

文章编号 1004-924X(2018)04-0788-08

机载激光雷达姿态角补偿及其效果验证

王建军*, 李云龙, 苗松

(山东理工大学机械工程学院, 山东淄博 255049)

摘要:机载激光雷达(LiDAR)扫描被测地形获得激光点云,进而重建被测地形的三维图像。机载激光雷达测量过程中,机载平台姿态角时刻发生波动,其对激光点云密度分布及重建三维成像精度具有显著影响。为消除姿态角波动对激光雷达测量的不利影响,设计了一套姿态角补偿装置,包括机械结构设计和控制系统设计;并搭建了半物理仿真实验系统,编制了总控制软件使各子设备之间时间同步控制及数据采集,实现了对机载激光雷达工作原理及姿态角补偿原理的实验仿真和补偿效果验证,补偿后DSM高程精度的RMSE误差由3.50 mm以上减小到3.28 mm。实验结果表明,搭建的半物理仿真实验系统可正确模拟机载激光雷达的工作过程,设计的姿态角补偿样机对机载激光雷达点云产品质量有显著的补偿效果。

关键词:机载激光雷达;姿态角波动;点云密度;半物理仿真;补偿;数字地表模型精度;点云

中图分类号:TN958.98 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182604.0788

Effectiveness verification of attitude compensation for airborne LiDAR

WANG Jian-jun*, LI Yun-long, MIAO Song

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

* Corresponding author, E-mail: wangjianjun@sdut.edu.cn

Abstract: Airborne LiDAR scans a terrain surface to obtain a laser point cloud, which is used to reconstruct a 3-D image of the surveyed terrain. During the measurement procedure of airborne LiDAR, the attitude angles of the airborne platform always fluctuate, which has a significant influence on the point density distribution of the laser point cloud and on the accuracy of the reconstructed digital surface model (DSM). In order to compensate for the adverse effects of attitude fluctuations, an attitude compensation prototype was designed that includes the mechanical structure and control system design. To verify the influence of attitude fluctuations on LiDAR measurements and to validate the compensation effectiveness of the designed attitude compensation prototype, a semi-physical simulation system was set up. The total control software was programmed to realize the time-synchronization control and data acquisition of all sub-systems. Using the semi-physical simulation system, the imaging procedure of airborne LiDAR and the attitude compensation principle were simulated and verified, and the RMSE of the post-compensation DSM was reduced to 3.28 mm from the original that was over 3.50 mm. Experimental results show that the working process simulation for airborne LiDAR and the com-

收稿日期:2017-08-14;修订日期:2017-10-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51575326);国家留学基金资助项目(No. 201508370010);山东省自然科学基金教育厅联合专项(No. ZR2014JL027);山东省青年教师成长计划经费(2015);山东理工大学博士科研基金资助项目(No. 4041-413028);淄博市校城融合项目(No. 2017ZBXC161)

compensation principle of the designed attitude compensation prototype are correct, and that the attitude compensation prototype has significant compensation effectiveness for airborne LiDAR.

Key words: airborne LiDAR; attitude fluctuation; point density; semi-physical simulation; compensation; digital surface model accuracy; point cloud

1 引 言

激光雷达是非接触的曲面信息高精度测量方法,测量效率高^[1-3],按载体分为车载、机载和星载激光雷达。其中,机载激光雷达作为一种地形测绘技术,可快速获得被测地形的三维模型,在城市建模、资源勘测、地形测绘和交通规划等领域得到了广泛应用^[4-5]。机载平台姿态角波动对激光雷达扫描点云有显著影响,可改变激光点云覆盖区域及点云密度,降低对被测地形的空间采样分辨率,从而导致重建三维地形模型失真增大、精度降低^[6-8]。因此,设计合适的姿态角补偿方法及装置,有效消除机载平台姿态角波动对激光雷达测量点云质量及三维成像精度的不利影响,具有重要意义^[9]。

