

基于共面约束的多线激光雷达相对位置关系检校

张 顺¹, 黄玉春^{1*}, 张文俊²

- (1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079;
2. 立得空间信息技术股份有限公司, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 多线激光雷达具有成本低、体积小、能直接获取场景地物表面的三维点云数据等优点, 已被广泛应用在无人驾驶、移动测量、机器人等领域。为减少遮挡, 提高点云密度, 两个或多个激光雷达常被集成在一起, 互为补充。不同激光雷达的安装位置和姿态不同, 要融合激光雷达的点云数据, 关键在于对激光雷达之间相对位置关系的检校。为检校激光雷达之间的相互位置关系, 提出了基于共面约束的检校算法。算法要求不同的激光雷达同时扫到相同的平面, 利用平面在不同坐标系下的对应关系求解激光雷达之间的相互位置关系, 并结合 Levenberg-Marquardt (L-M) 优化算法, 提高检校精度。该算法操作简单、通用性强、检校精度高。

关键词: 多线激光雷达; 相对位置关系检校; 共面约束; L-M 优化

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0330003

Relative position calibration of multibeam LIDAR based on coplanar constraints

Zhang Shun¹, Huang Yuchun^{1*}, Zhang Wenjun²

- (1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Leader Spatial Information Technology Corporation, Wuhan 430079, China)

Abstract: Multibeam LIDAR has been widely applied in the fields of unmanned ground vehicle, mobile measurement and robots because of its low cost, small size and capability of acquiring 3-dimensional distance of objects in the scene. To reduce occlusion and improve the density and coverage of point cloud, two or more LIDAR devices are integrated together to complement each other. As the installation position and attitude of the LIDAR are different, relative position calibration is a key step before fusing different laser data. In order to calibrate the relative spatial position relationship, a method based on coplanar constraints was proposed. Different LIDARs captured the range data of the same plane simultaneously. Although the range data had different coordinate systems, they represented the same plane. Relative positions between LIADR were initially obtained by fitting the common plane of multiple range data of different coordinate systems, and then optimized by L-M algorithm to enhance the

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(41671419, 51208392); 国家 863 计划(2015AA124001); 武汉大学学科交叉项目(2042017kf0204); 地球空间国家协同创新中心(2042017KF0235)

作者简介: 张顺(1994), 男, 硕士生, 主要从事移动测量和传感器检校方向的研究。Email: shun_z@whu.edu.cn

通讯作者: 黄玉春(1994), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事多传感器集成与移动测量、交通遥感、机器学习方面的研究。
Email: hycwhu@whu.edu.cn

calibration accuracy. This method is simple, accurate, and suitable for most LIDAR configurations in practical applications.

Key words: multibeam LIDAR; relative position calibration; coplanar constraints; L-M optimization

0 引言

多线激光雷达能同时发射多条激光光线,在物体表面形成多条交线,获得场景中地物表面的点云数据。相对于单线激光雷达,多线激光雷达扫描一次能获得物体表面稀疏的三维轮廓信息,信息量更为丰富。同时,与旋转式三维激光扫描仪相比,多线激光雷达虽然分辨率低,但是其扫描速度快、成本低、体积小、能获得较好的物体表面强度信息,已广泛应用于无人驾驶^[1-2]、移动测量^[3-4]、机器人^[5-8]等领域。为减少遮挡,提高点云密度,两个或多个多线激光雷达常被集成在一起,互为补充。多个激光雷达由于扫描方向的不同,能从不同侧面获取同一物体表面数据,有效减少单个激光雷达常见的遮挡问题,同时能获得物体表面更为密集的点云数据,达到三维激光扫描仪的效果。因此,两个及以上的多线激光雷达的集成在实际应用中十分常见。不同激光雷达的安装位置和姿态不同,要融合不同激光雷达的点云数据,获取密集的表面轮廓信息,关键在于不同激光雷达之间相对空间位置关系的检校,即计算不同多线激光雷达坐标系之间的空间旋转和平移关系。

目前对于单线激光雷达和三维激光扫描仪外参检校的研究比较多,而对于多线激光雷达之间相互位置关系检校的研究比较少。三维激光扫描仪的检校主要是确定扫描仪在场景中的空间位置,由于其点云密度高,郑瀚提出从密集的点云数据中提取出明显的标靶点完成检校^[9],褚智慧通过从点云中的面寻找同名点来完成检校^[10]。而多线激光雷达分辨率低,采用特征点进行检校的难度大、精度低。单线激光雷达检校的目的是为了确定与其他传感器的相对空间位置关系,实现数据的融合,例如单线激光雷达与相机的检校,或者多个单线激光雷达之间的检校。单线激光雷达与相机的检校可以参考 Zhang 等提出的利用棋盘平面作为标定物,激光点扫在棋盘上作为约束条件完成检校^[11]。由于单线激光雷达的扫描线是一条直线,也可以采用线特征进行检校。例

