

基于参考面约束的车载移动测量系统安置参数检校方法

俞家勇¹, 程 焱¹, 田茂义^{1*}, 卢秀山^{2*}, 马龙称¹, 周茂伦³, 曹岳飞³, 李国玉³

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 海洋工程研究院, 山东 青岛 266590;

3. 青岛秀山移动测量有限公司, 山东 青岛 266510)

摘要: 车载移动测量系统是一种多传感器高度集成的测量设备, 系统精度不仅取决于集成的传感器精度, 还受激光扫描仪与组合导航系统之间安置参数检校的准确度影响。考虑到安置参数检校方法的便捷、有效性以及系统最终精度评估, 提出一种基于参考面特征约束的车载移动测量系统安置参数检校方法。该方法根据包含系统安置参数的激光扫描点定位方程, 利用参考面上的激光扫描点到参考面方程距离偏差最小作为约束条件, 同时考虑到安置参数旋转量与偏移量间存在相关性, 采用分步解算方法将旋转和平移量进行分开求解。最后, 通过采集检校场和外场数据进行系统内符合和外符合精度评估。实验结果表明: 该方法能够有效的消除安置误差影响, 检校后内符合精度为 0.007 m, 外符合精度为 0.024 m。

关键词: 车载移动测量系统; 面特征约束; 安置误差检校

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190524

Boresight parameters calibration method of VMLS system based on reference planar features constraint

Yu Jiayong¹, Cheng Lang¹, Tian Maoyi^{1*}, Lu Xiushan^{2*}, Ma Longcheng¹,
Zhou Maolun³, Cao Yuefei³, Li Guoyu³

(1. College of Geomatics and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Institute of Ocean Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Qingdao Xiushan Mobile Survey Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: The vehicle mobile laser scanning (VMLS) system is a highly integrated multi-sensor measurement system. The accuracy of the VMLS system depends on the accuracy of not only the integrated sensor, but also the calibration of boresight parameters between the laser scanner and the integrated navigation system. Considering the convenience and effectiveness of the calibration method of the boresight parameters and the accuracy evaluation of the VMLS system, a calibrating method of the boresight parameters of the VMLS system based on the reference planar features constraint was proposed. The proposed method was based on the direct

收稿日期: 2019-12-10; 修订日期: 2020-02-05

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项 (2013YQ120343); 重大仪器设备开发专项 (040326010701)

作者简介: 俞家勇 (1992-), 男, 博士生, 主要从事测量数据处理方面的研究。Email: yujiayongskd@163.com

通讯作者: 田茂义 (1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事数字城市、数字矿山、移动测量系统 (MMS)、“3S”集成与应用的教学与研究方面的研究。Email: tianmaoyi_zhy@126.com

卢秀山 (1961-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事现代测量数据处理理论及应用和“3S”集成技术及应用方面的研究。

Email: xiushanl@vip.sina.com

georeferencing of lidar measurements including the boresight parameters. The equation used the minimum distance deviation from laser footpoint to reference plane as the constraint. In addition, considering the correlation between rotation and offset amount of the boresight parameters, the stepwise solving method was composed to separate boresight angle and offset parameters. Finally, through the datum acquired from calibration field and check fields, the internal and external accuracy of VMLS system were evaluated. The experimental results show that the proposed method can effectively eliminate the influence of boresight errors. After calibration, the internal accuracy is 0.007 m and the external accuracy is 0.024 m.

Key words: vehicle mobile laser scanning system; planar feature constraint; boresight calibration

0 引言

随着地理信息数据在众多领域的广泛应用,数据的时效性、精度、信息丰富度受到极大关注。目前,传统测绘手段因采集效率低、数据点密度小、外业工作量大、数据时效性差且包含信息丰富度低等因素,难以满足行业发展需求。随着移动测量技术的广泛应用,上述矛盾迎刃而解。车载移动测量系统(Vehicle Mobile Laser Scanning, VMLS)采用非接触主动测量方式,在载体行进过程中可高效获取丰富的高精度、高密度三维激光点云与影像数据,在大比例尺测图、智慧城市、智能驾驶、三维重建等领域有广泛应用^[1-2]。