目前,关于机载激光雷达姿态角补偿方法主要可分为两类,一类采用通用的机载稳定平台来消除机载姿态角变化的影响;另一类是专用于机载激光雷达的姿态角补偿方法。前一类方法由于采用通用的机载稳定平台,激光雷达、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)等测量设备均需安装在通用机载稳定平台上,势必造成通用机载稳定平台的体积、质量和惯性均较大,因此不适合小型飞机的携带及测量应用;另外,通用机载稳定平台的二次姿态角误差残余对机载激光雷达的测量也有显著的影响,故仍需进一步进行二次姿态角误差的补偿^[10-11]。后一类方法如滚动角补偿法,目前已应用于 Leica 公司的 ALS50-70^[12]和 Optech 公司的 ALTM3100^[13]等市售机载激光雷达系统,但其具体补偿原理没有进行技术公开,而且该方法未能补偿俯仰角变化的不利影响。

针对现有机载激光雷达姿态角补偿研究的不足,本文设计了一套姿态角补偿装置,并做出了样机,主要弥补了滚动角和俯仰角变化的不利影响。利用实验室的三轴转台、IMU 装置、激光测距仪、扫描振镜以及设计的姿态角补偿样机等设备,搭建了半实物仿真实验系统,并编制了总控软件,实

现了多设备之间的时间同步控制及数据采集。通过半物理仿真实验系统,设计了实验方案和实验步骤,一方面模拟了机载激光雷达的实际扫描及三维成像过程;另一方面,验证了设计的姿态角补偿装置的补偿效果。

2 机载激光雷达姿态角补偿方法

2.1 机载激光雷达测量原理

由机载激光雷达扫描获取地面激光脚点过程中的坐标转换关系如图 1 所示。

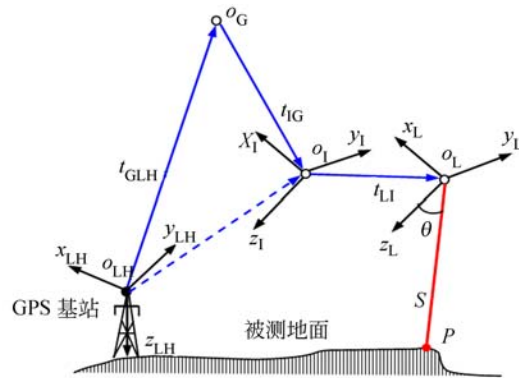


图 1 机载激光雷达获取激光脚点的坐标转换关系
Fig. 1 Schematics of coordinate transformation relationship in laser footprint measurement with airborne LiDAR

图 1 中, o_L 为激光扫描仪光学中心, o_I 为 IMU 测量中心, o_G 为 GPS 接收天线相位中心, o_{LH} 为由 GPS 基站所确定的当地水平参考坐标系的(记为 LH)原点, S 为激光测距, 则激光脉冲打在地面上的激光脚点 P 在 LH 中的三维坐标为^[14-15]:

$$\begin{bmatrix} x_P^{LH} \\ y_P^{LH} \\ z_P^{LH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{GLH} \\ y_{GLH} \\ z_{GLH} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{IG} \\ y_{IG} \\ z_{IG} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{IMU} \left(\mathbf{R}_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{LI} \\ y_{LI} \\ z_{LI} \end{bmatrix} \right), \quad (1)$$

式中: $(x_{GLH}, y_{GLH}, z_{GLH})$ 为 GPS 相位中心在 LH 中的坐标; (x_{IG}, y_{IG}, z_{IG}) 为 IMU 测量中心相对于 GPS 天线相位中心的坐标偏移量; (x_{LI}, y_{LI}, z_{LI})

为激光扫描仪光学中心相对于 IMU 测量中心的坐标偏移量; \mathbf{R}_0 为激光扫描仪瞬时扫描坐标系相对于激光扫描仪仪器坐标系的转换矩阵, 旋转角为扫描角 $(-\theta)$; \mathbf{R}_{IMU} 为 IMU 惯性坐标系相对于 LH 的转换矩阵, 旋转角为机载平台 3 个姿态角 $(-\omega, -\phi, -\kappa)$ 。

2.2 机载激光雷达姿态角补偿原理

文献[6]已证明, 偏航角变化对激光扫描点云覆盖区域和点密度的影响要远小于滚动角和俯仰角的影响; 另外实际飞机按预先规划航线飞行时, 机载平台的偏航角通常在实时变化, 以跟随被测地形或测量物特征, 因此没必要对偏航角进行补偿; 再者, 若同时补偿 3 个姿态角, 则所需的三轴补偿系统机械结构及控制复杂性要远高于二轴补偿系统。基于以上原因, 本文设计的姿态角补偿装置主要补偿滚动角和俯仰角的变化, 而未补偿偏航角的变化。机载激光雷达的姿态角补偿原理示意图如图 2 所示。

