

# 一种地面移动激光成像系统的视准轴误差 自标定方法研究

孟宪刚<sup>1</sup> 胡少兴<sup>2</sup> 张爱武<sup>1</sup> 段乙好<sup>1</sup> 张 晓<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

<sup>2</sup> 北京航空航天大学机械工程与自动化学院, 北京 100191

**摘要** 视准轴角度误差直接影响移动激光成像系统(MMS)的点云精度,尤其是在多路线、多角度下扫描同一区域时,不理想的视准轴误差估计会造成重叠区域无法无缝拼合。针对上述问题,提出了一种基于平面特征的地面移动激光成像系统的视准轴误差自标定方法,给出移动激光成像系统的点云生成模型,依据三维场景中的平面特征,建立 Gauss-Helmert 平差模型,依据最小二乘法,推导出计算视准轴误差的方程。实验结果表明,提出的方法不需要特殊的定标场,只需在数据采集过程中以不同方位扫描同一平面特征就可以计算出视准轴误差,且计算结果可靠有效。

**关键词** 机器视觉; 移动激光成像系统; 视准轴误差; Gauss-Helmert 模型; 平面特征; 自标定

**中图分类号** TN959.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1108008

## A Self-Calibration Method for Bore-Sight Error of Ground-Based Mobile Mapping System

Meng Xiangang<sup>1</sup> Hu Shaoxing<sup>2</sup> Zhang Aiwu<sup>1</sup> Duan Yihao<sup>1</sup> Zhang Xiao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China  
<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** Bore-sight error estimation for the mobile mapping system (MMS) plays an extremely important role in the quality of the point cloud, especially when the MMS scans the same area from different routes and angles, unideal bore-sight error estimation seriously reduce the point cloud registration accuracy. For fine calibration of the bore-sight error, a bore-sight error self-calibration method based on plane fetures of MMS is propped, the computing model of point cloud of MMS is given, the Gauss-Helmert adjustment model is established based on plane features of MMS, and the solution is derived based on the least square method. The experiment results show that the bore-sight error is easily computed by the proposed method, and the computation result is reliable and effective

**Key words** machine vision; mobile mapping system; bore-sight error; Gauss-Helmert model; plane feature; self-calibration

**OCIS codes** 150.1135; 110.2990; 120.4820

收稿日期: 2014-03-19; 收到修改稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家科技支撑计划(N2012BAH31B01)、国家自然科学基金(41071255)、北京市自然科学基金重点项目(B类)(KZ201310028035)、教育部博士点基金(20131108110005)

作者简介: 孟宪刚(1984—),男,博士研究生,主要从事车载成像系统的集成与应用等方面的研究。

E-mail: mxg\_gxm@sina.com

导师简介: 胡少兴(1984—),男,博士,副教授,主要从事空间信息技术、三维激光与高光谱成像、计算机视觉与机器人等方面的研究。E-mail: husx98@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

# 1 引 言

近些年来,移动激光成像系统(MMS)因其可以快速获取高密度和高精度的三维(3D)点云,使得点云处理技术被广泛应用于城市测绘、增强现实(AR)、环境保护等领域<sup>[1-3]</sup>。移动激光成像系统由二维激光扫描仪、定位定向系统(POS)和地面移动平台组成。为获得被测目标的三维点云,MMS需要借助POS,实现由激光坐标系到WGS84坐标系的转换,在这个过程中,影响MMS点云精度的因素很多<sup>[4]</sup>,除了激光入射角和测绘点目标的反射率之外,最重要的限制因素就是POS数据的位置、姿态误差和未正确补偿的视准轴、偏心距误差。视准轴误差是在集成MMS时,由于固有的安装限制,使得二维激光传感器的坐标系与POS本体坐标系的三个轴向不能精确对齐导致的。偏心距可以通过传感器提供的尺寸参数结合全站仪等手段测量得到,且其对系统定位误差的影响会随着测距长度的变大而减小。但是,视准轴角误差只能通过实验的方法进行标定,且不可忽略不计。

传统视准轴误差的标定有4种方法:1)利用一组重叠航带的点云<sup>[5-6]</sup>,通过最小二乘法计算视准轴角误差,其所估算的视准轴精度常常受限于由数据插值得到的点云数据;2)手动调整角度,直到看到具有一定特征的点云数据已重叠<sup>[7]</sup>;3)通过建立

