

文章编号 1004-924X(2025)16-2543-09

多线激光雷达旋转平台外参标定方法研究

王世强¹, 孟召宗¹, 高楠¹, 张宗华^{1,2*}

(河北工业大学机械工程学院, 天津 300401;

2. 河北工业大学创新研究院(石家庄), 河北 石家庄 050299)

摘要:为实现对三维场景的全方位点云数据扫描, 本文设计一种多线激光雷达旋转式扫描系统。该系统扫描的三维点云质量高度依赖于激光雷达与旋转平台之间的位姿转换关系。然而, 现有标定方法大多局限于单线雷达的应用场景, 并存在标定模型单一、参数耦合严重等问题。为此, 本文提出一种新的基于平面特征的多线激光雷达旋转平台外参标定方法。首先, 结合随机采样一致性算法, 构建多线激光雷达与旋转平台外参校正的数学模型。其次, 通过引入线性递减惯性权重系数替代标准粒子群优化算法中的固定惯性权重改进传统粒子群算法, 并采用改进算法对所构建的数学模型优化求解。最后, 通过仿真与实际场景中的点云厚度分析及重建效果评估, 验证所提方法的准确性与有效性。实验结果表明: 相比于校准前点云厚度为 7.668 1 cm, 校准后点云厚度降至 4.039 0 cm, 这说明经过所提方法标定后重建的点云分布更加均匀。结合使用标定前、后重建场景的点云分布对比, 进一步证明所提方法的有效性和可靠性。

关键词: 多线激光雷达; 雷达标定; 外参标定; 三维重建; 点云

中图分类号: TN958.98; TP391.4 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253316.2543

CSTR: 32169.14.OPE.20253316.2543

Research on the external calibration method for multi-beam LiDAR rotating system

WANG Shiqiang¹, MENG Zhaozong¹, GAO Nan¹, ZHANG Zonghua^{1,2*}

(1. College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Innovation and Research Institute of Hebei University of Technology in Shijiazhuang,
Shijiazhuang 050299, China)

* Corresponding author, E-mail: zhzhzhang@hebut.edu.cn

Abstract: To achieve full-view point cloud data acquisition of three-dimensional (3D) scenes, this paper proposed a multi-beam LiDAR rotational scanning system. The quality of the 3D point cloud reconstructed by this system was highly dependent on the pose transformation relationship between the LiDAR and the rotating platform. However, existing calibration methods were mainly designed for single-line LiDAR applications and faced issues such as overly simplistic calibration models and severe parameter coupling. Therefore, this paper presented an external parameter calibration method for multi-beam LiDAR rotating platforms based on planar features. First, a mathematical model for calibrating the target parameters was

收稿日期: 2025-03-27; **修订日期:** 2025-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U2341275, No. 52075147); 河北省教育厅科学研究项目 (No. JZX2024021); 河北工业大学创新研究院(石家庄)石家庄市科技合作专项基金资助项目 (No. SIZZZA24008)

constructed based on plane features by integrating the RANdom SAmple Consensus (RANSAC) algorithm. Then, an improved Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, which introduced a linearly decreasing inertia weight coefficient to replace the fixed inertia weight, was employed to optimize the constructed mathematical model. Finally, the accuracy and effectiveness of the proposed calibration strategy were validated through point cloud thickness analysis and 3D scene reconstruction evaluation in both simulation and real-world scenarios. Experimental results show that the point cloud thickness is reduced from 7.668 1 cm before calibration to 4.039 0 cm after calibration, indicating that the point cloud distribution reconstructed using the proposed calibration method is more uniform. The comparison of point cloud distribution in reconstructed scenes before and after calibration further verifies the effectiveness and reliability of the proposed method.

Key words: multi-beam LiDAR; LiDAR calibration; external calibration; 3D reconstruction; point cloud

1 引言

多线激光雷达通过时间飞行法获取距离信息,并结合方位角和仰角计算三维点云数据^[1]。凭借其高精度和实时性,该设备被广泛用于无人驾驶、逆向工程和数字城市建设等领域。尽管多线激光雷达可同时获取水平与垂直方向的点云数据,但仍存在垂直分辨率低和单帧点云稀疏等缺陷。将激光雷达与旋转平台结合,旋转扫描并集成多帧点云数据,是稠密化点云的重要技术。其原理是通过坐标变换,将不同旋转角度的点云数据集成到统一坐标系。点云重建质量取决于激光雷达与旋转轴之间的外参精度,外参不准确将导致点云畸变或分层。

为准确扫描三维空间点云数据,许多学者针对激光雷达与旋转平台的外参标定方法进行研究,并取得一定成果。Oberländer等人^[2]通过体素网格滤波器简化点云,利用冗余信息完成参数校正。Yamao等人^[3]基于不同扫描角度的重叠部分,利用局部冗余偏差实现标定。Alismail等人^[4]假设局部表面平整性,提出基于最近邻平面特征的自动校准方案。师等人^[5]设计室内大场景扫描系统,借助平面特征以图解法补偿系统内参。王等人^[6]提出改进粒子群算法标定正交轴激光扫描设备,并在室内环境中验证效果。上述方法的标定对象主要是单线激光雷达,这些方法若直接应用于多线激光雷达的标定,会因为其精度低而导致重建点云出现较大变形。

