

## 利用混合规则几何面的 MMS 激光扫描仪检校方法

陈天恩, 王冬\*, 刘凤英

(山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 提出了一种利用混合规则几何面进行车载移动测量系统(MMS)激光扫描仪外参数检校的方法。该方法利用现实环境中普遍存在的平面和圆柱面地物,结合平面和柱面可公式化的几何特征对激光点进行严密的数学方程式约束,通过非线性优化的方法精确求解激光扫描仪相对于 MMS 定位测姿 POS 系统的相对位置和姿态参数。实验结果表明:相对于只采用平面地物约束进行检校的方法,采用混合规则几何面联合约束检校的方法结果精度更高,距离残差中误差达到了 0.006 m;同一车载平台、两套不同激光扫描仪系统检校后,点云叠合效果较好。该检校方法具有精度高、简便、快速、实用等优点,具有较强的工程应用价值。

**关键词:** 车载移动测量系统; 激光扫描仪; 规则几何面; 外参数检校; 联合约束

**中图分类号:** P234      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0205009

## Calibration method of MMS laser scanner using hybrid regular geometric surfaces

Chen Tian'en, Wang Dong\*, Liu Fengying

(College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** A simple and practical method for MMS laser scanner calibration with hybrid regular geometric surfaces was proposed. The method utilized the plane and cylindrical objects which were ubiquitous in the real environment, and combined the geometric characteristics of the plane and cylindrical surface to constrain the laser point in a rigorous mathematical equation, and non-linear least square solution to determine the relative position and attitude parameters of the scanner relative to the MMS positioning and attitude measuring device POS accurately. The method did not need to establish a special calibration site. The experimental results show that the hybrid regular geometric surface combined constraint calibration method is more accurate than the method using only plane objects, reaching 0.006 m. After the same vehicle platform and two different laser scanner systems are calibrated, the point cloud superposition effect is better. The method is accurate, simple, fast, inexpensive, efficient and practical. The measured accuracy meets the requirements of large-scale production.

**Key words:** MMS; laser scanner; regular geometric surface; external parameters calibration; joint constraint

收稿日期:2019-03-21; 修订日期:2019-05-22

基金项目:国家自然科学基金(41271451);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2012DX033)

作者简介:陈天恩(1966-),男,教授,博士,主要从事摄影测量与遥感、计算机视觉、传感器检校方面的研究。

Email: 13646428367@163.com

通讯作者:王冬(1979-),男,副教授,博士,主要从事车载移动测量系统集成、数字摄影测量、矿山测量方面的研究。

Email: wdlfyqc@163.com

## 0 引言

车载移动测量系统(MMS)是一种集成多种传感器于一体的用于公路测量、城市建模、大比例尺地形图测绘、地物普查等应用的新型快速测量设备,近年来得到了快速发展和广泛应用<sup>[1-7]</sup>。

车载移动测量系统是一套高度集成的系统,传感器之间外参数的检校方法和检校精度直接影响到系统测量数据的最终精度,所以各传感器之间相对位置及姿态需要精确检校<sup>[8]</sup>。另外,为了满足某些特殊测量目的,移动测量系统中传感器位置及姿态需要适时调整。因此,车载移动测量系统在使用前必须经过检校,目的是获取各传感器相对于 GPS 天线中心的三维坐标( $X, Y, Z$ )的偏移量( $d_x, d_y, d_z$ )及 IMU 中心的倾角偏移量(侧滚角偏移:Roll, 航向角偏移:yaw,俯仰角偏移:Pitch)共 6 个偏移参数。国内外许多学者在车载激光移动测量系统传感器检校方面做了大量的研究工作,并提出了很多方法。王力等提出了采用回光反射材料制作的人工标志进行激光扫描仪外参数标定的方法<sup>[9]</sup>;康永伟等提出了应用硅电池找出控制点精确点位的标定方法<sup>[10]</sup>;Bae, K 等提出了基于平面特征的地面激光扫描仪(TLS)系统内部误差项检校方法<sup>[11]</sup>;张海啸等人提出了利用平面地物特征进行车载激光扫描仪外参数自动检校的方法<sup>[12]</sup>;So, E.等提出了基于点平面约束的地面旋转 2D 激光测距仪的检校方法<sup>[13]</sup>;Kaartinen H 等提出了基于永久性检校场的车载激光扫描仪检校方

