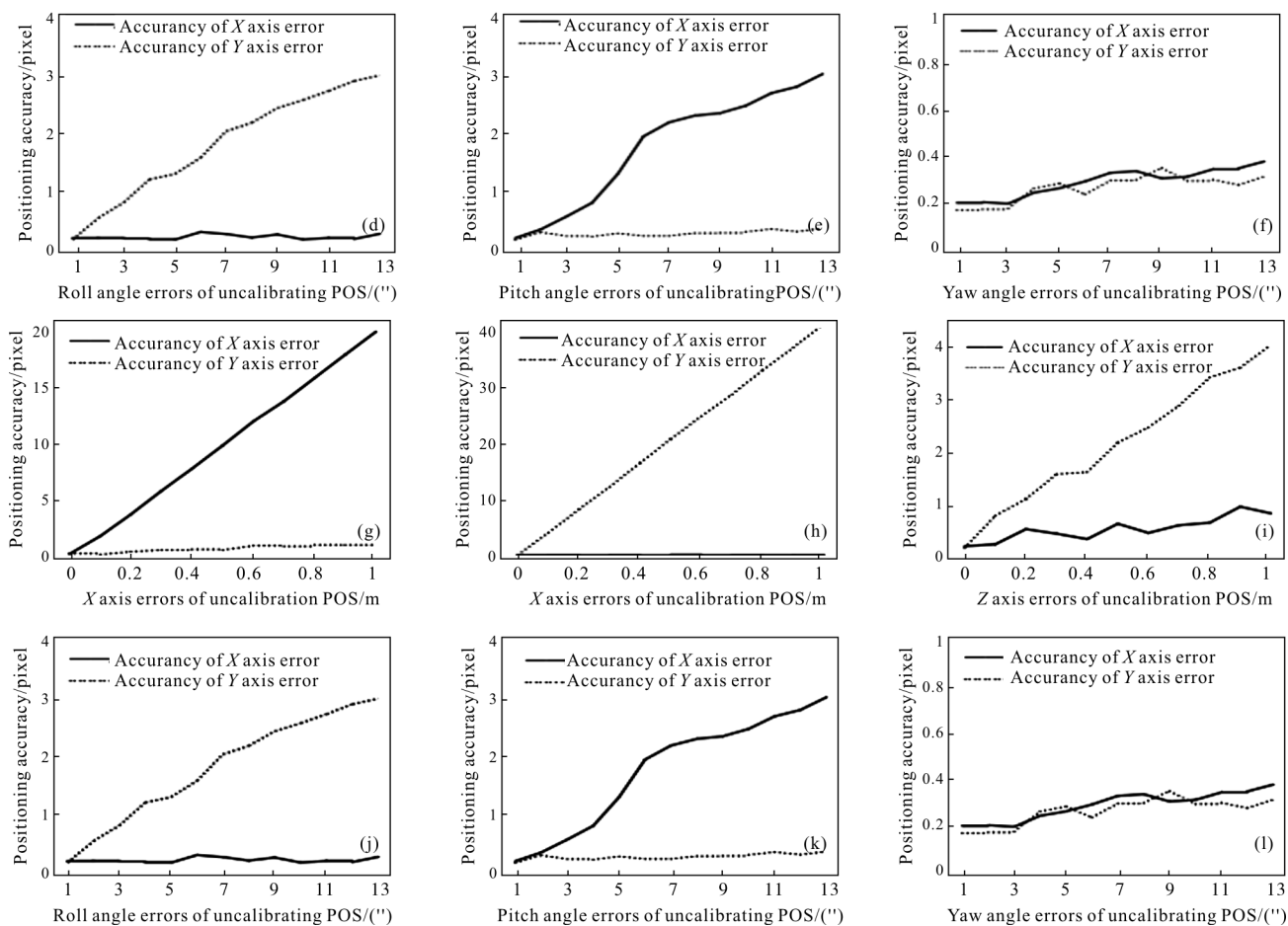


图 2 不同误差影响定位精度曲线图

Fig.2 Different error influence the positioning accuracy

2.1.2 结果分析

扫描仪探测器的探元间距是 12 μm，角度分辨率为 5”，成像分辨率为 0.05 m，在焦平面上每移动 12 μm，角度每摆动 5”，相当于地面定位误差 0.05 m，即一个像元。

由图 2 中的误差曲线可以看出，相机投影中心水平偏移、POS 系统位置水平偏差大小与它们引起的定位误差成线性关系，其中飞行方向偏移大小对 X 方向的定位精度影响较大，摆扫方向偏移大小对 Y 方向的精度影响较大。高程方向偏移大小与它们引起的定位误差成非线性关系，高程方向偏移大小放大了 X 方向和 Y 方向的误差。而相机偏心角、IMU 轴系偏角大小与它们引起的定位误差成非线性关系，其中偏航角引起的误差相对很小，滚动方向对 X 方向的定位精度影响较大，俯仰方向对 Y 方向的定位精度影响较大。当相机安置误差偏心角和 POS 系统轴系偏差大于 3”时，对定位精度的影响大于 1 个