地面控制点方法来进行视准轴检校<sup>[8]</sup>;4)通过最近邻迭代(ICP)算法使其共面平面特征的差异最小化计算视准轴角误差<sup>[9-10]</sup>。这几种方法大都针对航空激光扫描成像系统,且前三种方法限制条件较为严格。一般来说,如果二维激光扫描传感器和POS在移动平台上的相对位置发生改变后,在使用之前必须重新定标,每次标定非常耗时;第4种方法需要在多路线、多角度下尽量扫描到同一平面以计算平面的法线和质心,但由于激光点云的离散性,并不能保证每次都能扫描到完整的平面。上述4种方法都是基于数据驱动的视准轴误差校正方法,并没有考虑MMS系统误差对点云精度的影响。

# 2 基于平面特征的视准轴误差定标法

视准轴角误差对点云坐标误差的影响可以用(1)式近似表示为

$$\epsilon_{\text{boresight}}[m] = D[m] \times \theta_{\text{boresight}}, \quad (1)$$

式中 $\theta_{\text{boresight}}$ 为视准轴角误差(以弧度表示), $\epsilon_{\text{boresight}}$ 为点云坐标误差, $D$ 为激光雷达(LiDAR)到被测目标点的距离。

如图1所示,当在不同方位下扫描同一平面特征时,会导致LiDAR到被测目标点的距离发生变化,根据(1)式可知,扫描得到的点云将会不完全共面。

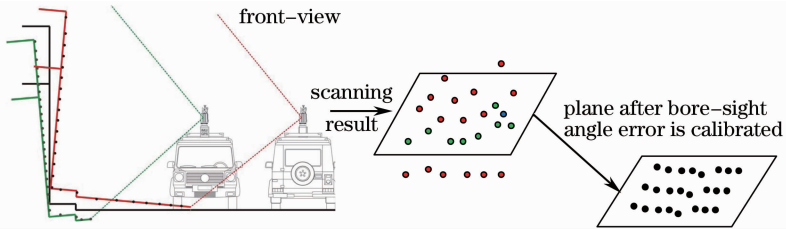


图1 基于平面特征的视准轴角误差校正原理

Fig.1 Calibration principles of bore-sight angle error based on planar feature

针对现有算法的不足,本文以“视准轴角误差会导致多方位扫描同一平面特征时所获得的点云不共面”为依据,提出了基于 Gauss-Helmert 平差模型的 MMS 视准轴误差自标定方法。根据点云生成模型、平面特征的几何模型以及观测值精度,建立起严格的数学模型;对函数模型线性化得到 Gauss-Helmert 平差模型;根据最小二乘法原理推导出计算视准轴角误差的法方程。本标定方法无需在使用前对 MMS 进行标定,只要在所采集的数据中包含平面特征,就可以实现自标定。

# 3 计算视准轴角误差

Gauss-Helmert 平差模型(一般平差模型或混

合模型)是著名的 Gauss-Markov 平差模型的扩展模型<sup>[11]</sup>。在解算 Euler-Liouville 方程时,由于平差问题中的观测值和未知参数不能通过变换观测值和未知参数之间的函数关系而分开,Gauss-Helmert 平差模型允许求解一个带有条件方程的最优化问题。为了能够利用线性 Gauss-Helmert 模型求解未知参数,非线性的条件方程需要通过一阶泰勒级数展开式进行线性化。Gauss-Helmert 方程的一般形式为

