

Mars-LiDAR 系统误差分析及安置角误差飞行检校

胡国军^{1,2,3}, 朱精果⁴, 刘汝卿⁴

(1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450052; 2. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054; 4. 中国科学院光电研究院, 北京 100094)

摘要: 机载激光雷达系统是集成激光扫描仪、全球定位系统和惯性导航系统等于一体的多传感器集成系统。机载激光雷达的检校和标定是保证激光点云定位精度的关键环节, 其中扫描系统安置角误差是影响定位精度的主要因素之一。首先介绍了国产中远程机载激光雷达 Mars-LiDAR 系统, 然后基于误差传播定律对系统误差进行了分析。研究了系统安置角误差的飞行检校方法, 采用外场定标的方法将安置角进行动态分离, 并通过飞行试验完成了系统安置角误差的动态检校, 对 Mars-LiDAR 系统在 3000 m、4000 m 飞行高度获取的点云进行了定位精度分析和校正, 验证了 Mars-LiDAR 系统安置角误差检校方法的实用性。

关键词: 机载激光雷达系统; 系统误差; 安置角误差; 三维点云; 误差检校

中图分类号: TN249; P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1217009

Error analysis of Mars-LiDAR system and calibration of installation angle error

Hu Guojun^{1,2,3}, Zhu Jingguo⁴, Liu Ruqing⁴

(1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;

2. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China;

3. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;

4. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Airborne LiDAR system is a multi-sensor integrated system, including laser scanner, global positioning system, inertial navigation system, and so on. One of the key point to obtain high positioning accuracy of laser point cloud is the airborne LiDAR calibration. And the installation angle error of laser scanner is one of the main factors which influence the measurement accuracy. Based on the working principle of airborne LiDAR system, a domestic medium range system Mars-LiDAR was developed. According to the error propagation law, the effects of measurement error and hardware installation error were analyzed. A method using different calibration field to separate installation angle errors between laser scanner and inertial navigation system was proposed. At the height of 3 000 m and 4 000 m, the high positioning accuracy was obtained, satisfying the specifications of data acquisition of airborne LiDAR.

收稿日期: 2016-04-22; 修订日期: 2016-05-26

基金项目: 国家高分重大专项项目(GFZX040305)

作者简介: 胡国军(1977-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究。Email: hgj_2000@163.com

通讯作者: 朱精果(1977-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光成像探测方面的研究工作。Email: zhujg@aoe.ac.cn

Finally the test data verified the utility, reliability and feasibility of the error calibration method by using practical engineering application.

Key words: airborne LiDAR system; system error; installation angle error; three dimensional point cloud data; error calibration

0 引言

机载激光雷达 LiDAR 是近年来快速发展的一项高新技术^[1]。它突破了传统地面三维数据获取技术的周期长、工作量大等局限,利用高速激光扫描测距方法,能够快速、准确地获得大量地表三维信息,与传统的航测技术相比是继 GPS 技术之后的测绘界又一重大技术革命^[2-3]。

国外自 20 世纪 60 年代开始研制激光雷达测量系统,经过四十多年的发展,目前国外机载激光雷达技术的硬件水平和系统集成技术已经相当成熟^[4]。我国自 20 世纪 80 年代开始进行机载激光雷达的研制,华中科技大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、上海技术物理研究所、北京理工大学等单位均对该技术展开了广泛研究。2009 年,中国科学院光电研究院承担了国家 863 计划重点项目“轻小型机载激光雷达 LiDAR 系统技术”^[5],完成了工程样机研制,并于 2014 年成功研制了国产中远程测距机载激光雷达 Mars-LiDAR 系统,进行了飞行验证^[6]。

机载 LiDAR 系统是一个复杂的多传感器集成系统,其精度受到系统内各个组成部分的共同影响。其中,系统误差是由于机载 LiDAR 系统的硬件设备本身和在执行测量任务过程中采用的量测方案的不完善产生的。因此,对 LiDAR 系统进行误差校正是必不可少的。