如 Zhou 利用激光线与棋盘平面之间的几何关系完成相机与单线激光雷达之间的检校^[12]。单线激光雷达之间的检校可以利用相机作为中介,也可以利用线特征完成。Fernandez-Moral 等提出了利用激光与相互垂直平面的交线完成检校^[13]。田祥瑞等提出了利用竖直墙面特征来完成检校过程^[14]。多线激光雷达之间的检校可以参考上述思想,例如采用相机作为中介,但是这种方法的花费较高,不具有通用性。同时,多线激光雷达的扫描线是一条曲线,难以采用线特征进行检校,而平面特征是适合多线激光雷达的检校。

文中利用不同激光雷达同时扫到共同的平面,基于共面约束,结合 L-M 优化算法^[15],实现了不同激光雷达之间的相互位置关系检校。共同平面可以是建筑物的墙面、地面以及人工平面物体等。检校时可以移动激光雷达或者平面物体,从不同位置和姿态采集多组平面数据,操作简单。文中算法的核心思想是利用共同平面在不同激光雷达坐标系下的法向量和距离之间的对应关系,将检校参数的求解问题转化为最优化求解问题,通用性强,求解精度高,适合于多个激光雷达阵列时的相对位置关系的高精度检校。

1 问题定义

1.1 坐标系的建立

多线激光雷达记录的是激光发射角(水平角和垂直角)和斜距,此时激光点是在极坐标系下描述的。首先需要将激光点从极坐标系转换到空间直角坐标系。如图 1 所示,建立空间直角坐标系。

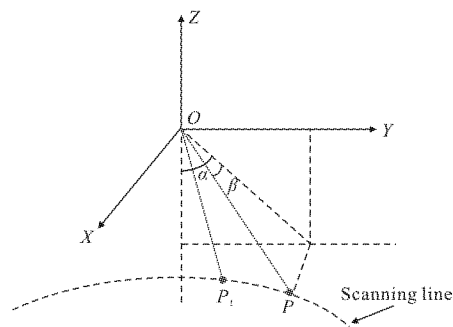


图 1 坐标系的转换

Fig.1 Transformation of coordinate system

如图 1 所示,以激光雷达的发射中心为原点,水平方向为 Y 轴,垂直方向为 X 轴建立右手坐标系。极坐标系下的激光发射角在空间直角坐标系下的表示为水平角 α 和垂直角 β ,斜距记为 L ,即为线段 OP 的长度。激光点 P 是在空间直角坐标系下的坐标表示为 p ,则与极坐标的转换关系如公式(1)所示:

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \cdot \sin\beta \\ L \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha \\ -L \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

多线激光雷达有多条扫描线,同一扫描线上的激光点垂直角相同,垂直角决定了扫描的宽度,水平角范围为 $0\sim 360^\circ$ 。

多线激光雷达扫描线是曲线的原因在于斜距和垂直角。如图 1 所示,同一扫描线上的两点 P_1 和 P ,两者垂直角相等,但是 P_1 距离原点近,斜距短,由公式(1)可知, P_1 和 P 两点的 x 值不同。由此可见,同一扫描线上的激光点的值不同,且呈非线性变化,因此多线激光雷达扫到平面上是一条曲线。如图 2 所示,为多线激光雷达扫描线的俯视图,一条扫描线对应一个垂直角。

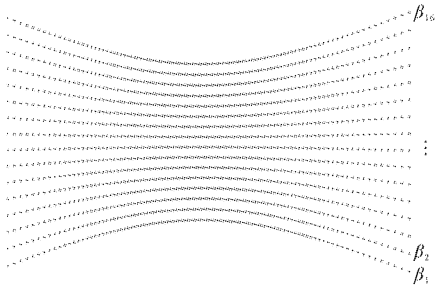


图 2 多线激光扫描线示意图

Fig.2 Schematic diagram of multibeam laser scanning lines

1.2 问题的描述

如图 3 所示,两个激光雷达命名为激光 A 和激光 B ,激光雷达按照图 1 的方式建立空间直角坐标系 $O_A - X_A Y_A Z_A$ 和 $O_B - X_B Y_B Z_B$,两坐标系均为右手坐标系。文中求解的是两个激光坐标系之间的相对位置关系。

图 3 中所示的平面,激光 A 和激光 B 均在平面上形成多条激光线,其中红色扫描线对应的是激光 A 在平面上形成的点云数据,黑色扫描线是激光 B 在平面上形成的点云数据。通过公式(1)将所有的点云数据转换到三维空间直角坐标系下,对应的激光