$$f(l, x) = Ax + Bv + w = 0, \quad (2)$$

式中 $l$ 为观测量, $x$ 为未知参数, $A$ 为对未知参数求一阶偏导后的设计矩阵, $B$ 为对观测量求一阶偏导后的设计矩阵, $w$ 为闭合差向量。

### 3.1 MMS 定位模型

根据(3)式可知,激光脚点的坐标是 MMS 每个

传感器的观测值和这些传感器之间的安置参数综合变换的结果。

$$X(t)_{\text{target}} = X_0(t) + R_{\uparrow}^i(t) \mathbf{R}_b^i(t) \left\{ \mathbf{R}_s^b \begin{Bmatrix} [\rho(t) + \Delta\rho] \cos \theta(t) \\ 0 \\ [\rho(t) + \Delta\rho] \sin \theta(t) \end{Bmatrix} + \mathbf{l}_0 \right\}, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{l}_0$  为 LiDAR 坐标系与惯性测量单元(IMU)坐标系之间的偏心量,  $\mathbf{R}_s^b$  为 LiDAR 坐标系统到 IMU 坐标系统的旋转矩阵,这两个矩阵都是常量矩阵;在  $t$  时刻下,  $X(t)_{\text{target}}$  为激光脚点在 WGS84 坐标系下的坐标,  $\rho(t)$  为 LiDAR 坐标系原点到激光脚点的距离,  $\theta(t)$  为激光束在 LiDAR 坐标系  $XOZ$  平面与  $X$  轴的夹角,  $\mathbf{R}_b^i(t)$  为 IMU 坐标系到本地水平坐标系的旋转矩阵,  $\mathbf{R}_{\uparrow}^i(t)$  为本地水平坐标系到 WGS84 坐标系的旋转矩阵,  $X_0(t)$  为在 WGS84 坐标系下的全球定位系统(GPS)中心坐标;  $\Delta\rho$  为 LiDAR 的测距系统误差。

如果考虑定位模型中包含视准轴角误差的话,则  $\mathbf{R}_s^b = \mathbf{R}_{s \Delta\text{bore-sight}}^b * \mathbf{R}_{s \text{estimated}}^b$ , 其中  $\mathbf{R}_{s \Delta\text{bore-sight}}^b$  为视准轴角误差的补偿矩阵,  $\mathbf{R}_{s \text{estimated}}^b$  为视准轴角的近似值。

从(3)式亦可得出,激光脚点的生成模型是非线性的,因此,当 MMS 的方位发生改变时,视准轴角误差对激光脚点的影响是不同的,点与点之间的拓扑关系将发生变化,符合本文基于平面特征的视准轴误差校正的理论前提。

### 3.2 函数模型

在城市环境中, MMS 所采集的 3D 点云中包含了丰富的平面几何特征,例如建筑物的屋顶和表面、路面和桥梁表面等。这些平面的 3D 方程可定义为

$$ax + by + cz - d = 0, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{c}$  是平面的法线矢量,  $d$  是原点到平面的距离。平面参数满足以下约束条件:

$$g(\hat{x}) = a^2 + b^2 + c^2 - 1 = 0. \quad (5)$$

位于这些平面上的点云应该满足函数模型

$$f(\hat{l}, \hat{x}) = [\hat{a} \ \hat{b} \ \hat{c}] \left\{ \hat{X}_0(t) + \hat{R}_{\uparrow}^i(t) \hat{R}_b^i(t) \left\{ \hat{R}_s^b \begin{Bmatrix} [\hat{\rho}(t) + \Delta\rho] \cos \hat{\theta}(t) \\ 0 \\ [\hat{\rho}(t) + \Delta\rho] \sin \hat{\theta}(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{Bmatrix} \right\} \right\} - \hat{d} = 0 \quad (6)$$

(6)式中的未知参数  $x$  包括视准轴角误差的三个分量  $(\alpha, \beta, \gamma)$ 、4 个平面参数  $(a, b, c, d)$  和 LiDAR 的测距系统误差  $\Delta\rho$ , POS 的位置观测值  $[X(t), Y(t), Z(t)]$ 、姿态角观测值  $[(r(t), p(t), y(t))]$  和 LiDAR 观测值  $[\rho(t)]$  设置为 Gauss-Helmert 模型的观测量。

### 3.3 最小二乘法模型求解

根据泰勒级数一阶展开式,对(6)式线性化后得 Gauss-Helmert 平差模型

$$\mathbf{A}\hat{\delta} + \mathbf{B}\hat{\nu} + \mathbf{w} = 0, \quad (7)$$

对约束条件(5)式线性化后的表达式为

$$\mathbf{G}\hat{\delta}_c + \mathbf{w}_c = \hat{\nu}_c, \quad (8)$$

根据最小二乘法和拉格朗日乘数法,得到  $h$  表达式

为

$$h = \hat{\nu}^T \mathbf{P}\hat{\nu} + 2 \hat{\mathbf{K}}^T (\mathbf{A}\hat{\delta} + \mathbf{B}\hat{\nu} + \mathbf{w}), \quad (9)$$