目前,对机载激光雷达的检校还处于研究阶段,还没有形成统一的标准。Schenk T (2001)在《Modeling and Analyzing Systematic Errors in Airborne Laser Scanners》中详细阐述了各系统误差项对激光脚点坐标的影响,为系统误差模型的建立提供了理论基础,但是可操作性差。Favey 于 2001 年提出了根据控制点在往返重叠航带中位置偏移的几何模型的自检校法;Habib A F(2008)等提出了利用重迭航带中的线性特征地物校正系统安置角;Vosselman(2004)等也使用了相同的方法估计系统安置角;Filin (2003)利用自然表面改正系统偏差并在此基础上提出了系统

安置角误差改正模型;Csanyi(2007)等沿航线方向布设激光地面控制点来提高 LiDAR 数据的精度;Zhihe Wang(2008)也采用了类似的方法,他利用激光数据在重迭区域中的控制平面并结合最小二乘平差分析改正系统安置参数。但这种航带连接点检校法存在着一定的缺陷:连接点的坐标需要用激光脚点内插得到,而这个过程会降低连接点的精度,最终影响校正精度。国内也有不少学者致力于激光雷达的检校研究。刘经南分析了动态偏心改正及动态时效误差对机载激光测高精度的影响,讨论了不同的误差源对定位结果精度的影响(2002);张小红详细推导了单点线扫描方式下的几何定位数学模型,提出了分步几何法恢复线扫描系统安置角误差的方法,并给出了高程和平面精度评定结果(2007);尤红建针对机载三维成像仪推导了单点线扫描及圆扫描两种模式下的解算模型;中国科学院光电研究院针对自研的单点摆扫式激光雷达系统推导了点云解算模型,并研发了预处理软件^[7-10]。

文中依据国产 Mars-LiDAR 系统各种传感器的集成原理,介绍了该系统集成和工程应用情况,重点分析了机载 LiDAR 系统的各种误差关系,并结合实际飞行实验,对安置角引起的 LiDAR 系统误差进行了修正,验证了模型的可行性。

1 Mars-LiDAR 系统集成

1.1 系统简介

机载 LiDAR 系统主要由激光雷达传感器系统、高精度定位定姿系统(POS)和航测相机三大部分组成^[11]。通过搭载航测飞机,激光器向地面发射激光束,并接收激光反射脉冲,由此根据公式(1)计算出飞机到地面点之间的距离。同时根据飞机上 GPS 记录的空间位置,结合飞机当时的飞行姿态,共同解算出地面点的三维坐标^[12-13]。

$$\rho = \frac{1}{2} ct^2 \quad (1)$$

文中试验采用的整套国产 Mars-LiDAR 系统

由中国科学院光电研究院设计,包括激光雷达硬件系统、主控软件 Mars-LiSC、数据预处理软件 Mars-LiPre 等。其中硬件系统由 Mars-LiDAR、POSAV610、天宝(型号)GPS 接收机、哈苏数字航测相机、加固笔记本、过渡架等构成,如图 1 所示。Mars-LiDAR 以脉冲激光器作为主动探测光源,利用激光单色性好、方向性强、能量高、光束窄的特点进行测距扫描,通过接收目标对激光信号的反射和散射回波来测量目标的方位和距离。图 2 给出了机载 Mars-LiDAR 系统的功能单元组成。