与单线激光雷达相比,多线激光雷达与旋转平台结合可获取更稠密的点云数据,从而获取更

丰富的纹理信息。Wang等人^[7]设计一种多线激光雷达绕轴旋转系统,并提出基于点到平面距离最小化的外参标定方法。Feng等人^[8]通过旋转激光雷达采集不同角度的棋盘格标定板点云数据,优化叠加点云厚度以获得最优目标参数。屈等人^[9]设计一种多级圆孔标靶,用于完成多线激光雷达与转轴系统的标定。总体而言,多线激光雷达与旋转轴的标定研究仍较为有限,且现有标定方法多集中于局部参数的优化。

激光雷达与旋转平台的外参标定研究多集中于单线激光雷达,而针对多线激光雷达的研究成果相对有限且存在一定的局限性。例如,Wang等人^[7]仅标定两个旋转参数,未能全面覆盖所有必要参数;Feng等人^[8]及屈等人^[9]的方案则需要设计专用标定靶标,这使得标定场景受限,难以适应复杂或动态环境。针对这些问题,本文提出一种基于点云平面厚度最小化的新型校准方法。首先,构建以点云厚度为基础的数学模型,在该模型中平面参数作为中间变量,通过RANSAC(RANdom SAmple Consensus)算法^[10]直接计算,从而简化传统模型参数的数量和复杂度。其次,采用改进粒子群优化算法优化标定模型,采用线性递减权重策略替代标准粒子群算法中的固定权重,提升搜索效率和收敛速度。最后,通过模拟和实验验证所提方法的有效性和可行性。

2 多线激光雷达与旋转平台外参标定

2.1 标定原理

平面特征是三维重建领域中用于传感器标

定的常用特征形式^[11],也是激光雷达与旋转平台外参标定中广泛采用的关键特征之一。理想情况下,不同旋转角度所采集的点云数据转换至参考坐标系后应共面。然而由于激光雷达与旋转平台坐标系的外参存在误差,点云在该平面上下分散,且与真值偏离越大,点云离散程度越高。基于此原理可通过最小化扫描点云厚度完成目标参数计算。

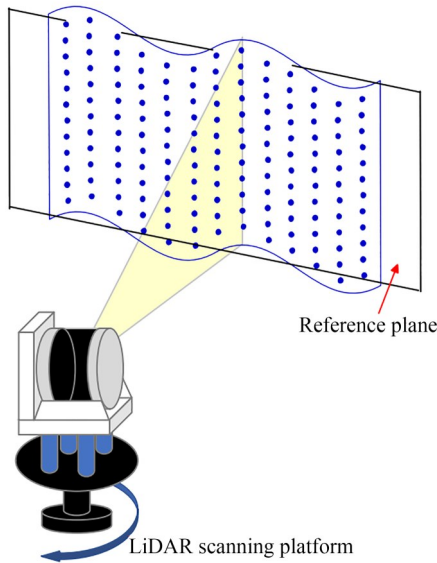


图 1 激光雷达旋转平台标定原理图

Fig. 1 Calibration principle for LiDAR rotating platform

将激光雷达旋转平台放置在平面的前方,并对平面进行旋转扫描,具体如图 1 所示。旋转平台旋转一周激光雷达扫描目标平面获取的点云数据设为 P_A , 记为 (x_j, y_j, z_j) 。根据参考文献[4]描述,点云 P_A 生成模型可简写为:

$$P_A = f(V, \rho, \theta, \alpha, \varphi), \quad (1)$$

其中: $V = [R_L^A, t_L^A]$ 是需要计算的未知变量, R_L^A 和 t_L^A 分别表示激光雷达与转轴系统的旋转矩阵和平

移向量。 $R_L^A = R_z(\omega_z)R_y(\omega_y)R_x(\omega_x)$, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别为绕 x 轴, y 轴, z 轴的旋转角度; $t_L^A = [t_x \ t_y \ t_z]$ 是激光雷达坐标系原点相比于旋转坐标系原点在 x 轴, y 轴, z 轴位移。 $\rho, \theta, \alpha, \varphi$ 分别代表激光雷达所测量的距离、仰角、方位角和系统旋转角。

设扫描理想平面方程为:

$$ax + by + cz + d = 0. \quad (2)$$

点云 P_A 的坐标记为 (x_j, y_j, z_j) , 根据公式(1)知,这是一个由参数 V 决定的变量。设点在平面上方为正,点在平面下方为负,所有扫描点到平面的距离为:

$$d_j = \frac{ax_j + by_j + cz_j + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}. \quad (3)$$