车载移动测量系统的精度是广泛应用的关键因素之一,除了受各传感器单元自身精度限制,还取决于传感器间的集成精度。系统的误差源分为偶然误差和系统误差,偶然误差包含激光扫描仪测角与测距误差、系统位置和姿态误差;系统误差包含激光扫描仪与 IMU 间的安置误差以及 GNSS 相位中心与 IMU 间的杆臂值误差。通常,杆臂值可根据系统设计模型或高精度观测等方式精确获得,误差在毫米级。但安置误差因加工、安装产生,且无法通过直接观测精确获得,成为系统误差的主要影响因素,因此,精确检校安置参数对系统广泛应用具有重要意义^[3-4]。

目前,移动测量系统安置误差的检校方法大致可分为基于点云数据的数据驱动法和基于系统定位原理的严密校准方法两类。数据驱动法主要用于车载移动测量系统,该方法认为,安置误差导致的重叠数据偏差可通过平移和旋转方式予以消除。Habib 利用同名线特征和面特征的调整重叠条带偏差^[5-6]。Maas 和 Lee 均基于 TIN,分别通过离散点与网格点的匹配、平面斑块确定的线特征调整重叠条带间的偏差^[7-8]。数据驱动法较为简单,对原始数据、检校场无

特殊要求,认为安置误差的影响可通过不同扫描数据间的刚性转换进行消除,一定程度上可提高点云数据的精度,但受数据自身因素、人为因素影响以及没有从误差源建立严密检校方程,因此最终校准结果无法取得较高的精度。

严密检校方法需获取移动测量系统采集的原始数据,根据包含安置参数的激光脚点定位方程和严密的约束模型进行参数求解,可获得较高的检校精度。严密校准方法通常使用点、线、面作为约束模型。张卡、聂倩结合直接定位方程,通过罗德里格矩阵求解相机或扫描仪坐标系与载体坐标系间安置参数^[9-10]。姚连璧和王力将公共点坐标进行转换,将安置参数求解简化为载体坐标系和扫描参考坐标系的转换参数求解^[3, 11]。康永伟采用硅电池找出激光扫描线的位置,建立控制点在像方坐标系和物方坐标系间的转换关系,求解安置误差^[12]。叶泽田将激光扫描时间作为变量引入激光点云数据中用于控制点判读,并对传统检校模型参数进行微小修正^[13]。Pusztai 和 Zhen 均基于棋盘格,分别根据同名点间距最小和同名点构成直线的长度差最小实现安置误差求解^[14-15]。张靖通过建立同名特征点与周围真实激光脚点的虚拟连接点模型,构造同名点坐标与系统误差参数间的函数模型,根据最小二乘原理求解参数^[16]。Zhen Li 通过将不同条带点云间的偏差最小化进行安置误差校准^[17]。Ting On Chan 以城市中多种特征地物相应的几何模型作为约束,根据最小二乘法同时估计多组安置角误差^[18]。Erik Heinz 利用参考平面与扫描点之间的约束条件估计激光扫描仪的内外检校参数^[19]。田祥瑞通过多次扫描平整垂直墙面对姿态角分别进行误差检校^[20]。Lu 通过扫描特制检校面,利用面约束模型求解安置误差^[21]。Scouarnec 使移动测量系统在静止状态下扫描特征平面,利用扫描线与平面正交关系作为约束求解安置误差^[22]。Rieger 采用 ICP 算法使不同

2.1 高精度三维检校场

高精度三维检校场建立在山东科技大学校园内, 包含教学楼、实验楼、标志性建筑物、学生公寓和部分地面等。检校场附近为通畅、宽阔的直行道路且两侧树木矮小, 采集区域 GNSS 信号良好、可完整扫描参考面。参考面模型平整且边缘易识别, 包含不同方向、不同远近的平面, 分布如图 2 所示。