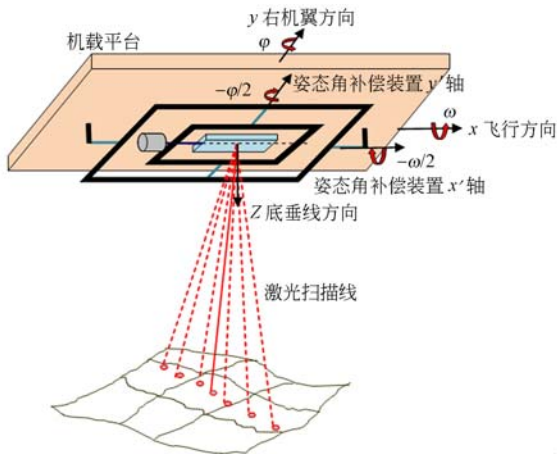


图 2 机载激光雷达姿态角补偿原理示意图

Fig. 2 Principle of attitude compensation for airborne LiDAR

在图 2 设计思想的基础上, 设计制作了姿态角补偿装置样机, 其本质上是一个结构紧凑的二轴转动平台。在其二轴旋转中心处安装了一个扫描振镜, 用于反射 LiDAR 的激光脉冲, 且扫描振镜反射激光脉冲的光点与二轴转台的旋转中心严格重合。二轴转动平台有两个转动框架, 即内框和外框。内框和外框的转动各由一个步进电机驱动, 同时, 各有一个 17 位的光电轴角编码器实时测量两个转动框架的实际转角。该补偿装置主要补偿机载平台的滚动角和俯仰角变化。当机载平

台的滚动角变化为 ω (绕 x 轴转动) 及俯仰角变化为 φ (绕 y 轴转动) 时, 设计的姿态角补偿装置的 x' 轴和 y' 分别同步反向转动 ω 及 φ 的一半, 则经扫描振镜反射后激光脉冲的出射方向可免受机载平台两个姿态角变化的影响。姿态角补偿装置采用 ARM9 芯片作为控制器, 其软件系统功能主要包括: (1) 采集 IMU 装置的测量数据, 进行相应的数据格式变换; (2) 采集姿态角补偿装置的内、外轴上安装的光电轴角编码器的实际转角值; (3) 通过定时器中断控制方式, 实现内、外轴上步进电动机的转角控制; (4) 将 ARM 的输入控制信号和内、外转轴的输出转角信息储存在上位机硬盘中。姿态角补偿装置的转台结构的负载仅为一个振镜装置, 故惯性、质量和体积均大大减小, 并且仅对激光束进行姿态角补偿, 其补偿频率和控制精度均提高, 可满足机载激光雷达对复杂姿态角波动的补偿要求。

3 姿态角补偿仿真实验系统搭建

3.1 半物理仿真实验系统结构组成

为验证姿态角补偿装置的补偿效果, 基于三轴转台、激光陀螺仪和姿态角补偿样机, 在实验室搭建了半物理仿真实验系统, 其总体硬件构成如图 3 所示。

半物理仿真实验系统中包括以下设备: ① 总控制及数据采集计算机, 自行设计的总控与数据采集软件; ② 三轴转台及其控制柜, 测角精度为 0.001° ; ③ 姿态角补偿样机及其上位机; ④ 激光测距仪, 测距精度为 1.5 mm ; ⑤ 激光陀螺仪, 测角精度为 0.01° ; ⑥ 被测地形模型, 采用白色聚苯乙烯制作, $500 \text{ mm} \times 380 \text{ mm} \times 275 \text{ mm}$, 表面有平面、斜坡、长方体和椭圆顶结构, 能模拟各种地形, 激光反射性好。

该系统中, 激光测距仪、姿态角补偿装置和激光陀螺仪均安装在三轴转台安装平台上。扫描振镜反射光点、姿态角补偿装置的旋转中心及三轴转台的旋转中心严格重合。地形模型安装在三轴转台正上方天花板上。三轴转台的旋转中心与被测地形模型的垂直距离为 1375 mm 。控制三轴转台的 x 轴 (内轴) 和 y 轴 (中轴) 分别进行幅值 3° 、频率 0.5 Hz 、初相角为零的正弦波动, 模拟机载平台的滚动角和俯仰角变化。扫描振镜匀速摆