点到平面距离的最大值与最小值之差可认为是点云的厚度:

$$\delta = \max(d_j) - \min(d_j). \quad (4)$$

将公式(3)代入公式(4),并消去常数项得:

$$\delta = \frac{\max(ax_j + by_j + cz_j) - \min(ax_j + by_j + cz_j)}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}. \quad (5)$$

对公式(5)归一化处理,分子分母同时除以 c , 并令 $A = a/c, B = b/c$ 。公式(5)进一步更新为:

$$\delta = \frac{\max(Ax_j + By_j + z_j) - \min(Ax_j + By_j + z_j)}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1^2}}. \quad (6)$$

令 $W = [A, B]$ 对应平面参数, $[W, 1]$ 是平面的法向量,点 (x_j, y_j, z_j) 由公式(1)所得,将公式(1)代入公式(6)中,得到如式(7)的模型:

$$L(V, W) = \frac{\max([W, 1] * (f(V, \rho, \theta, \alpha, \varphi))^T) - \min([W, 1] * (f(V, \rho, \theta, \alpha, \varphi))^T)}{\|[W, 1]\|}. \quad (7)$$

当 $L(V, W)$ 最小时,对应的 V, W 就是最优解,其中 V 为所求的目标参数。

$$V, W = \underset{V, W}{\operatorname{argmin}} L(V, W). \quad (8)$$

2.2 优化方法

公式(7)为所提的激光雷达与旋转平台外参标定数学模型,此为复杂的非线性优化问题。针

对此类问题优化,粒子群优化算法^[12]具有计算速度快、易于理解等优势,适合用于优化所提数学模型。其更新公式如式(9)所示:

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}, i}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}}^k - x_i^k), \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases}, \quad (9)$$

其中: k 表示当前迭代次数, i 为当前粒子索引, x 表示粒子的位置, v 为其对应的速度。 p_{best} 为粒子个体最优位置, g_{best} 表示全局最优位置, 这些向量的维度均与 x 相同。此外, ω 为惯性权重, c_1 为个体学习因子, c_2 为群体学习因子, r_1 和 r_2 为区间 $[0, 1]$ 内随机数, 用以增加搜索随机性。

2.2.1 改进粒群算法

当使用粒子同时优化参数 V 和 W 时, 通常难以获得最优的目标参数。因为参数 W 表示重建点云 P_A 的平面法向量, 其值直接受到目标参数 V 的影响。为解决参数间耦合问题, 采用粒子群优化算法优化目标参数 V , 针对每个粒子的平面点云数据, 直接使用 RANSAC 算法计算参数 W 。总体而言, 参数 W 不直接参与优化过程, 而是通过 RANSAC 算法计算得到, 并作为中间变量参与损失函数 $L(V, W)$ 的计算。

为提高计算结果的准确性和全局收敛能力, 采用线性递减惯性权重 ω 改进标准粒子群算。初始阶段使用较大惯性权重, 增强全局搜索能力; 后期使用较小惯性权重, 以便更精细的局部搜索。惯性权重的具体更新公式为:

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) * \frac{\text{iter}}{\text{iter}_{\max}}, \quad (10)$$

其中: $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 分别表示惯性权重的最大值和最小值, iter 表示当前迭代次数, $\text{iter}_{\max}$ 是最大迭代次数。

2.2.2 优化原理说明

使用粒子群算法优化计算激光雷达与旋转平台外参数学模型(公式(7))时, 每个粒子的位置 x 都被认为是目标参数 V 的一种潜在解。将 x 代入损失函数, 并结合 RANSAC 方法计算得到的 W , 计算每个粒子的适应度值。然后根据公式(11)~公式(14)更新个体最优解(p_{value})、个体最优位置(p_{best})和全局最优解(g_{value})、全局最优位置(g_{best})。每次更新后, 判断是否满足收敛条件; 如果满足, 则输出结果, 否则利用公式(9)和公式(10)更新粒子位置, 再次计算新粒子适应度值。迭代计算, 直至满足收敛条件:

$$p_{\text{best}, i}^{k+1} = \begin{cases} x_i^{k+1}, & \text{if } L(x_i^{k+1}, W_i^{k+1}) < p_{\text{value}, i}^k, \\ p_{\text{best}, i}^k, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

$$p_{\text{value}, i}^{k+1} = \begin{cases} L(x_i^{k+1}, W_i^{k+1}), & \text{if } L(x_i^{k+1}, W_i^{k+1}) < p_{\text{value}, i}^k, \\ p_{\text{value}, i}^k, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (12)$$

$$g_{\text{best}}^{k+1} = \begin{cases} x_i^{k+1}, & \text{if } L(x_i^{k+1}, W_i^{k+1}) < g_{\text{value}}^k, \\ g_{\text{best}}^k, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (13)$$

$$g_{\text{value}}^{k+1} = \begin{cases} L(x_i^{k+1}, W_i^{k+1}), & \text{if } L(x_i^{k+1}, W_i^{k+1}) < g_{\text{value}}^k, \\ g_{\text{value}}^k, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (14)$$