法<sup>[14]</sup>,姚连璧等人提出了基于标准靶球的扫描仪外参数标定方法<sup>[15]</sup>;Ting On Chan 等提出了基于柱面的地面激光扫描仪自检校方法<sup>[16]</sup>,此方法主要是检校 TLS 的内部系统误差,并进行了详细的实验分析。上述方法中有的需要建立专用的移动测量系统检校场,此法检校和维护费用较高;有的需要设定特定的标靶和特殊的辅助材料,此法检校的灵活性差,工作量大;有的采用单一的平面特征检校外参数,存在检校结果不稳定等不足;有些采用柱面特征完成了单台 TLS 的内部参数检校,并验证了检校效果优于平面的方法。

文中在分析车载移动测量系统整体工作原理的基础上,提出了一套利用混合规则几何面的高精度车载移动测量系统激光扫描仪外参数检校方法,并建立了新的系统检校模型。该方法利用现实环境中常见的平面和柱面地物,如广告牌平面、交通标志牌平面、安放路灯和交通标志的圆柱体等地物,根据采集、提取的平面和柱面激光数据联合约束平差,即可精确反求激光扫描仪的 6 个安置参数。实现车载激光扫描仪外参数的快速、简便、精确检校,且平、柱面联合约束检校的方法精度更高。

## 1 检校用数学模型

车载系统主要由 POS 定位测姿系统、控制系统、距离测量仪(DMI)、激光扫描仪、光学以及热红外数码相机等组成,如图 1 所示。POS 系统提供载体的实时定位定姿信息,基于传感器在载体系统中的



图 1 车载激光移动测量系统

Fig.1 Vehicle mobile laser measurement system

已知位置及姿态, 就可以实时获取各传感器在地心地固坐标系或切平面坐标系中的位置及姿态, 此时通过激光扫描仪和数码相机获取地物的点云和影像数据, 从而实现对地物的测量。

单点扫描方式采集数据的激光扫描仪所获取的地物空间信息是一系列分布不均密度不等的离散点云, 与光学影像不同, 很难在离散的点云中精确观测到点状地物的空间位置, 所以, 采用控制点进行扫描仪检校的方法存在工作量大、效率低等一些不足。相对于点状特征而言, 从激光点云中提取规则的平面或曲面特征更易实现且更可靠, 所以检校中采用控

制平面或控制曲面代替控制点, 可以提高激光扫描仪外参数检校的精度和效率。文中利用平面和柱面可公式化的几何特征对要检校的激光点进行严密的数学方程式约束, 并通过非线性优化的算法精确求得扫描仪坐标系相对于 POS 坐标系的位置和姿态参数, 从而完成激光扫描仪坐标系到测图坐标系的检校工作。

### 1.1 坐标系统定义及检校模型

车载激光扫描仪外参数检校过程中涉及下述几个坐标系统, 如图 2 所示。

#### (1) 激光直角坐标系

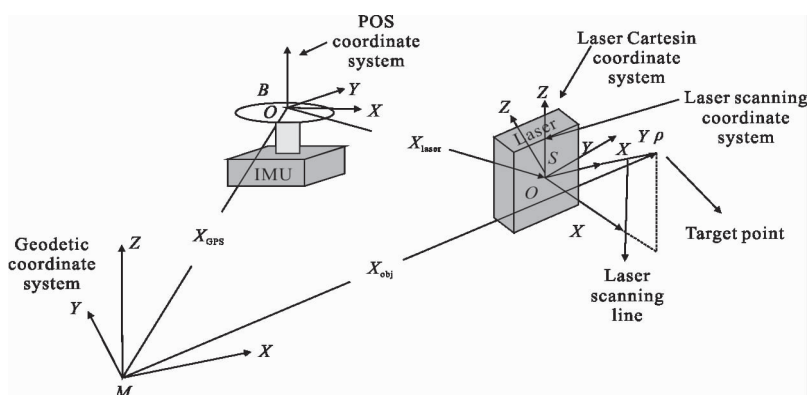


图 2 车载激光测绘系统坐标系示意图

Fig.2 Coordinate system sketch map of MMS

该坐标系由激光扫描仪的仪器轴向来确定。原点位于激光扫描仪的激光发射点或零距离处,  $x$  轴在扫描面内指向主扫描方向,  $y$  轴垂直于扫描面指向车行方向,  $z$  轴在扫描面内垂直于主扫描方向指向上方。