式中  $\mathbf{A}$  为  $f$  对未知参数求偏导后的设计矩阵,  $\mathbf{B}$  为  $f$  对观测量求偏导后的设计矩阵,  $\mathbf{P}$  为观测值的权重矩阵,  $\hat{\delta}$  为未知参数的改正向量,  $\hat{\nu}$  为观测值的残差向量,  $\hat{\mathbf{K}}$  为拉格朗日乘数向量,  $\mathbf{w}$  为方程的闭合差向量,其值约等于  $f(\mathbf{l}, \mathbf{x}_0)$ ,  $\mathbf{l}$  为  $t$  时刻的观测值向量,  $\mathbf{x}_0$  为未知参数的初始估值。

#### 3.3.1 带有约束条件的法方程

针对基于平面的标定方法,(9)式中的平面未知参数应该满足约束方程(8)式,因此,在(9)式中应该加入两个额外的约束项,表达式  $h$  变更为

$$h = \hat{\nu}^T \mathbf{P}\hat{\nu} + \hat{\nu}_c^T \mathbf{P}_c \hat{\nu}_c + 2 \hat{\mathbf{K}}^T (\mathbf{A}\hat{\delta} + \mathbf{B}\hat{\nu} + \mathbf{w}) + 2 \hat{\mathbf{K}}_c^T (\mathbf{G}\hat{\delta}_c + \mathbf{w}_c - \hat{\nu}_c), \quad (10)$$

式中  $\mathbf{P}_c$  为约束条件的权重矩阵,  $\hat{\mathbf{K}}_c$  为约束条件的拉格朗日乘数向量,  $\mathbf{G}$  为平面约束条件的设计矩阵,  $\hat{\delta}_c$  为平面未知参数的改正向量,  $\hat{\nu}_c$  为平面约束的残差向量,  $\mathbf{w}_c$  为平面约束的闭合差向量。

在(10)式中,未知参数  $x$  可以分为两组,视准轴角误差和 LiDAR 测距系统误差  $\Delta\rho$  构成  $x_1$ , 平面约束条件参数构成  $x_2$ , 因此,(10)式可以改写为

$$h = \hat{v}^T P v + \hat{v}_c^T P_c v_c + 2 \hat{K}^T (A_1 \hat{\delta}_1 + A_2 \hat{\delta}_2 + B v + w) + 2 \hat{K}_c^T (A \hat{\delta}_c + w_c - \hat{v}_c), \quad (11)$$

式中  $A_1, \hat{\delta}_1$  分别是针对  $x_1$  的设计矩阵和校正向量,  $A_2, \hat{\delta}_2$  分别是针对  $x_2$  的设计矩阵和校正向量。

针对(11)式,可以使用传统的最小二乘法推导得到未知参数的解。该方程的特殊情况是要最小化观测量和约束条件残差的加权平方和,根据拉格朗日乘法求条件极值的步骤,可以推导出法方程的最终形式为

$$\begin{bmatrix} A_1^T M^{-1} A_1 & A_1^T M^{-1} A_2 \\ A_2^T M^{-1} A_1 & A_2^T M^{-1} A_2 + G^T P_c G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_1 \\ \hat{\delta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T M^{-1} w \\ A_2^T M^{-1} w + G^T P_c w_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

或者表达为法方程的简写形式

$$N \hat{\delta} + u = 0. \quad (13)$$

假设参与平差的点的个数为  $n$ ,平面的个数为  $m$ ,则(12)式解的形式为

$$\begin{bmatrix} \hat{\delta}_{1(4,1)} \\ \hat{\delta}_{2(4,m,1)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_{1(4,n)}^T M_{(n,n)}^{-1} A_{1(n,4)} & A_{1(4,n)}^T M_{(n,n)}^{-1} A_{2(n,4,m)} \\ A_{2(4,m,n)}^T M_{(n,n)}^{-1} A_{1(n,4)} & A_{2(4,m,n)}^T M_{(n,n)}^{-1} A_{2(n,4,m)} + G_{(4,m,m)}^T P_{c(m,m)} G_{(m,4,m)} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} A_{1(4,n)}^T M_{(n,n)}^{-1} w_{(n,1)} \\ A_{2(4,m,n)}^T M_{(n,n)}^{-1} w_{(n,1)} + G_{(4,m,m)}^T P_{c(m,m)} w_{c(m,1)} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中  $M_{(n,n)} = B_{(n,8n)} P_{(8n,8n)}^{-1} B_{(8n,n)}^T$ 。