其中: $p_{\text{best}, i}^k$ 和 $p_{\text{best}, i}^{k+1}$ 分别表示粒子 i 在第 k 次和第 $(k+1)$ 次迭代中的个体最优位置, $p_{\text{value}, i}^k$ 和 $p_{\text{value}, i}^{k+1}$ 表示对应的个体最优值。类似地, g_{best}^k 和 g_{best}^{k+1} 分别表示第 k 次和第 $(k+1)$ 次迭代中的全局最优位置, g_{value}^k 和 g_{value}^{k+1} 表示对应的全局最优值。 W_i^{k+1} 表示在第 $(k+1)$ 次迭代中, 粒子 x_i^{k+1} 重建点云后, 利用 RANSAC 方法拟合得到的平面参数, 此作为中间变量参与计算。

2.2.3 优化流程

通过将改进粒子群算法与 RANSAC 方法相结合, 对所构建的模型进行优化, 进而准确计算目标参数。图 2 展示整套算法的优化流程。

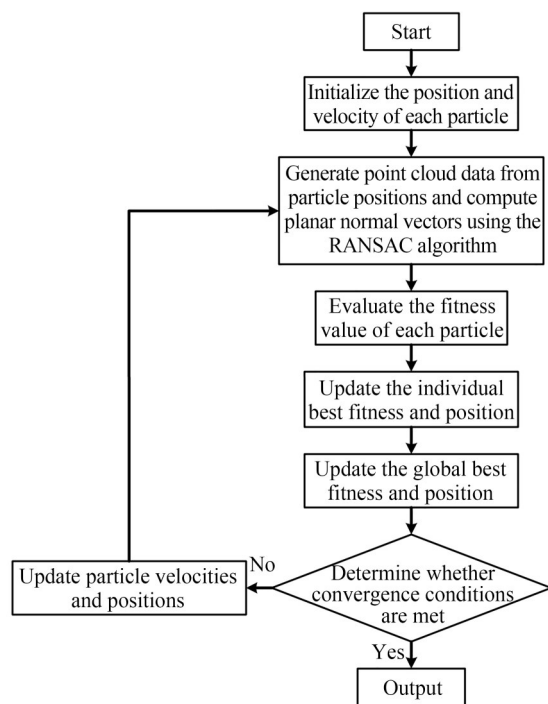


图 2 优化流程图

Fig. 2 Optimization flowchart

3 仿真和实验验证

为验证所提出算法的准确性,本部分通过仿真与实际实验数据进行全面评估。由于激光雷达垂直于旋转平台 XOY 平面, Z 轴的旋转和平移不影响平面的整体平整度,因此将 Z 轴的旋转和平移设为定值,即 $\omega_z = 0, t_z = 0$ 。此时,参数 V 的维度降为 $[\omega_x, \omega_y, t_x, t_y]$ 。在第 3.1 节,利用模拟数据对所提方法的精度进行验证。相较于实际实验,由于已知目标参数的真值,仿真能够更有效评估算法准确性。在第 3.2 节,搭建多线激光雷达旋转扫描系统,以不同初始旋转角扫描目标平面采集数据,并与现有算法进行对比分析,从而验证所提方法的计算精度。

3.1 仿真实验

参考 VLP-16 型激光雷达的相关参数(见表 1),使用 MATLAB 对激光雷达点云数据仿真模拟。模拟激光雷达垂直放置于边长为 2 m 的虚拟立方体空间内,其中心位置与立方体几何中心重合。设定目标外参为理想值: $[-90^\circ, 0^\circ, 0 \text{ cm}, 0 \text{ cm}]$,旋转分辨率为 1° 。图 3(a)展示在理想条件下,旋转平台扫描该虚拟立方体所得的点云分布。为验证所提出方法的准确性与鲁棒性,在理想外参基础上分别添加三组不同程度的偏差: $[0.5^\circ, 0.2^\circ, 10 \text{ cm}, 20 \text{ cm}]$, $[0.2^\circ, 0.1^\circ, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}]$, $[0.1^\circ, 0.05^\circ, 2 \text{ cm}, 5 \text{ cm}]$ 。图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)分别对应各组偏差下的点云结果,可以观察到,引入偏差后,立方体点云出现了明显分层和错位现象,且随着偏差幅度的增大,分层与错位程度也逐渐加剧,进一步说明标定精度对点

云质量显著影响。

表 1 激光雷达关键参数

Tab. 1 Parameters of LiDAR

Name	Parameters
LiDAR model	PandarXT-16
Vertical field of view(FoV)/(°)	-15~+15
Vertical FoV resolution/(°)	2
Horizontal FoV/(°)	360
Horizontal FoV resolution/(°)	0.4
Horizontal scan frequency/Hz	10
Range accuracy (1σ)/cm	0.5