图 2 高精度三维检校场

Fig.2 High-precision 3D calibration field

检校场测量遵循“先控制后碎部”的原则, 在高精度 GNSS 控制网基础上, 使用 Leica TM30 高精度全站仪采用免棱镜模式进行参考面测量, 每个参考面上均匀分布 15~30 个测量点, 车载移动测量系统安置误差精度及可靠性很大程度上取决于检校场模型精度, 文中对所有参考平面进行平面拟合并分析误差, 所得拟合误差如图 3 所示。校园内 93 个朝向不同的拟合参考面误差主要集中于 1~8 mm, 中误差为 3.7 mm, 所测参考面能够满足绝大多数车载移动测量系统检校需求。

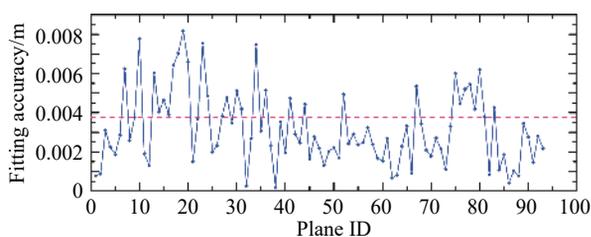


图 3 参考面拟合误差分析

Fig.3 Reference plane fitting error analysis

2.2 检校函数模型

由系统定位公式可知, 最终的点云数据涉及多个传感器提供的数据, 但各传感器均存在误差。为提高检校模型稳定性, 获得最佳参数, 文中选用附有参数的条件平差模型, 将每个传感器的观测值误差一并考虑到解算模型中。

观测值:

$$L = [\rho \quad \theta \quad \phi \quad r \quad p \quad h \quad X_0 \quad Y_0 \quad Z_0] \quad (2)$$

安置参数:

$$X = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z] \quad (3)$$

参考平面方程如公式 (4) 所示:

$$Ax + By + Cz - D = 0 \quad (4)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为参考面方程参数。

通过车载移动测量系统对参考平面进行数据采集, 每个参考面上的扫描点云均应满足对应参考面方程, 这里以点到平面距离平方和最小作为约束条件, 基于平面的数学约束模型如公式 (5) 所示:

$$f_p = f_p(\hat{L}, \hat{X}) = f_p(L + V, X^0 + \hat{x}) = \frac{(A_p x_i + B_p y_i + C_p z_i - D_p)^2}{A_p^2 + B_p^2 + C_p^2} \quad (5)$$

式中: X^0 表示检校参数初始值; V 为观测值改正数; \hat{x} 为检校参数初始值的改正数; x_i 、 y_i 、 z_i 为激光脚点 i 在地心地固坐标系下坐标; A_p 、 B_p 、 C_p 、 D_p 为 i 扫描点所在平面对应的约束参考面 P 的平面方程参数。

2.3 安置参数求解

安置参数中包含角元素和线元素, 在车载移动测量系统中, 安置角误差为主要影响因素。初始参数获取过程中, 线元素精度要高于角元素, 因传感器精度不同, 线元素误差基本与设计值一致, 通常在毫米级。另外, 考虑到角元素与线元素对点云精度影响具有相关性, 所以采用分步平差方法, 首先解算影响较大的安置角误差, 在解算结果的基础上再以平移量作为参数, 将剩余误差再分配进行平移参数求解, 最终实现安置误差高精度检校。

车载移动测量系统作为一种多传感器集成设备, 各传感器本身也存在一定误差。为简化模型, 文中认为不同传感器测得观测值之间不具有相关性^[25], 权阵可表示为对角阵, 如公式 (6) 所示:

$$P = \text{diag} \left(P_p^1 \quad P_p^2 \quad \dots \quad P_p^{i-1} \quad P_p^i \right) \\ P_p^i = \text{diag} \left(P_i^1 \quad P_i^2 \quad \dots \quad P_i^{j-1} \quad P_i^j \right) \\ P_i^j = \text{diag} \left(P_j^1 \quad P_j^2 \quad \dots \quad P_j^{k-1} \quad P_j^k \right) \\ P_j^k = \text{diag} \left(\frac{1}{\sigma_{\rho_k}^2} \quad \frac{1}{\sigma_{\theta_k}^2} \quad \frac{1}{\sigma_{\phi_k}^2} \quad \frac{1}{\sigma_{r_k}^2} \quad \frac{1}{\sigma_{p_k}^2} \right. \\ \left. \frac{1}{\sigma_{h_k}^2} \quad \frac{1}{\sigma_{X_{0k}}^2} \quad \frac{1}{\sigma_{Y_{0k}}^2} \quad \frac{1}{\sigma_{Z_{0k}}^2} \right) \quad (6)$$