图 1 Mars-LiDAR 系统集成照片

Fig.1 Photo of Mars-LiDAR system

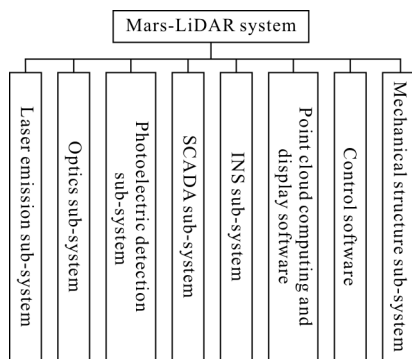


图 2 机载 Mars-LiDAR 功能组成图

Fig.2 Function constituent of airborne Mars-LiDAR system

1.2 系统测量作业

机载 LiDAR 测量作业的生产流程主要包括航摄准备、数据采集、数据预处理、数据后处理等环节。其详细作业流程如图 3^[10]所示。

(1) 航摄准备

航摄设计是飞行作业前的首要任务,包括航线

设计、地面基站架设、检校场选择等三大部分^[7]。

(2) 数据采集

在飞机起飞前 30 min,打开地面基站上 GPS 接收机,在飞到测区之前,打开 POS 系统,静止一段时间,按“8”字飞行,飞完之后直飞 5 min,以保证 POS 系统处于最佳工作状态;然后开始数据采集。在测区进行数据采集时,飞机可按设计航线自动飞行;数据采集完之后再依次直飞 5 min、倒“8”字飞行、静止几分钟,关掉 POS 系统;而地面 GPS 接收机则在飞机关掉 POS 系统后延迟 30 min 关闭。

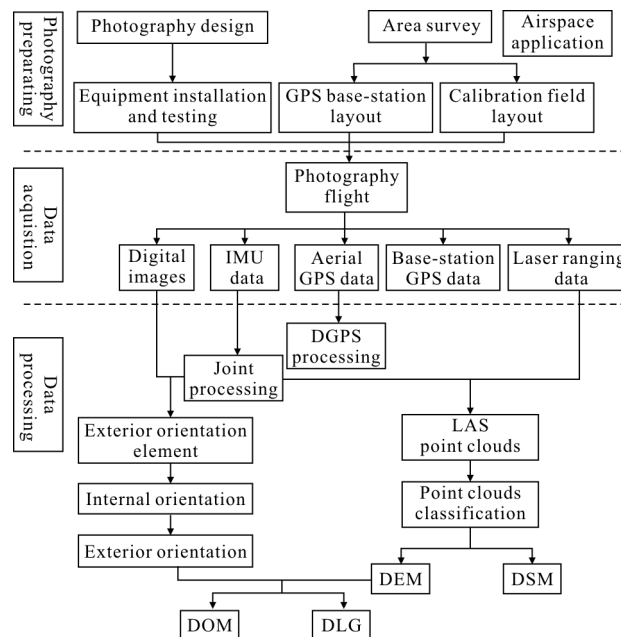


图 3 机载 LiDAR 测量作业流程图

Fig.3 Work flow of airborne LiDAR system

(3) 数据预处理

飞行结束后,对机载 LiDAR 采集到的原始数据进行解算。

针对系统所获取的原始扫描数据,经过解码分类、数据检查、数据同步、联合 POS 数据、坐标转换以及坐标解算,获取 LiDAR 测距值、系统时间以及各种格式(主要有:LAS、xyzi 等标准格式)的、含有 UTC 时间和强度信息的高精度点云数据文件,实时快速地获取三维点云数据结果。

(4) 数据后处理

结合定位定姿数据和影像,经过专用软件处理,得到工程中常用的 DSM、DEM 以及 DOM 等数据后处理产品。

2 系统误差分析与安置角动态检校方法

文中采用参考文献[14]中的机载激光雷达定位误差的传递关系,包括激光测距误差、扫描指向误差、GPS 定位误差、姿态测量误差、POS 的安置偏差和时间同步误差等,如图 4 所示。