为确保每个平面方程 $ax + by + cz + d = 0$ 中的系数 c 不为零,且考虑到 Z 轴自由度对标定结果无影响,将采集的数据均绕 Z 轴旋转 45° 。选取方位角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 旋转范围内点云使用 RANSAC 算法进行平面拟合,并以拟合所得平面的法向量为基准,计算所有点的厚度。计算过程中粒子群算法的参数设置为:粒子数量 $N = 30$,维度 $D = 4$,权重系数 $\omega = 0.7$,搜索区域上边界为 $[-89^\circ, 1^\circ, 100 \text{ cm}, 100 \text{ cm}]$,下边界为 $[-91^\circ, -1^\circ, -100 \text{ cm}, -100 \text{ cm}]$ 。初始粒子在上下边界区间内随机生成,且其中一组粒子包含理想值。设定收敛条件为达到最大迭代计算次数 $iter_{\max}$ 时停止计算,并将 $iter_{\max}$ 设定为 200。此外,其他参数为 $\omega_{\max} = 0.9, \omega_{\min} = 0.5, c_1 = c_2 = 1.5$ 。图 4 为基于三种添加偏差数据的计算过程,其中 PSO 代表标准粒子群算法, LW-PSO 代表线性递减权重改进粒子群算法。从图中可以看出,改进后的粒子群算法在收敛速度和最终计算精度方面,相较于传统粒子群算法有明显提升。

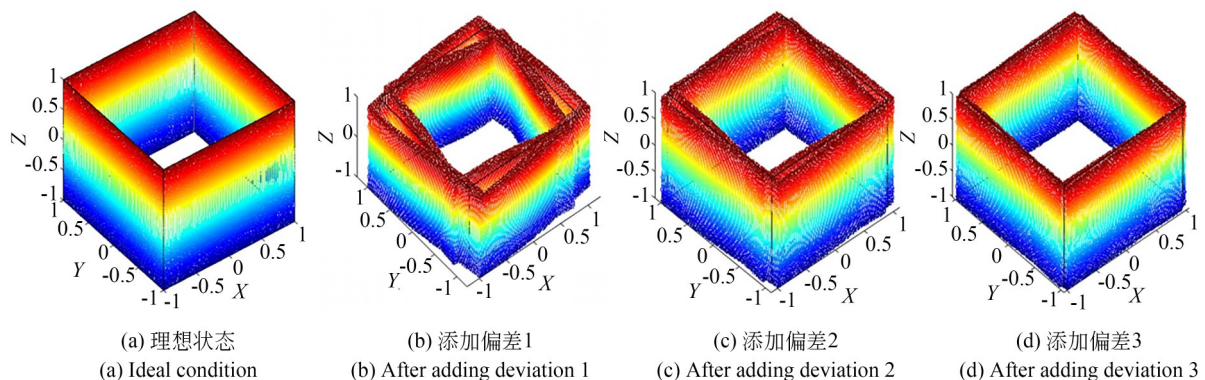


图 3 重建点云分布

Fig. 3 Reconstructed point cloud distribution

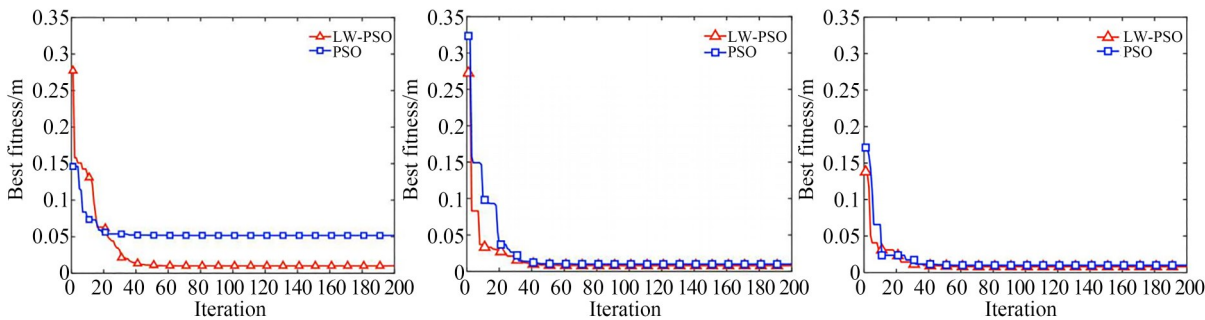


图4 添加不同偏差数据集的计算过程

Fig. 4 Computation process for datasets with different biases

表 2 外参对比

Tab. 2 External parameters comparison

	True value/[$\omega_x(^{\circ})$, $\omega_y(^{\circ})$, $t_x(\text{cm})$, $t_x(\text{cm})$]	Calibrated value/[$\omega_x(^{\circ})$, $\omega_y(^{\circ})$, $t_x(\text{cm})$, $t_x(\text{cm})$]
Biases 1	[−89.5, 0.2, 10, 20]	[−89.504 1, 0.199 3, 10.021 5, 19.680 3]
Biases 2	[−89.8, 0.1, 5, 10]	[−89.798 7, 0.100 7, 4.988 7, 10.003]
Biases 3	[−89.9, 0.05, 2, 5]	[−89.899 9, 0.049 8, 2.003 1, 4.997 3]