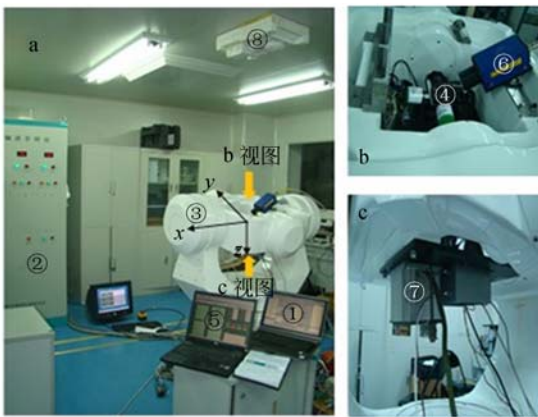


图 3 半实物仿真实验系统总体硬件构成。(a) 实验系统总照片;(b) 转台安装设备下视图;(c) 转台安装设备上视图

Fig. 3 Composition of hardware structure of semi-physical simulation system. (a) Whole photo of experimental system; (b) Bottom view of three-axis turntable installed devices; (c) Top view of three-axis turntable installed devices

动实现垂直于飞行航线的横向扫描被测地形,摆动角为 $\pm 8^\circ$ 。激光测距仪发射激光脉冲并进行回波测距。激光陀螺仪测量三轴转台模拟的滚动角和俯仰角的变化,提供给姿态角补偿装置,姿态角补偿装置反向转动滚动角和俯仰角变化值的一半,实时消除滚动角和俯仰角变化对激光扫描指向的偏移影响。

另外,为模拟机载激光雷达中飞机的前向飞行过程,给姿态角补偿样机施加绕 y' 轴的匀速单向转动,带动激光扫描振镜反射的激光扫描线匀速前移,实现对机载激光扫描过程中飞机前向运动的模拟。因此,姿态角补偿样机绕 y' 轴的转角运动是俯仰角补偿运动和匀速单向转角运动两者的叠加。

3.2 实验系统控制和数据流

根据激光脚点计算公式(1)和图 1 的机载激光雷达坐标转换关系可知,要获得精确的激光脚点空间坐标,需同步获得每个激光发射脉冲时的发射角、激光测距值、飞机姿态角值及补偿装置输出的角度值。因此,在半物理仿真实验中进行软件编程时,对各种设备采集数据时进行了时间同步。采用一台总控计算机对所有设备进行统一调控。图 4 所示为半物理仿真实验系统的控制流和数据流图。

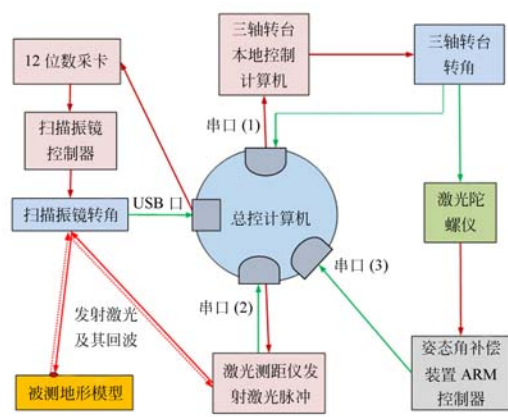


图 4 半物理仿真系统中的控制流和数据流

Fig. 4 Flows of control signal and sampling data in semi-physical simulation system

图 4 中,深红色实箭头线为控制信号流,绿色实箭头线为测量数据流,鲜红色实箭头线为出射激光束,鲜红色虚箭头线为激光回波(彩图见期刊电子版)。在总控计算机上,采用三个串口和一个 USB 口实现对五设备(三轴转台、激光测距仪、扫描振镜、姿态角补偿装置和激光陀螺仪)的时间同步控制和数据采集。通过串口(1)提供给三轴转台控制器内轴(x 轴)和外轴(y 轴)的转角幅值、频率和初相位,使内、中两轴分别进行正弦波动,模拟机载平台的滚动角和俯仰角波动,同时采集三轴转台两轴的实际转角值。通过 USB 口控制 12 位数据采集卡,产生模拟电压信号,控制扫描振镜左右摆动,同时采集扫描振镜实际转角值并反馈回总控计算机。通过串口(2)控制激光测距仪发射激光脉冲,经扫描振镜反射后对地形模型进行扫描,并获得激光测距值。激光陀螺仪测量三轴转台内、中两轴的实时转角值,提供给姿态角补偿装置,姿态角补偿装置一方面绕 x' 和 y' 分别反向转动滚动角和俯仰角值的一半;另一方面,还绕 y' 轴叠加单向匀速转动,模拟激光扫描的前向巡航过程。同时,激光陀螺仪的测量值和姿态角补偿装置的两轴实际转角值采集后通过串口(3)送入总控计算机中。