#### (2) POS 坐标系(或平台坐标系)

该坐标系由 GPS 天线位置和 IMU 的轴向来确定。原点一般位于 GPS 天线中心或 IMU 的质心,  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的方向由 IMU 的三轴方向确定, 构成右手直角坐标系。

#### (3) 当地水平坐标系

一般定义与 POS 坐标系同坐标原点,  $x$  轴指向东,  $y$  轴与  $x$  轴垂直指向北,  $z$  轴垂直于  $x$  轴和  $y$  轴向上, 构成右手直角坐标系。

#### (4) 大地坐标系

选用 WGS-84 高斯克吕格 3°带投影坐标系。

检校的目的是确定激光扫描仪(LS)与定位定姿系统(POS)之间的相对位置和姿态关系。LS 与 POS

之间的关系用激光直角坐标系与 POS 坐标系之间的关系来表示; POS 与大地坐标系之间的相对位置、姿态关系用 POS 坐标系与大地坐标系之间的关系来表示。三者之间的相互关系可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = R_l^w R_{POS} \left( R_{Las} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{Las} \\ Y_{Las} \\ Z_{Las} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} X_{POS} \\ Y_{POS} \\ Z_{POS} \end{bmatrix} \quad (1)$$

公式(1)为基于 POS 定位测姿数据进行激光扫描仪检校用的数学模型。其中,  $(x, y, z)$  为激光点在激光直角坐标系中的坐标;  $R_{Las}$  为激光扫描仪在 POS 坐标系中的安置角度  $(\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las})$  组成的旋转矩阵;  $(X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las})$  为激光扫描仪在 POS 坐标系中的位置偏移量;  $(X_G, Y_G, Z_G)$  为激光点在大地坐标中的坐标;  $R_{POS}$  为激光点对应的 IMU 测姿角度组成的旋转矩阵, 即 POS 坐标系与当地水平坐标系之间的坐标变换旋转矩阵;  $R_l^w$  为当地水平坐标系与 WGS-84 坐标系之间的坐标变换旋转矩阵;  $(X_{POS},$

$Y_{POS}, Z_{POS}$ )为激光点对应的 POS 定位数据。

### 1.2 系统检校用数学模型

虽然公式(1)建立了激光点扫描仪坐标系与地面测量坐标系间的检校关系,但是在检校时用常规测量仪器观测的地面控制点可能在激光点云中查找不到,只能根据采集的激光点间的相互关系采用临近点代替,所以使公式(1)存在一定的近似性,进而影响最后的检校精度。为了克服这一缺陷,常用平面或曲面代替单点进行整体平差解算检校参数。在这里采用了平面和柱面代替单点进行约束平差,进而精确求得检校参数,这两种约束平差所需的数学模型如下所述。

#### (1) 平面约束平差模型

设 $(r, s, t)$ 为平面  $P$  在地面测量坐标系中的三个法向矢量,所有落在平面  $P$  上的激光点经检校后的地面测量坐标 $(X_G, Y_G, Z_G)$ 应满足以下平面方程:

$$r \cdot X_G + s \cdot Y_G + t \cdot Z_G = 1 \quad (2)$$

将公式(2)进行微分取至泰勒级数展开式的一次项,得到约束平差所需的线性误差方程式:

$$V_{\text{平面}} + A_{\text{平面}} X - L_{\text{平面}} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{平面}}$ 为平面约束条件残差向量; $X$ 为 $[\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las}, X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las}]$ 增量向量; $A_{\text{平面}}$ 为 $X$ 对应的微分系数阵; $L_{\text{平面}}$ 为微分常数项向量。