表2为利用所提方法在不同偏差数据集下计算得到的外参与真值外参对比。可以看到,相比于初始值[−90,0,0,0],所提方法计算得到的目标参数与真值更接近,这说明所提方法的准确性。此外,重建平面的点云厚度通常被用作判断外参标定精度的重要标准。采用添加偏差1所得

数据集分析,表3为优化前后四个平面的点云厚度。可以观察到,标定前各平面的点云厚度大致相等,平均值约为58.267 9 cm,表明存在明显畸变。经过本文所提方法校正后,点云的平均厚度降低至1.359 6 cm,相较于标定前有明显改善,此结果进一步验证所提方法的有效性。

表 3 点云厚度的对比

Tab. 3 Point cloud thickness comparison

(cm)

	Front	Back	Left	Right	Average
Before calibration	59.346 7	58.304 9	57.018 9	58.401 1	58.267 9
After calibration	1.419 3	1.258 1	1.563 6	1.197 5	1.359 6

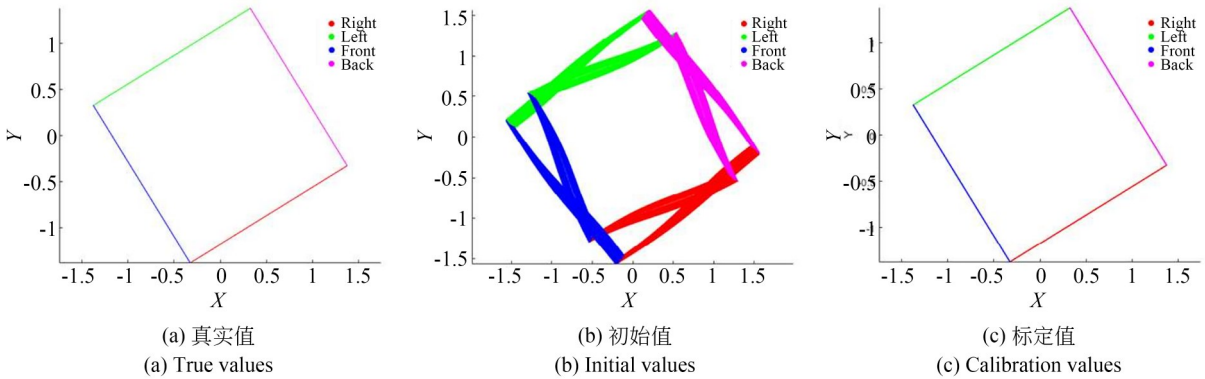


图5 不同参数重建后的点云分布图

Fig. 5 Reconstruction point clouds distribution with different parameters

为了直观地展示标定前后点云分布变化,本文分别采用真实值、初始值以及标定后的外参值对点云进行重建(均基于添加偏差1的数据集),并将重建结果投影至 XOY 平面,如图5所示。图5(a)展示基于真实值重建的点云分布,可以看出各点分布整齐,精确落在各自对应的平面上,作为参考基准;图5(b)为基于初始值重建的点云,可观察到明显的分层和错位现象,反映出未标定时的外参误差;图5(c)展示使用标定后外参值所重建的点云,分布相比初始值明显更加规整,绝大多数点已准确对齐至各自平面,重建效果接近基于真实值的情况。上述结果进一步验证了本文所提出标定方法在准确性与有效性方面的优越性能。

3.2 实际实验

为验证所提方案在实际环境中的准确性,使用禾赛 PandarXT-16 型激光雷达搭建实验旋转平台,并将其置于一个大型平坦平面前方 5 米处扫描目标平面,如图6所示。实验中,通过单片机控制步进电机转动 1° 扫描一帧数据。在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的旋转范围内,选取16条扫描线均能覆盖目标平面的数据,将这些数据转换至参考坐标系生成平面点云数据。随后,旋转平台 60° 调整扫描方向,继续控制单片机采集目标平面的点云数据。如此操作,当旋转平台转一圈时采集到6组点云数据。此采集数据方法目的是确保旋转平台可以

