

## 车载 LiDAR 扫描系统安置误差角检校

田祥瑞<sup>1</sup>, 徐立军<sup>2</sup>, 徐 腾<sup>1</sup>, 李小路<sup>1</sup>, 张勤拓<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191; 3. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 车载激光雷达系统是集成激光扫描仪(LS)、全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(INS)等于一体的多传感器集成系统。激光雷达系统多传感器的时空对准是实现数据融合及高精度三维测量的保障, 其中扫描系统安置误差角是影响激光测量点定位精度的主要因素之一。首先分析了车载激光雷达系统中的相关坐标系及坐标系之间的空间转换关系, 提出了一种以带有竖直边沿的竖直墙面作为检校场, 对 LiDAR 扫描系统与惯性导航系统之间的安置误差角进行检校的方法。通过构建的车载 LiDAR 系统安置误差角的检校对所提出的检校方法进行了实验验证。

**关键词:** 系统检校; 车载 LiDAR; 坐标转换; 安置误差角

**中图分类号:** TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3292-06

## Calibration of installation angles for mobile LiDAR scanner system

Tian Xiangrui<sup>1</sup>, Xu Lijun<sup>2</sup>, Xu Teng<sup>1</sup>, Li Xiaolu<sup>1</sup>, Zhang Qintuo<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Novel Inertial Instruments and Navigation System Technology, Beijing 100191, China;

2. Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of Ministry of Education, School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Mobile LiDAR system is a multi-sensor integrated system, including laser scanner (LS), global positioning system(GPS), inertial navigation system(INS), and so on. Space registration is the key to get high precision 3D mapping. The installation angle error of LS is one of the main factors which influence the measurement accuracy. The related coordinate systems and transformations were introduced first. A method using vertical facade of a building wall to calibrate installation angles between LS and INS was proposed. A vehicle-borne LiDAR 3D mapping system was built to test the method.

**Key words:** system calibration; mobile LiDAR; coordinate transformation; installation angle error

收稿日期: 2014-02-21; 修订日期: 2014-03-28

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724001); 国家自然科学基金(61201316, 61121003); 高等学校博士学科点专项科研基金(20121102120040)

作者简介: 田祥瑞(1986-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达三维成像技术方面的研究。Email: txr1986@163.com

导师简介: 徐立军(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达三维成像及目标探测等方面的研究。

Email: lijunxu@buaa.edu.cn

## 0 引言

激光雷达三维扫描成像是近年来随着激光测距技术、惯性导航技术、计算机技术和 GPS 技术等的发展而发展起来的一种新型快捷的三维测量方法。根据搭载激光雷达系统的不同平台,主要可以分为地面激光雷达<sup>[1]</sup>、车载激光雷达<sup>[2]</sup>、船载激光雷达、机载激光雷达和星载激光雷达<sup>[3]</sup>。

激光雷达系统是空间三维和时间一维的四维系统。空间三维信息由激光测距系统、惯性导航系统、GPS 定位系统共同获得。一维时间信息由 GPS 授时提供,外加其他定时器或计数器,从而以时间为基准进行多传感器数据融合,进而实现空间配准和时间配准<sup>[4]</sup>。当传感器测量精度一定的情况下,传感器间的安置角误差是影响扫描成像精度的主要因素。对激光扫描仪方位元素的标定,目前主要采用在检校场设置控制点进行静态检校<sup>[5]</sup>,但是这种方法增加了系统检校的复杂性,必须设定大量固定的特征点目标,而且要从扫描点中精确提取特征点位置。在一些快速扫描情况下不具有更好的实效性。同样的问题存在于机载 LiDAR 的系统检校中,为此出现了利用航带重叠区域数据方法<sup>[6]</sup>、航带平差法<sup>[7]</sup>、分步几何法<sup>[8]</sup>等在航动态检校方法。然而未见针对车载激光雷达系统的动态检校方法研究,为保障车载激光雷达系统的快捷性,需要一种简捷的系统检校方案。

文中首先介绍车载激光雷达系统相关坐标系间的转换关系,提出了一种利用垂直墙面的激光扫描仪的安置误差角快速检校方法。该方法无需设定特征点,通过两次扫描垂直墙体即可得到激光扫描仪的安置误差角。最后给出车载激光雷达系统的实际实验验证。