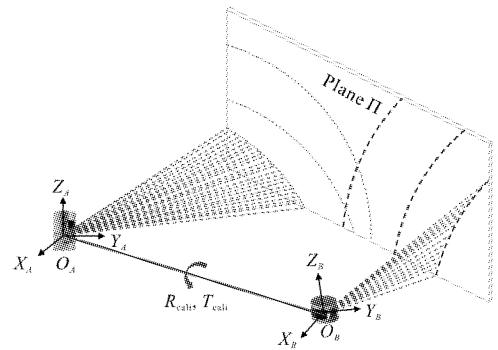


图 3 激光检校示意图

Fig.3 Schematic diagram of calibration of LIDAR

点分别表示为 $p^A = \{p_1^A, p_2^A, \dots, p_n^A\}$ 和 $p^B = \{p_1^B, p_2^B, \dots, p_n^B\}$,点与点之间没有对应性,但都同属于一个共同的平面 Π 。基于此共面约束,文中解决的问题可以进一步描述为:已知扫到同一平面上的激光点集合 P^A 和 P^B ,计算激光 A 和激光 B 之间的相对位置关系,即求解空间旋转矩阵 R_{cali} 和平移向量 T_{cali} 。其中旋转矩阵是 3×3 的正交矩阵,表示的是坐标系绕三个坐标轴旋转的角度,自由度为 3;平移向量是一个 3×1 的列向量,表示的是两个坐标原点之间的平移关系,自由度也为 3。

2 相对位置关系的检校

文中检校的对象是多线激光雷达,检校原理采用的是共面约束。共面约束需要知道平面在两个坐标系下的法向量和距离,根据法向量和距离的对应关系求解旋转矩阵和平移向量。

2.1 激光平面拟合

求解激光雷达相对位置关系之前,需要确定平面的法向量和到坐标系原点的距离,即需要根据激光点 P^A 和 P^B 拟合点云平面。数据采集过程中,由于仪器精度和环境的影响,激光数据必然存在误差,部分数据与真实情况相差较大,若这些数据参与模型参数的计算,则会导致模型参数产生较大偏差。因此,在进行平面拟合前,有必要对异常数据进行筛选与剔除。

文中采用随机抽样一致性(RANSAC)算法剔除异常数据,计算平面方程^[16-17]。RANSAC 算法的思想是在观测数据集中采取随机抽样的方法来估计出

最优模型。RANSAC 算法分为三步,第一步从点云数据集中随机抽取最小样本(平面的最小样本为三个数据点),第二步利用样本数据计算平面参数,第三步计算所有数据点到平面的距离,距离小于给定阈值的数据点视为内点,统计内点的个数。RANSAC 算法重复这三步,直到内点个数达到最多。如图 4 所示,红色点为随机选取的样本点,绿色点为内点,黑色点为噪声点(即外点)。

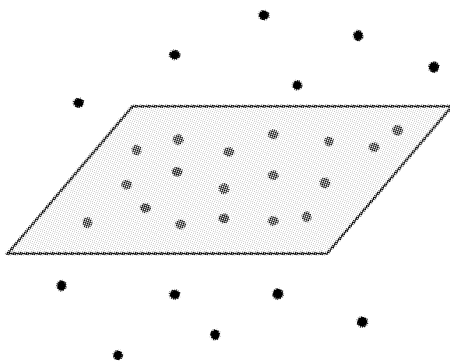


图 4 RANSAC 拟合平面
Fig.4 RANSAC fitting plane

三维点云数据中拟合的平面方程如公式(2)所示:

$$n^T \cdot p - d = 0 \quad (2)$$

式中: p 为位于平面上的任意激光点的三维坐标,用 3×1 的矩阵表示; n 为一个 3×1 的单位向量,其方向为激光坐标系原点到平面的法线方向; T 为矩阵转置运算符; d 为激光坐标系原点与平面之间的法线距离,是一个标量。对于文中的激光数据集 P^A 和 P^B 来说,均可以拟合出平面。移动激光雷达或者平面标定物形成对平面的 N 次观测,由此得到两个坐标系下的平面参数集合: $\{n_A^i, d_A^i, n_B^i, d_B^i\} (i=1, 2, \dots, N)$, 其中表示第 i 组数据, A, B 对应坐标系, d_A 和 d_B 表示的是坐标系原点到平面的法线方向距离,平面的单位法向量为 n_A 和 n_B 。

2.2 平移向量的初始解

两个激光坐标系原点和平面在空间里的分布如图 5 所示, T_{cali} 表示的是激光雷达之间的平移向量,即文中需要求解的目标。从图中可以分析出平移向量的空间几何关系,即平移向量在单位法向量 n_A 上的投影距离即为 d_A 和 d_B 之间的差值,用数学方式表