由于阵风湍流等外界干扰造成的飞行姿态角变化,其振动缓慢(一般为 $0.5 \sim 1$ Hz),幅值一般为 3° 左右。本补偿研究采用的数据测量和控制频率均为 50 Hz。根据采样定理,对于机载平台的姿态角变化为 $0.5 \sim 1$ Hz 来说,理论上采样频率为 $1 \sim 2$ Hz(即 2 倍的 Nyquist 频率)就可以满

足无失真的测量要求,一般采用 10 倍的 Nyquist 频率(即 5~10 Hz)来满足实际要求。这里采用的数据采样频率为 50 Hz(即 50~100 倍的 Nyquist 频率),故此频率足够以较高精度满足无失真的测量要求,同时也满足本研究中低频姿态角变化(0.5~1 Hz)的补偿控制时间响应要求。总控计算机中的总控软件采用 VC++ 编程,其流程为:(1)软件初始化,通过串口通信给外部设备设置初始参数。(2)在定时中断服务程序中,根据设计的姿态角波动函数,分别控制三轴转台内、中两轴转动相应角度,并采集两轴的实时转角数据;控制扫描振镜转动,从 -8° 匀速扫描到 $+8^\circ$,并采集扫描振镜的实时转角值;模拟激光脉冲重复频率为 10 kHz,激光扫描频率为 100 Hz,控制激光测距仪发射脉冲,并采集激光测距数据;控制姿态角补偿两轴转动,并采集装置两轴的实时转角;(3)重复定时中断过程,直到控制循环次数结束。

4 实验过程与结果

由半物理仿真系统模拟机载激光雷达的工作过程,对补偿装置的补偿效果进行验证。所获得的实验数据主要侧重于分析激光点云的补偿效果。获得了 4 种情况下激光点云的空间分布及其重建数字地表模型(Digital Surface Model, DSM)的高程精度,包括参考点云、理想激光点云、受姿态角波动影响的点云、经过姿态角补偿后的点云。通过比较姿态角补偿前和补偿后两种激光点云所重建 DSM 的高程精度,来反映所设计的姿态角补偿装置的补偿效果。具体实验步骤如下:

(1)参考点获取。三轴转台模拟的姿态角为零时,由姿态角补偿样机的 y' 轴单向匀速转动模拟飞机的飞行过程,由扫描振镜摆动扫描地形模型,共获得 151 条扫描线,每条扫描线含 151 个激光脚点。此激光点云(记为 P_{151D})为理想扫描情况下获得,点云密度高且均匀,重建 DSM 精度高、失真小,故将 P_{151D} 中 22 801 个点作为被测地形模型的参考点,用于评价后续其他点云所重建的 DSM 精度。

(2)理想点云获取。与步骤(1)中获得参考点云的方法相同,只是采样密度降低,共进行 101 条扫描线,每条扫描线含 101 个点,获得的点云未受

姿态角变化的影响,作为理想点云,记为 P_{101D} 。

(3)受姿态角波动影响的点云获取。当三轴转台内、中两轴分别进行幅值为 3° 、频率为 0.5 Hz 且初相位为零的正弦波动时,姿态角补偿样机的 y' 轴单向匀速转动模拟飞机的飞行过程,但姿态角补偿装置不起补偿作用。由扫描振镜摆动扫描,进行了 101 条扫描线,每条扫描线 101 个点,获得的点云为受滚动角和俯仰角波动影响的点云,记为 P_{101A} 。

(4)姿态角补偿后点云的获取。与步骤(3)相似,但姿态角补偿装置开始补偿工作,其 x' 轴和 y' 轴同时对滚动角和俯仰角的变化进行补偿。共进行了 101 条扫描线,每条扫描线有 101 个点的扫描,获得的点云为经过姿态角补偿后的点云,记为 P_{101C} 。