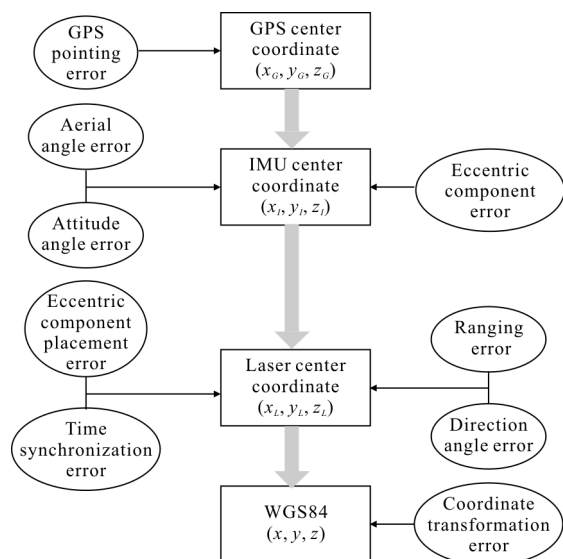


图 4 机载 LiDAR 系统误差关系图
Fig.4 Map of the error relationship of the airborne LiDAR system

为了最大可能地提高测量精度,降低系统误差的影响,需要对激光测距值误差、激光扫描镜的指向误差、大气折射误差、姿态量测误差和硬件安置误差等进行检校。可以归类为静态检校和动态飞行检校两种。

其中,硬件安置误差是影响机载 LiDAR 系统定位精度的主要因素之一。

硬件安置误差主要有偏心距误差和安置角误差。偏心距误差主要由 GPS 接收机天线到激光束在扫描镜上发射点的距离的量测误差,该误差在 GPS 与 IMU 联合解算中已经得到校正。而安置角误差指的是机载 LiDAR 系统中在实际安装中,IMU 各轴与激光扫描系统的各轴指向间有一个微小的角度差:航向误差 $\Delta\beta$ 、俯仰误差 $\Delta\alpha$ 、翻滚误差 $\Delta\varphi$ 。同时,由于飞机落地时的剧烈震动也可能造成仪器的移动,导致安置角误差扩大。因此,必须对安置角进行动态飞行检校。

线扫描模式下,在三个(侧滚、俯仰、航向)安置角偏差中,俯仰角安置偏差 $\Delta\alpha$ 主要使被扫描物体的真实位置沿与扫描线垂直的方向产生偏差;侧滚向的安置角偏差 $\Delta\varphi$ 会使激光脚点产生影响,会使被扫描物体的计算位置产生偏移;航向安置角偏差 $\Delta\beta$ 既会改变被扫描物体中心的位置,又会使物体产生变形。

2.1 俯仰角检校

通过对向飞行,利用天底点尖顶房(或定标器)进行俯仰向偏差的分离。

利用天底点尖顶房对俯仰向偏差的分离原理图如图 5 所示。俯仰向安置角偏差会使对同一尖顶房屋顶扫描时,前向飞行与后向飞行所得到的屋顶点云数据产生偏差,在此利用屋脊之间的偏差距离 D 即可求得俯仰向安置角偏差 $\Delta\alpha$ 。方法为:利用屋顶的点云数据恢复出屋顶的两个顶面,再利用这两个面就可以求得屋脊线。前向飞行与后向飞行的两个屋脊线恢复出后,即可求得偏差距离 D 。

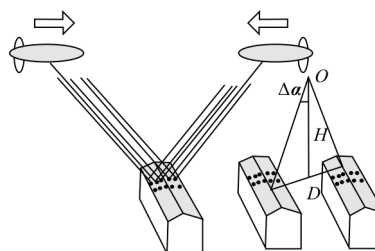


图 5 利用屋顶对俯仰角安置偏差分离
Fig.5 Peeling-off of the pitch angle by the use of roof

可得俯仰向安置角偏差为:

$$\Delta\alpha = \frac{D}{2H} \quad (2)$$

式中: D 是指前向飞行与后向飞行获得的同一地物中心位置间的距离差; H 为平均飞行高度(假定前向飞和后向飞时的扫描高度基本一致)。

2.2 侧滚角检校

在分离出俯仰向偏差后,加上俯仰向偏差改正重新计算生成一组激光点云数据,此点云数据将不受俯仰向安置角偏差的影响。侧滚向安置角偏差会使水平面上的一条本来水平的扫描脚点连线倾斜。根据该原理,对侧滚向安置角偏差进行分离。