示为:

$$n_A^T \cdot T_{\text{cali}} = d_A - d_B \quad (3)$$

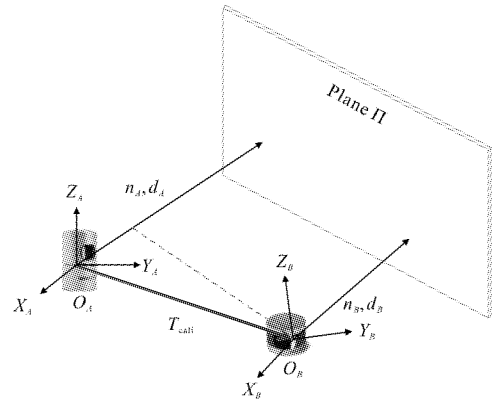


图 5 平移向量几何关系图
Fig.5 Geometric relation of the translation vector

公式(3)中的平移向量 T_{cali} 的自由度为 3,因此最少需要三组数据可以计算出平移向量的初始解。由 RANSAC 算法计算的平面参数集合 $\{n_A^i, d_A^i, n_B^i, d_B^i\}$ 以及公式(3)可以得到平移向量的误差方程:

$$T_{\text{cali}} = \underset{T_{\text{cali}}}{\text{argmin}} \sum_i^N \left(n_A^T \cdot T_{\text{cali}} - d_A + d_B \right)^2 \quad (4)$$

式中: i 代表第 i 组数据; $N (N \geq 3)$ 表示观测的总次数。公式(4)可由最小二乘求得平移向量的初始解,如公式(5)所示:

$$T_{\text{cali}} = \left(N_A N_A^T \right)^{-1} N_A (D_A + D_B) \quad (5)$$

式中: N_A 为激光 A 坐标系中 N 组平面单位法向量构成的 $3 \times N$ 大小的矩阵; D_A 和 D_B 表示的是坐标系原点到平面的法线距离组成的两个 $N \times 1$ 大小的矩阵。根据平面参数集合以及公式(5)可以计算出平移向量 T_{cali} 的初始解。

2.3 旋转矩阵的初始解

激光雷达之间平移向量的初始解确定后,还需要计算两者之间旋转矩阵的初始解。坐标系统之间的旋转矩阵表示的是两个坐标系之间坐标轴指向的变换关系,在空间中旋转矩阵不改变向量之间的相互位置关系,在代数上旋转矩阵是一个正交矩阵。文中算法基于共面约束,平面法向量在空间中是重合的,在几何上经过旋转矩阵表达在不同的坐标系中。因此,位于激光 B 坐标系中的平面单位法向量经由

旋转矩阵转换到激光 A 坐标系中, 与平面在激光 A 坐标系中的单位法向量等价, 由此可以写出旋转矩阵的误差方程, 如公式(6)所示:

$$R_{\text{cali}} = \arg \min_{R_{\text{cali}}} \sum_i^N \left(n_A^i \right)^T \left(R_{\text{cali}} n_B^i \right) \quad (6)$$

式中: R_{cali} 为由激光 B 坐标系转换到激光 A 坐标系的旋转矩阵; i 代表第 i 组数据; N 为观测的总次数。公式(6)等价于以下形式:

$$R_{\text{cali}} = \min_{R_{\text{cali}}} \text{trace}_i \left(R_{\text{cali}} N_B N_A^T \right) \quad (7)$$

式中: N_A 、 N_B 为平面单位法向量组成的矩阵。由于旋转矩阵是正交矩阵, 还应该满足正交矩阵的性质, 由此可以得到公式(8):

$$\begin{cases} R_{\text{cali}}^T R_{\text{cali}} = I \\ \det(R_{\text{cali}}) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

公式(7)是 Orthogonal Procrustes Problem(OPP)问题^[18], 为满足公式(8)对旋转矩阵的要求, 可以得到相应的拉格朗日函数, 如公式(9)所示:

$$f(R_{\text{cali}}, L, g) = \min_R \text{trace}_i(R_{\text{cali}} M) + \text{trace}(L(R_{\text{cali}}^T R_{\text{cali}} - I)) + g(\det(R) - 1) \quad (9)$$

式中: M 为 $N_B N_A^T$; L 和 g 是相对应的拉格朗日乘数, L 为 3×3 的矩阵, g 为常数; 函数 f 对旋转矩阵 R_{cali} 变换可以得到公式(10):

$$R_{\text{cali}}^T M^T = -(L^T + L - gI) \quad (10)$$

公式(10)中, 等式右边是对称形式, 因此, 等式左边是对称阵, 可以推导出公式(11):

$$R_{\text{cali}}^T M^T = M R_{\text{cali}} \Rightarrow M^T = R_{\text{cali}} M R_{\text{cali}} \quad (11)$$