## 1 坐标空间变换基础

车载激光雷达系统的相关坐标系包括:瞬时激光束坐标系  $o-x_{sl}y_{sl}z_{sl}$ 、激光扫描仪参考坐标系  $o-x_Ly_Lz_L$ 、惯性平台参考坐标系  $o-x_Iy_Iz_I$ 、当地水平参考坐标系  $o-x_Gy_Gz_G$ 、WGS-84 坐标系  $o-x_{84}y_{84}z_{84}$ , 如图 1 所示。

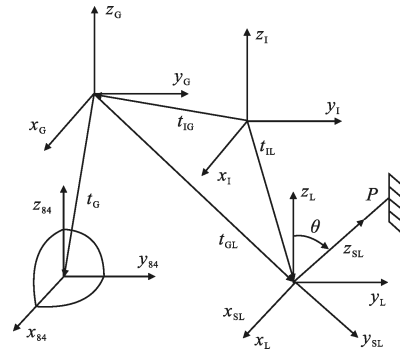


图 1 车载激光雷达系统相关坐标系

Fig.1 Coordinate systems of mobile LiDAR system

激光脚点从瞬时激光束坐标系到 WGS-84 坐标系的坐标变换关系可以写成下式形式<sup>[9]</sup>:

$$\begin{bmatrix} x_{84} \\ y_{84} \\ z_{84} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \\ z_{GPS} \end{bmatrix} + R_W \left[ R_N \left[ R_M \cdot R_L \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_{LI} \\ \Delta y_{LI} \\ \Delta z_{LI} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_{IG} \\ \Delta y_{IG} \\ \Delta z_{IG} \end{bmatrix} \right] \right] \quad (1)$$

式中:  $S$  为某一瞬间激光扫描测距测得的激光发射点到激光脚点  $P$  间的距离;  $R_L$  是关于扫描角的旋转矩阵。记瞬时激光束在激光扫描仪参考坐标系下的扫描角为  $\theta$ , 则  $R_L$  可以记为:

$$R_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$R_M$  为激光扫描仪与惯性测量传感器之间的旋转矩阵。假设惯性平台参考坐标系的  $x_I$  轴指向平台的运动方向, 记绕  $y_I$  轴旋转的俯仰安置误差角  $\alpha$ , 绕  $x_I$  轴旋转的侧滚安置误差角  $\beta$ , 绕  $z_I$  轴旋转的偏航安置误差角  $\gamma$ ,  $R_M$  为:

$$R_M = R_{\alpha y} \cdot R_{\beta x} \cdot R_{\gamma z} \quad (3)$$

其中

$$R_{\alpha y} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_{\beta x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_{\gamma z} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$(\Delta x_{LI}, \Delta y_{LI}, \Delta z_{LI})^T$  为激光扫描仪参考坐标系的坐标原点与惯性平台参考坐标系的坐标原点之间的偏

心量,  $(\Delta x_{IG}, \Delta y_{IG}, \Delta z_{IG})^T$  为 GPS 天线相位中心与惯性平台的参考中心之间的偏心量。

$R_N$  为惯性参考坐标系到当地水平参考坐标系之间的旋转矩阵, 惯性导航系统(INS)测得的俯仰角  $\varphi$ 、侧滚角  $\omega$  和偏航角  $\kappa$  是惯性平台参考坐标系到当地水平参考坐标系的三个旋转欧拉角。则  $R_N$  可以写为:

$$R_N = R_\varphi R_\omega R_\kappa \quad (7)$$

其中

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_\kappa = \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$R_W$  为当地水平坐标系到 WGS-84 坐标系的旋转矩阵,  $(x_{GPS}, y_{GPS}, z_{GPS})^T$  是 GPS 相位中心在 WGS-84 坐标系下的位置。GPS 测得结果是 GPS 相位中心的经纬度和海拔, 用  $(B, L, H)$  来表示, 其中  $B$  是纬度,  $L$  为经度,  $H$  为海拔, 则有:

$$R_W = \begin{bmatrix} -\cos L \sin B & -\sin L & -\cos L \cos B \\ -\sin L \sin B & \cos L & -\sin L \cos B \\ \cos B & 0 & -\sin B \end{bmatrix} \quad (11)$$

GPS 的相位中心在 WGS-84 坐标系下的位置与经纬度和海拔的关系为:

$$\begin{bmatrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \\ z_{GPS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H)\cos B \cos L \\ (N+H)\cos B \sin L \\ [N(1-e^2)+H]\sin B \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $e$  为第一偏心率;  $N$  为卯西圈曲率半径。计算公式如下:

$$N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} \quad (13)$$

式中:  $a$  为 WGS-84 椭球的长半轴,  $a = 6\,378\,137\text{ m}$ ;  $e^2 = 0.006\,694\,379\,990\,13$ 。