像元。

总之，相机安置误差和 POS 系统安置误差对定位精度的影响规律基本一致，二者所引起的误差具有合并的可能性。

2.2 不同摆扫角度和俯仰角度对两者误差合并的影响

由上述实验结果所提出的假设，由公式(1)可知，式中虽然严格地表达了红外摆扫影像的成像几何模型，但模型间参数太多，且存在较强的相关性，难以直接应用于扫描仪的系统误差检校。因此，有必要对相机安置误差、POS 系统安置误差和扫描角三者的相关性展开研究。公式(2)可改写为：

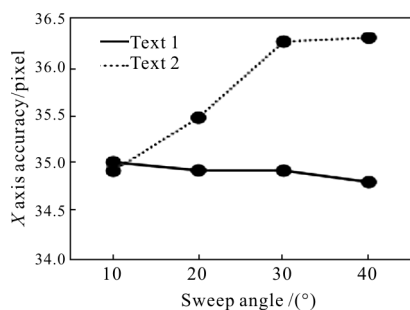
$$R_{IMU}^{-1} \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} + R_{misalign} R_{scan} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \lambda R_{misalign} R_{scan} R_c \begin{bmatrix} \tan(\Psi_{X_t}) \\ \tan(\Psi_{Y_t}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.1 实验过程与结果

下面就三者的相关性设计两组实验,如图 3 所示。

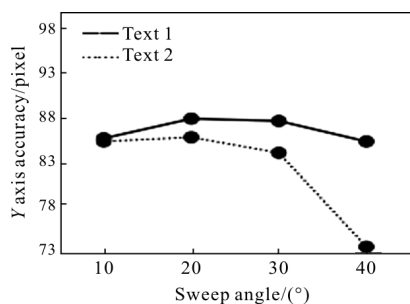
实验 1 两误差项分开加入: 相机最大安置误差 X 方向误差为 1 m, Y 方向为 1 m, Z 方向误差为 1 m, 俯仰方向为 12", 滚动方为 12", 偏航方向为 12"。POS 系统安置误差值与相机安置误差值相同。观察其在不同摆扫幅度定位误差变化规律。

实验 2 相机安置误差合并到 POS 安置误差: POS 系统误差值 X 方向误差为 2 m, Y 方向为 2 m, Z 方向误差为 2 m, 俯仰方向为 24", 滚动方为 24", 偏航方向为 24", 相机安置误差值为零。观察其在不同摆扫幅度定位误差变化规律。



(a) 对 X 方向的定位精度影响

(a) Positioning accuracy effect on the X-direction



(b) 对 Y 方向定位精度影响

(b) Positioning accuracy effect on the Y-direction

图 3 合并误差项对定位精度的影响

Fig.3 Effect of the combined error terms on positioning accuracy

2.2.2 结果分析

扫描仪视轴方向偏差设计值 Z_c 为 0.198 9 m, 滚动方向偏差 X_c 为 0.162 1 m, Y_c 为 0, 其标定误差可控制在 1 cm 之内。由公式(1)可知, 当 $R_{misalign}$ 没有误差时, 则相机投影中心偏移量检校误差引起的定位误差不大于 1 cm, 可忽略; 当 $R_{misalign}$ 各方向标定误差不超过 12" 时, $R_{misalign}$ 标定误差和相机投影中心偏移量共同引起的定位误差不会超过 0.002 cm, 可忽略;

当摆扫时刻俯仰角度和摆扫角度较小时, 公式(1)中的 R_{scan} 近似单位阵, 故 R_c 的三轴偏心应近似地可与 $R_{misalign}$ 合并处理, 以减少检校变量, 上述的实验结果验证了这一点。

由图 3 可知, 两误差项分开加入时摆扫角度的大小对红外影像定位精度影响较小。当相机安置误差合并到 POS 系统安置误差时, 摆扫角度放大了 X 方向的定位误差, 吸收了 Y 方向的定位误差。随着摆扫度数的增大, 俯仰补偿也相应的增大, 此时 R_{scan} 的影响逐渐增大, R_c 矩阵在三个坐标轴分量上重新分配, R_c 与 $R_{misalign}$ 的相关性应逐渐减少。当摆扫幅度小于 20° 时(正负各 10°)时, 相机安置误差与 POS 系统安置误差可合并处理。