将矩阵 M 进行奇异值分解(SVD), 可以得到 $M = USV^T$, 公式(11)可以改写为:

$$M^T M = VS^2 V^T = R_{\text{cali}} US^2 U^T R_{\text{cali}}^T \quad (12)$$

由公式(12)得到旋转矩阵的初始解, 如下所示:

$$\begin{cases} N_B N_A^T = USV^T \\ R_{\text{cali}} = VU^T \end{cases} \quad (13)$$

每组平面数据可以提供公式(5)、(13)两个约束方程, 同时考虑公式(8)对旋转矩阵的约束, 因此最少只需三组数据才可求解。

2.4 L-M 优化初始解

实际采集操作中, 共同平面的观测数据远多于三组, 且存在不同程度上的误差。基于上述平移向量和旋转矩阵的初始解, 在这一节充分利用好不同的观测数据, 采用 L-M 算法对初始解进行优化, 得到平移向量和旋转矩阵的最优解。以平移向量和旋转矩阵的初始解作为初值输入, 以点-面作为约束条件, 即激光点位于平面上这一事实, 如图 6 所示, 激光点位于平面上, 则激光原点与激光点构成的向量和平面法向量的乘积为激光原点到平面的法线方向距离。根据这一约束对平移向量和旋转矩阵进行整体优化。

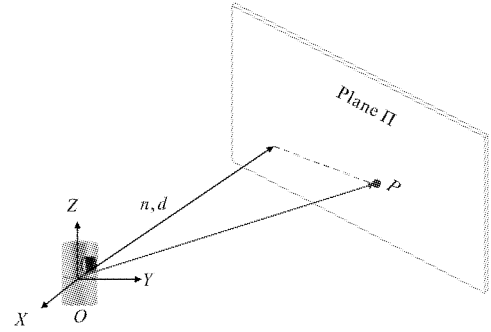


图 6 点-面约束示意图

Fig.6 Schematic diagram of point to plane constraint

图 6 中, 在理想情况下, 向量 OP 在法向量方向上的投影距离应与距离 d 在数值上相等, 但是由于噪声的影响, 两者之间会存在偏差, 将偏差的平方记为投影差, 如公式(14)所示:

$$E = \left(n_A^T \left(R_{\text{cali}} P^B + T_{\text{cali}} \right) - d_A \right)^2 \quad (14)$$

公式(14)中, R_{cali} 和 T_{cali} 由公式(5)和公式(13)计算得到, 表示的是激光 B 坐标系转换到激光 A 坐标系的旋转矩阵和平移向量。 P^B 是平面上激光点在激光 B 坐标系下的三维坐标, 即由 RANSAC 算法得到的内点坐标, n_A 和 d_A 为平面在激光 A 坐标系下的参数。由此可以列出优化方程, 如公式(15)所示:

$$\arg \min_{R_{\text{cali}}, T_{\text{cali}}} \frac{1}{N} \sum_i^N (E_i) \quad (15)$$

公式(15)计算的是平均投影误差, 其中 N 是点的个数。为了避免陷入局部极小值的情况, L-M 算法需要较为准确的初值, 以文中计算的初始解作为初值输入, 以公式(15)为优化条件, 使得平均投影误

差最小,来计算出旋转矩阵和平移向量的最优解。

优化过程中,为了增加算法的鲁棒性,优化方程里的平面点集合只选取通过 RANSAC 算法进行平面拟合得到的内点。同时为了简化计算,采用欧拉角来表示旋转矩阵,优化结束后再转换成矩阵形式。经过 L-M 优化计算可以得到平移向量和旋转矩阵的优化解。

3 实验结果及分析

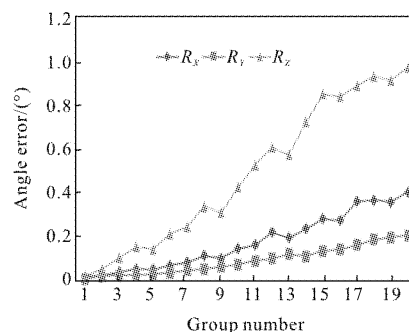
3.1 仿真数据实验结果

为了评估算法的鲁棒性,文中首先采用仿真数据来评测算法性能。在仿真实验中,激光数据的产生完全模拟激光雷达 VLP-16 和 HDL-32E 的工作原理。VLP-16 和 HDL-32E 分别是 16 线和 32 线的激光雷达,工作原理是记录激光射线的水平角、垂直角和斜距,通过角度和距离将激光点从极坐标系转到空间直角坐标系中。实验中,设置多线激光雷达的水平角范围为 $-60^\circ\sim 60^\circ$,角分辨率为 0.1° ,垂直角按官方参数设置。设置平面与其中一个激光原点相距 2 m,地面与激光原点相距 3 m,平面大小设置为 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ 。激光射线与平面或地面相交产生激光点。设置激光雷达之间的旋转矩阵(欧拉角表示,单位为 $^\circ$)和平移向量(单位为 mm)真值如下所示:

$$\begin{cases} R_{\text{truth}}=[2, 15, 1]^\circ \\ T_{\text{truth}}=[500, 20, 10]\text{ mm} \end{cases}$$