式中: i 表示检校实验中第 i 个平面集; j 表示平面集 i 中第 j 个平面约束模型; k 表示第平面约束模型 j 上

第 k 个激光脚点。参数解算过程涉及的 A 、 B 、 W 矩阵的形式与 P 类似, A 为对角矩阵, B 、 W 为列矩阵, 为简化形式, 下文只写出第 k 个激光脚点的方程。

首先将安置角作为参数, 将函数模型线性化, 得安置角改正数条件方程如公式 (7) 所示:

$$A V + B \hat{X} + W = 0 \quad (7)$$

系数矩阵 A :

$$A_j^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_p^k}{\partial \rho} & \frac{\partial f_p^k}{\partial \theta} & \frac{\partial f_p^k}{\partial \phi} & \frac{\partial f_p^k}{\partial r} \\ \frac{\partial f_p^k}{\partial p} & \frac{\partial f_p^k}{\partial h} & \frac{\partial f_p^k}{\partial X_0} & \frac{\partial f_p^k}{\partial Y_0} & \frac{\partial f_p^k}{\partial Z_0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

系数矩阵 B :

$$B_j^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_p^k}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_p^k}{\partial \beta} & \frac{\partial f_p^k}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \quad (9)$$

闭合差向量 W :

$$W_j^k = \frac{(a_p^j x_k + b_p^j y_k + c_p^j z_k - d_p^j)^2}{(a_p^j)^2 + (b_p^j)^2 + (c_p^j)^2} \quad (10)$$

采用最小二乘平差法求解, 观测值、安置角改正数:

$$\hat{X} = -\left(B^T (A P^{-1} A^T)^{-1} B\right)^{-1} B^T (A P^{-1} A^T)^{-1} W \quad (11)$$

$$V = -P^{-1} A^T (A P^{-1} A^T)^{-1} (W + B \hat{X}) \quad (12)$$

将改正数代入, 迭代求解出角元素平差值:

$$\hat{L} = L + V \quad (13)$$

$$\hat{X} = X^0 + \hat{X} \quad (14)$$

当安置角求解完成后, 将其作为已知量对平移参数进行求解。求解过程与安置角求解过程类似, 最后迭代求出平移参数。

3 实验分析与精度评估

为了评估安置参数检校结果, 使用车载移动测量系统采集了两组实验数据: 第一组为检校场数据, 用于验证检校方法和评估内符合精度; 第二组为外场数据, 区域内包括利用 RTK、全站仪等手段采集的检核点以及少量靶标球, 用于评估检校后移动测量系统的外符合精度。实验所用的移动测量系统为青岛秀山移动测量有限公司自主研发的 VSurs-Q 型轻便型移动测量系统, 如图 4 所示。

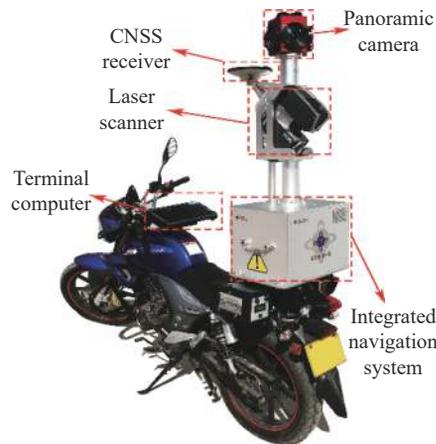


图 4 VSurs-Q 移动测量系统

Fig.4 VSurs-Q mobile measurement system

3.1 实验数据获取

3.1.1 检校数据采集

为了最大化体现出安置误差影响, 通常采集路线均以往返扫描作为一组并尽可能获取完整的参考面扫描点云数据。

在外业数据采集过程中, 需进行必要的机动以保证组合导航精度。采集完成后, 需要对组合导航处理结果进行精度检核, 采用 Waypoint Inertial Explorer 8.80 软件的紧组合算法对基站和流动站数据进行处理。一般要求后处理结果要基本达到组合导航系统标称精度, 避免引入其他误差造成检校结果较差。若 POS 处理精度较差, 则重新安排检校实验。