### 3.3.2 残差计算

当已经估计出未知参数后,观测量的残差  $v$  和约束条件的残差  $v_c$  也能通过未知参数回代计算出来,  $v$  和  $v_c$  的最终计算公式为

$$\begin{cases} v = -P^{-1} B^T (B P^{-1} B^T)^{-1} (A_1 v_1 + A_2 v_2 + w) \\ v_c = G \hat{\delta}_2 + w_c \end{cases}. \quad (15)$$

## 3.4 随机模型

文献[12]考虑了 POS 观测相关性对确定视准轴角的影响,但是由于本文不能得到 POS 传感器所提供的位置、姿态数据的互相关信息,同时也为了简化计算,假设所有 8 个观测值的误差均值为零并且互不相关。这种假设是次优的,可以通过不同时间下 POS 观测量的协方差矩阵部分补偿。因此,观测值的权阵  $P$  是一个对角阵,其形式为

$$P_{(n,n)} = D^{-1} = \begin{bmatrix} P_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_n \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中  $P_i = \text{Diag} \left( \frac{1}{\sigma_{X_i}^2}, \frac{1}{\sigma_{Y_i}^2}, \frac{1}{\sigma_{Z_i}^2}, \frac{1}{\sigma_{\rho_i}^2}, \frac{1}{\sigma_{\rho_i}^2}, \frac{1}{\sigma_{\rho_i}^2}, \frac{1}{\sigma_{\rho_i}^2}, \frac{1}{\sigma_{\rho_i}^2} \right)$ , 可以通过传感器制造商所提供的系统信息获得相关观测量的中误差(RMS)。

同样地,假设针对所有平面的约束条件的权值是相等的,则权阵  $P_c$  具有如下形式为

$$P_c = \frac{1}{\sigma_c^2} I, \quad (17)$$

式中  $I$  为单位矩阵,  $\sigma_c^2$  为约束条件的方差,它的值应该不大于 8 个观测值方差的任何一个,即应满足

$$\frac{1}{\sigma_c^2} \geq P_i, \quad 1 \leq i \leq 8. \quad (18)$$

## 4 实验与分析

为了验证本文方法的可行性,实验以首都师范大学的本部操场及北一区校园为测区,采用了首都师范大学自主集成的车载激光成像系统 VBLMS (Vehicle-Based LiDAR Mapping System)进行了视准轴误差标定实验。VBLMS 所集成的 LiDAR 的测距范围为 80 m,数据采集速率为 8000 point/s,测距精度为 50 mm;POS 的数据更新率为 100 Hz, GPS 位置数据差分后的精度约为 2 mm,INS 姿态数据经相关软件处理后的翻滚、俯仰、偏航的精度分别为 0.03°、0.03°、0.055°。



图 2 车载激光成像系统

Fig.2 VBLMS

为使视准轴角误差对平面特征的影响表现得更为明显,实验对测区进行了双向、3次不同角度的扫

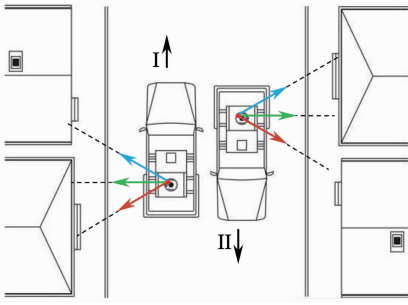


图 3 实验路线与激光扫描角度(顶视图)  
Fig. 3 Experimental route and LiDAR scanning angles (top view)

描,如图 3 所示,红、绿、蓝箭头分别代表调整后的激光扫描角度 $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $30^\circ$ 。

经过对 GPS 数据差分、POS 与 LiDAR 数据的时间同步匹配等后处理后,根据(2)式,得到了测区的点云场景(图 4),然后根据先验知识提取出场景中大量平面特征上的点及其原始观测值。提取平面特征的原则是:在平面特征之间,尽量提取场景中不同方位的平面,以消除平面特征之间的相关性;对于多方位扫描下的同一平面特征,尽量提取路线远近差异较大的平面特征,因为视准轴角误差在这些平面特征的表现更为明显。