利用地面平直线状地物对侧滚向安置角偏差的分离原理图如图 6 所示。在对向飞行过程中,尽量保证飞机是沿垂直于地面平直线状地物的方向飞行。

侧滚向安置角偏差会导致前后对向飞行时,对同一地面平直线状地物产生偏差,两条平直线状地物之间的夹角即为侧滚向安置角偏差 $\Delta\varphi$ 。在平直线状地物上定标时,利用的点云数据并非一条扫描线上的点云数据,而是平直线状地物上的面点。利用足够的点云数据恢复出平直线状地物面方程,两个面之间的夹角即为侧滚向安置角偏差 $\Delta\varphi$ 。

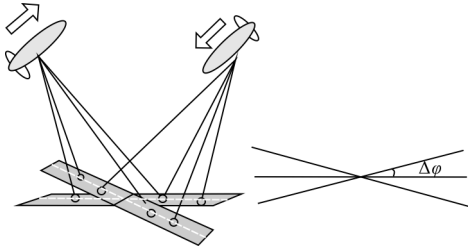


图 6 利用地面平直线状地物对侧滚向安置角偏差的分离

Fig.6 Peeling-off of the roll angle by use of the ground plane linear objects

2.3 航偏角检校

在分离出侧滚向安置角偏差后,重新计算一组新的点云数据,此数据就不再含俯仰向安置角偏差和侧滚向安置角偏差,利用此时的点云数据对航偏向安置角偏差进行分离。航偏向安置角偏差 $\Delta\beta$ 会改变被扫描物体中心的位置,使其在水平方向上产生变形。分离该偏差可以利用金字塔状定标器,采取对向或单向双次飞行数据即可进行分离。

利用金字塔状定标器进行航偏向安置角偏差分离原理图如图 7 所示。点云数据采用金字塔状定标器处于飞机天底点方向飞行数据和金字塔状定标器处于飞机一侧方向飞行数据。当金字塔状定标器处于飞机天底点时,不存在航向安置角偏差的影响,利

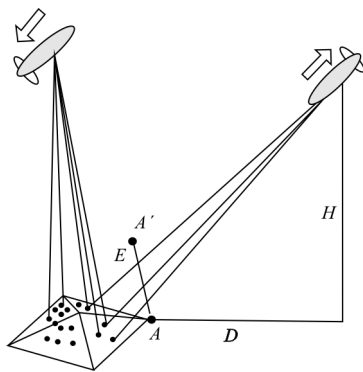


图 7 利用金字塔状定标器进行航偏向安置角偏差分离

Fig.7 Peeling-off of the heading angle by use of the pyramid scaler

用金字塔状定标器上的点云数据及其附近地面点点云数据,可以求得 A 点两个金字塔面及地面的平面方程,由三个面得方程可以求得 A 点的坐标,A 点为金字塔状定标器的脚点;金字塔状定标器处于飞机一侧的点云数据含航偏向安置角偏差影响,同样方法可以求得 A 点的偏移坐标点 A'。A 与 A' 点之间的距离为 S,根据如下公式即可求出航偏向安置角偏差:

$$\Delta\beta = \frac{S}{D} \quad (3)$$

式中:S 是两次飞行 A 点的位置之间的偏差距离;D 是 A 点与飞行天底点之间的距离。

3 试验飞行的安置角检校

根据安置角检校原理,利用定标软件对解算后的三维点云数据进行安置角量测。

如图 8 所示,同一尖顶房屋在往返航线中其横剖面图的屋脊点不重合,通过测量和反复迭代解算,最终俯仰向安置角偏差 $\Delta\alpha=2.205^\circ$ 。改正后效果如图 9 所示,图中经俯仰角安置误差改正后的同一尖顶房屋在往返航带中其横剖面图的屋脊点实现了重合。