3.1.2 外符合精度评估数据采集

外场数据采集区域如图 5 所示, 采集区域往返路线长度约 15 km, 主要分为建筑物采集区和道路采集区两部分, 区域内检核点主要采用全站仪结合 CORS 手段获取。建筑采集区包括广场、教学楼, 包含大量的规则标志物, 部分特征如图 5(b)、(d) 所示, 因主要在广场区域采集, 故 GNSS 观测条件较好; 道路采集区包含道路标线、交通标志牌、防撞桶、栅栏等特征地物, 考虑到存在特征点提取误差, 数据采集时还布设了高精度标靶球作为检核之一, 标靶球点位采用静态观测获得, 部分特征如图 5(a)、(c) 所示, 道路两侧分布有较高大的树木且部分区域建有高楼, 比较接近一般工程作业环境。移动测量系统扫描点密度随着距离的增加而变小, 故检核点主要分布在系 60 m

扫描半径范围内以保证准确提取特征点。

使用移动测量系统对外场采集区域进行往返测量,采集路线如图 5 中黄线所示。当采集完成后进行 POS 解算,后处理组合导航位置及姿态精度整体良

好,高程精度优于 0.055 m,平面精度优于 0.025 m,航向角精度优于 0.28',横滚角、俯仰角精度优于 0.14'。为方便对比,测得点云数据转换至投影坐标系下与检核点进行外符合精度评估。



图 5 外符合精度实验区域

Fig.5 External accuracy evaluation area

3.2 检校结果与内符合精度评估

3.2.1 检校参数计算

车载移动测量数据采集完成,POS 后处理精度满足要求后,开始进行安置参数检校处理,参数解算处理流程如图 6 所示,安置参数初始值可以通过系统设计模型中获得或者利用高精度工业测量系统进行标定。

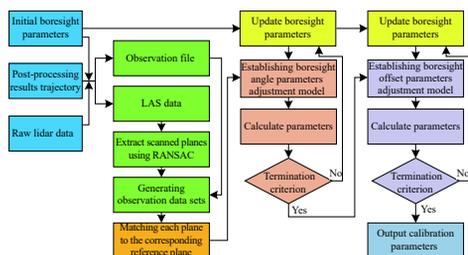


图 6 安置参数求解流程

Fig.6 Solving process of boresight parameters

首先,使用初始参数和组合导航处理结果对扫描仪原始数据进行融合变换,生成扫描点云数据和观测

值索引文件;然后,利用 RANSAC 算法从每趟路线扫描的点云数据中提取出参考面对应的扫描面并进行标记;根据提取的扫描点云面的索引信息从观测值索引文件中检索出观测值信息,生成观测值信息文件;通过编号将每个扫描点云面与参考面进行匹配,获得约束方程;至此完成数据准备工作,开始进行参数解算,第一步构建安置角参数求解平差模型,利用最小二乘迭代求解安置角参数,第二步是将解算出来的安置角参数作为已知值,构建安置平移参数求解平差模型,迭代求解安置平移参数,最终输出安置参数解算结果并进行精度评定。计算过程与最终计算结果如表 1 所示。

将计算结果与初始安置参数对比,检校前后 α 角相差 -0.26° 、 β 角相差 0.48° 、 γ 角相差 0.31° ,若不进行高精度检校,车载移动测量系统获取数据的精度会受到极大影响,将无法满足高精度测量任务。造成这种