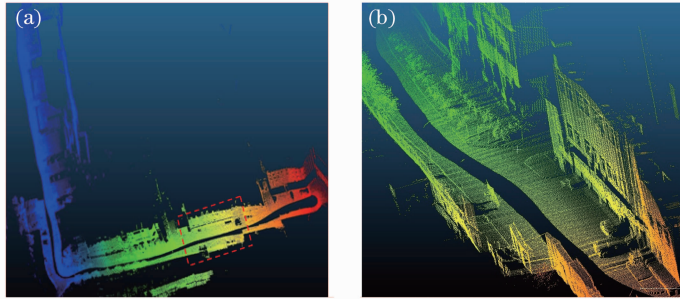


图 4 三维点云场景。(a) 点云概览; (b) 放大(a)中框选部分点云

Fig. 4 3D point cloud. (a) Point cloud overview; (b) point cloud selected by a box in (a) is partially magnified

利用本文所提出的算法进行了视准轴角误差及 LiDAR 测距系统误差的解算,迭代的中止条件是视准轴角误差改正数的小数点后 4 位皆为零值,5 次迭代计算的中间过程和结果如表 1 所示。

表 1 视准轴角误差迭代计算过程

Table 1 Iterative process of calibrating bore-sight angle error

| Variables<br>Iteration count | Correction                | Correction               | Correction                | Correction              | $\delta\alpha / (^\circ)$ | $\delta\beta / (^\circ)$ | $\delta\gamma / (^\circ)$ | $\delta\rho / \text{m}$ |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                              | $\Delta\alpha / (^\circ)$ | $\Delta\beta / (^\circ)$ | $\Delta\gamma / (^\circ)$ | $\Delta\rho / \text{m}$ |                           |                          |                           |                         |
| 1                            | 1.0097                    | 0.0532                   | -0.1277                   | 0.1125                  | 1.0097                    | 0.0532                   | -0.1277                   | 0.1125                  |
| 2                            | -0.2163                   | -0.0175                  | 0.0433                    | -0.0512                 | 0.7934                    | 0.0357                   | -0.0844                   | 0.0613                  |
| 3                            | -0.4828                   | -0.0321                  | 0.0621                    | -0.0478                 | 0.3106                    | 0.0036                   | -0.0223                   | 0.0135                  |
| 4                            | -0.0000                   | -0.0003                  | 0.0005                    | -0.0107                 | 0.3097                    | 0.0033                   | -0.0218                   | 0.0028                  |
| 5                            | -0.0000                   | -0.0003                  | 0.0006                    | -0.0003                 | 0.3097                    | 0.0030                   | -0.0212                   | 0.0025                  |

在得到视准轴角误差及 LiDAR 的系统误差

后,补偿到定位方程(3)式中,重新解算提取出的平面点云坐标。如图 5 所示,采用特征值法分别对同一平面校正前后的平面特征点云进行了拟合<sup>[13]</sup>,蓝色条柱代表的是校正前平面拟合的中误差,红色条柱代表的是校正后平面拟合的中误差。从图 5 中可知,校正后,参与解算的所有平面的拟合精度比较正前有了明显的提高。

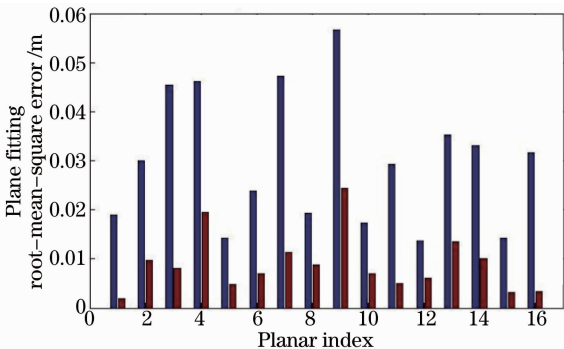


图 5 视准轴角误差补偿前后平面拟合精度对比

Fig. 5 Comparison of planar fitting precision before and after bore-sight angle error is calibrated