图 8 俯仰向安置角偏差校正前尖顶房屋屋脊线偏移示意图

Fig.8 Skew-line offset diagram of the ridge house roof before calibration of the pitch angle error



图 9 俯仰向安置角改正后尖顶房屋重合示意图

Fig.9 Coincidence diagram of the ridge house roof after calibration of the pitch angle error

如图 10 所示,图中为同一地面往返航线下由于侧滚角安置误差存在所产生的垂直方向上的倾斜角度差,经测量和反复迭代解算,最终得到侧滚角安置误差 $\Delta\varphi=-2.4^\circ$ 。



图 10 检校前侧滚角误差示意图

Fig.10 Roll angle error before calibration

如图 11 所示,量测得到图中同向航向下的同一

建筑物几何中心的距离差 S , 结合飞行的航带带宽 D , 由公式 $\Delta\beta=S/D$ 可得, $\Delta\beta=3.20^\circ$ 。



图 11 同向航带建筑物偏移点云图

Fig.11 Building-offset points cloud of the air stripes in the same direction

如图 12 所示为检校后建筑物重合点云图。

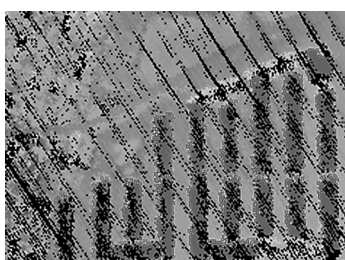


图 12 检校后建筑物重合点云图

Fig.12 Coincidence points cloud of the buildings after calibration

4 实际点云校正结果

利用开发的数据预处理软件, 并结合检校参数对点云数据进行解算, 获得了试验区的精确点云。飞行试验在不同相对航高 3 000 m、4 000 m 均获取了有效航摄照片(图 13)和点云数据(图 14), 图 14 展示了两条航带点云检校前后的效果对比。



图 13 航拍照片

Fig.13 Aerial photography image

由图 14 可以看出, 点云检校处理前: 两条航带中地物点云边缘模糊, 小河沿岸及桥不重合, 同时可以明显看到小河旁边出现两个建筑物 (实际只有一个建筑物); 点云检校处理后: 地物点云清晰, 小河沿

岸已完全重合, 小河旁边只出现一个建筑物, 与实际情况相符。



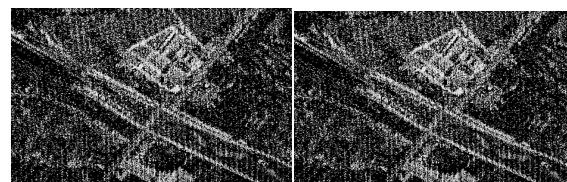
(a) 检校前两条航带的点云

(a) Points cloud of 2 stripes before calibration



(b) 检校后两条航带的点云

(b) Points cloud of 2 stripes after calibration



(c) 检校前后对比局部放大图(左为处理前, 右为处理后)

(c) Partial-enlarged comparison chart (left for the pre-processing, right for the after)

图 14 相邻两条航带点云检校前后效果对比

Fig.14 Comparing effect of the points cloud of 2 neighboring stripes before-and-after calibration

经过检校后, 采用三维激光雷达原理样机飞行试验得到的部分点云数据进行了点位精度评估, X 方向上差距较小, 误差为 0.38m, Y 方向误差为 1.59m, Z 方向上误差为 0.12m, 满足机载激光雷达数据获取技术规范要求。

5 结论

文中基于国产 Mars-LiDAR 系统机载飞行试验获得大量有效点云数据, 验证了该系统的合理性和有效性。同时利用误差传播定律分析了各种误差, 结合该系统自身结构特点, 通过动态飞行对系统进行了安置角检校, 并对获得三维点云数据进行精度评估, 点云定位精度满足机载激光雷达数据获取技术规范要求。

同时由于在实际工程中, 系统会受到很多不确

定因素的影响,系统误差的分析与改正,仍有进一步优化空间。

参考文献:

- [1] Wang Jianjun, Liu Jidong. Analysis and sorting of Impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser Point cloud obtained from airborne laser scanning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 239-244. (in Chinese)
王建军, 刘吉东. 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素分析及其影响大小排序 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 239-244.
- [2] Li Guoming, Xian Guiyu. ALS70 airborne LiDAR data using the product production[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(12): 151-153. (in Chinese)
李国明, 咸桂玉. 简述利用 ALS70 机载激光雷达生产数据产品[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(12): 151-153.
- [3] Feng Wenjiang. Analysis on positional accuracy of 3D laser scanning data [J]. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 2014, 30(1): 31-34. (in Chinese)
冯文江. 三维激光扫描数据点位精度分析 [J]. 地矿测绘, 2014, 30(1): 31-34.
- [4] Jenkins L G. Key drivers in determining LiDAR sensor selection[C]//ISPRS Commission V II Mid-term Symposium "Remote Sensing: from Pixels to Process", 2006: 342-352.
- [5] Li Menglin, Zhu Jingguo, Meng Zhe, et al. The design of lightweight and small sized airborne laser scanner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (5): 1426-1431. (in Chinese)
李孟麟, 朱精果, 孟柘, 等. 轻小型机载激光扫描仪设计 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1426-1431.
- [6] Zhu Jingguo, Li Feng, Huang Qitai, et al. Design and realization of an airborne LiDAR dual-wedge scanning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0502001. (in Chinese)
朱精果, 李锋, 黄启泰, 等. 机载激光雷达双光楔扫描系统设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0502001.
- [7] Tian Xiangrui, Xu Lijun, Xu Teng, et al. Calibration of installation angles for mobile LiDAR scanner system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3292-3297. (in Chinese)
田祥瑞, 徐立军, 徐腾, 等. 车载 LiDAR 扫描系统安置误差角检校[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3292-3297.
- [8] Li Xiaozhen, Wu Yufeng, Guo Liang, et al. Downward-looking 3-D imaging configuration and algorithm for synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3276-3281. (in Chinese)
李小珍, 吴玉峰, 郭亮, 等. 合成孔径激光雷达下视三维成像构型及算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3276-3281.
- [9] He Weiji, Sima Boyu, Miao Zhuang, et al. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging Lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 2(10): 2488-2494. (in Chinese)
何伟基, 司马博羽, 苗壮, 等. 光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2488-2494.
- [10] Wang Liying. Theory and Method of Error Processing of the Airborne LiDAR Data [M]. Wuhan: Surveying and Mapping Press, 2013. (in Chinese)
王丽英. 机载 LiDAR 数据误差处理理论与方法[M]. 武汉: 测绘出版社, 2013.
- [11] Yan Jie, Ruan Youtian, Xue Peiyao. Active and passive optical image fusion technology [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8 (3): 378-385. (in Chinese)
严洁, 阮友田, 薛珮瑶. 主被动光学图像融合技术研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 378-385.
- [12] Qu Hengkuo, Zhang Qingyuan, Ruan Youtian. Laser radar based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 243-247. (in Chinese)
屈恒阔, 张清源, 阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 243-247.
- [13] Li Xiaolu, Xu Lijun. Influence of laser footprint deviation causing by motion error of airborne LiDAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36 (11): 1270-1279. (in Chinese)
李小路, 徐立军. 平台运动误差对机载 LiDAR 激光脚点分布的影响分析 [J]. 武汉大学学报, 2011, 36 (11): 1270-1279.
- [14] Zhu Jingguo, Guan Yanling. Analysis of impacts of measurement errors on positioning accuracy of light Weighted mini airborne LiDAR [J]. *Surveying and Mapping Science Edition*, 2013, 4(38): 30-34. (in Chinese)
朱精果, 关艳玲. 轻小型机载激光雷达定位精度影响因素分析[J]. 测绘科学专刊, 2013, 4(38): 30-34.