从上式可以看出, 旋转矩阵  $R_W$  由 GPS 测得的经纬度计算得出,  $R_N$  由惯性导航系统(INS)测得的三个姿态角计算得出,  $R_L$  由扫描角计算得出,  $(x_{GPS}, y_{GPS}, z_{GPS})^T$  由 GPS 测得经纬度计算得出,  $(0, 0, S)^T$  由激光测距得出。偏移量  $(\Delta x_{LI}, \Delta y_{LI}, \Delta z_{LI})^T$  和  $(\Delta x_{IG}, \Delta y_{IG},$

$\Delta z_{IG})^T$  可通过静态测量得到较精确的值。因此系统检校的关键是对安置角误差  $\alpha, \beta, \gamma$  进行测量。

## 2 检校方法

如图 2 所示, 选择具有较高竖直墙面的高楼作为检校场, 高楼表面较平整, 有竖直墙角, 车载激光雷达系统在离高楼一定距离时扫描高楼墙面。

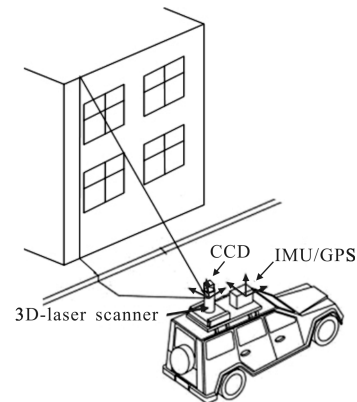


图 2 车载激光雷达系统检校示意图

Fig.2 System calibration of mobile LiDAR system

### 2.1 侧滚向安置误差角检校

在三个姿态安置误差角中, 唯有侧滚向安置误差角使得计算得到的高楼竖直面上的扫描线产生倾斜, 如图 3 所示。理想的竖直墙面上的激光扫描线是竖直的, 当有侧滚角安置误差时, 则通过坐标转换之后的扫描线发生倾斜, 倾角即是侧滚向安置误差角。通过测量倾斜扫描线上的上下两端的两个激光脚点之间的水平方向上的距离差值与竖直方向上的距离差值, 在安置误差角角度较小的情况下, 可以认为比值即为侧滚向安置误差角, 如下式所示:

$$\beta = \frac{y_U - y_D}{z_U - z_D} \quad (14)$$

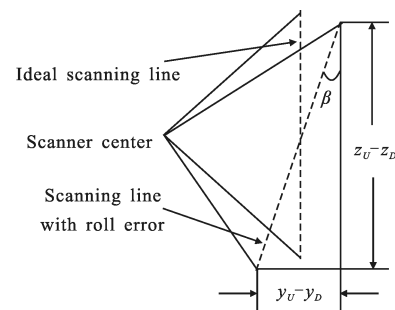


图 3 侧滚向安置误差角对扫描线的影响

Fig.3 Influence of roll placement angle error on scan line

### 2.2 俯仰向安装误差角检校

当车载激光雷达系统存在俯仰向安装误差角时, 实际扫描线产生倾斜, 因此计算得到的墙体竖直边会呈现出一条斜边, 如图 4 所示, 竖直的墙边变成了一条斜边, 这条线与垂线的夹角即为俯仰向安装误差角  $\alpha$ , 较准确的计算方法是这些斜边上的点投影竖直平面上, 拟合出这条直线, 由其斜率求得  $\alpha$ 。一种较便捷的计算方法如图中所示, 选取斜边上较远的两个激光脚点, 计算其水平方向上的距离及竖直方向上距离, 在安置误差角角度较小的情况下计算其比值得到, 如下式所示:

$$\alpha = \frac{x_U - x_D}{z_U - z_D} \quad (15)$$

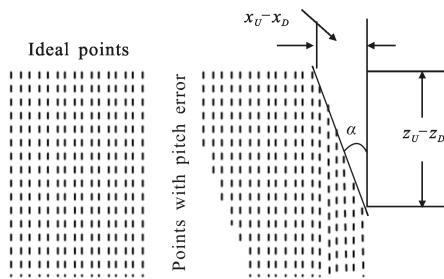


图 4 俯仰向误差角对点云分布的影响

Fig.4 Influence of pitch placement angle error on point cloud distribution

### 2.3 航向安置误差角检校

为显现出车载激光雷达系统航向安置误差角对激光脚点的影响, 需要车载激光雷达系统与墙体远近不同的垂直距离对竖直墙体进行两次扫描, 如图 5 所示。

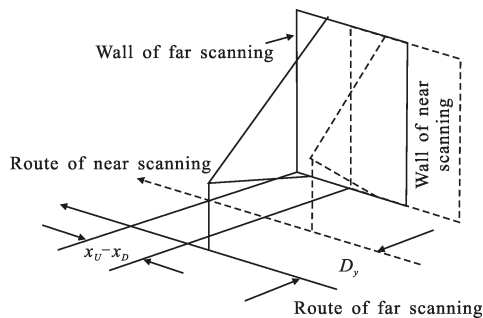


图 5 航向安置误差角对激光点云分布的影响

Fig.5 Influence of yaw placement angle error on point cloud distribution

存在航向安置误差角的情况下, 不同距离对对竖直墙体扫描的点云在航向上的分布影响是不同的,

通过测量同一墙体边缘在航向上的位置差  $x_U - x_D$  和两次扫描航线之间的距离  $D_y$ , 在误差角较小的情况下求其比值, 即可得到航向安置误差角, 如下式所示:

$$\gamma = \frac{x_U - x_D}{D_y} \quad (16)$$

一般安置角误差较小, 利用以上所述方法就可以方便、快速地将安置误差角解算出来。但三个安置误差角对激光脚点的影响是综合的, 非线性的。仅有当安置误差角较小的情况下可以近似成线性的。安置误差角的检校方案是让车载系统平台以较远的距离对墙体进行整体扫描。首先检校侧滚向的安置误差角, 得到没有侧滚向误差角的点云, 提取墙体竖直边沿的点进行计算得到俯仰向安置误差角; 然后在离墙体较近的情况下再次对竖直墙体进行整体扫描一次, 将两次整体扫描的点云一起利用检校得到的安置误差角进行校准, 得到不含侧滚、俯仰向安置误差角的点云; 最后利用 2.3 节所述方法测得航向安置误差角。

## 3 实验

### 3.1 实验系统

基于 Rigel 激光扫描仪 Riegl LMS-Q120i 搭建了一套车载激光雷达三维扫描成像系统, 如图 6 所示。

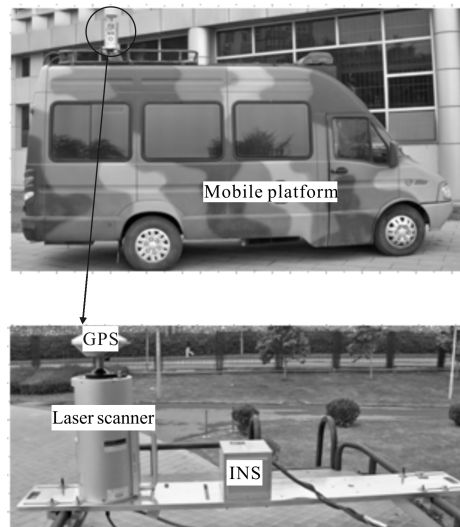


图 6 基于 Riegl 激光扫描仪 LMS-Q120i 的车载 LiDAR 三维扫描成像系统

Fig.6 Mobile LiDAR system based on Riegl LMS-Q120i scanner

系统由激光扫描仪、INS、差分 GPS 以及车载平台组成。选择了如图 7(a)所示的楼房侧立面进行系统检

校,对侧立面进行了距离较近和较远两次扫描,两次运行线路相距 80.25 m,以 GPS UTC 时间为基准进行数据融合,得到的点云如图 7(b)所示。图中坐标系选择墙体点云的平均经纬度对应的水平面为  $xy$  平面。从图 7(b)中可以看出,由于系统的安装误差,两次扫描得到的墙体点云并不重合。