经过以上步骤,比较 P_{101D} 与 P_{101A} 及其重建 DSM 的精度,可分析滚动角和俯仰角波动对激光点云及 DSM 精度的影响;另外,通过比较 P_{101A} 与 P_{101C} 及其重建 DSM 的精度,可验证姿态角补偿装置对激光点云的补偿效果。获得的 4 种点云及其点云密度的三维图和重建 DSM 图,如图 5 所示。

与被测地形模型实物相比,实验获得的 DSM 三维成像与之非常符合,证明了半实物仿真实验系统工作原理的正确性。由图 5(c1)可知,滚动角和俯仰角波动造成了激光点云覆盖区域发生扭曲;图 5(c2)显示,姿态角波动造成点云密度的分布不均匀,其中下半部分的点云密度大大减小,而上半部分在小区域内增加。图 5(d1)显示,经过姿态角补偿装置补偿后,姿态角波动造成的激光点云覆盖区域的扭曲得到了矫正;由 5(d2)显示,经姿态角补偿后点云密度的不均匀分布得到了改善。

为比较姿态角补偿前后由点云重建的 DSM 精度的改善情况,采用 P_{151D} 的 22 801 个点作为被测地形模型的参考点,对另外 3 种点云(即 P_{101D} 、 P_{101A} 、 P_{101C})重建的 DSM 高程精度进行了计算和评价。为强化对比,采用了两种 DSM 高程精度插值计算方法,即线性平面插值方法(Linear Interpolation)和三次曲面插值方法(Cubic Interpolation)^[16-17],所获得的 3 种点云的 DSM 高程误差统计值如表 1 所示。

表 1 重建 DSM 的高程误差统计值

Tab.1 Statistics of elevation errors of reconstructed DSMs

Reconstructed DSMs from point clouds	DSM elevation errors/mm					
	Cubic interpolation			Linear interpolation		
	Mean	Std	RMS	Mean	Std	RMS
P_{101D}	-0.01	2.50	2.50	-0.01	2.60	2.60
P_{101A}	0.31	3.49	3.50	0.31	3.54	3.55
P_{101C}	-0.21	3.28	3.28	-0.25	3.23	3.28

从两种插值方法获得的 DSM 高程误差的 RMS 指标来看,由 P_{101C} 重建的 DSM 高程误差均为 3.28 mm,相对于由 P_{101A} 重建的 DSM 高程误差(线性平面插值为 3.50 mm,三次曲面插值为 3.55 mm)明显减小,表明 DSM 精度得到了改善和提高,从而证明设计的姿态角补偿装置具有很好的补偿效果。