表 1 安置参数解算结果

Tab.1 Solution result of boresight parameters

	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta Z/m$	α/rad	β/rad	γ/rad	
Initial value	0.067	0.306	0.210	1.577 79	-1.041 09	0.022 07	
Angle parameter	Iteration1	0.067	0.306	0.210	1.581 73	-1.051 20	0.015 75
	Iteration2	0.067	0.306	0.210	1.582 49	-1.049 65	0.016 67
	Iteration3	0.067	0.306	0.210	1.582 40	-1.049 60	0.016 57
	Iteration4	0.067	0.306	0.210	1.582 40	-1.049 61	0.016 56
Translation parameter	Iteration1	0.069	0.306	0.210	1.582 40	-1.049 61	0.016 56
	Iteration2	0.070	0.307	0.208	1.582 40	-1.049 61	0.016 56
Final results	0.070	0.307	0.208	1.582 40	-1.049 61	0.016 56	

误差的主要原因是标定的传感器轴系与实际轴系存在偏差。这种偏差对角度影响较大,对平移量较小,通过平移参数改正量即可得到验证,检校后的平移参数改正量为毫米级,基本符合实际加工安装情况。从迭代过程看出,分步平差法在一定程度上分离了安置参数中的角元素和线元素,可避免解算过程中二者耦合带来其他不确定因素影响。

3.2.2 内符合精度评估

文中设计了一种内符合精度评估方法,通过将检校后的扫描点投影到匹配的参考特征面上,计算出扫描点和投影点之间的坐标和距离偏差来评估检校结果,如图 7 所示。图中所有数据均在地心地固坐标系下, C 为对应参考面,红色箭头为平面法向量 n , P_i 为激光脚点坐标, P_s 为 P_i 对应的投影点坐标。理想情况下,参考面的点云数据应与参考面 C 重合,但由于存在多种随机误差和残留系统误差影响,检校后的激光扫描点仍未完全在参考面 C 上。误差的计算方式为 $dx = X_i - X_s$, $dy = Y_i - Y_s$, $dz = Z_i - Z_s$, $ds = \cos \langle n, \overrightarrow{P_i P_s} \rangle \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ 。

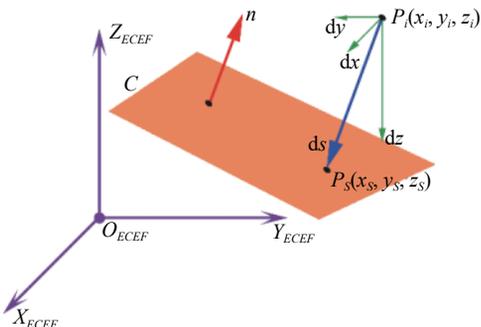


图 7 精度评定原理

Fig.7 Principle of internal accuracy evaluation

内符合精度评估结果如图 8 所示,参与计算的扫描点数共 239 409 个。图 8(a)、(b) 分别是检校前、检校后四个评估残差对应的频率分布直方图。由图 8(a) 知,安置误差检校前,距离偏差 ds 分布于 ± 0.170 m 区间内,中误差为 0.050 m,误差较为分散,内符合精度较差。由图 8(b) 知,安置误差检校后,距离偏差 ds 分布于 ± 0.035 m 区间内,中误差为 0.007 m。误差分布集中,几乎接近正态分布,由此可以看出因安置参数误差存在而导致的系统差被基本消除,检校后的数据内符合精度较高。