采集完平面上的激光点,并已知这些平面的法向参数和 $[\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las}, X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las}]$ 的初始近似值后,对所有激光点进行法化得到求解 $[\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las}, X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las}]$ 增量的法方程式,并进行最小二乘平差计算:

$$A_{\text{平面}}^T A_{\text{平面}} X - A_{\text{平面}}^T L_{\text{平面}} = 0 \quad (4)$$

改正数的解为:

$$X = (A_{\text{平面}}^T A_{\text{平面}})^{-1} A_{\text{平面}}^T L_{\text{平面}} \quad (5)$$

将 $[\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las}, X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las}]$ 的初始值代入上述法方程(4)解算得到新的改正数  $X$  和 $[\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las}, X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las}]$ 后,计算精度是否满足要求,否则反复迭代趋近直到满足精度要求,最后完成系统的检校。

受平面  $P$  的法向量 $(r, s, t)$ 以及 $[\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las}, X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las}]$ 初始值精度的影响,可能会造成上述

计算解的不定,进而影响最后的系统检校精度。为了克服这个问题,在平差计算时增加了 LM (Levenberg-Marquardt)非线性优化算法来解算 6 个检校参数。LM 算法是在未知参数的初始值不精确或者不知道的情况下,进行求解非线性最小二乘问题的一种平差方法。

将公式(4)、(5)进行改化得到 LM 计算用的求解方程式:

$$(A_{\text{平面}}^T A_{\text{平面}} + \lambda) X - A_{\text{平面}}^T L_{\text{平面}} = 0 \quad (6)$$

以及 LM 解:

$$X = (A_{\text{平面}}^T A_{\text{平面}} + \lambda)^{-1} A_{\text{平面}}^T L_{\text{平面}} \quad (7)$$

平差时每次调整  $\lambda$  的值来控制计算结果的收敛和发散。LM 计算的收敛条件是比较两次求得的增量的差小于一个阈值,文中检校实验中平差计算时,将阈值设定为 0.000 01 rad,反复迭代至满足精度要求。

#### (2) 圆柱面约束平差模型

虽然平面约束平差模型能够有效地解算出激光扫描仪的安置参数,但是,现实场景中很多平面不是严格的平面,普遍存在凹凸不平的现象(如建筑物的墙壁),所以若采用平面约束进行检校,很可能影响检校参数的精度;另外,当平面的位置、方向以及数量不合理时,会造成平面上激光点过少、平面的法向量分布情况不满足三维空间的遍历性分布,进而导致最后的参数解算不稳定,甚至求不出解的问题。例如,当采用的平面的方位与移动测量系统轨迹方向一致时,会造成移动测量系统前进方向的偏移量  $Y_{Las}$  解的不稳定。若采用圆柱面约束解算检校参数就能够有效克服这一问题。

设 $(X_C, Y_C, R)$ 为圆柱面在地面测量坐标系中的中心坐标和半径,所有落在圆柱面  $H$  上的激光点经检校后的地面测量坐标 $(X_G, Y_G, Z_G)$ 应满足以下柱面方程:

$$(X_G - X_C)^2 + (Y_G - Y_C)^2 - R^2 = 0 \quad (8)$$

将公式(8)进行微分得到柱面约束平差所需的线性误差方程式:

$$V_{\text{柱面}} = A_{\text{柱面}} X - L_{\text{柱面}} \quad (9)$$

对应的法方程式以及改正数的解为:



$$A_{柱面}^T A_{柱面} X - A_{柱面}^T L_{柱面} = 0 \quad (10)$$

$$X = \left( A_{柱面}^T A_{柱面} \right)^{-1} A_{柱面}^T L_{柱面} \quad (11)$$

受柱面参数( $X_C, Y_C, R$ )以及 $[\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las}, X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las}]$ 初始值精度的影响,同样会造成上述计算解的不定,所以,仍然采用 LM 非线性优化算法进行平差计算。将公式(10)、(11)进行改化得到 LM 计算用的求解方程式为:

$$\left( A_{柱面}^T A_{柱面} + \lambda \right) X - A_{柱面}^T L_{柱面} = 0 \quad (12)$$

对应的 LM 解为:

$$X = \left( A_{柱面}^T A_{柱面} + \lambda \right)^{-1} A_{柱面}^T L_{柱面} \quad (13)$$

采用迭代计算直到满足精度要求,完成系统的检校。

### (3) 平面与圆柱面混合约束平差模型

当检校场同时存在平面与柱面物体时,可以将模型(1)中描述的平面约束平差模型与(2)中描述的圆柱面约束平差模型结合起来,组成混合约束平差模型对激光扫描仪进行检校,从而得到更稳定精确的检校结果。因此,可将公式(3)、(9)联合起来得到平面与圆柱面混合约束平差模型的误差方程式:

$$V_{平柱} = A_{平柱} X - L_{平柱} \quad (14)$$

式中: $V_{平柱}$ 为平面与圆柱面混合约束条件残差向量; $X$ 为 $[\varphi_{Las}, \omega_{Las}, \kappa_{Las}, X_{Las}, Y_{Las}, Z_{Las}]$ 增量向量; $A_{平柱}$ 为 $X$ 对应的微分系数; $L_{平柱}$ 为微分常数项向量。

相应的法方程式为:

$$A_{平柱}^T A_{平柱} X - A_{平柱}^T L_{平柱} = 0 \quad (15)$$

相应的 LM 计算用的求解方程式为:

$$\left( A_{平柱}^T A_{平柱} + \lambda \right) X - A_{平柱}^T L_{平柱} = 0 \quad (16)$$

平差计算仍然采用反复迭代的方法,最后解算出所需的更加精确和可靠的检校参数。

## 2 实验与分析

为验证文中提出的平面与圆柱面混合约束激光扫描仪检校方法的有效性,笔者所在课题组在一辆铁路轨道检测车上安装了两套 Leica 制 Pegasus Two 型车载移动测量系统,如图 3 所示。该系统用来采集高质量的路轨及周围附属设施的空间信息数据,用于铁路的管理及维护。



图 3 Leica 制 Pegasus Two 型车载移动测量系统及实验用铁路轨检车

Fig.3 Leica Pegasus Two vehicle mobile measurement system and experimental railway track inspection vehicle

Pegasus Two 系统由一台每秒采集 100 多万个激光点、量测精度达到 2 mm 的 Z+F 2D 激光扫描仪、一套定位精度 2 cm、测姿精度 0.002° 的 SPAN35 型定位测姿 POS 系统以及 7 台可采集 360° 全景影像的单相机集成而成。为了提高激光点的采集密度,尤其是轨道各个侧面的覆盖面积,尽可能多地采集轨道周围及其他附属设施的空间信息,在铁路轨检车前后不同指向的两个位置安装了两套 Pegasus Two 系统。POS 系统存在定位测姿误差,这是影响移动测量系统测量精度的主要因素之一。两套扫描系统分别采用各自的 POS 定位信息进行检校后,可能会造成检校后的激光点云在融合时增大点云间的偏差。为了克服这一问题,笔者将一套系统的激光原始数据与另一套的 POS 定位测姿系统结合,使两套系统共用一套 POS 定位测姿数据,从而使两套系统的激光点云精度达到一致,这需要对 Pegasus Two 系统进行高精度的检校。

图 4 为 Pegasus Two 系统在铁路轨道上采集的一段试验场的点云展示图。现场是一个车辆检测场,线路两侧停放了一些铁路检测车和普通汽车以及厂房,试验场中还设置了几个激光反射板。轨道周围环境中可利用的约束条件有地面,工程车上部分平面

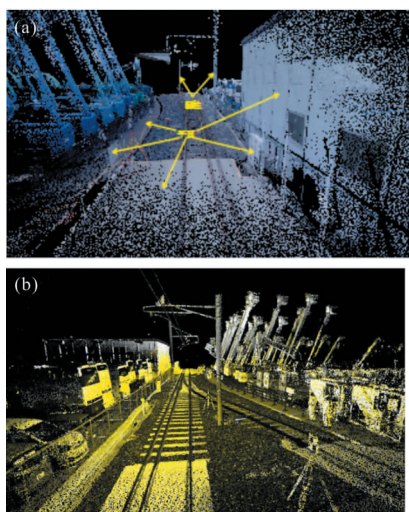


图 4 试验场点云截图

Fig.4 Points cloud picture of the test site

组件,以及圆柱形电杆等地物,可利用的理想平面比较少。图中可以看出,平面的走向基本都与轨道方向一致,这会造成平面约束检校时与轨道方向一致的方向上的分量解算结果的不稳定和精度降低。检校数据是直接利用系统获取的轨道两边的人工地物激光点数据,以验证文中方法的实用性、方便性和有效性。激光扫描仪相对于 POS 坐标系的初始安置位置和姿态参数直接通过人工目估的方法进行设置,不需要用全站仪进行精确的量测,因此,文中检校方法对检校条件要求不高。