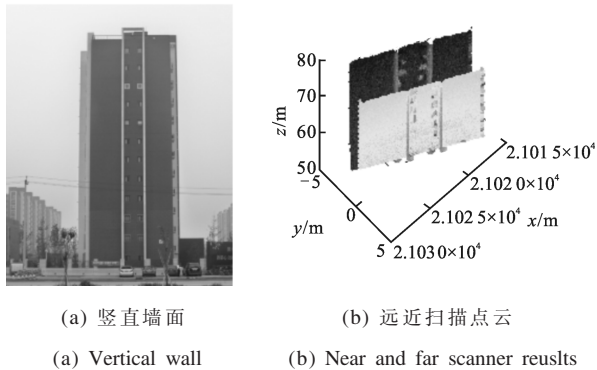


图 7 用于系统检校的楼房侧立面

Fig.7 Side elevation of wall for system calibration

### 3.2 检校实验

#### 3.2.1 侧滚与俯仰向检校

选取较远距离扫描测得的墙体点云,提取墙体上边沿和下边沿点,上下边沿的竖直距离是 50 m。首先拟合出两条边沿所在直线,计算垂直于墙体方向之间的距离。然后提取墙体的竖直边沿点进行拟合,计算沿墙体方向之间的距离,求得其侧滚向和俯仰向的安置误差角。图 8(a)为检校前提取的墙体上下边沿,图 8(b)为侧滚和俯仰向检校后的上下墙体边沿。检校前墙体上下边沿沿垂直和平行于墙体方向上的距离为 0.198 9 m 和 0.065 0 m,对应侧滚向误差角为 0.392 9°,俯仰向误差角为 -0.128 4°。

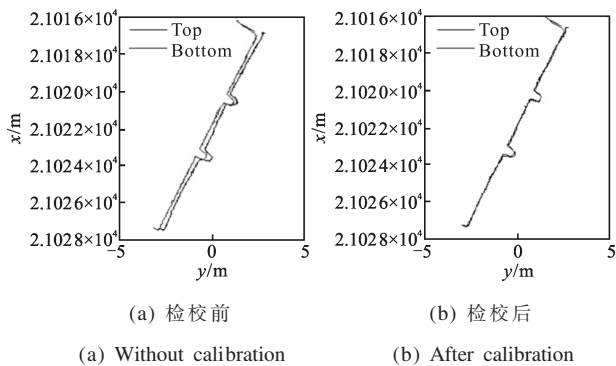


图 8 侧滚向和俯仰向安置误差角检校前后墙体上下边沿

Fig.8 Top and bottom of wall before and after roll and pitch errors calibration

#### 3.2.2 航向安置误差角检校

利用检校得到的俯仰向、侧滚向安置误差角对扫描数据进行检校,消除俯仰向、侧滚向安置误差角的影响。提取远近两次扫描墙体同一竖直边沿的点云数据,计算由于航向安置角造成的两次扫描竖直边缘沿墙体方向上的移动量为 1.106 6 m,对应航向安置误差角为 0.790 0°。图 9 为检校前后远近两次扫描墙体底部边沿,检校前两次扫描的墙体没能重合,检校后重合较好。

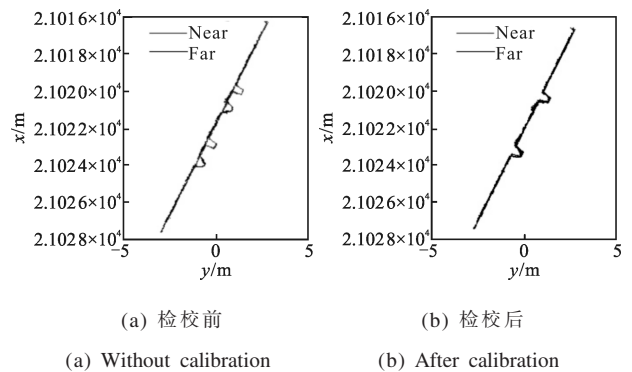


图 9 航向安置误差角检校前后两次扫描得到的墙体底部边沿

Fig.9 Bottom of wall of near and far scanning before and after yaw error calibration

通过检校得到激光扫描仪的安置误差角为俯仰向  $\alpha=-0.128 4^\circ$ 、侧滚向  $\beta=0.392 9^\circ$ 、航向  $\gamma=0.790 0^\circ$ 。两次扫描的墙体点云检校前后的水平分布如图 10 所示。可以看出,检校后点云分布更集中,两次扫描获得点云也能较好地重合。由于扫描仪的测距精度为 20 mm,因此检校后墙体表面点云依然有一定的厚度。