3 结论

文中针对大视场红外多光谱扫描仪的成像特点, 利用所建立的成像几何模型, 仿真分析了相机安置误差和 POS 系统安置误差对定位精度的影响规律及两者的相关性。实验表明相机安置误差和 POS 系统安置误差对定位精度的影响规律大致一致, 其中偏航方向的误差影响远小于其它方向的误差影响; 相机安置误差与 POS 系统安置误差对定位精度影响的相关性随着摆扫角度增大而减小, 在摆扫幅度小于 20° 时(正负各 10°)时相关性显著。在后期检校方案中可考虑利用小摆扫角数据先检校两者的和, 然后再利用大摆扫角数据进一步分解系统误差, 以减少求解的不确定性。

参考文献:

[1] Dong Hao, Liu Huitong. Simulation analysis of large FOV infrared scanning imaging quality on aircraft yawing rotation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 810-815. (in Chinese)
董浩, 刘会通. 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 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 810-815.

[2] Han Bing, Chen Xin, Rao Peng, et al. Applications of ASIC in the long array column of infrared TDI detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (6): 1733-1738. (in Chinese)
韩冰, 陈忻, 饶鹏, 等. ASIC 技术在长阵列 TDI 红外探测

- 器中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1733-1738.
- [3] Li Gang, Yang Mingyu. Image motion measurement for airborne camera based on joint transform correlation [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 401-406. (in Chinese)
李刚, 杨名宇. 基于联合变换相关的机载航空相机像移测量[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 401-406.
- [4] Zhang Yuxin, Liu Yu, Ge Wenqi. Development and prospect of image motion compensation technology [J]. *Chinese Optics*, 2010, 1(2): 112-118. (in Chinese)
张玉欣, 刘宇, 葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学, 2010, 1(2): 112-118.
- [5] Sun Hui, Zhang Shumei. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(11): 2492-2499. (in Chinese)
孙辉, 张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2492-2499.
- [6] Wang Dejiang, Kuang Haipeng, Cai Xichang. Digital implementation of forward motion compensation in TDICCD panoramic aerial camera [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(12): 2465-2472. (in Chinese)
王德江, 匡海鹏, 蔡希昌. TDICCD全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2465-2472.
- [7] Ren Shunqing, Yang Huizhong, Wu Guangyu, et al. A new method of measuring interaxial non-orthogonality in multiaxial system [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1997, 5(1): 44-47. (in Chinese)
任顺清, 杨慧中, 吴广玉, 等. 多轴系统轴间不正交度测试的新方法[J]. 中国惯性技术学报, 1997, 5(1): 44-47.
- [8] Yuan Xiuxiao, Yang Fen, Zhao Qing, et al. Boresight misalignment calibration of integrated DGPS I/MU system [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(12): 1039-1043. (in Chinese)
袁修孝, 杨芬, 赵青, 等. 机载系统视准轴误差检校[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2006, 31(12): 1039-1043
- [9] Zhang Haitao, Zhang Bing, Zuo Zhengli, et al. Boresight misalignment and position offset calibration of push-broom hyperspectral sensor integrated POS system [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 973-977. (in Chinese)
赵海涛, 张兵, 左正立, 等. 推扫式高光谱传感器集成的系统视准轴及位置偏差检校 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2013, 38(8): 973-977
- [10] Cao Yu, Feng Ying, Zhao Lishuang, et al. Effect of attitude installation error of camera on precision of monocular visual odometry [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(12): 23-26. (in Chinese)
曹毓, 冯莹, 赵立双, 等. 相机姿态安装误差对单目视觉定位精度的影响[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(12): 23-26.
- [11] Zhang Jing, Jiang Wanshou. Self-calibration of LiDAR system mounting bias using virtual tie point model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(6): 762-769. (in Chinese)
张靖, 江万寿. 基于虚拟连接点模型的机载LiDAR系统安置误差自检校[J]. 测绘学报, 2011, 40(6): 762-769.
- [12] Udo Tempelmann, Ludger Hinsken, Utz Recke. ADS40 calibration & verification process [C]//ISPRS International Workshop -Working Group I/5: Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation, 2003: 22-23.
- [13] Yuan Xiuxiao. GPS Assisted Aerial Triangulation Principle and Application [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2001. (in Chinese)
袁修孝. GPS辅助空中三角测量原理及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2001.
- [14] Umker M B, Heimes F J. New calibration and computing method for direct georeferencing of image and scanner data using the position and angular data of a hybrid inertial navigation system [J]. *Proceedings of the OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation*, 2001, 97(26): 14560.
- [15] Hinsken L, Miller S, Tempelmann U, et al. Triangulation of LH systems' ADS40 imagery using ORIMA GPS/IMU [C]//IAPRS-SIS, 2001, 34(B3/A): 156-162.