图 5 是两套系统用混合平柱面约束检校前获取

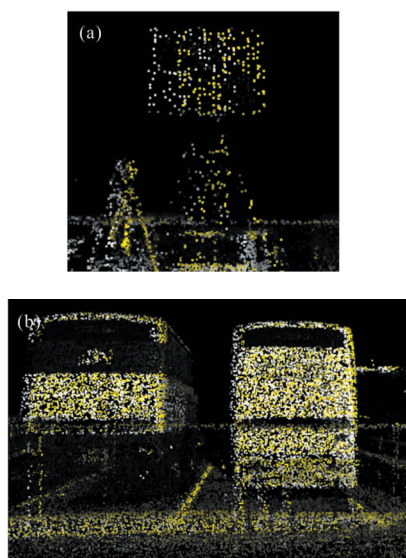


图 5 系统前进方向上产生的点云错位

Fig.5 Points cloud dislocation in moving direction

的激光点云(黄色点云和白色点云)叠合起来的效果图。可以看出激光反射板和车辆在前进方向上均有明显的错位现象,而且很难从点云图中分辨出反射板的形状。所以需要进行高精度检校,提高系统的测量精度,消除点云叠合错位现象。

为验证、对比激光扫描仪外参数检校时只采用平面特征约束和采用混合规则平柱面约束的解算精度和有效性,对两种平差模型分别进行了实验。实验中,没有事先用全站仪精确测定平面和柱面的参数,而是采用了随机抽样一致性算法 (Random Sample Consensus, RANSAC),自动提取拟合出点云中的平面和柱面特征,并计算出平面和柱面的参数作为后面平差解算的初始参数,平差时把平面和柱面参数与激光扫描仪的安置参数一起作为未知参数进行平差计算。

该次检校实验中采用了两根圆柱形电杆进行约束,为了避免电杆倾斜以及上下不同半径产生的误差,将电杆从下到上分割成几段,每段当作一个圆柱进行约束,如图 6 所示。由于电杆有一定的长度,对应地面较长时间段内采集的激光点云,通过分段可以有较多的约束控制,以提高计算的强度和稳定性。

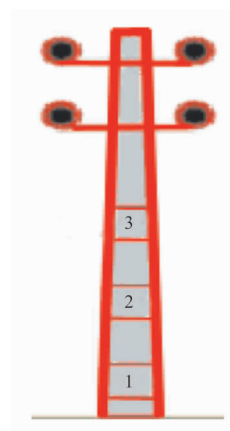


图 6 柱面分段拟合示意图

Fig.6 Piecewise fitting graph of the cylinder

表 1、2 所示分别为只采用平面约束平差和采用平柱面联合约束平差解算的扫描仪检校参数和精度。把其中一套扫描仪检校后获取的平面点云进行拟合,用另一套检校过的扫描仪获取的激光点到拟合后平面的距离偏差的中误差作为评价检校精度的指标之一。从表中可以看出,采用混合规则几何面约束平差解算的检校参数精度比只采用平面约束平差

表 1 只采用平面约束解算的扫描仪位置姿态参数及精度

Tab.1 Position and attitude parameters and accuracy of scanner only using plane constraints

Position and attitude parameters	$X_{LIS}/m$	$Y_{LIS}/m$	$Z_{LIS}/m$	$\varphi_{LIS}/(^{\circ})$	$\omega_{LIS}/(^{\circ})$	$\kappa_{LIS}/(^{\circ})$	RMS of the distance/m
Initial values	-1.055 7	3.604 2	0.167 5	-177.476 70	-43.840 14	-0.004 61	0.112
Adjusted values	-1.057	3.52	-0.189	-177.483 92	-48.663 03	-0.001 98	0.009