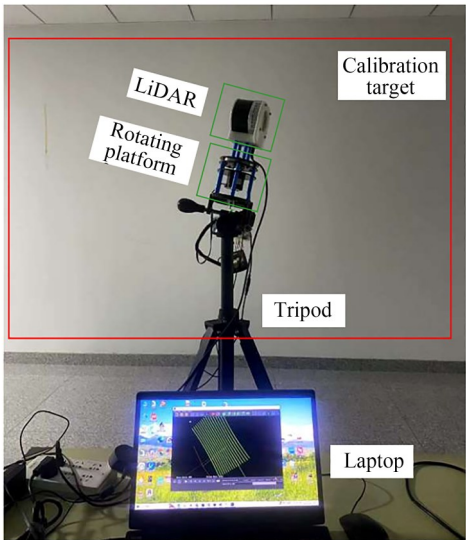


图6 激光雷达旋转扫描系统
Fig. 6 LiDAR rotation scanning system

获取其周围 360° 内的所有点云数据,从而确保实验数据的完整性。

激光雷达与转轴外参初值设为 $[-90^{\circ}, 0^{\circ}, 0\text{ cm}, 0\text{ cm}]$ 。以初值为中心,设定 ω_x 和 ω_y 搜索的上下浮动为 $[-2^{\circ}, 2^{\circ}]$, t_x 和 t_y 的浮动为 $[-2\text{ cm}, 2\text{ cm}]$,优化算法参数设置参考模拟部分。尽管现阶段已提出多种激光雷达与旋转轴外参标定方法,但其创新点主要集中于特征提取或优化参数设计层面,其核心优化原理与经典算法 Alismail^[4]方法相同。因此,本文选用 Alismail^[4]方法作为主要对比基准。考虑到 Alismail 等人的方法专为单线激光雷达旋转系统设计,为更准确地复现其算法精度,从16线激光雷达中选取仰角为 1° 的扫描线的数据,模拟单线激光雷达并完成校准任务。表4展示了不同算法在计算激光雷达与旋转平台外参时的结果对比。

表4 不同方法的计算结果				
Tab. 4 Calculation results of different methods				
	$\omega_x/(^{\circ})$	$\omega_y/(^{\circ})$	t_x/cm	t_y/cm
Initial value	-90	0	0	0
Alismail ^[4]	-89.820 4	0.090 1	-0.178 1	2.030 2
Proposed	-89.978 8	0.140 3	-0.008 2	1.450 1

为了评估表4中不同外参的精度,将所有外参用于重建点云,并计算各平面的点云厚度,结果如表5所示。点云厚度越小对应的外参精度越高,本文所提方法计算得到的外参所重建的平面点云厚度均小于初始值和 Alismail 方法计算的结果。具体而言,本文所提方法点云厚度平均值为 4.039 0 cm ,而初始值和 Alismail 方法平均值分别为 7.668 1 cm 和 4.723 3 cm 。图7展示本文方

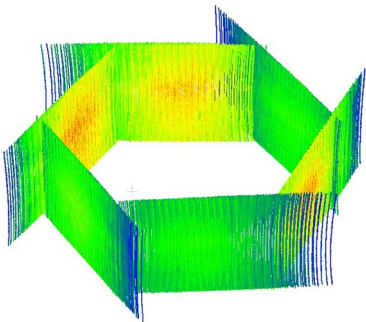


图7 所有扫描平面重建点云效果图
Fig. 7 Point clouds for scanning planes in different orientations

表 5 不同算法计算的点云厚度

Tab. 5 Point cloud thickness calculated by different methods

(cm)

	Point cloud thickness						Average value
	1	2	3	4	5	6	
Initial value	8.329 1	7.648 1	7.845 3	7.272 9	7.022 2	7.890 5	7.668 1
Alismail ^[4] method	4.929 8	4.879 9	4.702 2	4.878 6	4.305 8	4.643 6	4.723 3
Proposed method	4.131 6	4.276 9	3.875 7	4.079 5	3.697 5	4.172 9	4.039 0

法所重建所有扫描平面的点云重建效果,点云分布均匀且位于同一平面上。这些数据充分验证本文方法在外参计算中的高精度。

为验证所提方法在实际环境中的重建效果,将旋转平台置于一个空旷的房间内,如图 8(a)所示。以 1° 为间隔扫描点云数据,并分别采用由所提算法计算得到的外参和初始值进行重建。为便于观察点云分布概况,重建点云根据旋转平台的角度不同显示不同颜色:旋转角度位于 $0^\circ \sim$

180° 的点云显示为绿色, $180^\circ \sim 360^\circ$ 的点云显示为红色(彩图见期刊电子版)。图 8(b)为使用初始值重建的点云,表现出明显的错位和分层现象;图 8(c)为使用所提出方法计算出的参数重建的点云,其分布更加均匀且无明显错位。这些实际场景点云重建的差异性进一步说明所提出方法计算的外部参数显著提升了三维重建的质量,进一步验证所提方法在实际应用中的稳定性和准确性。