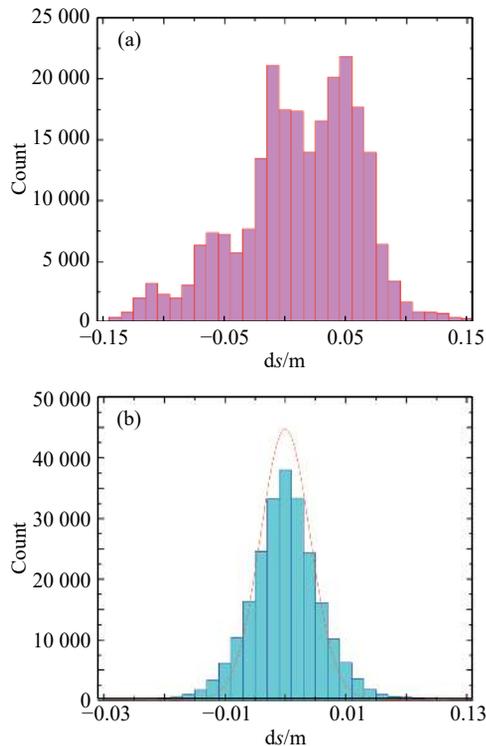


图 8 内符合精度评估结果

Fig.8 Evaluation result of internal accuracy

3.3 外符合精度评估

在检校过程中,为了较好地消除安置误差,在作业场地选择、检校路线设计方面均采用较高标准,最大限度地保证检校过程中不引入其他误差。然而,在实际作业过程中,环境较为复杂,系统实际精度一般低于检校精度。为验证测量精度的可靠性,对系统外符合精度进行评估,选择泰山广场和前湾港路作为精度评估实验区域,通过比对同名特征点坐标差值的方式进行外符合精度评估。数据采集前,已预先通过 CORS 和全站仪获取部分特征点坐标。数据采集完成后,解算成投影坐标系下点云,在点云中拾取同名特征点进行比对,方向位偏差分布如图 9 所示。

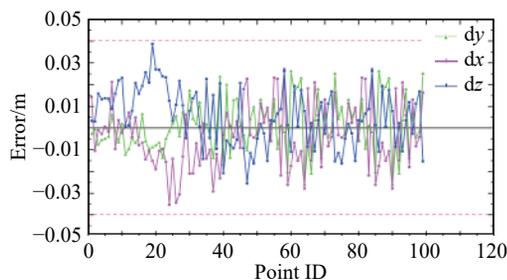


图 9 点位误差分布图

Fig.9 Diagram of point error distribution

此次参与外符合精度评估的球形靶标、建筑物角点、交通标志线角点共 99 个特征点,其中球形靶标 27 个,建筑物角点 46 个,交通标志线角点 26 个。按公式 (15) 计算,外符合精度为 0.024 m。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [dx_i^2 + dy_i^2 + dz_i^2]}{m}} \quad (15)$$

前湾港路为双向六车道,车载移动测量系统沿道路双向各扫描一次,往返扫描点云数据见图 10,蓝色为自西向东扫描数据,红色为自东向西扫描数据,从水平和垂直方向分别选取特征地物往返扫描结果,图 (a) 为花坛中的树木,图 (b) 为道路中央栅栏,图 (c) 为交通标志牌,图 (d) 为道路横向剖面图。图中往返两次点云数据的重合度良好。由此可看出,利用文中方法检校后,车载移动测量系统的安置误差基本消除。

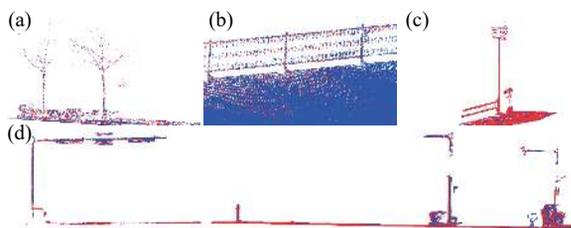


图 10 检校后往返扫描地物重叠情况

Fig.10 Round-trip scanned overlapping ground features point cloud after calibration

4 结束语

文中提出一种基于参考面特征约束的车载移动测量系统安置误差检校方法,以包含安置参数的车载移动测量系统扫描点定位方程为理论基础,根据多组对向扫描的参考平面点云,利用高精度三维检校场参考面模型进行特征约束求解安置参数。在参数求解过程中,将安置参数中的角度参数和平移参数分开解算,在一定程度上可以避免二者耦合带来其他不确定因素的影响。考虑作业过程中,环境因素导致最终结果的差异性,以及较好地评价检校结果和系统最终精度,分别采集了检校场数据和外场区域数据进行内符合和外符合精度评估。实验结果表明,点云内符合精度为 0.007 m,外符合精度为 0.024 m,通过对比,内符合和外符合精度基本上能达到该系统理论最佳值,说明检校方法能够很好地消除安置误差。此外,该方法