表 2 平面、柱面联合约束解算的扫描仪位置姿态参数及精度

Tab.2 Position and attitude parameters and accuracy of scanner using planes and cylinders constraints together

Position and attitude parameters	$X_{LIS}/m$	$Y_{LIS}/m$	$Z_{LIS}/m$	$\varphi_{LIS}/(^{\circ})$	$\omega_{LIS}/(^{\circ})$	$\kappa_{LIS}/(^{\circ})$	RMS of the distance/m
Initial values	-1.055 7	3.604 2	0.167 5	-177.476 70	-43.840 14	-0.004 61	0.112
Adjusted values	-1.059	3.483	-0.186	-177.464 66	-48.630 34	-0.016 54	0.006

解算的精度有了明显的提高, 距离偏差的中误差从 0.009 m 提高到了 0.006 m。

为了验证系统检校的效果, 把两套扫描仪获取的点云数据进行了叠合。图 7 为试验场的两套激光点云数据叠合后的 3D 效果图, 可以看出检校场中所有地物, 包括铁轨、枕木、铁轨周围地物、空中电线、工程车部件都重合一致, 如果不考虑 POS 本身的观测精度, 检校精度均达到了生产要求。图 8 是检校后以两套系统激光点云叠合在一起的局部放大截图, 灰色点云为第一套系统的激光数据, 黄色点云为第二套的激光数据。与图 5 相比较, 可以明显看出, 反射板、车辆以及电线杆的点云叠合后已经严格重

合在一起。特别是比较细小的电线和电线支架, 点云叠合的效果也比较好的, 高度和平面上都没有错位现象, 说明系统检校达到了比较好的效果。



图 7 联合约束检校后两系统激光点云叠合图

Fig.7 Laser point cloud overlapping screenshot of two systems after joint constraint calibration

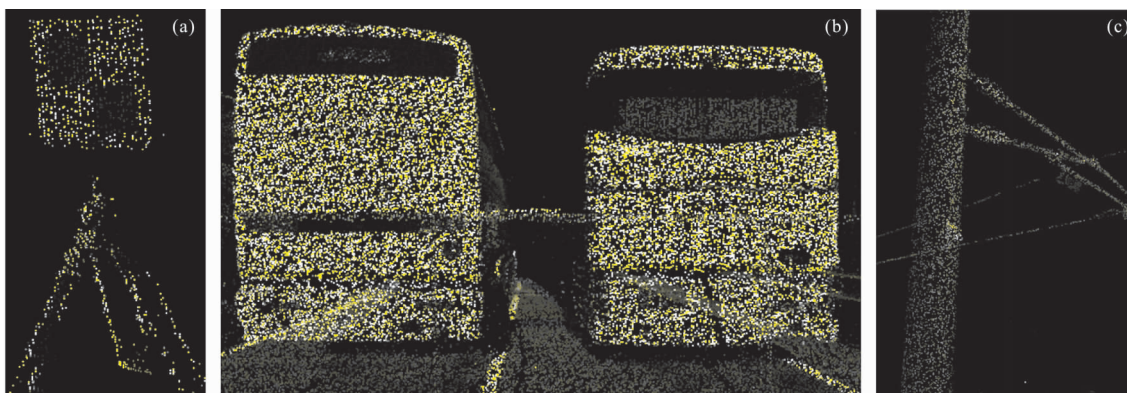


图 8 混合平柱面联合约束检校后点云叠合效果图

Fig.8 Points cloud overlapping effect map after adjustment of joint constraint

### 3 结 论

车载移动测量系统已经成为城市规划、道路测

量、地物普查以及三维建模的一种重要的数据快速采集工具, 其中激光扫描仪安置参数的精确、快速检校是移动测量系统需要解决的关键技术之一。文中



提出的利用混合规则几何面的MMS激光扫描仪外参数检校方法,将平面和柱面结合起来,弥补了平面约束检校时的一些不足。利用一般场所常见的平面和圆柱面等简单几何体地物,即可实现对车载移动测量系统的精确、快速检校。该检校方法不但适合于单套移动测量系统的激光扫描仪外参数检校,也适合于复合(同一移动平台安装多套系统)移动测量系统的外参数检校;具有精确、简便、快速、低廉、高效和实用等显著特点,具有较好的推广应用价值。