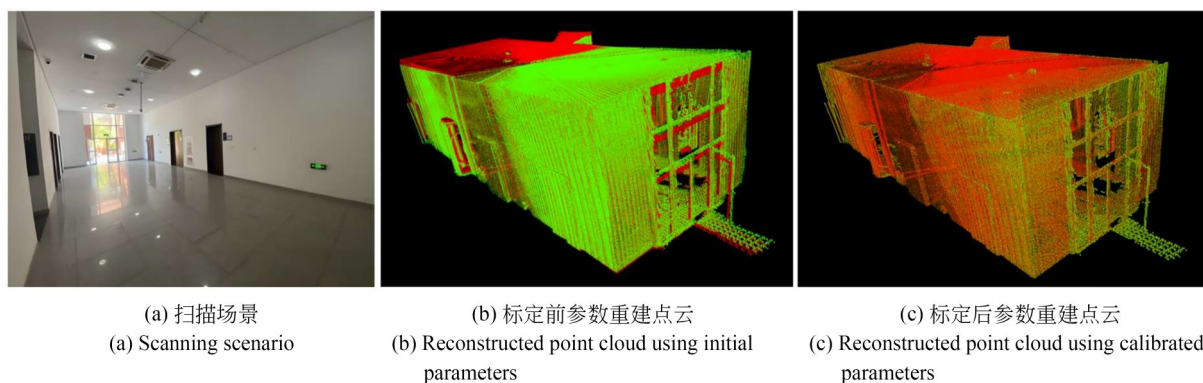


图 8 扫描场景与不同外参重建点云对比图

Fig. 8 Actual scanning scenarios and reconstructed point cloud

4 结 论

本文提出一种多线激光雷达与旋转平台外参的全新高精度标定方法。该方法首先构建了基于平面点云厚度最小化数学模型,平面特征作为中间变量被 RANSAC 方法直接计算,只存在外参变量。其次提出使用粒子群算法优化所构建模型,利用线性递减权重系数改进标准粒子群算法的常量权重系数。文章最后使用仿真和实际数据验证所提标定方法。仿真结果表明所提标定方案计算得出的外参接近真实值。实际实验中由于目标参数真值难以预测,使用点云厚度

校准标定的准确性:校准前点云厚度为 7.668 1 cm,而校准后点云厚度降至 4.039 0 cm。实验结果说明本文所提方法显著提高重建点云的精度,为其在相关领域的更广泛应用提供坚实的理论和 method 支持。

作者贡献声明:

王世强:测量方法的提出,论文构思和撰写;
孟召宗:测量实验的设计及数据整理和分析;
高楠:测量实验数据分析;
张宗华:论文审核与编辑写作。

参考文献:

- [1] 章大勇, 吴文启, 吴美平. 机载激光雷达系统标定方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2806-2813.
ZHANG D Y, WU W Q, WU M P. Calibration technology of airborne lidar [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2806-2813. (in Chinese)
- [2] OBERLÄNDER J, PFOTZER L, ROENNAU A, *et al.* Fast Calibration of rotating and swivelling 3-D laser scanners exploiting measurement redundancies[C]. 2015 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. September 28 - October 2, 2015, Hamburg, Germany. IEEE, 2015: 3038-3044.
- [3] YAMAO S, HIDAKA H, ODASHIMA S, *et al.* Calibration of a rotating 2D LRF in unprepared environments by minimizing redundant measurement errors [C]. 2017 *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. July 3-7, 2017, Munich, Germany. IEEE, 2017: 172-177.
- [4] ALISMAIL H, BROWNING B. Automatic calibration of spinning actuated lidar internal parameters [J]. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32 (5) : 723-747.
- [5] 师瑞卓, 张小俊, 孙凌宇, 等. 基于单线激光雷达的三维形貌重建方法研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(2): 188-195.
SHI R Z, ZHANG X J, SUN L Y, *et al.* Research on 3D shape reconstruction method based on single-line lidar[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(2): 188-195. (in Chinese)
- [6] 王舜, 周惠兴, 张中岳, 等. 基于改进粒子群的正交轴系三维激光扫描设备的几何参数标定研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 1-8.
WANG S, ZHOU H X, ZHANG Z Y, *et al.* Research on geometric parameter calibration of 3D-laser-scanner with orthogonal shafting based on improved particle swarm optimization [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(1): 1-8. (in Chinese)
- [7] WANG S, ZHANG H, WANG G J, *et al.* FGRSC: improved calibration for spinning LiDAR in unprepared scenes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(14): 14250-14262.
- [8] FENG X, YU X D, HE Y, *et al.* The calibration method of the external rotation axis for multi-line LiDAR [C]. 2023 *IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*. January 29-31, 2023, Shenyang, China. IEEE, 2023: 201-207.
- [9] 屈海龙, 王世强, 孟召宗, 等. 多线激光雷达与外置转轴间关系标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(10): 223-231.
QU H L, WANG S Q, MENG Z Z, *et al.* Calibration method for multibeam LiDAR and external rotating axis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025, 62(10): 223-231. (in Chinese)
- [10] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24 (6): 381-395.
- [11] 赵涵卓, 丁宇航, 张宗华, 等. 条纹投影测量系统标定方法研究[J]. 河北工业大学学报, 2023, 52 (3): 17-28.
ZHAO H Z, DING Y H, ZHANG Z H, *et al.* Research on calibration method of fringe projection measurement system [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2023, 52(3): 17-28. (in Chinese)
- [12] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. November 27-December 1, 1995, Perth, WA, Australia. IEEE, 1995: 1942-1948.

作者简介:



王世强(1989—),男,河南濮阳人,博士研究生,2018年于郑州大学获得硕士学位,主要研究方向为传感器标定、三维重建及点云处理。E-mail: wsqzkyt@163.com

作者简介:



张宗华(1974—),男,江苏徐州人,博士,教授,1996年、1998年、2001年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析方面的研究。E-mail: zhzhang@hebutedu.cn