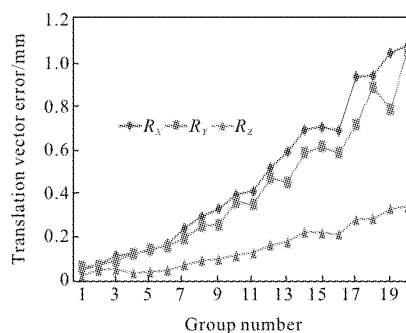
仿真实验中平移向量和旋转矩阵的真值已知,因此可以采用计算的平移向量、旋转矩阵和真值之间的误差来评价算法的检校精度。

上述过程定义了激光参数、平面参数、激光坐标系之间的相对位置关系。在此基础上,在 32 线激光雷达仿真数据中,加入均值为 0,标准差为 1~20 mm 的高斯噪声。由于 16 线和 32 线激光雷达的信噪比不同,因此在 16 线激光雷达仿真数据中加入均值为 0,标准差为 32 线的 1.3 倍的高斯噪声。为减少误差的偶然性,在每组噪声水平下,独立进行 100 次实验,每一次实验中,仿真产生 10 组平面数据。采用文中算法计算激光坐标系之间的相对位置关系,统计不同噪声水平下的误差,将结果绘制如图 7 所示。



(a) 角度误差

(a) Angle errors



(b) 平移向量误差

(b) Translation vector error

图 7 仿真实验误差结果图

Fig.7 Diagram of the simulation experiment errors

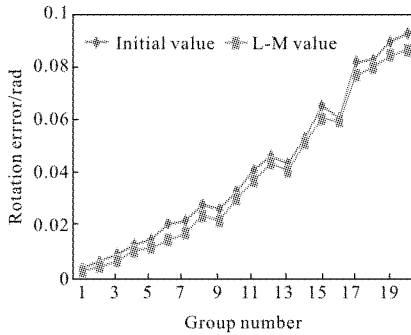
图 7 分别统计了旋转矩阵 3 个转角和平移向量 3 个位移量与真值之间的误差。从图中可以看出,随着激光噪声水平的增加,对应的误差在缓慢增大。这说明计算结果受噪声的影响,这是由于噪声增大时,平面拟合的偏差就越大,平面法向量和距离的误差也越大,导致计算结果精度变差。图中误差增长的趋势十分平缓,说明文中的算法的鲁棒性好。同时,在大噪声水平下,图中角度误差不超过 1° ,平移误差不超过 10 mm,说明了文中算法具有很好的检校精度。

实验中,进一步验证了 L-M 优化算法对文中结果的影响。设置了未加点面约束与加入点面约束的对比实验,误差计算公式如下所示:

$$\begin{cases} E_R = \arccos\left(\frac{R_{\text{truth}} \cdot R_{\text{cali}}^T}{\|R_{\text{truth}}\| \cdot \|R_{\text{cali}}\|}\right) \\ E_T = \|T_{\text{cali}} - T_{\text{truth}}\| \end{cases} \quad (16)$$

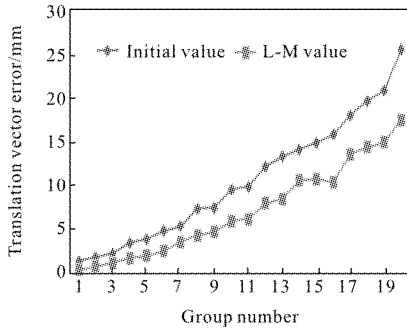
公式(16)中,旋转矩阵是由三个转角组成的列向量, E_R 计算的是转角向量与真值之间的角度偏离值,

单位为 rad。 E_T 表示的是平移向量与真值之间的误差,采用欧式距离来计算,单位为 mm。实验结果如图 8 所示。



(a) 旋转矩阵误差

(a) Rotation matrix errors



(b) 平移向量误差

(b) Translation vector error

图 8 对比实验误差结果图

Fig.8 Diagram of comparative experiment errors

图 8 分别统计了未加入点面约束和加入点面约束的误差结果,对比实验结果发现,加入点面约束的实验误差均小于未加入点面约束的实验误差,说明 L-M 优化算法提高了检校的精度。这是因为优化过程中加入了新的约束条件,即点面约束,同时优化过程是从整体的角度进行平差,减弱了噪声对结果的影响。

从图 7 的仿真结果来看,文中算法在不同噪声水平下的误差均较小,算法具有很好的鲁棒性和准确性。从图 8 的对比实验来看,加入点面约束进一步提高了文中算法的检校精度。