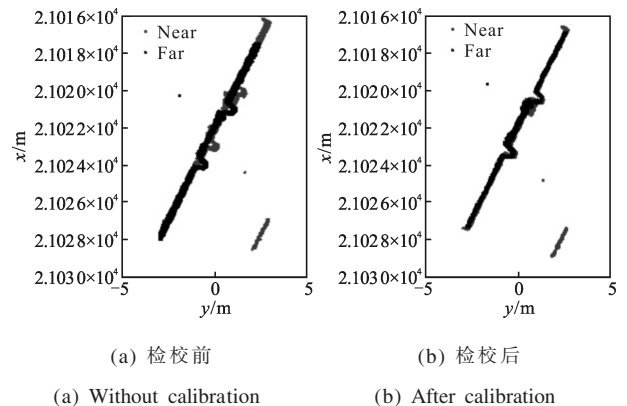


图 10 两次扫描的墙体点云水平分布

Fig.10 Horizontal distribution of point cloud of wall of near and far scanning

## 4 讨论

为了得到精确的检校结果, 所选择的墙体应该是竖直的, 表面较平, 有较明显的竖直的边沿。墙体越高, 两次扫描相距越远, 可以得到越好的检校结果。因此选择检校楼面时, 要选择较竖直、较高的楼面, 同时可以远距离扫到的楼面。为了较准确地提取墙体特征, 应该有较密的墙体点云, 因此在扫描时车的运动速度越慢越好。

为了得到竖直的墙体点云, 应该将坐标系转换到墙体对应的水平参考坐标系里。为消除坐标变换带来的墙体倾斜, 以墙体的平均经纬度对应的水平面作为成像水平坐标系的水平面。

与设置特征点进行系统检校相比, 文中方法不需要设置特征点的特定检校场, 可以在系统测量过程中选择合适的竖直楼面进行随时随地的检校。

## 5 结论

车载激光三维扫描成像系统是集成激光扫描仪、GPS、INS 等为一体的多传感器系统, 系统检校是提高测量精度的必要步骤。文中提出了一种适用于车载激光雷达扫描系统的安置误差角检校方法, 利用墙体的竖直特征信息, 只需要扫描两次, 无需设置特征点, 是一种简单、有效的扫描系统安置角误差检校的方法。利用集成的车载系统进行了实验验证, 实验结果显示所提方法具有可行性和实用性。

### 参考文献:

- [1] Xu Jinjun, Zhang Minwei. Status and development of terrestrial laser scanner [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2007(1): 47-50. (in Chinese)  
徐进军, 张民伟. 地面三维激光扫描仪: 现状与发展[J]. 测绘通报, 2007(1): 47-50.
- [2] Shen Yan, Li Lei, Ruan Youtian. Mobile mapping technology by vehicle-borne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 438-440. (in Chinese)  
沈严, 李磊, 阮友田. 车载激光测绘技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 438-440.
- [3] Pfeifer N, Mandiburser G. Topography laser ranging and scanning: principle and processing [R]. Taylor & Francis Group, LLC, 2008: 315-316.
- [4] Shi Bo, Lu Xiushan, Wang Dong, et al. Space and time registration of vehicle-borne 3D measurement system based on multi-sensor fusion [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(9): 14-19. (in Chinese)  
石波, 卢秀山, 王冬, 等. 基于多传感器融合的车载三维测量系统时空配准[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 14-19.
- [5] Kang Yongwei, Zhong Ruofei, Wu Yu. Research of calibrating vehicle laser scanner's external parameters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 249-253. (in Chinese)  
康永伟, 钟若飞, 吴隼. 车载激光扫描仪外参数标定方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 249-253.
- [6] Wang Cheng, Menenti M, Stoll M P, et al. Error analysis and correction of airborne LiDAR data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 390-397. (in Chinese)  
王成, Menenti M, Stoll M P, 等. 机载激光雷达数据的误差分析及检校[J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 390-397.
- [7] Habib A, Kersting A P, Bang K. Impact of LiDAR system calibration on the relative and absolute accuracy of the adjusted point cloud [C]//EuroCOW Workshop on Integrated Systems for Sensor Georeferencing and Navigation, Working Group 1/5, Spin, 2010: 171-195.
- [8] Zhang Hande, Liu Yanxiong, Bie Jun, et al. Optimized design for airborne LiDAR calibration test [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(1): 7-11. (in Chinese)  
张汉德, 刘炎雄, 别君, 等. 机载 LiDAR 系统校准方案优化设计[J]. 海洋通报, 2011, 30(1): 7-11.
- [9] Wang Dong, Lu Xiushan. Realization of multi-coordination system conversion on vehicle-borne 3D information acquisition system [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(4): 35-37. (in Chinese)  
王冬, 卢秀山. 车载式三维信息采集系统中多坐标系统转换实现[J]. 测绘科学, 2007, 32(4): 35-37.