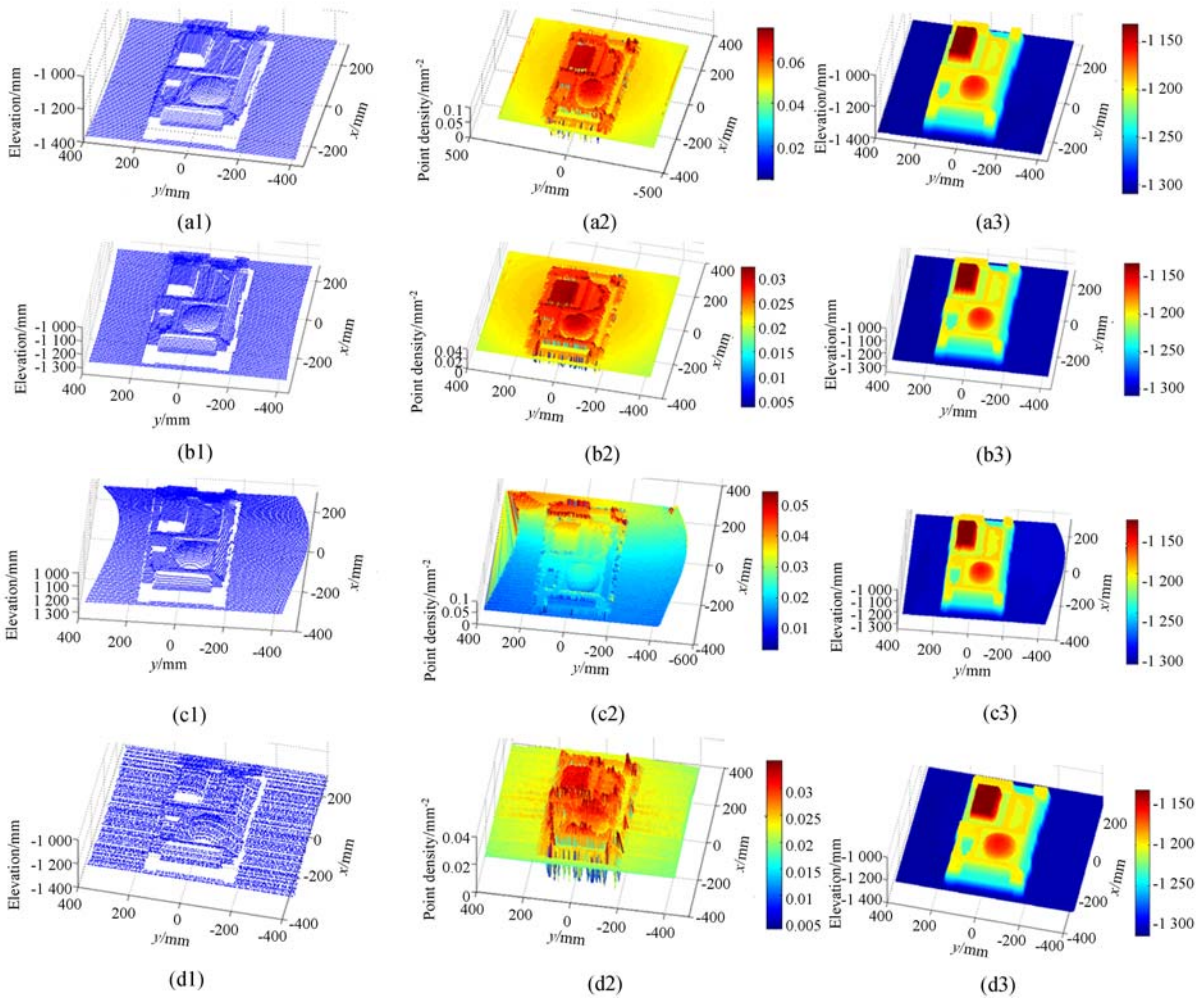


图 5 机载激光雷达姿态角影响及补偿半物理仿真系统实验结果。其中,a, b, c, d 依次代表四种点云,即 P_{151D} 、 P_{101D} 、 P_{101A} 、 P_{101C} ;1, 2, 3 分别为激光点云的空间分布三维图、点云密度图和重建 DSM; y 为扫描方向, x 为飞行方向

Fig. 5 Experimental results of semi-physical simulation system for airborne LiDAR' attitude effect and compensation. Herein, a, b, c, d represent four point clouds, i. e., P_{151D} , P_{101D} , P_{101A} , P_{101C} , respectively; 1, 2, 3 refer to 3-D images of point cloud, point density and reconstructed DSM, respectively; y is scanning direction, x is flight direction

5 结 论

本文通过分析机载激光雷达姿态角波动补偿原理设计了姿态角补偿样机,结合三轴转台等设备搭建了机载激光雷达姿态角补偿半物理仿真实验系统,编制了总控制软件,实现了各设备之间的

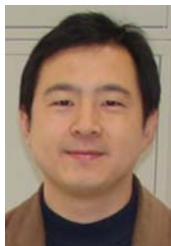
时间同步控制和数据采集,完成了姿态角补偿半实物仿真实验。半物理仿真实验结果表明,所设计的姿态角补偿装置的补偿原理是正确的,补偿后 DSM 高程误差的 RMSE 值在本实验中由 3.50 mm 和 3.55 mm 减小到 3.28 mm,对机载激光雷达点云产品质量起到了明显的补偿效果。

参考文献:

- [1] 张丽艳, 夷宏明, 刘胜兰. 在机测量激光测头位姿的线性标定[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(4): 681-689.
ZHANG L Y, YI H M, LIU SH L. Linear calibration for on-machine measurement of laser probe pose[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 681-689. (in Chinese)
- [2] 杨德山, 董丽丽, 梁倩倩, 等. 大型散货堆体积的快速测量[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(9): 2126-2133.
YANG D SH, DONG L L, LIANG Q Q, *et al.*. Rapid volume measurement for large bulk cargo[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2126-2133. (in Chinese)
- [3] 吴禄慎, 史皓良, 陈华伟. 基于特征信息分类的三维点数据去噪[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(6): 1465-1473.
WU L SH, SHI H L, CHEN H W. Denoising of three-dimensional point data based on classification of feature information[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1465-1473. (in Chinese)
- [4] 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): 0414001-1-0414001-6.
WANG J J, LIU J D. 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): 0414001-1-0414001-6. (in Chinese)
- [5] 刘志青, 李鹏程, 陈小卫, 等. 基于信息向量机的机载激光雷达点云数据分类[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(1): 210-219.
LIU ZH Q, LI P CH, CHEN X W, *et al.*. Classification of airborne LiDAR point cloud data based on information vector machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 210-219. (in Chinese)
- [6] 王建军, 徐立军, 李小路, 等. 姿态角扰动对机载激光雷达点云数据的影响[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(8): 1810-1817.
WANG J J, XU L J, LI X L, *et al.*. Impact of attitude deviations on laser point cloud of airborne LiDAR[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(8):1810-1817. (in Chinese)
- [7] BALTSAVIAS E P. A comparison between photogrammetry and laser scanning[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2-3): 83-94.
- [8] 王建军, 许同乐, 李东兴, 等. 机载平台 6-D 运动误差对 LiDAR 点云质量的影响比较[J]. 红外与激光工程, 2016, 42(8): 0830002.
WANG J J, XU T L, LI D X, *et al.*. Comparison of impacts of helicopter platform 6-D motion errors on point cloud quality from airborne LiDAR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 42(8): 0830002. (in Chinese)
- [9] WANG J J, XU L J, LI X L, *et al.*. An apparatus for compensating impacts of airborne platform attitude variations on LiDAR point clouds[C]. *Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE*, 2012: 1382-1386.
- [10] 李增彦, 李小氏, 周兆英, 等. 机载稳定平台半实物仿真方法研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(6): 60-63.
LI Z Y, LI X M, ZHOU ZH Y, *et al.*. Hardware-in-the-loop simulation method of airborne stabilized platform[J]. *Electronics Optics & Control*, 2016, 23(6):60-63. (in Chinese)
- [11] 王日俊, 白越, 续志军, 等. 多旋翼无人飞行器机载云台的复合稳定控制方法[J]. 电光与控制, 2016, 23(4): 17-22.
WANG R J, BAI Y, XU ZH J, *et al.*. Composite stability control of airborne platform mounted on multi-rotor UAV[J]. *Electronics Optics & Con-*

- trol, 2016, 23(4): 17-22. (in Chinese)
- [12] Leica Geosystems. Leica ALS70-HP product specifications[EB/OL]. [2018-02-05]. <http://www.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=18534>. pdf.
- [13] Optech. ALTM Pegasus HA500-summary specification sheet [EB/OL]. [2018-02-05]. http://www.optech.com/wp-content/uploads/specification_altm_pegasus.pdf.
- [14] 王建军. 基于正交化实验对影响机载激光雷达测量精度的工作参数进行最优化设计[J]. 中国激光, 2013, 42(2): 0214003.
WANG J J. Optimized design of parameters affecting the accuracy of airborne LiDAR by using orthogonalization-based experiments [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 42(2): 0214003. (in Chinese)
- [15] BALTSAVIAS E P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2-3): 164-198.
- [16] DICKMAN J, DE HAAG M U. Aircraft heading measurement potential from an airborne laser scanner using edge extraction[C]. *Proceedings of 2007 IEEE Aerospace Conference, IEEE*, 2007: 1-16.
- [17] 王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0314001.
WANG J J, XU L J, LI X L. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0314001. (in Chinese)

作者简介:



王建军(1973—),男,山东淄博人,博士,副教授,2004年于南京理工大学获得硕士学位,2013于北京航空航天大学获得工学博士学位,主要研究方向为机载激光雷达三维成像、误差分析及补偿技术。E-mail: wangjianjun@sdut.edu.cn



李云龙(1993—),山东泰安人,男,硕士研究生,2015年于山东理工大学获得学士学位,主要研究方向为机载激光雷达姿态角补偿装置智能控制技术研究。E-mail:1205966359@qq.com