3.2 真实数据实验结果

通过仿真数据实验结果可以看出,对于多线激光雷达之间相对位置关系的解算,文中具有很好的鲁棒性和准确性,并且操作简单。

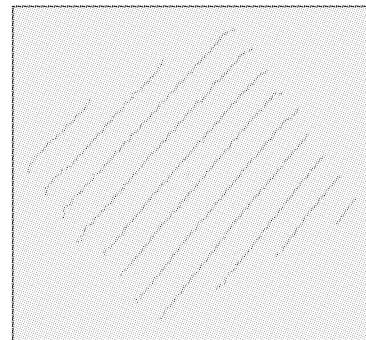
为了进一步验证文中算法在实际应用中的效果,利用集合多线激光雷达系统采集真实场景中的数据进行实验。实验中采用 Velodyne 公司生产的 VLP-16 激光雷达和 HDL-32E 激光雷达采集真实场景中的数据。两种多线激光雷达集成在测量车上,实验的目的是通过采集的数据计算两者之间的相对位置关系,集成设备如图 9 所示。



图 9 集成设备图

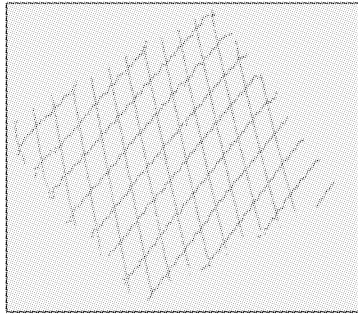
Fig.9 Diagram of integrated device

真实场景实验中,采集了 40 组数据,其中 25 组作为计算数据,15 组作为检查数据。利用 25 组数据和文中算法计算出激光雷达之间的相互位置关系参数,即图 9 中两个空间直角坐标系之间的旋转矩阵和平移向量。两种激光雷达的分辨率和扫描方向均不同,因此文中采用平面特征是否重合作为评价标准。将 16 线激光数据按照相对位置关系转换到 32 线激光雷达坐标系中,相同平面应该重合,达到加密数据的效果。文中从 16 线激光数据和 32 线激光数据中截取任一共同平面,然后将 16 线激光坐标系中的平面数据按照相对位置关系参数转换到 32 线激光坐标系中,最后在 CloudCompare 里叠加显示,结果如图 10 所示。



(a) 单一激光点云

(a) Single laser point cloud



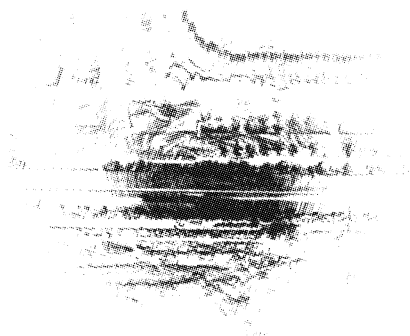
(b) 叠加的激光点云
(b) Superimposed laser point clouds
图 10 平面点云图

Fig.10 Diagram of point clouds in plane

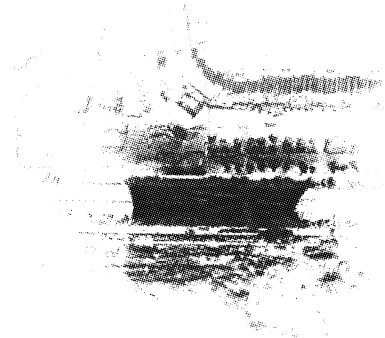
图 10 中红色数据点是 32 线激光平面数据,黑色据点是 16 线激光平面数据经平移向量和旋转矩阵转换到 32 线激光坐标系中的数据。从图中可以看出两者重合在一起,达到了加密数据的效果。

为了进一步验证相对位置关系参数的实际效果,文中利用测量车采集了一段路面的数据,然后通过相对位置参数将两种激光数据转换到相同的坐标系中,观察路面点云数据是否加密,结果如图 11 所示,图 11(a)是 16 线激光雷达数据,图 11(b)是融合后的激光数据。

从图 11 中可以明显看出路面的点云数据被加密了。从图 11 (a)中可以看出 16 线的激光点云数据十分稀疏,难以从中选取同名特征点、线来定量评价实验结果,因此文中采用平面特征的法向量和距离的误差定量评价文中算法精度。从检查数据中截取相同平面,通过相对位置参数将数据转换到相同坐标系中,然后通过 RANSAC 算法分别拟合平面,计算法向量之间的角度偏差和距离的数值偏差。结果如表 1 所示。



(a) 数据融合前的路面点云图
(a) Diagram of point cloud of road surface before fusion



(b) 数据融合后的路面点云图
(b) Diagram of surface point cloud of road after fusion
图 11 密集的激光点云图