图 6(c)与图 6(d)是在补偿视准轴角误差前后,两次扫描操场主席台的剖面对比图,从图中可以看到,补偿视准轴角误差后,两次扫描数据的重叠度得到很大的提升。

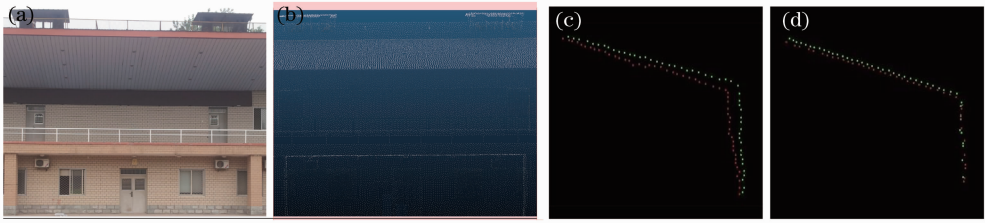


图 6 视准轴误差校正前后主席台重叠区域的剖面图。(a) 主席台图像；(b) 视准轴角误差校正后的主席台模型；(c) 视准轴角误差校正前；(d) 视准轴角误差校正后

Fig. 6 Cross-section of overlap area of platform before and after bore-sight angle error is calibrated. (a) Platform image; (b) platform model after bore-sight angle is calibrated; (c) before bore-sight angle error is calibrated; (d) after bore-sight angle error is calibrated

为了更加深入地分析视准轴角误差与距离被测目标平面远近的关系,按照如下条件设计了仿真实验:

- 1) 假定 MMS 的视准轴误差  $\delta\alpha$ 、 $\delta\beta$ 、 $\delta\gamma$  分别为  $2.0^\circ$ 、 $0.56^\circ$ 、 $1.3^\circ$ ;
- 2) 按照图 7 所示的参数建立三个平面方程,其中  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  分别为  $178^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $30^\circ$ ;
- 3) 使激光的入射角度按照  $5^\circ$  的间隔从  $-50^\circ$  变化到  $+50^\circ$ ,在每个人射角度下,MMS 按照  $0.2\text{ m}$  的采样间隔移动  $2\text{ m}$ ;
- 4) 修改  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ ,变化 LiDAR 到被测平面的距离。

根据以上条件,共仿真了 4 组数据,其中,图 8 为不存在误差时的仿真点云;表 2 对不同距离扫描下得到的数据计算了平面拟合精度和视准轴角误差。

从表 2 中可以看出,随着 MMS 到被测平面距离的增大,平面的拟合精度越来越差,但是所解算的视准轴误差角度却越来越接近真值。

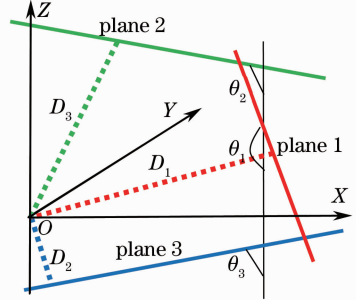


图 7 平面参数  
Fig. 7 Planar parameters

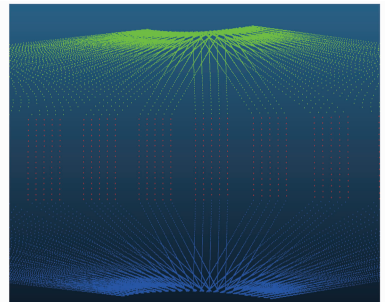


图 8 不存在误差的仿真点云

Fig. 8 Resulting point cloud of simulation without errors

表 2 在不同距离下解算数据得到的平面拟合中误差和视准轴角误差

Table 2 Planar fitting RMS and bore-sight angle error at different distances

| $D_1/\text{m}$ | $D_2/\text{m}$ | $D_3/\text{m}$ | Plane 1 fitting | Plane 2 fitting | Plane 3 fitting | $\delta\alpha / (^\circ)$ | $\delta\beta / (^\circ)$ | $\delta\gamma / (^\circ)$ |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
|                |                |                | RMS /m          | RMS /m          | RMS /m          |                           |                          |                           |
| 30             | 5              | 5              | 0.0055          | 0.0036          | 0.0043          | 1.9997                    | 0.5616                   | 1.0602                    |
| 60             | 10             | 10             | 0.0228          | 0.1349          | 0.1403          | 2.0003                    | 0.5584                   | 1.1502                    |
| 90             | 20             | 20             | 0.0409          | 0.2344          | 0.2331          | 2.0002                    | 0.5587                   | 1.1590                    |
| 120            | 30             | 30             | 0.0471          | 0.3138          | 0.3110          | 2.0000                    | 0.5590                   | 1.1231                    |