具有一定的通用性,能够较为全面的对移动测量系统进行安置误差检校和总体精度评估。此外,在标准化检校场的基础上结合面特征自动化提取算法,能够实现检校过程的全自动化处理,这对移动测量系统标准化检校和精度评估具有重要意义。

参考文献:

- [1] Yang Bisheng, Liang Fuxun, Huang Ronggang. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1509-1516. (in Chinese)
- [2] Wang Yu, Cheng Liang, Chen Yanming, et al. Building point detection from vehicle-borne LiDAR data based on voxel group and horizontal hollow analysis [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 419.
- [3] Yao Lianbi, Wang Zhifei, Sun Haili. Design and implementation of vehicle laser scanner's external parameter calibration [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(1): 161-166. (in Chinese)
- [4] Glennie C, Lichti D D. Static calibration and analysis of the velodyne HDL-64E S2 for high accuracy mobile scanning [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(6): 1610-1624.
- [5] Habib A, Kersting A, Ruifang Z, et al. LiDAR strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips[D]. Beijing:Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008: 385-390.
- [6] Habib A, Bang K, Kersting A. Impact of lidar system calibration on the relative and absolute accuracy of derived point cloud[C]//The Euro COW 2010, 2010, 2: 283.
- [7] Maas H G. Least-squares matching with airborne laserscanning data in a TIN structure [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(3): 548-555.
- [8] Lee J, Yu K, Kim Y, et al. Adjustment of discrepancies between LIDAR data strips using linear features [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 475-479.
- [9] Zhang Ka, Sheng Yehua, Ye Chun, et al. Absolute calibration and precision analysis for vehicle-borne 3D data acquiring system integrated with GPS, INS and CCD-camera [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(1): 55-59. (in Chinese)
- [10] Nie Qian, Chen Weimin, Chen Changjun. Research on absolute calibration for vehicle-borne 3D laser imaging system [J].

- Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013, 11: 74–77. (in Chinese)
- [11] Wang Li, Li Guangyun, Yang Yongxin, et al. One-site calibration of mounted parameter method for 3D mobile laser scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1106005. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] Ye Zetian, Yang Yong, Zhao Wenji, et al. Dynamic calibration of exterior orientations for vehicle GPS/IMU/LS laser imaging system [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(3): 345–350, 372. (in Chinese)
- [14] Pusztai Z, Eichhardt I, Hajder L. Accurate calibration of multi-lidar-multi-camera systems [J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2139.
- [15] Jian Z, Ravani B. Bore-sight calibration of mobile laser scanner using an external fixture [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2016, 10(3): 0011.
- [16] Zhang Jing, Jiang Wanshou, Jiang San. Automated airborne lidar system calibration using virtual tie point model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(3): 389–396. (in Chinese)
- [17] Li Z, Tan J, Liu H. Rigorous bore-sight self-calibration of mobile and UAV lidar scanning systems by strip adjustment [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 442.
- [18] Chan T O, Lichti D D, Glennie C L. Multi-feature based bore-sight self-calibration of a terrestrial mobile mapping system [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 82: 112–124.
- [19] Heinz E, Eling C, Wieland M, et al. Analysis of different reference plane setups for the calibration of a mobile laser scanning system [J]. *Proceedings of the Internationalen Ingenieurvermessungskurs*, 2017: 25–29.
- [20] 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)
- [21] Lu X, Feng C, Ma Y, et al. Calibration method of rotation and displacement systematic errors for ship-borne mobile surveying systems [J]. *Survey Review*, 2017, 51(364): 78–86.
- [22] Le Scouarnec R, Touzé T, Lacambre J B, et al. A new reliable bore-sight calibration method for mobile laser scanning applications [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, XL-3/W1: 67–72.
- [23] Rieger P, Studnicka N, Pfennigbauer M, et al. Bore-sight alignment method for mobile laser scanning systems [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2010, 4(1): 13–21.
- [24] Zhang Haixiao, Zhong Ruofei, Sun Haili. External parameter calibration method of vehicle laser scanning system based on planar features [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(12): 1640–1649. (in Chinese)
- [25] Skaloud J, Lichti D. Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61(1): 47–59.