Fig.11 Diagram of dense laser point cloud

表 1 15 组数据平均误差表

Tab.1 Average error of 15 sets data

Number	Normal vector error/rad	Distance error/mm
15	0.026	5.73

实验过程中,发现少部分数据噪声较大,平面拟合的效果很差,剔除这些数据后,平均法向量误差为 0.026 rad,距离误差为 5.73 mm。以上实验结果说明文中算法在实际应用中能取得很好的效果。

4 结束语

文中提出了一种多线激光雷达之间相对位置关系检校的新算法。贡献主要有两点,一是充分利用多线激光的特点,提出了共面约束。基于共面的检校算法操作简单,精度高。二是在优化过程中引入了新的约束条件,即点-面约束,进一步提高了计算结果的精度。

参考文献:

- [1] Ye Y, Fu L, Li B. Object detection and tracking using multi-layer laser for autonomous urban driving [C]// International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2016: 259-264.
- [2] Droschel D, Schwarz M, Behnke S. Continuous mapping and localization for autonomous navigation in rough terrain using a 3D laser scanner [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2017, 88: 104-115.
- [3] Zhang Yi, Du Fanyu, Luo Yuan, et al. Map-building approach based on laser and depth visual sensor fusion SLAM [J]. *Application Research of Computers*, 2016,

- 33(10): 2970–2972. (in Chinese)
张毅, 杜凡宇, 罗元, 等. 一种融合激光和深度视觉传感器的 SLAM 地图创建方法 [J]. 计算机应用研究, 2016, 33(10): 2970–2972.
- [4] Lenac K, Kitanov A, Cupec R, et al. Fast planar surface 3D SLAM using LIDAR [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2017, 92: 197–220.
- [5] Alismail H, Browning B. Automatic calibration of spinning actuated lidar internal parameters [J]. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32(5): 723–747.
- [6] Du Liang, Zhang Tie, Dai Xiaoliang. Robot kinematic parameters compensation by measuring distance error using laser tracker system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2351–2357. (in Chinese)
杜亮, 张铁, 戴孝亮. 激光跟踪仪测量距离误差的机器人运动学参数补偿 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2351–2357.
- [7] Bogue R. Sensors for robotic perception. Part two: positional and environmental awareness [J]. *Industrial Robot*, 2015, 42(6): 502–507.
- [8] Liu Jiayin, Tang Zhenmin, Wang Andong, et al. Negative obstacle detection in unstructured environment based on multiple LiDARs and compositional features [J]. *Robot*, 2017, 39(5): 638–651. (in Chinese)
刘家银, 唐振民, 王安东, 等. 基于多线激光雷达与组合特征的非结构化环境负障碍物检测 [J]. 机器人, 2017, 39(5): 638–651.
- [9] Zheng Han. The measurement calibration of terrestrial 3D laser scanning [J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2015(16): 61–62. (in Chinese)
郑瀚. 地面三维激光扫描检校测量 [J]. 黑龙江科技信息, 2015(16): 61–62.
- [10] Chu Zhihui, Duan Changlong. Research of calibrating vehicle laser scanner's external parameters [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2016(2): 55–58. (in Chinese)
褚智慧, 段昌龙. 车载三维激光扫描系统外参数标定研究 [J]. 北京测绘, 2016(2): 55–58.
- [11] Zhang Q, Pless R. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration)[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005(3): 2301–2306.
- [12] Zhou L, Deng Z. A new algorithm for computing the projection matrix between a LIDAR and a camera based on line correspondences [C]//International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. IEEE, 2012: 436–441.
- [13] Fernández–Moral E, González–Jiménez J, Arevalo V. Extrinsic calibration of 2D laser rangefinders from perpendicular plane observations [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2015, 34(11): 1401–1417.
- [14] 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)
田祥瑞, 徐立军, 徐腾, 等. 车载 LiDAR 扫描系统安置误差角检校 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3292–3297.
- [15] Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares [J]. *Quarterly Applied Math*, 1944, 2(4): 436–438.
- [16] Yang Junjian, Wu Liangcai. A robust point cloud plane fitting method based on RANSAC algorithm[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2016(2): 73–75. (in Chinese)
杨军建, 吴良才. 基于 RANSAC 算法的稳健点云平面拟合方法[J]. 北京测绘, 2016(2): 73–75.
- [17] Li Xi, Han Xie, Xiong Fengguang. Plane fitting of point clouds based on RANSAC and TLS [J]. *Computer Engineering and Design*, 2017, 38(1): 123–126. (in Chinese)
李希, 韩燮, 熊风光. 基于 RANSAC 和 TLS 的点云平面拟合[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(1): 123–126.
- [18] Peter H Schönemann. A generalized solution of the orthogonal procrustes problem[J]. *Psychometrika*, 1966, 31(1): 1–10.