## 5 结 论

研究了一种地面移动激光成像系统的视准轴误差自标定方法,分析了 MMS 的系统误差,依据在多个方位下扫描同一平面特征时视准轴误差会导致点云的不共面特性,利用激光脚点的定位方程和平面

的几何公式,建立了含有未知参数的条件方程(Gauss-Helmert 平差模型),并以平面参数的方向余弦的平方和等于 1 作为约束条件,利用最小二乘法和拉格朗日乘数法推导了法方程,得到了视准轴角误差改正量解的形式,然后通过迭代计算得到了

最后的视准轴角误差。在实验部分,从获得的点云数据中提取了场景中大量的平面特征及其点云的原始观测值,通过该算法解算了视准轴角误差,并将此视准轴角误差代入激光脚点定位方程,对校正前后的重叠点云进行了定性分析,并通过对比较校正前后平面的拟合精度,定量分析了该算法的有效性。此外,相比于车载 LiDAR 成像系统,由于机载 LiDAR 成像系统不但具有与之相似的系统组成和激光脚点定位方程,而且具有更高的飞行高度、更灵活的航线设计,这都会导致在不同航迹下扫描同一平面特征区域时,视准轴角误差对点云重叠度的影响更明显,因此,该算法亦能很好地应用于机载 LiDAR 成像系统的视准轴误差检校。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Tian. Data processing methodology for laser measurement point cloud[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 091202.  
陈 田. 激光测量点云的数据处理方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 091202.
- 2 Hu Shaoxing, Chen Chunpeng, Zhang Aiwu. Application of SLAM in vehicle-borne mobile mapping system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108012.  
胡少兴, 陈春朋, 张爱武. 同步定位及地图创建算法在车载移动测绘系统中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108012.
- 3 Shao Jie, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Research on fusion of 3D laser point clouds and CCD image[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0514001.  
邵 杰, 张爱武, 王书民, 等. 三维激光点云与 CCD 影像融合的研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0514001.
- 4 C Glennie, K Kusevic, P Mrstik. Performance analysis of a kinematic terrestrial LiDAR scanning system [C]. *MAPP/ASPRS 2006 Fall Conference*, 2006.
- 5 C Glennie. Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LiDAR systems[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2007, 1(3): 147-157.
- 6 Wang Zhihua, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Airborne radar calibration system based on the overlap strip[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0214003.  
王致华, 张爱武, 王书民, 等. 基于重叠航带的机载激光雷达系统检校[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0214003.
- 7 C Glennie. Reign of point clouds: A kinematic terrestrial lidar scanning system[J]. *Inside GNSS*, 2007, 2(7): 22-31.
- 8 Yuan Xiuxiao, Yang Fen, Zhao Qing, *et al.*. Bore-sight misalignment calibration of integrated D GPS/IMU system[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(12): 1039-1043.  
袁修孝, 杨 芬, 赵 青, 等. 机载 POS 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 P Rieger, N Studnicka, M Pfennigbauer, *et al.*. Bore-sight alignment method for mobile laser scanning systems[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2010, 4(1): 13-21.
- 10 P Kumari, W E Carter, R L Shrestaha. Adjustment of systematic errors in ALS data through surface matching [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(10): 1851-1864.
- 11 E Grafarend, J Awange. *Applications of Linear and Nonlinear Models[M]*. Berlin: Springer Press, 2012.
- 12 J Skaloud, P Schaer. Towards a more rigorous bore-sight calibration [C]. *ISPRS International Workshop on Theory Technology and Realities of Inertial/GPS/Sensor Orientation*, 2003.
- 13 Guan Yunlan, Cheng Xiaojun, Shi Guigang. A robust method for fitting a plane to point clouds[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(7): 981-984.  
官云兰, 程效军, 施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(7): 981-984.

栏目编辑:张浩佳