#### 参考文献:

- [1] Sun Liang, Xia Yonghua, Ma Xiaowei, et al. The application of vehicle-borne mobile mapping system in urban trees census [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(3): 137-141. (in Chinese)  
孙亮, 夏永华, 马小伟, 等. 车载移动测量系统在城市树木普查中的应用[J]. 测绘科学, 2018, 43(3): 137-141.
- [2] Liu Rufei, Lu Xiushan, Yue Guowei, et al. An automatic extraction method of road from vehicle-borne laser scanning point clouds [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 250-256. (in Chinese)  
刘如飞, 卢秀山, 岳国伟, 等. 一种车载激光点云数据中道路自动提取方法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42(2): 250-256.
- [3] Gong Jianya, Cui Tingting, Shan Jie, et al. A survey on facade modeling using LiDAR point clouds and image sequences collected by mobile mapping systems [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(9): 1137-1143. (in Chinese)  
龚健雅, 崔婷婷, 单杰, 等. 利用车载移动测量数据的建筑物立面建模方法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2015, 40(9): 1137-1143.
- [4] Wang Yonghong, Chen Hongqiang, Yang Xiaofeng, et al. Accuracy analysis of vehicle-borne mobile surveying system in municipal pipeline measurement [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(5): 82-84, 99. (in Chinese)  
王永红, 陈宏强, 杨晓锋, 等. 车载移动测量系统在市政管线地形图测量中的精度分析 [J]. 测绘通报, 2017(5): 82-84, 99.
- [5] Lu Xiushan, Teng Teng, Liu Rufei. Mobile mapping, geographic information update urban management intelligence [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1592-1597. (in Chinese)  
卢秀山, 滕腾, 刘如飞. 移动测量、地理信息更新与城市管理智能化 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1592-1597.
- [6] Petrie G. An introduction to the technology mobile mapping systems [J]. *Goeinformatics*, 2010, 13(1): 32-43.
- [7] Morgan D. Using mobile LiDAR to survey railway infrastructure. Lynx mobile mapper [C]//Proc FIG Comm, 2009, 5: 32-40.
- [8] Xue Wu, Zhang Yongsheng, Zhang Lijun, et al. Discussion on geometric calibration of mobile measurement system [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(1): 68-71. (in Chinese)  
薛武, 张永生, 张李军, 等. 车载测量系统几何标定的探讨 [J]. 测绘科学, 2015, 40(1): 68-71.
- [9] Wang Li, Li Guangyun, Yang Xinyong, 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)  
王力, 李广云, 杨新永, 等. 车载三维激光扫描系统安置参数一站式标定 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1106005.
- [10] Kang Yongwei, Zhong Ruofei, Wu Yu. Research of Calibrating vehicle laser scanner's external parameters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (S1): 249-253. (in Chinese)  
康永伟, 钟若飞, 吴昊. 车载激光扫描仪外参数检校方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S1): 249-253.
- [11] Bae K, Lichti D D. On-site self-calibration using planar targets for terrestrial laser scanners [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2007, 37 (Part 3/W52): 14-19.
- [12] 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)  
张海啸, 钟若飞, 孙海丽. 顾及平面特征的车载激光扫描系统外参数标定法 [J]. 测绘学报, 2018, 47 (12): 1640-1649.
- [13] So E, Basso F, Menegatti E. Calibration of a rotating 2D laser range finder using point-plane Constraints [J]. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Amp;*



- Intelligent Systems*, 2013, 7(2): 30–38.
- [14] Hyyppä H, Kaartinen H, Jaakkola A, et al. Benchmarking the performance of mobile laser scanning systems using a permanent test field [J]. *Sensors*, 2012, 12(9): 814–835.
- [15] 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)  
姚连璧, 汪志飞, 孙海丽. 车载激光扫描仪外参数标定方法设计与实现[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 161–166.
- [16] Ting On Chara, Derek D Lichta, David Belton. A rigorous cylinder-based self-calibration approach for terrestrial laser scanners [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 99: 84–99.